



Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques ?

Michel Duru (1), Pierre-Marie Aubert (2), Christian Couturier (3), Sylvain Doublet (3)

(1) UMR 1248 AGIR, INRAE, Université Toulouse, INPT, 31326 Castanet Tolosan, France

(2) Institut du développement durable et des relations internationales, 41 rue du Four, 75006 Paris, France

(3) Solagro, 75 Voie du Toec, Toulouse, France

Résumé

L'agriculture doit faire face à de grands défis qui sont interdépendants : dérèglement climatique, production d'énergie, érosion de la biodiversité, pollution des milieux, sécurité alimentaire et santé humaine. Pour éclairer les politiques publiques, nous comparons des scénarios dont un objectif commun est l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. Ils reposent sur différentes hypothèses de production de biomasse et de son allocation à l'élevage, aux produits biosourcés et au sol. L'état de l'art montre des interdépendances fortes entre ces différents domaines. Nous concluons que des innovations ou changements systémiques sont nécessaires pour faire face aux différents défis. Sur ces bases, nous montrons que les scénarios reposant le plus sur les technologies sont climato-centrés et ignorent les questions de biodiversité et de santé. A l'opposé, les scénarios plus multifonctionnels reposent sur des innovations plus systémiques, souvent déjà connues, sont meilleurs pour la biodiversité et la santé, mais sont plus difficiles à mettre en œuvre car demandant plus de sobriété dans la consommation de produits animaux et d'énergie et nécessitant de lever un plus grand nombre de verrous sociotechniques. Ces analyses suggèrent de mieux mobiliser les acquis agronomiques pour construire et évaluer des scénarios. En conclusion, nous montrons comment les scénarios les plus systémiques confortent le Green Deal et soulignent les insuffisances de la PAC.

Mots-clés : agroécologie, élevage, dérèglement climatique, bioénergie ; séquestration du carbone

Food systems scenarios for 2050 at European and French levels: what insights for public policies?

Abstract

Agriculture has to face major challenges: climate change, energy production, erosion of biodiversity, environmental pollution, food security and human health. To this end, we compare scenarios for which a common objective is to achieve carbon neutrality by 2050. They are based on different assumptions of biomass production and allocation to livestock, bio-based products and soil. The state of the art shows strong interdependencies between these different fields. We conclude that innovations or systemic changes are necessary to face the different challenges. On these bases, we show that the scenarios based the most on technologies are climate-centered and miss questions of biodiversity and health. In contrast, the more multifunctional scenarios are based on more systemic innovations, often already known, are better for biodiversity and health, but are more difficult to implement because requiring more sobriety in consumption of animal products and energy and requiring a greater number of socio-technical barriers to be lifted. These analyzes suggest better mobilizing agronomic knowledge to construct and evaluate scenarios. In conclusion, we show how the most systemic scenarios reinforce the Green Deal and highlight the weaknesses of the CAP.

Keywords: agroecology, climate change, bioenergy; carbon sequestration; livestock

Un constat alarmant et de nouveaux défis

Environnement, ressources et santé : un constat alarmant

Dans les pays industrialisés, le développement d'une agriculture basée sur l'utilisation d'intrants industriels a eu de multiples conséquences sur l'environnement notamment la biodiversité (Mujtar *et al.*, 2019).

En Europe, l'utilisation d'engrais azotés minéraux a été multipliée par 3,4 entre le début des années 60 et la fin des années 80 entraînant d'importantes perturbations des écosystèmes telles que l'eutrophisation (Cordell *et al.*, 2009), même si leur utilisation a diminué de 25% depuis (FAOstat¹). En parallèle, l'utilisation de pesticides a fortement augmenté pour atteindre un pic au début des années 90 et n'a diminué que de 9% depuis (FAOstat) malgré des politiques dédiées à leur réduction. Leur utilisation intensive a eu d'importantes conséquences négatives sur la biodiversité, les régulations biologiques (Geiger *et al.*, 2010), le développement de résistances des bioagresseurs (Powles et Yu, 2010), mais aussi sur la santé humaine (Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016). La mécanisation et l'utilisation intensive des pesticides ont permis aux agriculteurs de simplifier radicalement les séquences des cultures via le développement de rotations courtes ou monocultures (Bennett *et al.*, 2012). Dans le même temps, la réduction de la superficie des habitats non cultivés et l'augmentation de la taille des parcelles a conduit à une forte simplification de la composition et configuration du paysage, ce qui a aussi réduit la biodiversité et les services de régulations biologiques (Rusch *et al.*, 2016). Dans le même temps, les exploitations se sont beaucoup spécialisées. En élevage, cela a été permis par une augmentation massive des importations de tourteaux soja (souvent issus de la déforestation) depuis les années 60 jusque vers 2007 pour atteindre 35M de t, suivi d'une diminution de 14% depuis (FAOstat), du fait du remplacement par des tourteaux de colza qui n'est pas une légumineuse. Les élevages de monogastriques spécialisés et de grande taille, non autonome pour l'alimentation, n'ont pas toujours des surfaces suffisantes pour épandre les effluents. L'accroissement de la production et de la consommation de viande (x 1,4 depuis 1970), surtout de la volaille, joint à l'accroissement de fertilisation azotée, ont aussi fortement contribué à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'ammoniac du début des années 60 au début des années 90 (+23% d'après FAO stat). Elles ont diminué ensuite (-26%) en relation avec la réduction des quantités d'azote minéral utilisé et du nombre de bovins².

Depuis les années 2000, les impacts environnementaux de cette agriculture dite « industrielle » basée sur l'utilisation massive d'intrants sont tellement importants qu'elle est considérée comme une des premières activités humaines conduisant au dépassement des « limites planétaires », notamment en matière de biodiversité (Campbell *et al.*, 2017). De ce fait, plusieurs instances internationales³ concluent que poursuivre dans la même direction (c.-à-d. « business as usual ») n'est plus une option.

De nouveaux défis à relever nécessitant d'élargir les fonctions de l'agriculture

Urgence pour le climat et aussi défi énergétique

Pour tenir les engagements de neutralité carbone en 2050, l'Europe a comme objectif de réduire de 30% les émissions du secteur d'ici 2030 (Guyomard *et al.* 2021). En France les experts s'accordent à dire qu'il faut diviser les émissions des GES au minimum par 2 en agriculture d'ici 2050 (MTES, 2020). Cette réduction n'ayant été que de 5% sur la période 1990-2015 devrait être de 46% d'ici 2050 ; son rythme doit donc être considérablement accéléré (x 7). Outre la réduction des émissions, il est attendu que l'agriculture séquestre plus de carbone pour atteindre la neutralité climatique.

L'agriculture est aussi sollicitée pour fournir de l'énergie. Pour la biomasse agricole, il s'agit à ce jour principalement du colza et dans une moindre mesure du bois des haies et de la forêt paysanne

¹ <http://www.fao.org/faostat/fr/>

² <https://visuels.l214.com/sites/www.viande.info/2014/pages/Evolution-structure-conso-viande-France.jpg>

³ <https://www.globalagriculture.org/transformation-of-our-food-systems.html>

ainsi que de la méthanisation des déjections agricoles ; le total correspondant à moins du 1/4 de l'énergie utilisée en agriculture, soit 10 Mt tep (ClimAgri®). Les agrocarburants, notamment le diester de colza, sont critiqués pour leur faible efficacité énergétique.

Sécurité alimentaire et santé

L'augmentation des maladies chroniques non transmissibles (obésité, diabète, cancers, maladies cardiovasculaires...) depuis au moins une vingtaine d'années, y compris pour les moins de 45 ans en France⁴, constitue un enjeu de santé majeur. Les causes en sont multiples. Concernant l'alimentation, sont identifiés la non-atteinte des apports nutritionnels recommandés pour (i) les fibres et les antioxydants du fait d'une consommation insuffisante de fruits, légumes et légumineuses), (ii) les acides gras à longue chaîne (omega 3), des acides gras polyinsaturés du fait de changements des huiles consommées, mais aussi de l'alimentation des animaux d'élevage (Duru, 2019). Ces déficits sont source de dysbiose intestinale générant une inflammation à bas bruit (Schroeder et Bäckhed, 2016), facteur de risque pour de nombreuses maladies chroniques (Rinninella *et al.*, 2019). Concernant les contaminants, si plus de 90% des produits alimentaires respectent la limite maximale de résidus (LMR), ce seuil est critiqué pour les pesticides lorsqu'ils sont des perturbateurs endocriniens car il n'y a pas de proportionnalité des effets induits avec la dose (Cimino *et al.*, 2017). En outre, l'effet possible d'une ingestion de très faibles quantités tout au long d'une vie sur la diversité et le fonctionnement de notre microbiote intestinal, n'est pas considéré alors que de tels effets ont été montrés expérimentalement (Meng *et al.* 2020). Il est donc attendu une agriculture contribuant à la santé par la production de produits riches en nutriments et pauvres en contaminants, et à même de nourrir une population croissante.

Biodiversité et autonomie en produits biosourcés

L'intensification de l'agriculture, la réduction du nombre d'espèces cultivées (en France, 4 espèces annuelles, hors prairies, occupent 90% des terres arables), mais aussi le remembrement (moins d'infrastructures écologiques et augmentation de la taille des parcelles) ont réduit la fourniture des services écosystémiques (SE) à l'agriculture et à la société (Therond et Duru, 2019). En agriculture, cette dynamique soutient un cercle vicieux dans la mesure où toutes choses égales par ailleurs, plus d'intrants de synthèse sont nécessaires pour maintenir les rendements agricoles. La réduction de la pollinisation pour des cultures comme le colza qui en sont dépendantes peut aussi réduire les rendements (Catarino *et al.*, 2019). Pour les services à la société, l'érosion (boues, mais aussi relargage de pesticides dans les eaux) et les pertes de carbone (non contribution à la régulation du climat) sont aussi un problème. La généralisation du travail du sol a renforcé l'érosion avec migration des résidus de pesticides dans les eaux (Panagos et Katsoyiannis, 2019).

