

## Agroénergie et émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne

Pierre-Alain Jayet\*, Laure Bamière\*, Olga Zuravel\*

@ 48034

**Mots-clés :** biocarburants, agriculture, biogaz, gaz à effet de serre, modélisation

***Cet article explore le potentiel de production européenne d'agrocarburants « en sortie de ferme » dans le cadre de la directive européenne RED II, la production de biométhane et les impacts sur une série de critères économiques et environnementaux. L'analyse intègre le « prix » des émissions de gaz à effet de serre (GES) en rapport avec les incitations financières dont pourrait bénéficier la production de biomasse à finalité énergétique. Le système de production agricole pourrait satisfaire 20 % de la consommation de carburant liquide et de gaz naturel avec la production d'agrocarburants et de biogaz, tout en réduisant de 18 % les émissions directes de GES d'origine agricole. Cela s'accompagnerait de modifications importantes en termes d'allocation des terres agricoles, de production et d'alimentation animales et plus généralement de production nette de calories alimentaires.***

### Introduction

Le secteur de production agricole contribue aux émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'Union européenne (UE) principalement sous forme de méthane et de protoxyde d'azote. Ces gaz représentent plus de 90 % des émissions directes agricoles de l'UE. Hors forêt et changement d'usage des terres, elles représentent plus de 12 % du total des émissions de l'UE en équivalent dioxyde de carbone sur la base des pouvoirs radiatifs cumulés de ces gaz sur un horizon de 100 ans<sup>1</sup>.

Parmi les options de réduction des émissions de GES et d'accroissement de la sécurité énergétique, la promotion des carburants d'origine renouvelable en substitution aux ressources fossiles est mise en avant. Longtemps soutenue dans le cadre de politiques agricoles et énergétiques, elle fait l'objet d'une controverse portant sur la variation nette des émissions liées à la production

d'une culture destinée à être transformée en carburant [Crutzen et al., 2008]. Il s'agit alors d'évaluer le potentiel énergétique des résidus de cultures et des productions dédiées à l'énergie en regard de l'objectif européen d'augmenter la part des biocarburants de seconde génération<sup>2</sup> (2G) pour atteindre 3,5 % de l'énergie utilisée dans les transports d'ici 2030, selon les directives européennes sur les énergies renouvelables RED II et RED III [EU, 2018; EU, 2023]. Cet objectif devrait être atteint tout en limitant la part des biocarburants de première génération dans la consommation énergétique finale de transport fixée à 7 % et en garantissant la réduction d'au moins 65 % des émissions de GES pour les biocarburants produits après 2021 par rapport aux carburants conventionnels. À titre comparatif, selon [Cour des comptes européenne, 2023], pour l'année 2021, les énergies renouvelables représentaient 7,5 % des énergies utilisées dans les transports routiers et ferroviaires, dont 4,0 % par les biocarburants et biogaz issus de cultures destinées à l'alimentation humaine et animale, tandis que

\* INRAE.

les biocarburants avancés et le biogaz ne représentaient que 0,8 %.

Nous proposons d'évaluer la capacité du secteur agricole à produire des biomasses à finalité énergétique dans le cadre des directives européennes portant sur la durabilité des productions et d'en évaluer les impacts sur les émissions directes de GES d'origine agricole et la sécurité alimentaire. À cette fin, nous utilisons le modèle d'offre agricole européenne AROPAj [Jayet et al., 2023] et proposons cinq scénarios portant sur le prix des produits 2G, la part de surface dédiée aux cultures énergétiques, l'amplitude maximale de variation des effectifs animaux autorisée et le prix des émissions de GES. Nous en évaluerons les impacts sur un ensemble de critères économiques et environnementaux, dans le contexte économique et climatique des années sur lesquelles le modèle est calibré.

## 1. Méthode et modèle

Une analyse comparative est menée à partir de cinq scénarios dérivant d'une situation de référence, fondée sur six années d'observations du système européen de production agricole. Les scénarios sont mis en œuvre avec le modèle d'offre agricole européenne AROPAj, en mobilisant les données du réseau européen d'information comptable agricole (RICA) pour les 28 États membres de l'Union européenne (UE) sur la période 2013-2018. Ces données ont permis de calibrer le modèle AROPAj, décliné en groupes types d'exploitations agricoles représentatifs à l'échelle de la région pour chacune des six années concernées [Jayet et al., 2023]. Chaque groupe type représente un ensemble d'exploitations agricoles d'une région ayant des caractéristiques similaires (type d'activité, taille économique, altitude, part de la surface irriguée).