Les deux tiers des terres cultivées nécessaires pour satisfaire la consommation de biomasse agricole non alimentaire de l'UE, dont les aliments pour les animaux d'élevage, sont situés dans d'autres régions du monde, en particulier en Chine, aux États-Unis et en Indonésie, ce qui entraîne des impacts potentiels sur des écosystèmes éloignés ; cela représente 13,6 des 28,2M ha utilisées à des fins non alimentaires (Bruckner *et al.*, 2019). L'UE est donc très dépendante en aliments du bétail (tourteaux de soja), ainsi qu'en agrocarburant (huile de palme) , et ces cultures, le plus souvent issues de la déforestation sont un des facteurs d'accroissement de risque de zoonoses car elles entraînent un rapprochement entre des animaux sauvages chassés de leur habitat naturel et des élevages domestiques, proches de zones périurbaines et qui crée de nouvelles chaînes de transmission à des agents infectieux (Afelt *et al.*, 2018).

Des scénarios pour cadrer des stratégies

Pour relever ces défis, des politiques publiques ont été mises en place (PAC, directives nitrates, plan Ecophyto...), mais les résultats n'ont pas été à la hauteur des ambitions. Une des raisons souvent invoquées est le raisonnement "en silo" par problème ou domaine. Pour dépasser ces limites, des

⁴ <https://www.santepubliquefrance.fr/>

acteurs (institutions, acteurs économiques, think tank...) construisent des scénarios correspondant à des alternatives plausibles, susceptibles d'éclairer les politiques. Nous nous limitons ici à la comparaison de scénarios recouvrant une diversité d'objectifs, allant de la structuration du débat à l'appui aux politiques publiques. Quel que soit l'objectif, ils doivent s'appuyer sur des connaissances scientifiques établies ou dans le cas contraire, il importe de préciser le degré de maturité des innovations considérées, surtout lorsqu'une échéance est fixée pour atteindre un objectif, comme c'est le cas pour les émissions de GES. Cette évaluation peut être faite dans plusieurs domaines. Le plus courant est le niveau de maturité technologique (TRL), allant par exemple de la preuve de concept (TRL 3) à la démonstration d'un prototype (TRL 6) ou au système réel qualifié par des missions opérationnelles réussies (TRL 9) (Sausser *et al.*, 2006). Des caractérisations complémentaires peuvent être faites pour les niveaux de "marchandisation", de "légalisation", de "légitimation" (degré d'adhésion des acteurs) et de "domestication" (Vik *et al.*, 2021). Nous avons enrichi ce dernier domaine pour tenir compte des spécificités de l'agriculture. En effet, la prise en compte d'enjeux multiples ne repose pas uniquement sur les technologies qui conduisent souvent à des innovations incrémentales. Les recherches en agroécologie montrent l'intérêt d'innovations de rupture reposant sur un accroissement de la biodiversité, mais tributaires de verrouillage sociotechnique et/ou de changement de comportement. Des exemples sont donnés dans le tableau 1. Les technologies doivent aussi être évaluées pour leur cohérence. Il s'agit en effet d'éviter les effets de transfert d'une activité à l'autre pour une même ressource ou un même impact (Weishaupt *et al.*, 2020). Enfin, la plupart des scénarios portant sur la sécurité alimentaire, l'énergie et le changement climatique, il importe de vérifier qu'ils ne génèrent pas d'effets rebonds, tout particulièrement sur la biodiversité et la santé.

niveau (1-9)	maturité technologique (TRL)	marchandisation	légalisation	légitimation	domestication
3	preuve de concept	les besoins du marché sont connus	l'utilisation du produit nécessite de changer de législation	la technologie semble inappropriée et non souhaitable à une partie de la population	une idée d'intégration dans la "vraie vie" existe
6	technologie démontrée dans des contextes pertinents	les produits sont mis sur le marché en petites quantités	l'approbation est mature	la technologie semble inappropriée et non souhaitable pour un petit nombre d'acteurs	des changements organisationnels ou sociétaux fondamentaux sont nécessaires pour utiliser la technologie ou changer de pratiques (verrouillage sociotechnique)
9	efficacité en situation réelle	marché stabilisé ou en croissance	production et utilisation ne posent pas problème	la technologie est généralement approuvée et acceptée	la technologie ou le changement de pratique ou le changement de paradigme fonctionne et permet d'atteindre les objectifs visés

Tableau 1 : Degré de maturité des innovations et pratiques dans cinq domaines (adapté de Vik *et al.*, 2021)

Dans une première partie, nous ferons l'état de l'art quant aux options stratégiques dans les domaines clefs du système agri-alimentaire que sont la production de biomasse végétale, l'élevage, l'alimentation, l'énergie, ainsi que la séquestration du carbone. Dans la partie suivante, nous comparerons quelques scénarios à l'aune des connaissances scientifiques des différents domaines considérés et les discuterons quant à leur capacité à prendre en compte les défis présentés ci-dessus.

Prérequis pour décrire et comparer les scénarios

Etat des connaissances dans les domaines clefs

Logiques culturelles pour la production de biomasse végétale

La production de biomasse passe par la création de conditions de production (structuration du sol, fourniture en eau et nutriments, contrôle des bioagresseurs) favorables à la croissance des plantes en impactant peu l'environnement, tout en fournissant des services à la société (Wang *et al.*, 2018). Trois grandes stratégies génériques sont généralement considérées pour produire plus et/ou réduire les impacts des systèmes agricoles (Hill et MacRae, 1996).

Une première stratégie consiste à optimiser l'apport d'intrants en fonction des besoins spatio-temporels des plantes, limitant ainsi les apports de fertilisants et de pesticides par les technologies de l'agriculture de précision, et à miser sur la génétique pour adapter les plantes aux contraintes et/ou augmenter les rendements. Cette stratégie ne remet pas en cause les systèmes agricoles simplifiés qui reposent sur un petit nombre de cultures. C'est la voie dominante, soutenue jusqu'il y a peu par la PAC (Dedieu *et al.*, 2020). La voie de l'efficacité d'utilisation des intrants étant exogène à l'exploitation étant privilégiée, on parle d'intensification soutenable (Lal, 2020).

Une seconde stratégie consiste à substituer autant que possible les intrants fossiles ou de synthèse chimique par des fertilisants d'origine organique et des technologies de biocontrôle : biopesticides, stimulateurs de santé des plantes et du sol, apport d'organismes développés industriellement pour améliorer la nutrition des sols et les régulations biologiques (Duru *et al.*, 2015).

La troisième stratégie est basée sur la gestion de la biodiversité cultivée et associée (naturelle) des écosystèmes afin de fournir de SE utiles à l'agriculture (Duru *et al.*, 2015). Ces services dits « intrants » sont la structuration du sol, le stockage et la restitution de l'eau, le contrôle de l'érosion, la régulation des ravageurs et des maladies ainsi que la pollinisation (Therond et Duru, 2019). Ils reposent sur (i) les rotations longues, les intercultures et cultures associées ainsi que les éléments semi-naturels tels que les haies), (ii) la composition et la configuration du paysage qui recouvre l'abondance et la diversité des auxiliaires des cultures (pollinisateurs, prédateurs des bioagresseurs), et (iii) la diversité dans le sol (microorganismes, faune). Le sol joue un rôle clef au travers de sa teneur en matières organiques dont vont dépendre la plupart des SE rappelés ci-dessus. En effet, la quantité, la qualité et la distribution de la matière organique contrôle l'abondance et la diversité de trois composantes de la biodiversité associée au niveau du sol : méso-macrofaune endogée ; micro-organismes du sol (Bender *et al.*, 2016). Ces différentes sources de diversité sont interdépendantes car les unes ont des effets généralement positifs sur les autres ; par exemple effet de la diversité des cultures sur les auxiliaires et la biodiversité dans les sols. Outre le choix des cultures, les leviers d'action sont le travail du sol, et ceux utilisés dans la première stratégie. Un retour important de biomasse dans et sur le sol est une condition de durabilité. Cette stratégie, l'agro-écologie, suppose de repenser complètement la conception des agroécosystèmes. Les stratégies 1 et 2 permettent de réduire certains des impacts de l'agriculture sur l'environnement, mais elles fournissent moins de services qu'une agriculture biodiversifiée (Drinkwater et Snapp, 2007). Une synthèse de 98 méta-analyses montre que 4 leviers (la fertilisation organique, la diversification des cultures et des infrastructures écologiques, la réduction du travail du sol et dans une moindre mesure l'apport de microorganismes au sol) ont un effet très majoritairement positif sur la fourniture de huit SE et la production de biomasse ; dans 63% des cas analysés, il y a augmentation à la fois de la production et de plusieurs services (Tamburini *et al.*, 2019). Ces systèmes reposent sur la gestion intégrée des nutriments par une combinaison judicieuse des sources organiques et inorganiques, sur le recyclage de la biomasse et des espèces fixatrices de l'azote, ainsi que sur la lutte intégrée contre les ravageurs, en créant des sols suppressifs de maladies, et en combinant des interventions chimiques et l'amélioration de la biodiversité (Lal, 2019).

Les scénarios se projetant à horizon 2050, il importe d'examiner comment les effets du réchauffement climatique sont pris en compte. Les données scientifiques montrent que l'agriculture européenne serait fortement impactée dans l'hypothèse d'une augmentation de la température de + 2°C. En Europe, il a été simulé une augmentation du rendement, à l'exception de certaines régions du Sud et du Sud-Est. Cependant, la dégradation des sols et les impacts de la chaleur ne sont pas pris en compte (Balkovič *et al.*, 2018). Or, il a été montré l'impact important des événements extrêmes sur la baisse du rendement du blé en France (-30% environ en 2016 (Ben-Ari *et al.*, 2018)). Les formes d'agriculture agroécologiques reposant sur des synergies tendent à être plus résilientes au changement climatique (Gil *et al.*, 2017).

Dans la stratégie 1, les voies de progrès combinent la génétique pour s'adapter aux stress abiotiques et les technologies de l'agriculture de précision pour réduire les impacts tout en visant une augmentation des rendements notamment pour les céréales. Mais il semble que les gains permis soient annulés par les effets du changement climatique (Schils *et al.*, 2018). La stratégie 3, basée sur la diversification des cultures, a le potentiel d'améliorer la fourniture de multiples SE qui sous-tendent la production agricole, et de conférer une résilience aux stress abiotiques (Degani *et al.*, 2019). Sur la base de ces analyses, nous avons tenté de classer les stratégies 1 et 3 pour les différents domaines de maturité. L'atout de la stratégie 1 est la généricité des technologies, ce qui favorise un marché de masse. Elle n'est contestée que par un petit nombre d'acteurs, mais il n'est pas assuré qu'elle permette de réduire suffisamment les impacts ou d'augmenter suffisamment les services rendus par la biodiversité à l'agriculture (Duru et Therond, 2021). Les principes d'une agriculture agroécologique (stratégie 3) sont bien connus. Mais toute la difficulté est de les décliner localement en fonction des spécificités de sol et de climat. Leur déploiement pour une transition de l'agriculture à grande échelle suppose des changements importants en amont et en aval de l'agriculture et des apprentissages importants des agriculteurs (Lucas *et al.*, 2020). Des verrouillages sociotechniques doivent donc être levés (Meynard *et al.*, 2013). Le niveau de "domestication" est donc plus faible que pour la stratégie 1.

Elevage

L'élevage est critiqué pour ses impacts environnementaux élevés, mais aussi du fait que la nourriture des animaux entre en compétition avec l'alimentation humaine, excepté pour les prairies et les co-produits de l'industrie agro-alimentaire, alors qu'il faut bien plus de ressources (surface, énergie) pour produire des protéines animales que pour la même quantité de protéines végétales (Poore et Nemeck, 2018).

La littérature montre que les techniques de l'élevage de précision (stratégie 1) peuvent permettre une réduction des GES et d'ammoniac (NH₃) dans l'air, de la pollution aux nitrates et aux antibiotiques dans l'eau, du phosphore, des antibiotiques et métaux lourds dans le sol. Mais dans la pratique, ces techniques visent surtout à surveiller en continu et en temps réel les animaux pour leur santé et bien-être. L'atténuation de l'impact environnemental de l'élevage est recherchée par l'amélioration des niveaux de productivité, de la conduite de la reproduction et d'une bonne santé des animaux (Tullo *et al.*, 2019). Mais ces choix sont souvent associés à des élevages hors sol afin de réduire les émissions provenant des déjections et de faciliter l'utilisation d'aliments à forte concentration énergétique et protéique pour atteindre des indices de consommation élevés. Cette forme d'élevage reposant sur des pratiques standardisées, peut-être assez facilement généralisée au même titre que l'agriculture conventionnelle. Cependant, poussée à l'extrême, une telle option conduit à supprimer l'utilisation des prairies, et à une forme de déshumanisation du travail de l'éleveur et à une perte de relation avec ses animaux.

A l'opposé, les élevages agroécologiques rendent plus de services à la société et exercent une moindre compétition avec l'alimentation humaine. Plusieurs formes peuvent être distinguées.

Les élevages de ruminants basés sur des prairies souvent difficilement utilisables pour d'autres productions ont un niveau élevé d'autonomie en protéines. L'herbe de ces prairies n'étant pas consommable par les humains, les produits animaux qui en sont issus n'entrent donc pas en compétition avec l'alimentation humaine. Par contre, le stockage additionnel de carbone qui a été

longtemps l'un des éléments clé des plaidoyers pour le maintien des prairies, est aujourd'hui remis en question. Pour les prairies permanentes, il est estimé neutre (Smith, 2014) à légèrement positif (+50 kgC/ha/an) » comme le montre l'étude 4 pour 1000 (Pellerin et al., 2019). Cependant, les situations non extrêmes pour l'intensité de pâturage et pour l'apport d'azote permettent d'augmenter la séquestration de carbone dans les prairies pâturées (Soussana et Lemaire, 2014). Les systèmes de polyculture-élevage utilisent souvent des prairies temporaires riches en légumineuses ainsi que des associations de cultures comme les méteils riches en protéines. Les associations entre culture et élevage sont possibles à l'échelle de la ferme ou d'un territoire (Moraine et al., 2014). Sous réserve d'une intégration forte entre culture et élevage, ces systèmes permettent de réduire les impacts environnementaux, notamment par les services que fournissent les prairies aux cultures (Martin et al., 2020). Le pâturage d'intercultures de cultures annuelles ou de prés vergers permet de ne pas utiliser de surfaces dédiées à l'élevage, et les animaux peuvent fournir plusieurs services aux cultures comme le contrôle du parasitisme et des adventices. Ces systèmes reposent sur des pratiques connues et des référentiels bien établis. Si, le passage à l'échelle ne génère pas d'effet rebond, il est fortement contrecarré par des verrouillages sociotechniques (Magrini et al., 2019) comme le manque d'expérience, la disponibilité de semences, la destruction du couvert végétal sans recours à des herbicides.

L'alimentation des élevages de poules et porcs entre beaucoup en compétition avec l'alimentation humaine puisqu'en France par exemple seulement 15% provient de l'utilisation de co-produits de l'agroalimentaire. L'autonomie en protéines à l'échelle de la ferme ou d'un territoire est la voie principale pour réduire les impacts environnementaux. Elle permet de s'affranchir des importations de tourteaux de soja et de disposer de suffisamment de surfaces pour épandre les déjections. Réduire les pollutions suppose aussi de déconcentrer les élevages dans certaines régions (Garnier et al., 2016), ce qui constitue un verrou majeur (faible niveau de domestication). Par contre, il est possible de renforcer la fourniture de services à la société en complétant les rations par du lin afin d'augmenter la teneur en omega 3, un acide gras essentiel à fonction anti-inflammatoire pour lequel 95% d'entre nous n'atteignons pas les apports nutritionnels recommandés (Duru, 2019).

Alimentation : consommation de produits animaux

En Europe, la prise de protéine est actuellement de l'ordre de 100 g / jour, dont près des 2/3 sous forme de protéines animales (de Boer et Aiking, 2018), là où une prise de 50 g/jour suffit à couvrir les besoins nutritionnels d'un individu « moyen » (correspondant à 0,66 g par kg de masse corporelle d'un individu de 75 kg ANSES, 2016, p. 23). La baisse de consommation de produits animaux, en particulier de viande, est donc une composante clef pour réduire l'impact de l'alimentation sur les émissions de GES, ainsi que les besoins en énergie et en terre (Tilman et Clarke, 2014). Le remplacement partiel de la viande par les légumineuses est un puissant levier pour réduire les émissions de GES (Prudhomme et al., 2020). Ainsi, de nombreuses études montrent que la réduction de la consommation de produits animaux permettrait de diminuer les émissions de GES de notre alimentation d'environ 40%. La sobriété dans la consommation de protéines animales est bonne aussi pour la santé. L'étude française Nutrinet-santé montre par exemple que l'alimentation du cinquième des personnes enquêtées consommant le moins de viande (-50%) a de meilleurs indicateurs santé, émet deux fois moins de GES et nécessite deux fois moins de surfaces et 30% d'énergie en moins que le cinquième en consommant le plus (Kesse-Guyot et al., 2021). Cette stratégie suppose cependant un changement important des habitudes de consommation et une réorganisation des filières d'élevage. Bien que démontrée, cette option présente un niveau de domestication insuffisant pour se généraliser pour ne nombreuses raisons dont le manque de sensibilisation du consommateur au fort impact environnemental de la consommation de viande (Hartmann et Siegrist, 2017). En outre, un couplage entre production et consommation est nécessaire pour ne pas désorganiser les filières, en particulier l'import-export.

Consommation et production d'énergie par l'agriculture

En France, le système alimentaire consomme 32 Mtep dont 25% pour l'agriculture avec moitié en énergie indirecte pour fabriquer les engrais, pesticides et machines). Les $\frac{3}{4}$ de l'énergie dépensée sont donc en aval de la ferme (collecte, transformation, distribution, consommation), (Barbier et al., 2018).

La contribution de l'agriculture à la question énergétique passe par une amélioration de l'efficacité (type d'agriculture) et la sobriété de la demande. Ainsi, dans le scénario NégaWatt, la sobriété énergétique permettrait de réduire de 28 % les consommations d'énergie de l'agriculture en 2050 par rapport à 2015⁵. En grandes cultures, la suppression du travail du sol et la réduction de la fertilisation sont les principaux leviers pour réduire la consommation d'énergie. Un levier supplémentaire est la réduction de la fourniture de grains aux animaux pour les monogastriques car leur alimentation entre en compétition avec l'alimentation humaine, mais aussi pour les ruminants qui ont une efficacité de conversion des céréales et oléoprotéagineux encore plus faible que les monogastriques (Laisse et al., 2018). La réduction de l'élevage et de la consommation des produits animaux pourrait contribuer de manière importante à l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'agriculture (Gingrich et Krausmann, 2018).

L'énergie représente de loin la plus grande part de l'utilisation de la biomasse non alimentaire. C'est pourquoi nous ne considérons pas ici les autres produits biosourcés comme les produits à base de lin, de chanvre ou d'amidon, pour la construction, l'industrie ou l'emballage.