AROPAj est un modèle de programmation mathématique reposant sur l'optimisation de la marge brute des exploitations agricoles, sous contraintes économiques et techniques, les variables de « commande » étant les activités de production (e.g., effectifs animaux, surfaces des différentes cultures, part de la production

vendue ou consommée sur l'exploitation), et d'autres variables endogènes associées aux effets externes (e.g., émissions de GES). La classification des groupes type représentatifs (de 1850 à 2000 groupes type pour l'ensemble de l'UE selon les années), l'estimation des paramètres et le calibrage groupe type par groupe type s'effectuent pour chaque année RICA indépendamment des autres. Les 21 activités agricoles (principales cultures de ventes, fourrages et prairies) — excluant les activités viticoles, horticoles, arboricoles et maraîchères — représentées dans le modèle couvrent environ 120 millions d'hectares, soit 85 % de la surface agricole utile totale (SAU) européenne. Le troupeau, estimé à partir du RICA et agrégeant toutes les activités animales représentées, varie de 102 à 105 millions d'unités gros bétail (UGB<sup>3</sup>).

En partant de la référence (REFE), les scénarios retenus sont présentés comme des modifications successives de valeurs de paramètres impactant la production de bioénergies, jusqu'à l'instauration d'un prix affectant les émissions directes de gaz à effet de serre par l'agriculture. La situation de référence est elle-même un résultat de l'optimisation, considérée comme proche de la réalité observée avec le RICA. Le modèle est mobilisé dans une version qui intègre la production de biométhane à la ferme, les cultures pérennes dédiées *a priori* à la bioénergie et le calcul des rendements des coproduits selon la méthode développée et expliquée par [Gérard et Jayet, 2023]. Les productions pérennes sont intégrées selon la méthode de calcul intertemporel proposée par [Ben Fradj et Jayet, 2018]. Dans la dernière version utilisée, le modèle intègre l'eau d'irrigation et l'azote comme facteurs de production recalculés avec les rendements des cultures pour 9 d'entre elles, dans une majorité de groupes type d'exploitations. Par ailleurs, la production de céréales peut être en partie mobilisée pour l'alimentation animale directement dans les élevages, qui consomment également des fourrages et des aliments concentrés achetés. Enfin, les effluents d'élevage peuvent être utilisés comme amendements azotés en substituts des engrais de synthèse, soit directement soit sous forme de digestats qui sont des coproduits de la fermentation méthanique.

Les scénarios étudiés sont brièvement présentés ci-dessous.

### REFE

Pour chaque année RICA et pour l'UE-28 (y compris Croatie et Royaume-Uni), la simulation de référence est associée à une politique agricole commune (PAC) stylisée et simplifiée. Le découplage généralisé des aides sous forme de droit à paiement unique à l'hectare (ha) est mis en œuvre, avec une estimation RICA pour chaque exploitation agricole représentative. Le couplage des soutiens à l'agriculture est maintenu dans certains cas, comme les aides directes (*top-ups*) concernant principalement les derniers pays entrés dans l'UE ainsi que l'aide spécifique par hectare de blé dur. Des productions pérennes à récolte annuelle, notamment le miscanthus et le *switchgrass*, sont présentes avec un prix de vente faible (10 € par tonne de matière sèche – €/tMS) et les prix des coproduits (e.g., pailles) sont fixés par hypothèse à un niveau également faible (0,35 €/tMS). Par ailleurs, la part de surface des cultures pérennes est limitée à 1 % de la SAU pour chacune d'elles. Le prix du biométhane retenu en valeur nette (prix de vente avec déduction des charges variables) est 0,35 €/m<sup>3</sup>, et les charges fixes associées aux méthaniseurs sont imputées à l'exploitation agricole. Enfin, parmi les paramètres susceptibles de varier avec les différents scénarios, le capital animal varie faiblement autour du niveau RICA (variation limitée à ± 0,1 % de l'estimation RICA pour les catégories animales «adultes» prises en compte dans le modèle, telles que vaches, bœufs, porcs, ovins, caprins, volailles).

### SCN1

Ce scénario est orienté sur la production de biomasses de «seconde génération» (2G) destinées à être transformées en agrocarburants liquides (initialement bioessence et biodiesel, et plus récemment biokérosène). Dans ce cadre, les prix supposés pour partie subventionnés sont respectivement de 70 €/tMS pour le miscanthus et le *switchgrass*, et 35 €/tMS pour les coproduits végétaux. L'écart entre ces deux prix peut être justifié

par le fait de disposer d'une plus grande quantité de biomasse homogène et accessible en «bord de champ». Dans ce scénario et les suivants, la part de coproduits exportés représente en moyenne 40 % de la biomasse aérienne sur l'ensemble des cultures, respectant la part réservée au retour au sol [Gérard et Jayet, 2023].

### SCN2

La limite de terres agricoles mises en production de cultures pérennes est portée à 10 % de la SAU de l'exploitation par culture, sachant que la somme des deux surfaces est elle-même contrainte (i.e., 18,1 % de la SAU). Parallèlement, le prix net opérationnel du biométhane est porté à 1 €/m<sup>3</sup>, signifiant le décollage de la production de biométhane. Au niveau des installations de fermentation méthanique, un ratio entre substrats d'origines animale et végétale est instauré, avec un maximum de 30 % pour les substrats d'origine animale.

### SCN3

L'amplitude de variation du capital animal est portée à ± 15 % autour de la valeur RICA. Par construction, avec la programmation linéaire, la valeur optimale des activités animales directement soumises à cette contrainte est susceptible d'atteindre une borne (-85 ou +115 % de la valeur initiale dans le cas présent). Ce n'est pas le cas pour toutes les activités animales, en particulier les bovins d'âge intermédiaire (i.e., hors vaches et bœufs) non soumis à ces limites. Jouent également sur les effectifs animaux l'existence de quotas laitiers, les contraintes d'alimentation animale, et la valorisation des effluents d'élevage.

### SCN4

Le scénario est caractérisé par une augmentation de 50 % des prix des produits à finalité énergétique, avec le passage à 105 €/tMS pour le miscanthus et le *switchgrass*, 52,5 €/tMS pour les coproduits végétaux, et 1,5 €/m<sup>3</sup> pour le biométhane. On notera que le fait de considérer ces hausses de prix comme des subventions

ne change pas la solution optimale donnée par le modèle.

**SCN5**

Un prix des émissions de GES, autrement dit une taxe, de 100 €/tCO<sub>2</sub>eq est proposé. Il est choisi en considérant qu’une subvention des coproduits de culture à hauteur de 35 €/tMS revient à créditer de 100 €/tCO<sub>2</sub>eq environ 1 tMS correspondant à 120 litres de biofuel (selon un ordre de grandeur avec une relative disparité entre bioéthanol, biodiesel ou biokérosène), supposée se substituer à du pétrole fossile de densité de l’ordre de 0,8 et composé principalement de carbone (0,120\*0,8\*44/12≈0,35tCO<sub>2</sub>/tMS et 35 €/tMS/0,35tCO<sub>2</sub>/tMS=100 €/tCO<sub>2</sub>eq). Ce prix est cohérent avec la valeur tutélaire du dioxyde de carbone proposée par [Quinet et al., 2019] (respectivement 55 et 250 €/tCO<sub>2</sub> pour 2020 et 2030). Le montant de cette subvention implicite est intégré dans la hausse du prix retenu pour les coproduits dans le scénario précédent. Il est donc proposé de pénaliser les émissions de GES à hauteur de la subvention implicite accordée aux biocarburants se substituant aux énergies fossiles.

En résumé, le scénario SCN1 reflète la mise en œuvre effective du potentiel de production de biocarburants de 2<sup>e</sup> génération issus principalement des coproduits de cultures via des prix attractifs de ces coproduits; le scénario SCN2 généralise la production de bioénergie 2G en

portant à 10 % de la SAU la part maximale dédiée à chacune des productions pérennes, tandis que la production de biométhane est elle aussi soutenue par un prix attractif; le scénario SCN3 repose sur une plus grande flexibilité apportée à l’ajustement des troupeaux répondant à la promotion des bioénergies; le scénario SCN4 est conçu pour évaluer la sensibilité du système de production agricole au soutien prononcé en faveur des bioénergies, avec une augmentation du prix net producteur apparentée à une subvention; le scénario SCN5 est conçu de sorte que le soutien par tonne de produit destiné à la bioénergie dans une perspective d’atténuation des émissions de GES est «compensé» par un «prix» du CO<sub>2</sub> équivalent appliqué aux émissions de GES d’origine agricole.