L'énergie fournie par la biomasse agricole, environ 2,2 Mtep⁶, est bien inférieure à celle consommée dans le process productif agricole.

Les agrocarburants de première génération (cannes à sucre, huile de palme, maïs etc.) entrent en compétition avec l'alimentation humaine. En outre, si leur culture induit un changement d'utilisation des terres (déboisement, retournement de prairies), ils risquent d'émettre plus de GES que les énergies fossiles. Le principal biocarburant en France issu du colza n'entre que partiellement en compétition avec notre alimentation puisqu'il permet de fournir des tourteaux, principalement aux vaches laitières. Néanmoins, il est apparu que ce n'était pas la panacée car l'efficacité énergétique est parfois très faible : en Europe, 85% des surfaces ne produisent pas suffisamment pour que le rapport énergie produite/énergie utilisée soit supérieur à 2 (van Duren et al., 2015), et les émissions de GES pour les produire élevée. Pour ces raisons, l'UE a plafonné à 7 % la part ces biocarburants dans la consommation finale du transport. Les biocarburants de deuxième génération issus de résidus de végétaux (pailles de céréales ou résidus forestiers) ou même d'algues, n'accaparent pas les terres agricoles, sauf à utiliser des cultures dédiées sur des terres de bon potentiel agronomique (Hassan et al., 2019). Il importe de réaliser le bilan carbone dans les sols de faible potentiel agricole.

La production de biogaz correspond à une meilleure efficacité énergétique que les agrocarburants de première génération. Cependant, elle ne doit pas non plus détourner les cultures d'une production alimentaire (ce qui est largement le cas par ex en Allemagne avec l'utilisation du maïs), ni intensifier une exploitation agricole, auquel cas elle reproduirait l'écueil des agrocarburants de première génération. C'est pourquoi doivent être privilégiées l'utilisation des déjections animales ou les cultures intermédiaires à vocation énergétique qui ne nécessitent pas de surfaces dédiées (CIVE)⁷. L'utilisation des déjections animales correspond à des émissions évitées par rapport au système de référence qui les épand directement sur les surfaces (Hijazi et al., 2016). La digestion du fumier est le moyen le plus efficace de réduire les émissions de GES, bien qu'il y ait des compromis avec d'autres impacts environnementaux locaux (Agostini et al., 2015). Même si des progrès sont possibles, la production de biogaz a un niveau de développement technologique élevé, mais un niveau de domestication encore insuffisant pour un déploiement généralisé. Des études complémentaires sont cependant nécessaires pour évaluer (i) la contribution possible des cultures

⁵ https://negawatt.org/IMG/pdf/sobriete-scenario-negawatt_brochure-12pages_web.pdf

⁶ <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/agriculture-enr-contributions-opportunités-2018-synthese.pdf>

⁷ « culture dérobée » à vocation énergétique, généralement de faible durée, placée entre deux cultures principales, le plus souvent à destination alimentaire.

intermédiaires et des pailles en veillant à ce que le retour de carbone au sol soit suffisant ; (ii) la valeur fertilisante et amendante des digestats, tout particulièrement en tenant compte des conditions d'épandage qui influent beaucoup sur la volatilisation des composés azotés (ammoniac, N₂O). En France, les ressources mobilisables pour la méthanisation (déjections, résidus cultures et CIVE) représentent un potentiel de mobilisation estimé à 4,8 MTep en 2030⁸ et 12MTep en 2050⁹. Une estimation faite à l'échelle de l'Europe estime pour la France la possibilité de produire entre 5,8 et 4,4 M tep à partir des déjections en considérant qu'elles seraient mobilisées à hauteur 50 et 20% (Meyer *et al.*, 2018) ; des valeurs donc supérieures aux estimations de l'Ademe.

Séquestration de carbone

Dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, au-delà de la division par deux des émissions de GES en agriculture et alimentation pour tenir les engagements, il est aussi prévu que l'agriculture contribue à atteindre l'objectif de zéro émissions nettes en 2050 en séquestrant du carbone pour compenser les émissions restantes des autres secteurs économiques. Dès lors, il est pertinent de comparer les réductions d'émissions de GES et le potentiel de séquestration des sols agricoles.

Les études sur la réduction des GES (Pellerin *et al.* 2013) et le 4 pour 1000 (Pellerin *et al.* 2019) quantifient les réductions permises par les bonnes pratiques agricoles, principalement par l'augmentation de l'efficacité des intrants, par le développement des légumineuses ou par la reconception des systèmes de cultures (généralisation des cultures intermédiaires, réduction du travail du sol et agroforesterie). Ces pratiques ne permettent de réduire les émissions de GES que d'environ 20%, loin de l'objectif des 50% affichés.

Par ailleurs, selon les hypothèses retenues, l'agriculture actuelle stocke ou déstocke du carbone (Pellerin *et al.*, 2019). Il a été montré que l'agriculture de conservation avec ses trois piliers permet de séquestrer le plus de carbone (Valkama *et al.*, 2020). En France, la généralisation de pratiques agroécologiques (cultures intermédiaires, réduction de travail du sol et agroforesterie) permettrait un stockage additionnel de 29,9 Mt eqCO₂ de stockage supplémentaire par an, en moyenne pendant 30 ans, soit un stockage annuel compris entre 27 et 41 Mt CO₂ eq selon l'hypothèse retenue pour la situation courante ; l'essentiel provenant des cultures intermédiaires (Pellerin *et al.*, 2019). Mais des controverses existent quant à l'effet du travail du sol à long terme : certains suivis de parcelles sur le long terme en conditions réelles montre une réalité plus complexe et des possibilités de séquestration de carbone supérieures en combinant les trois piliers de l'ACS (agriculture de conservation des sols)¹⁰. Ces estimations présentent une incertitude élevée, notamment pour les émissions de N₂O sur le temps long en agriculture de conservation des sols (Forte *et al.*, 2017). Elles doivent être affinées pour atteindre un niveau de TRL élevé.

Synthèse

Les émissions de l'agriculture française pour les années récentes sont estimées entre 88¹¹ et 108 Mt CO₂eq lorsqu'il est tenu compte de la fabrication des intrants (ClimAgri® Ademe). La comparaison des différents leviers pour les réduire montre que le levier le plus puissant compte tenu des données disponibles à ce jour serait un régime alimentaire plus végétalisé. Par exemple, en ramenant la consommation de viande des 4 et 5ème quintile à celle du 3ème quintile de l'enquête Nutrinet santé (Lacour *et al.*, 2018), ce qui correspond à la valeur haute des recommandations du PNNS 4 (500g de viande rouge et 150 g de charcuterie par semaine), auxquelles nous ajoutons 225 g de volaille, il est possible de réduire les émissions de GES de 34,6Mt CO₂eq. En comparaison, la généralisation des bonnes pratiques connues en agriculture et en élevage permettrait de réduire les émissions de 13M t CO₂eq (Pellerin *et al.*, 2013), soit seulement 12 à 15% environ des émissions du

⁸ https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20140519_gisements-substrats-methanisation.pdf

⁹ https://solagro.org/images/imagesCK/files/domaines-intervention/methanisation/2016/2019/WEB_Metha_transitions_solagro_2019.pdf

¹⁰ P Boivin, X Dupla, T Lemaitre, K Gondret, O Sauzet, E Verrecchia 2021 ACS et teneur en matières organiques du sol. Quelques enseignements tirés de la région lémanique. Agronomie, Ecologie et Innovation. TCS N°111

¹¹ <https://agriculture.gouv.fr/infographie-le-secteur-agricole-et-forestier-la-fois-emetteur-et-capteur-de-gaz-effet-de-serre>

domaine. A elles seules, elles ne permettront pas de diviser par deux les émissions de GES. Cet objectif nécessite donc d'envisager, au-delà de pratiques permettant d'augmenter l'efficacité des intrants, des innovations systémiques dont une révision de la place de l'élevage dans l'agriculture et de celle des protéines animales dans notre alimentation. En effet, des analyses ci-dessus, il ressort que les besoins en terre et en énergie pour se nourrir dépendent fortement de la consommation de protéines animales, en particulier de viande. L'élevage doit donc être réduit en proportion, mais ce sont les modes d'élevage qui entrent le moins en compétition avec l'alimentation humaine (co-produits et prairies permanentes) et/ou qui fournissent le maximum de SE (prairies temporaires) qui doivent être privilégiés (Duru et al., 2021). Maximiser les synergies suppose d'associer cultures et élevage et de produire de l'énergie sans utilisation de surfaces additionnelles, essentiellement par méthanisation à ce jour. Ces choix permettent de préserver les stocks de carbone dans le sol (prairies) ou de les augmenter (cultures intermédiaires). Cette analyse est cohérente avec une étude au niveau mondial montrant aussi qu'il faut activer plusieurs leviers pour ne pas dépasser 1,5°C en 2050 (Clark et al., 2020).

Reposant sur une moindre utilisation des intrants de synthèse, les pratiques agroécologiques sont aussi plus favorables à la biodiversité et présentent moins de risques pour la santé humaine (Duru et Therond, soumis). Cependant, les innovations et pratiques associées, même si elles ont fait la preuve de leur efficacité auprès de certains acteurs (maturité technologique), sont freinées pour leur déploiement du fait de verrouillages sociotechniques et/ou de nécessaires importants changements de comportements, comme par exemple une plus grande sobriété de la consommation de produits animaux et d'énergie. A l'inverse, les systèmes agricoles reposant plus sur les technologies peuvent être très performants pour réduire tel ou tel impact environnemental, bénéficier d'un contexte favorable à leur développement, mais ils fournissent moins de services à la société (Duru et Therond, soumis).