Chacun de ces six scénarios est mis en œuvre pour chacune des six années RICA.

**2. Résultats**

Les résultats présentés sont agrégés à l’échelle de l’UE et moyennés sur les six années RICA pour répondre à la question soulevée en préambule : les incitations par les prix au développement des bioénergies ont-elles un impact significatif sur leur production et sur les émissions directes de GES d’origine agricole, qui sont l’un des arguments mis en avant pour les justifier? Bien que les controverses évoquées (e.g., [Crutzen et al., 2008]) fassent état de l’ensemble d’une chaîne de transformations impliquant l’amont et l’aval

	<b>REFE</b>	<b>SCN1</b>	<b>SCN2</b>	<b>SCN3</b>	<b>SCN4</b>	<b>SCN5</b>
Prix coproduits (€/tMS)	0,35	35	35	35	52,5	52,5
Prix cultures pérennes (€/tMS)	10	70	70	70	105	105
Prix biométhane (€/m <sup>3</sup> )	0,35	0,35	1	1	1,5	1,5
Pourcentage SAU maximum autorisé par culture pérenne	1 %	1 %	10 %	10 %	10 %	10 %
Ratio minimal substrat animal/végétal	-	-	30 %	30 %	30 %	30 %
Pourcentage maximum ajustement capital animal	+/- 0,1 %	+/- 0,1 %	+/- 0,1 %	+/- 15 %	+/- 15 %	+/- 15 %
Prix du CO <sub>2</sub> (€/tCO <sub>2</sub> eq)	-	-	-	-	-	100

**Tableau 1. Tableau récapitulatif des valeurs des paramètres variant entre les différents scénarios étudiés**

de l'agriculture, il est utile de vérifier dans quelle mesure les émissions d'origine agricole varient avec la production de bioénergie supposée les diminuer.

Un important potentiel de production de biomasse disponible émerge, impliquant les productions végétales et animales à différents titres. Mise à part l'introduction de cultures pérennes, les deux types de productions impliquent l'émission à la fois de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{N}_2\text{O}$ , via différents facteurs de production tels que les amendements azotés pour les cultures et l'alimentation animale. Avec le modèle AROPAj, les deux types de productions diffèrent dans l'analyse par l'énergie finale à laquelle on les associe généralement : carburants liquides par transformation biologique ou thermique des biomasses cellulosiques, et gaz par fermentation méthanique de substrats ligneux et d'effluents.

Le modèle permet d'évaluer les impacts des scénarios proposés au sein des exploitations agricoles, en particulier en termes d'occupation des terres agricoles, d'effectif animal, d'alimentation animale, d'apports d'azote minéral ou organique. Déjà abordée par ailleurs [Ben Fradj et al., 2016], une autre catégorie d'arbitrage entre sécurité alimentaire et sécurité énergétique mérite d'être réanalysée. Enfin, nous aborderons l'impact économique des scénarios sur la marge brute et sur le montant des taxes (sur les émissions de GES) et subventions (incitations favorables aux biomasses pour l'énergie).

Les 36 jeux de simulations sont exploités pour la situation de référence (REFE) et les cinq scénarios (SCN1 à SCN5), en moyenne annuelle sur les six années RICA 2013-2018. Les impacts sur le système de production agricole et son environnement sont donc déclinés selon les critères économiques et environnementaux suivants :