Comparaison de scénarios de systèmes alimentaires

Les scénarios comparés

Depuis 2010, la littérature scientifique présente des scénarios concernant la place des protéines animales dans l'alimentation, en particulier dans les pays européens (Garnett et al., 2014). Le plus souvent, ils simulent les effets d'une réduction de la consommation de viande sans prendre en compte les différentes façons de la produire (Westhoek et al., 2014). Les plus récents proposent de ne nourrir les ruminants qu'à partir des surfaces non arables (prairies permanentes) alors que les monogastriques valoriseraient les sous-produits de l'agroalimentaire et les déchets afin de supprimer toute concurrence pour l'usage des terres entre l'alimentation animale et l'alimentation humaine (Van Zanten et al., 2016). Toutes ces études concluent qu'une forte réduction de la consommation des protéines animales serait un puissant levier pour réduire l'empreinte environnementale de l'élevage (Erb, 2016). Les régimes alimentaires simulés se rapprochent d'un régime de type méditerranéen (Farchi et al., 2017) dont l'intérêt pour la santé humaine a été souligné par les agences nationales pour la santé en Europe (Van Dooren et al., 2014). Des scénarios plus systémiques prenant en compte une analyse fine des usages des terres agricoles, de la diversité des usages de la biomasse, ainsi que de l'alimentation, sont rares. Nous en avons sélectionné deux.

Pour la France, Billen et al. (2018) définissent deux scénarios : (i) "poursuite de l'ouverture et de la spécialisation" : intégration volontariste dans les marchés internationaux allant de pair avec la spécialisation régionale ; aucun changement significatif dans le régime alimentaire ; le secteur de la grande distribution maintient sa capacité à capter l'essentiel de la valeur ajoutée de la chaîne d'approvisionnement en maintenant des prix bas pour les agriculteurs et en promouvant les aliments transformés plutôt que les produits bruts. A l'opposé, le scénario (ii) "autonomie, reconnexion et régime démitarien" vise à prendre le contrôle de l'approvisionnement alimentaire et repose sur des pratiques agroécologiques : rotations longues et diversifiées avec une proportion

élevée de légumineuses; une alimentation bien plus végétalisée est envisagée de manière cohérente avec une réduction et une meilleure répartition de l'élevage entre les différentes régions ainsi qu'au couplage des cultures et de l'élevage¹². En Europe, Strapasson *et al.* (2020), ont conçu deux scénarios (émissions basses et élevées), retenant pour chacun d'eux une des quatre intensités de changements pour la plupart des critères. Nous ne retenons ici que le scénario le plus ambitieux couplant un régime alimentaire plus végétalisé et un multi-usage des terres (cultures associées, intégration culture-élevage, agroforesterie...), et l'utilisation des terres libérées pour l'afforestation et l'énergie. Nous considérerons ces deux études publiées dans des journaux scientifiques comme des références incontournables pour comparer des scénarios ayant un périmètre et un objectif similaire, mais qui sont le plus souvent conçus par les institutions et think tank et trouvés dans la littérature grise. Parmi cette littérature foisonnante¹³, nous avons retenu quatre études, en ne présentant que le(s) scénario(s) permettant d'atteindre zéro émissions nettes en 2050 : LTS (2 scénarios)¹⁴, NZ (Loran et Allen, 2019), Tyfa (Aubert et Poux, 2019) pour l'Europe et Afterres 2050 (Solagro, 2017) pour la France (Tableau 2). Tous ces scénarios reposent sur des modèles permettant de quantifier les flux. Leurs points communs sont de prendre en compte : (i) les émissions de GES pour atteindre zéro émissions nettes en 2050, ainsi que le stockage de carbone et la production d'énergie (ii) le régime alimentaire, en particulier la consommation de viande comme un levier clef pour réduire les émissions. Par contre, ils présentent des spécificités que nous résumons ci-dessous.

Qui	Nom du scénario ou auteur	Année	Echelle	Scénarios retenus
Recherche (université)	Billen	2018	France	"autonomie, reconnexion, demitarrien"*
Recherche (université)	Strapasson	2020	Union européenne	émissions de GES élevées
Entreprise associative (Solagro)	Afterres2050	2016	France	
Think tank (Iddri)	Tyfa	2018	Union européenne	Tyfa-GHG
Think tank (IEEP/ECF)	Net Zero emissions 2050 (NZ)	2019	Union européenne	Scénario permettant la neutralité carbone
Institution (European commission)	Long Term Strategy for Europe (LTS)	2018	Union européenne	LTS 1.5 Tech* et 1.5 Life

Tableau 2 : Principales caractéristiques des scénarios comparés.

L'union européenne a publié sa vision stratégique de long terme permettant d'atteindre la neutralité climatique. Deux des sept scénarios dénommés LTS 1.5 Tech et 1.5 Life permettent d'atteindre la neutralité carbone ; ils sont respectivement construits à partir de leviers techniques et à partir de contraintes environnementales fortes. Le scénario 1.5 Life a le plus un recours à des comportements sobres pour la consommation d'énergie et de viande. Les deux scénarios sont basés sur une forte augmentation des cultures énergétiques: + 100% pour 1.5 Tech et + 30% pour 1.5 Life¹⁵. Le rapport Net Zero (NZ) by 2050 commandité par l'European Climate Foundation comprend 4 scénarios pour l'agriculture selon le nombre de leviers mobilisés (efficacité des pratiques, séquestration de carbone, changement d'utilisation des terres). Nous ne retenons que celui permettant d'atteindre zéro émissions nettes. Il repose sur une forte intensification des cultures et de l'élevage, une forte réduction de la consommation de viande ainsi qu'une allocation importante des surfaces à la forêt permise par une intensification poussée de l'agriculture. TYFA-GHG (ten years for agroecology) est produit par des chercheurs de l'Iddri avec une intention claire d'impacter le

¹² Ces mêmes auteurs ont développé récemment un scénario similaire au niveau européen (Billen *et al.* 2021)

¹³ <https://afterres2050.solagro.org/2021/05/universite-afterres2050-les-presentations-sont-en-ligne/>

¹⁴ https://ec.europa.eu/knowledge4policy/publication/depth-analysis-support-com2018-773-clean-planet-all-european-strategic-long-term-vision_en

¹⁵ https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2019/07/Note-de-position-ADEME-sur-les-sc%C3%A9narios-de-r%C3%A9duction-%C3%A0-long-terme-des-%C3%A9missions-de-GES-dans-l'UE_Juillet2019.pdf

débat autour des perspectives agricoles dans la scène européenne. L'objectif est de montrer qu'un scénario avec une production agricole 100% agro-écologique (abandon complet des pesticides et des engrais de synthèse) peut nourrir l'Europe, et d'explorer comment cela pourrait être fait. Afterres2050 pose en préalable la révision de l'ensemble de nos besoins (alimentaires, énergétiques, espace), afin de les mettre en adéquation avec les potentialités des écosystèmes, et raisonner à la fois l'offre et la demande. Afterres est articulé avec le scénario NégaWatt et prend en compte la dimension énergétique et les notions d'empreinte. Il repose également dans notre capacité à adopter des comportements plus sobres, plus soutenables, notamment en matière alimentaire.

Points communs et spécificités des scénarios

Les scénarios ont d'abord été comparés globalement sur la base du niveau et du type de rupture pour faire face au défi climatique :

- (i) hypothèses technologiques (c-à-d les stratégies 1 et 2 pour la production de biomasse) vs changements de comportements sociotechniques (acteurs amont et aval de l'agriculture), c-à-d la stratégie 3 pour la production de biomasse, ainsi que de la sobriété dans la consommation (produits animaux, énergie) ;
- (ii) orientation climato-centrée ou systémique, incluant par exemple les enjeux de biodiversité et de santé.

L'état de l'art fait ci-dessus montre que pour chaque critère la deuxième option semble créer de meilleures conditions pour atteindre les objectifs et/ou éviter des effets rebonds. La quantification des scénarios est nécessaire pour vérifier que les améliorations techniques se traduisent par des économies de ressources et des réductions d'impacts dans les différents domaines d'intérêt (Paul *et al.*, 2019). C'est particulièrement complexe en agriculture car ces effets rebonds peuvent aussi être causés par des adaptations naturelles, comme la résistance des ravageurs à certains pesticides. Sur cette base, on constate que les scénarios recherche (Billen, Strappason) et Afterres-Tyfa prennent au moins indirectement en compte les enjeux de biodiversité et de santé. Ils se caractérisent par des changements systémiques, des hypothèses de changements sociétaux, notamment un couplage entre production et consommation. La stratégie d'atténuation la plus fréquemment retenue est la réduction des émissions, parfois associée à une augmentation du puits de carbone ou à la substitution. A l'opposé, les deux scénarios LTS ne prennent pas en compte les enjeux de biodiversité et de santé. Ils sont climato-centrés et reposent sur des hypothèses technologiques. La stratégie d'atténuation est basée sur l'augmentation du puits de carbone ou la substitution. Les changements se font selon une approche par leviers individuels sans lecture systémique, avec parfois un mix avec une approche systémique. Il n'y a pas de couplage entre production et consommation. NZ est un scénario hybride et multifonctionnel reposant sur un mix de changements systémiques et paramétriques, de changements technologiques et de comportements sociétaux. Il maintient les équilibres existants entre production et consommation. La stratégie d'atténuation retenue est le plus souvent un mix de réduction des émissions de GES et d'augmentation du puit de carbone.

Nous avons ensuite comparé les scénarios selon les options prises pour les questions présentées en partie 2 qui font débat : type d'intensification pour la production de biomasse ; place et type d'élevage dans les territoires et des produits animaux dans l'alimentation ; importance du stockage de carbone et des bioénergies. Pour chaque option, nous avons retenu une dimension quantitative et une seconde plus qualitative (tableau 3). Cette dernière note évalue le degré de prise en compte des impacts sur l'environnement et/ou la santé (de 1 élevé à 3 faible).

Pour la production de biomasse, l'objectif de rendement en comparaison des niveaux actuels, va d'une diminution pour réduire les impacts sur la biodiversité et intégrer l'effet probable des événements climatiques extrêmes (note 1), à une augmentation importante (jusqu'à 40% dans certains scénarios) sur la base de technologies prometteuses qui permettraient de découpler

fortement intrants et impacts (note 3). Ces options ont été précisées en qualifiant le mode de production, de tout en AB (1) à l'absence d'AB (3).

Pour l'élevage et la consommation de protéines animales, nous avons considéré une réduction forte, modérée, faible (notée 1, 2, 3) pour atteindre les ambitions climatiques sans faire appel à un surcroît de séquestration. Ces options ont été précisées en qualifiant l'intensification de la production animale, de faible (1) à élevée (3) allant jusqu'au confinement des animaux, et l'autonomie en protéines en allant d'une autonomie complète à partielle.

Pour la séquestration du carbone, nous avons considéré une gamme allant d'un niveau élevé (noté 1) à faible (noté 3). Nous avons aussi distingué les options n'entrant pas en concurrence avec l'alimentation humaine (cultures intermédiaires notées 1) de celles nécessitant un changement d'utilisation des terres (afforestation qui si elle est massive est susceptible de réduire la biodiversité à l'échelle des paysages, ainsi que les technologies de capture et de stockage de carbone notée 3). Pour la production d'énergie à partir de la biomasse, nous avons distingué un niveau faible (noté 1) à élevé (noté 3) et tenu compte de la compétition pour l'usage des terres, de faible (cive, méthanisation des déjections animales, notés 1) à élevé (agrocarburant de première génération noté 3). Nous avons aussi distingué les modalités n'entrant pas en concurrence avec l'alimentation humaine (utilisation des déjections animales, des CIVE et du bois notée 1) à celles nécessitant un changement d'utilisation des terres (agrocarburant de première génération noté 3).

Notons que même pour de tels critères aussi simples, les comparaisons sont difficiles car le système est rarement décrit intégralement en valeur absolue. D'ailleurs, une revue des études européennes sur le potentiel des terres montre qu'elles mobilisent peu les acquis agronomiques pour définir des voies d'adaptation. De nombreuses lacunes sont observées (Kluts *et al.*, 2017). D'une part, les impacts environnementaux de l'intensification sont presque toujours ignorés, alors qu'ils doivent être pris en compte si cette intensification est nécessaire pour rendre les terres disponibles pour les cultures énergétiques (cas de NZ). D'autre part, l'évolution de la productivité de l'élevage, les mesures d'intensification spécifiques à l'élevage et leurs effets sur l'environnement sont mal ou pas du tout couverts. Autrement dit, les scénarios basés sur des paris technologiques ne permettent pas de savoir jusqu'où est-il possible de découpler production de biomasse et impact. Par contre, ceux basés sur des pratiques éprouvées comme la mise en œuvre des pratiques de l'agroécologie sont moins sujets à critique.

Pour les scénarios comparés, les choix faits quant aux prairies sont parfois peu précis. Les rendements et les volumes de production ne sont pas toujours indiqués. On dispose très rarement de descriptions fines de l'évolution des rotations ou des itinéraires techniques. L'impact du changement climatique sur les rendements est rarement spécifié ; on en déduit qu'il est rarement pris en compte. La nature transitoire du stockage de carbone dans les sols est souvent omise. Ce système de notation ne permet donc pas d'évaluer les scénarios, mais il permet de les classer.

	Domaines à forts enjeux						
	explicitement considérés						non explicitement considérés
	Objectif de rendement	Intensification de l'élevage	Transition protéique	Séquestration de carbone	Bio-énergie	Classement 1*	Impact santé et environnement
Billen	1	1	1	1	1	5	1
Strapasson	2	2	1	1	2	8	1
Tyfa	1	1	1	1	1	5	1
Afterres	2	1	1	1	1	6	1
NZ	3	3	1	1	1	9	2
TS life	3	2	2	2	2	11	2
TS tech	3	3	3	3	3	15	3

Tableau 3 : Classement des scénarios pour les domaines à forts enjeux, explicitement considérés ou non.

La note 1 indique les changements *a priori* les moins impactants sur la biodiversité et la santé.

* somme des colonnes 2 à 6

Malgré ces limites, les scénarios sont fortement discriminés pour les cinq critères considérés ensemble (tableau 3). A un extrême, on trouve les scénarios de Billen, Tyfa et Afterres qui reposent sur une réduction forte de la place de l'élevage et des protéines animales dans l'alimentation ce qui permet de disposer de surfaces supplémentaires pour réduire l'intensité des pratiques sur les cultures. A cela s'ajoute la séquestration de carbone sans afforestation et la production d'énergie à partir de co-produits afin de limiter la compétition pour l'usage des terres. Ces scénarios diffèrent entre eux de par la part des surfaces cultivées en bio (environ la moitié pour Afterres et la totalité pour Tyfa et Billen), ainsi que le type d'élevage le plus réduit (ruminants et monogastriques pour Afterres, monogastriques pour Tyfa). A l'opposé, les deux scénarios LTS visent des rendements élevés, une moindre réduction de l'élevage et de la consommation de protéines animales et une part plus élevée de la biomasse pour l'énergie. En intermédiaire, on trouve les scénarios de Strapasson et NZ. NZ intensifie le plus fortement les cultures et l'élevage et réduit fortement la consommation de produits animaux ce qui permet de disposer de surfaces importantes pouvant être afforestées afin de constituer un important puits de séquestration de carbone. Notons que l'hypothèse d'une augmentation des rendements agricoles, jusqu'à 30%, dépasse les évaluations de Balkovič *et al.* (2018) qui pourtant ne tiennent pas compte des événements extrêmes. Strapasson dans l'option choisie pour le scénario basse émission fait des choix similaires mais avec une intensité moindre. Les auteurs montrent qu'il est possible de réduire les émissions de GES de 30%, d'accroître la fourniture d'énergie de 20 à 100% et de passer d'émissions à de la séquestration dans les terres à hauteur de 60% des émissions actuelles.

Le classement des scénarios pour les impacts estimés sur la biodiversité et la santé sont similaires à ceux fait pour les cinq domaines considérés (tableau 3). Autrement dit, les scénarios les moins basés les technologies et faisant plus appel à la sobriété sont ceux qui auraient le moins d'impacts sur la biodiversité et la santé. Par contre, même si les technologies ou pratiques sont matures, leur déploiement est lent du fait de verrous sociotechniques importants.

Le cadre d'analyse a permis d'examiner ce qui distingue les scénarios et ainsi d'en faire une analyse critique. Ils diffèrent par (i) le niveau et le type d'intensification (plante, animal) : basés sur la biodiversité, les services et l'économie circulaire ou bien les technologies ; (ii) le réalisme de certaines options (stockage transitoire ou non), (iii) les arbitrages prioritaires (food, feed, importance des usages non agricoles). Ils diffèrent aussi par la gamme de critères d'évaluation considérée pour prendre en compte les antagonismes ou au contraire les synergies entre options. La diversité d'options entre scénarios recouvre celle observée en Autriche où il a été montré, comme dans notre analyse, un écart considérable entre celles retenues dans les politiques publiques et les visions soutenues par les parties prenantes. Pour les premières, les choix faits sont éloignés de l'espace d'options identifié par la modélisation biophysique, car ces choix reposent sur des paris technologiques. A l'inverse, les parties prenantes mettent surtout en avant l'intérêt de la généralisation de systèmes ou de façon de faire alternatifs ayant déjà fait leur preuve. Ces différences témoignent du caractère hautement politique du concept d'agroécologie, faible vs forte (Duru *et al.* 2015), ainsi que des visions divergentes de société qui en découlent (Hausknost *et al.* 2017).

Les scénarios face à la crise multi-dimensionnelle et aux politiques publiques

Pour faire face aux grands défis que sont le dérèglement climatique, l'érosion de la biodiversité, la pollution des milieux et la santé humaine, les connaissances sont souvent disponibles par domaine. La comparaison, au prisme de ces connaissances, de plusieurs scénarios ayant comme point commun d'atteindre zéro émissions nettes de GES en 2050 montre des options et des arbitrages contrastés. Ceux prenant indirectement en compte les impacts potentiels de l'agriculture sur la biodiversité et la santé sont basés sur des comportements plus sobres en termes de consommation de viande et d'énergie issue de la biomasse. De telles options permettant de réduire les impacts, mais surtout de rendre plus de services à la société tels que la régulation du climat, la biodiversité

et la santé (Duru et Therond, 2021) sont cependant contraignantes car elles reposent sur la diversification des filières ce qui suppose des réorganisations en amont et en aval de l'agriculture. Les scénarios qui intensifient le plus l'agriculture ne détaillent généralement pas les pratiques agroécologiques et font des paris technologiques pour augmenter le découplage entre production et impacts. Il est donc nécessaire de caractériser les options selon leur niveau de maturité technologique, mais aussi les freins sociotechnique à leur développement pour l'horizon temporel considéré.

La multiplicité des défis et l'urgence pour les prendre en compte sont telles qu'il convient de tenir compte d'une diversité de critères de performances, d'être à même de les hiérarchiser et de construire-évaluer des options techniques cohérentes avec l'avancée des connaissances scientifiques. Les limites pointées lors de l'analyse des scénarios doivent inciter les agronomes à bien plus s'investir dans leur construction pour (i) faire connaître des leviers notamment dans les façons de produire, (ii) évaluer la cohérence agronomique des différentes hypothèses qui fondent les scénarios, (iii) qualifier le degré de maturité technologique des innovations envisagées. L'amélioration de la santé du sol est souvent ignorée ou insuffisamment mobilisée. Quant aux options pour l'élevage : dimensionnement, répartition géographique, réorientation pour réduire la compétition avec l'alimentation humaine, changement de système alimentaire des animaux pour accroître la valeur santé des produits..., elles ne sont jamais toutes considérées ensemble (Duru et al., 2021).