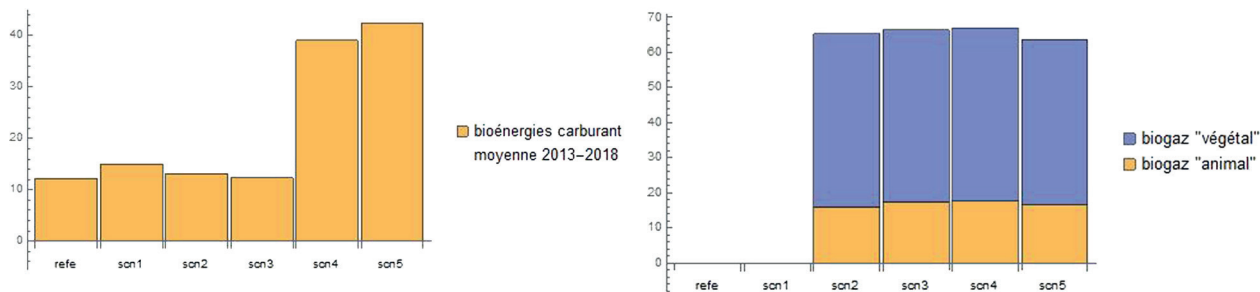
- production potentielle de biomasse en équivalent « biocarburant » en bord de champ, production potentielle de biométhane,
- émissions directes de gaz à effet de serre ( $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ), exprimées en équivalent  $\text{CO}_2$  sur la

base de leur pouvoir radiatif global sur une durée de 100 ans,

- production de céréales vendues versus auto-consommées à la ferme pour l'alimentation animale,
- allocation de la SAU répartie selon les principaux groupes de cultures, de prairies et fourrages, de friche et de cultures pérennes,
- taille des troupeaux estimée en UGB, représentant tous les effectifs animaux en équivalent temps plein,
- bilans nets exprimant les calories et les protéines disponibles pour l'alimentation humaine,
- apports d'azote d'origine minérale (engrais de synthèse) et organique (effluents d'élevage et digestats),
- marge brute agricole, produit de la « taxe » sur les émissions de GES et subventions accordées à la production de biomasses à finalité énergétique.

### Bioénergies

La valorisation énergétique des coproduits agricoles révèle un potentiel significatif, de l'ordre de 12 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), qui peut être substantiellement augmenté lorsque les productions pérennes deviennent profitables pour les exploitations agricoles (SCN4), jusqu'à dépasser 40 Mtep si la part admissible de SAU qui leur est allouée est de 10 %. Dans ce cas, le miscanthus représente plus de 95 % de la biomasse et de la surface en cultures pérennes, et entre en compétition directe avec les autres cultures, le *switchgrass* étant quant à lui implanté sur des terres moins productives. L'évaluation en équivalent carburant liquide repose sur les valeurs moyennes des coefficients techniques de transformation de la biomasse en carburant liquide. Sur la base du modèle et des scénarios retenus, ce potentiel en bord de champ d'exploitation représenterait 12 à 15 % de la consommation annuelle



**Figure 1. Production potentielle de bioénergies en sortie d'exploitation pour la référence (REFE) et les 5 scénarios (SCN1-5) : biocarburant (Mtep, à gauche) et biométhane (10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, à droite) – moyenne sur les 6 années RICA 2013-2018**

de carburant liquide dans le transport routier européen<sup>4</sup> et viendrait s'ajouter aux 6 % actuels de carburants liquides d'origine renouvelable, provenant en grande partie de produits agricoles dits de « 1<sup>re</sup> génération ». Même si la valorisation des coproduits impacte l'allocation des terres avec une augmentation de leur productivité, favorisée par l'augmentation des prix, la complémentarité entre produits joints (e.g., grain et paille) limite globalement la part que peuvent prendre les coproduits dans la production de bioénergie.

La production de biométhane n'est pas destinée aux mêmes usages en général, et plutôt que de l'exprimer en équivalent pétrole, nous conservons le mètre cube comme unité physique (1000 m<sup>3</sup> équivalant approximativement à 1 tep sous forme de chaleur). Dès que le prix proposé pour le biométhane rend la méthanisation profitable (SCN2), le potentiel de production sortie de ferme est significatif. Il est estimé à 65 milliards de mètres cubes, correspondant à environ 20 % de la consommation européenne de gaz naturel. Le biogaz produit provient à environ 15 % de substrats d'origine animale (effluents d'élevage), tandis que la méthanisation des substrats végétaux entre en compétition avec leur valorisation sous forme de carburant liquide.