Le récent Green Deal européen¹⁶ affiche des objectifs ambitieux et cohérents en termes de réduction des émissions de GES, de biodiversité, d'utilisation d'engrais et de pesticides, de part de la production en agriculture biologique. En ce sens, il présente des parentés avec les scénarios ayant les notes les plus faibles du tableau 3. La nécessaire réduction du gaspillage alimentaire est mentionnée dans la stratégie « de la fourche à la fourchette »¹⁷ mais la question du nécessaire changement de régime alimentaire – sous peine de devoir importer plus pour compenser des baisses de rendement – et de la réduction de la production animale ne sont pas du tout abordées (Aubert, 2020). La PAC, quant à elle, n'a pas d'ambition alimentaire, et elle n'en a pas beaucoup non plus sur le plan climatique. Atteindre le niveau d'émissions de gaz à effet de serre agricoles requis par les objectifs du Green Deal nécessiterait notamment de réguler les émissions spécifiques du secteur (méthane et protoxyde d'azote émis par les animaux et les engrais). Or il y a peu de choses dans la future PAC sur ce plan si ce n'est de maigres aides aux agriculteurs pour des actions en faveur du climat dans le programme de « développement rural » qui voit son maigre budget diminuer fortement (Bureau, 2021). Le Green Deal fixe des objectifs de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires et des engrais azotés, qui n'ont pas de traduction concrète dans les futurs règlements de la PAC. Un des objectifs du Green Deal prévoit d'enrayer le déclin de la biodiversité, mais sur ce plan la future PAC prévoit que les États membres devront conditionner les aides à la préservation d'un certain pourcentage des surfaces dans des conditions propices à la biodiversité. Néanmoins, ce pourcentage, comme la définition de ce que sont les surfaces en question seront largement laissés à la discrétion des États membres.

Le Green Deal paraît compatible donc avec les scénarios présentant les ruptures sociétales les plus fortes mais n'est aujourd'hui doté d'aucun instrument concret pour opérationnaliser sa stratégie, tout particulièrement sur le volet des protéines animales. La PAC omet de prendre à bras le corps les enjeux importants, laissant la porte ouverte aux options stratégiques des scénarios les plus technologiques pour répondre aux enjeux qui font pourtant consensus.

¹⁶ https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

¹⁷ https://ec.europa.eu/belgium/180505_agri_sante_mare_fr

Références bibliographiques

- Afelt, A., Frutos, R., Devaux, C., 2018. Bats, coronaviruses, and deforestation: Toward the emergence of novel infectious diseases? *Frontiers in Microbiology*, 9(APR), 1–5. <http://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00702>
- Agostini, A., Battini, F., Giuntoli, J., Tabaglio, V., Padella, M., Baxter, D., ... Amaducci, S., 2015. Environmentally sustainable biogas? The key role of manure co-digestion with energy crops. *Energies*, 8(6), 5234–5265. <http://doi.org/10.3390/en8065234>
- ANSES., 2016. *Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires. Avis de l'ANSES*. Maisons-Alfort, Agence nationale de la sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail, 82 p.
- Aubert P.-M., 2020. Vers un système alimentaire européen durable : pour une opérationnalisation réussie de la stratégie « De la fourche à la fourchette ». *Blog Iddri* (<https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/billet-de-blog/vers-un-systeme-alimentaire-europeen-durable-pour-une>)
- Aubert, P.-M., Schwoob, M.-H., & Poux, X., 2019. Agroecology and carbon neutrality in Europe by 2050: what are the issues? Findings from the TYFA modelling exercise. *Study Nr 02/19, (i)*, 52. <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue>
- Balkovič, J., Skalský, R., Folberth, C., Khabarov, N., Schmid, E., Madaras, M., ... van der Velde, M., 2018. Impacts and Uncertainties of +2°C of Climate Change and Soil Degradation on European Crop Calorie Supply. *Earth's Future*, 6(3), 373–395
- Barbier, C., Couturier, C., Pourouchottamin, P. R., Cayla, J.-M. R., Silvestre, M., Billen, G., & Pharabodh, I. 2018. Le bilan énergétique et carbone de l'alimentation en France de la production à la consommation.
- Ben-Ari, T., Boé, J., Ciais, P., Lecerf, R., Van Der Velde, M., & Makowski, D., 2018. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications*, 9(1). <http://doi.org/10.1038/s41467-018-04087>
- Bender S.F., Wagg C., vanderHeijden M.G.A., 2016. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*.
- Bennett, A. J., Bending, G. D., Chandler, D., Hilton, S., Mills, P., 2012. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 87(1), 52–71. <http://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00184.x>
- Billen, G., Le Noë, J., & Garnier, J., 2018. Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *The Science of the Total Environment*, 637-638, 695–705. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., & Sanz-cobena, A., 2021. Perspective Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle : The potential of combining dietary change , agroecology , and circularity. *One Earth*, 839–850. <http://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- de Boer, J., & Aiking, H., 2018. Prospects for pro-environmental protein consumption in Europe: Cultural, culinary, economic and psychological factors. *Appetite*, 121, 29–40. <http://doi.org/10.1016/j.appet.2017.10.042>
- Bruckner, M., Häyhä, T., Giljum, S., Maus, V., Fischer, G., Tramberend, S., & Börner, J., 2019. Quantifying the global cropland footprint of the European Union's non-food bioeconomy. *Environmental Research Letters*, 14(4). <http://doi.org/10.1088/1748-9326/ab07f5>
- Bureau, J.C., 2021. La future politique agricole commune : une douche froide sur le Green Deal <https://aoc.media/analyse/2021/02/10/la-future-politique-agricole-commune-une-douche-froide-sur-le-green-deal/>

- Campbell B.M., Beare D.J., Bennett E.M., et al., 2017. Agriculture production as a major driver of the earth system exceeding planetary boundaries. *Ecol Soc* 22:. doi: 10.5751/ES-09595-220408
- Catarino, R., Bretagnolle, V., Perrot, T., Vialloux, F., & Gaba, S., 2019. Bee pollination outperforms pesticides for oilseed crop production and profitability. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1912), 20191550`
- Cimino, A. M., Boyles, A. L., Thayer, K. A., & Perry, M. J., 2017) Effects of c Pesticide Exposure on Human Health: A Systematic Review. *Environmental Health Perspectives*, 125(2), 155–162. <http://doi.org/10.1289/EHP515>
- Clark, M. A., Domingo, N. G. G., Colgan, K., Thakrar, S. K., Tilman, D., Lynch, J., ... Hill, J. D., 2020. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets. *Science*, 708(November), 705–708.
- Cordell D., Drangert J.O., White S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ Chang* 19:292–305. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009
- Dainese M., E. A. Martin, et al., 2019. A global synthesis reveals biodiversity mediated benefits for crop production. *bioRxiv* (February) 1–19. doi:10.1126/sciadv.aax0121
- Dedieu, B., Détang-Dessendre, C., Dupraz, P., Duru, M., Guyomard, H., Therond, O., 2020. PAC et transition agroécologique; in *Quelle politique agricole commune demain? Détang-Dessendre C, Guyomard H (coord) Quelle politique agricole commune demain? Versailles, Ed Quae, 306p*
- Degani, E., Leigh, S. G., Barber, H. M., Jones, H. E., Lukac, M., Sutton, P., & Potts, S. G., 2019. Crop rotations in a climate change scenario: short-term effects of crop diversity on resilience and ecosystem service provision under drought. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 285(August), 106625. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106625>
- Drinkwater L.E., Snapp S.S., 2007. Nutrients in agroecosystems: rethink the management paradigm. *Adv Agron* 92:163-186. doi: 10.1016/S0065-2113(04)92003-2
- Duru, M., 2019. Agri-food choices for health: the case of fatty acids. *OCL - Oleagineux Corps Gras Lipides*.
- Duru, M., Therond, O. 2021. L'évaluation des systèmes agricoles à l'aune des services écosystémiques et de l'économie circulaire. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 11(1), 14p.
- Duru, M., Le Bras, C., Grillot, M., 2021. Une approche holistique de l'élevage, au cœur des enjeux de santé animale, humaine et environnementale. *Cahiers Agricultures*, 30, 26.
- Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-clouaire, R., Magne, M., Justes, E., ... Sarthou, J. P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services : a review. *Agronomy for Sustainable Development*. <http://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>
- Erb, K.-H., 2016). Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nature Communications*, 1–7. <http://doi.org/10.1038/pj.2016.37>
- Farchi, S., Sario, M. De, Lapucci, E., Davoli, M., & Michelozzi, P., 2017. Meat consumption reduction in Italian regions : Health co-benefits and decreases in GHG emissions, *PLoS ONE*, 1–19. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0182960>
- Forte, A., Fiorentino, N., Fagnano, M., & Fierro, A. , 2017. Mitigation impact of minimum tillage on CO2 and N2O emissions from a Mediterranean maize cropped soil under low-water input management. *Soil and Tillage Research*, 166, 167–178. <http://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.014>
- Garnett, T., 2014. What is a sustainable healthy diet? *FCRN Discussion Paper*, (April). http://www.fcrn.org.uk/sites/default/files/fcrn_what_is_a_sustainable_healthy_diet_final.pdf

Garnier, J., Anglade, J., Benoit, M., Billen, G., Puech, T., Ramarson, A., ... Tallec, G., 2016. Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses to river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin , France): past , present and future . *Environmental Science and Policy*, 63, 1–31. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.019>

Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W. W., Emmerson, M., Morales, M. B., ... Inchausti, P., 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. *Basic and Applied Ecology*, 11(2), 97–105. <http://doi.org/10.1016/j.baae.2009.12.001>

Gil, J. D. B., Cohn, A. S., Duncan, J., Newton, P., & Vermeulen, S., 2017. The resilience of integrated agricultural systems to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(4), 10. <http://doi.org/10.1002/wcc.461>

Gingrich, S., & Krausmann, F., 2018. At the core of the socio-ecological transition: Agroecosystem energy fluxes in Austria 1830–2010. *Science of the Total Environment*, 645, 119–129. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.074>

Guyomard, H., 2020. The Green Deal and the CAP: policy implications to adapt farming practices and to preserve the EU's natural resources, (April).

Forte, A., Fiorentino, N., Fagnano, M., & Fierro, A., 2017). Mitigation impact of minimum tillage on CO₂ and N₂O emissions from a Mediterranean maize cropped soil under low-water input management. *Soil and Tillage Research*, 166, 167–178. <http://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.014>

EFSA, 2017. *Dietary Reference Values for nutrients. Summary Report*. Brussels, European Food Safety Authority, 92 p.

Hartmann, C., & Siegrist, M., 2017. Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science and Technology*, 61, 11–25. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006>

Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K., 2019. Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(December 2018), 590–599. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.041>

Hausknost, D., Kalt, G., Hausknost, D., Schriefl, E., Lauk, C., & Kalt, G., 2017. A Transition to Which Bioeconomy? An Exploration of Diverging Techno-Political Choices A Transition to Which Bioeconomy? An Exploration of Diverging Techno-Political Choices. *Sustainability*, (April). <http://doi.org/10.3390/su9040669>

Hill, SB., MacRae, RJ., 1995. Conceptual frameworks for the transition from conventional to sustainable agriculture. *J Sustain Agricult* 7(1), 81–87

Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., & Effenberger, M., 2016. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1291-1300.

Kesse-Guyot, E., Rebouillat, P., Brunin, J., Langevin, B., Allès, B., Touvier, M., ... Baudry, J., 2021. Environmental and nutritional analysis of the EAT-Lancet diet at the individual level: insights from the NutriNet-Santé study. *Journal of Cleaner Production*, 296. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126555>

Kluts, I., Wicke, B., Leemans, R., & Faaij, A., 2017. Sustainability constraints in determining European bioenergy potential: A review of existing studies and steps forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69(November 2015), 719–734. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.036>

Lacour, C., Seconda, L., Allès, B., Hercberg, S., Langevin, B., Pointereau, P., ... Kesse-Guyot, E. (2018). Environmental Impacts of Plant-Based Diets: How Does Organic Food Consumption Contribute to Environmental Sustainability? *Frontiers in Nutrition*, 5(February), 1–13. <http://doi.org/10.3389/fnut.2018.00008>

- Laisse, S., Baumont, R., Dusart, L., Gaudré, D., Rouillé, B., Benoit, M., et al., 2019. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Productions Animales*, 31(3), 269–288. <http://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355>
- Lal, R., 2019. Eco-intensification through soil carbon sequestration: Harnessing ecosystem services and advancing sustainable development goals. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), 55A–61A. <http://doi.org/10.2489/jswc.74.3.55A>
- Lal, R., 2020. Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of soil and water conservation*, 1–2. <http://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A>
- Lorant, A. Allen, B., 2019 Institute for European Environmental Policy (IEEP): <https://ieep.eu/publications/net-zero-agriculture-in-2050-how-to-get-there>
- Lucas, A., Esteban, G., 2020. Agroecology in Large Scale Farming — A Research Agenda. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <http://doi.org/10.3389/fsufs.2020.584605>
- Magrini, M. B., Martin, G., Magne, M. A., Duru, M., Couix, N., Hazard, L., & Plumecocq, G., 2019. Agroecological transition from farms to Territorialisated agri-food systems: Issues and Drivers. In *Agroecological transitions: From theory to practice in local participatory design* (pp. 69-98). Springer, Cham.
- Martin, G., Durand, J. L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., ... & Novak, S., 2020. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(3).
- Meng, Z., Liu, L., Yan, S., Sun, W., Jia, M., Tian, S., ... Zhu, W., 2020. Gut microbiota: A key factor in the host health effects induced by pesticide exposure? *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (Vol. 68). <http://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04678>
- Meyer, A. K. P., Ehimen, E. A., & Holm-Nielsen, J. B., 2018. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 111, 154–164. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.05.013>
- Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., ... Savini, I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures : étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. *Ocl*, 20(4), D403. <http://doi.org/10.1051/ocl/2013007>
- Moraine M., Duru M., Nicholas P., Leterme P., Therond O., 2014. Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal*, DOI : 10.1017/S1751731114001189.
- MTES., 2020. Ministère de la transition écologique et solidaire., 2020. Stratégie nationale bas carbone https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf
- El Mujtar, V., Muñoz, N., Mc Cormick, B. P., Pulleman, M., & Tittonell, P., 2019. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand?. *Global Food Security*, 20, 132-144.
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., Hens, L., 2016. Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4(July), 148. <http://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Panagos, P., & Katsoyiannis, A., 2019. Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environmental Research*, 172(February), 470–474. <http://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.043>
- Paul, C., Techen, A. K., Robinson, J. S., & Helming, K., 2019. Rebound effects in agricultural land and soil management: Review and analytical framework. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1054–1067. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.115>
- Pellerin S, Bamière L, (pilotes scientifiques) et al., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du

- rapport d'étude, INRA (France), 114 p : <https://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1000-carbone-sols-potentiel-france>
- Pellerin S, Bamière L, Angers D, Béline F, Benoit M, Butault J. et al., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques.
- Poore, J., & Nemecek, T., 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 992(6392), 987–992. <http://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAQ0216>
- Powles, S. B., Yu, Q., 2010. Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual review of plant biology*, 61, 317-347.
- Prudhomme, R., Brunelle, T., Dumas, P., Le Moing, A., & Zhang, X., 2020. Assessing the impact of increased legume production in Europe on global agricultural emissions. *Regional Environmental Change*, 20(3). <http://doi.org/10.1007/s10113-020-01651-4>
- Rinninella, E., Cintoni, M., Raoul, P., Lopetuso, L. R., Scaldaferri, F., Pulcini, G., ... Mele, M. C. (2019). Health Gut Microbiota. *Nutrients*, 1–23.
- Rusch, A., Chaplin-Kramer, R., Gardiner, M. M., Hawro, V., Holland, J., Landis, D., ... & Bommarco, R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 198-204.
- Schroeder, B. O., Bäckhed, F., 2016. Signals from the gut microbiota to distant organs in physiology and disease. *Nature Medicine*, 22(10), 1079–1089. <http://doi.org/10.1038/nm.4185>
- Smith, P., 2014. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? *Global Change Biology*, 20(9), 2708–2711. <http://doi.org/10.1111/gcb.12561>
- Solagro, 2017. <https://afterres2050.solagro.org/2017/03>
- Soussana, J.-F., Lemaire, G., 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9–17. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.012>
- Strapasson, A., Woods, J., Meessen, J., Mwabonje, O., Baudry, G., Mbuk, K., 2020. EU land use futures : modelling food, bioenergy and carbon dynamics. *Energy Strategy Reviews*, 100545. <http://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100545>
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., Hallin, S., 2019. Agricultural diversification promotes biodiversity and multiple ecosystem services without compromising yield. *Submitted to Science Advances*, 10/28/2019, (November).
- Therond, O., Duru, M., 2019. Agriculture et biodiversité : les SE, une voie de réconciliation ? *Innovations Agronomiques*, 75, 29–47. Retrieved from <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/EFESE-services->
- Tilman, D., Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522. <http://doi.org/10.1038/nature13959>
- Tullo, E., Finzi, A., Guarino, M., 2019. Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of the Total Environment*, 650, 2751–2760. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.018>
- Valkama, E., Kunyupyaeva, G., Zhapayev, R., Karabayev, M., Zhusupbekov, E., Perego, A., ... Acutis, M., 2020. Can conservation agriculture increase soil carbon sequestration? A modelling approach. *Geoderma*, 369(March), 114298. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114298>
- Van Dooren, C., Marinussen, M., Blonk, H., Aiking, H., Vellinga, P., 2014. Exploring dietary guidelines based on ecological and nutritional values: A comparison of six dietary patterns. *Food Policy*, 44, 36–46. <http://doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.11.002>

- van Duren, I., Voinov, A., Arodudu, O., & Firrisa, M. T. (2015). Where to produce rapeseed biodiesel and why? Mapping European rapeseed energy efficiency. *Renewable Energy*, 74, 49–59. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.016>
- van Zanten, H. H. E., Mollenhorst, H., Klootwijk, C. W., van Middelaar, C. E., de Boer, I. J. M., 2016. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(5), 747–758. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0944-1>
- Vik, J., Melås, A. M., Stræte, E. P., & Søråa, R. A., 2021. Balanced readiness level assessment (BRLa): A tool for exploring new and emerging technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 169(May), 120854. <http://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120854>
- Westhoek, H., Lesschen, J. P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D., ... Oenema, O., 2014. Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change*, 26, 196–205. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Wang, L., Cutforth, H., Lal, R., Chai, Q., Zhao, C., Gan, Y., Siddique, K. H. M., 2018. “Decoupling” land productivity and greenhouse gas footprints: A review. *Land Degradation and Development*, 29(12), 4348–4361. <http://doi.org/10.1002/ldr.3172>
- Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecol Econ* 64:253–260



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.