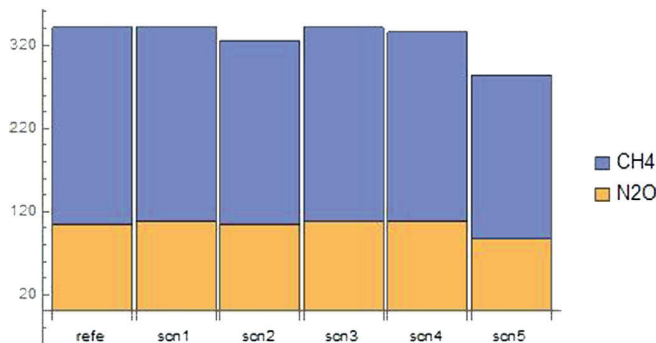
On observe que la mise en œuvre d'un prix sur les émissions de gaz à effet de serre (SCN5) aurait pour effet de diminuer la production de biogaz et d'augmenter le potentiel de biomasse destinée à être transformée en carburant liquide. Une synthèse graphique des résultats est proposée en

Figure 1. L'approvisionnement en biomasses est un critère important pour les entreprises de transformation. Dans cette perspective, les résultats détaillés par année RICA apparaissent robustes qualitativement et dans une moindre mesure quantitativement, avec une variation d'amplitude 15 % pour le potentiel « biocarburants » et 8 % pour le potentiel « biogaz » d'origine végétale sur les six années.

### Émissions de gaz à effet de serre

Le modèle AROPAj a souvent été utilisé pour l'estimation des fonctions de coût de réduction des émissions de GES, qui sont estimées selon le niveau de détail et les facteurs d'émission proposés par le GIEC (pour plus de détails, voir [De Cara et al., 2018]). Dans l'exercice qui est ici proposé (SCN5), on instaure un prix équivalent à une taxe sur les émissions directes de deux principaux GES que sont le méthane et le protoxyde d'azote (comptant pour plus de 90 % des émissions agricoles directes en équivalent CO<sub>2</sub> sur 100 ans). La valeur de 100 €/tCO<sub>2</sub>eq est choisie en rapport avec la hausse des prix des biomasses 2G destinées aux biocarburants, plus précisément les coproduits des cultures, prix que l'on peut apparenter à une subvention aux carburants renouvelables considérés comme substitués des carburants d'origine fossile.

Les quantités de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> émises varient peu entre les scénarios SCN1 à SCN4, avec une amplitude des écarts plus faible pour le N<sub>2</sub>O (3 %) comparé au CH<sub>4</sub> (7 %), ce dernier comptant



**Figure 2. Émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole pour la référence (REFE) et les 5 scénarios (SCN1-5) (MtCO<sub>2</sub>) – moyenne sur les 6 années RICA 2013-2018**

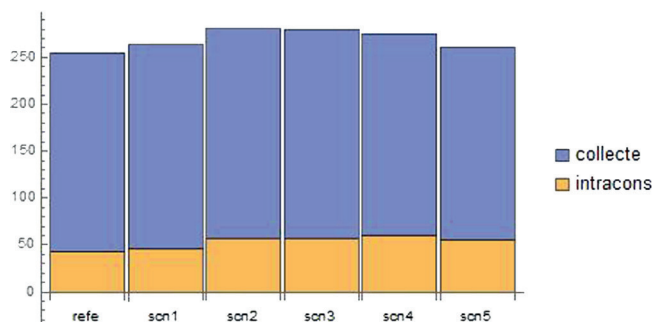
déjà pour les deux tiers des émissions agrégées (voir aussi Figure 2). Dans le scénario SCN5, en affectant la valeur de 100 €/tCO<sub>2</sub>eq aux émissions de GES, la baisse de ces émissions serait de l'ordre de 18 % (283 MtCO<sub>2</sub> en SCN5 comparé à 341 MtCO<sub>2</sub> en REFE).

Comme attendu, le meilleur moyen théorique de réduire les émissions de GES est de leur donner une valeur. Si l'on considère que le biogaz et les carburants liquides produits à partir de la biomasse agricole se substituent à des énergies fossiles, cette réduction d'émissions pourrait être doublée. Cette sorte d'équivalence ne tient pas compte des émissions liées aux processus industriels associés à l'amont et à l'aval de la production agricole.

### Production de céréales

Nous nous focalisons sur les productions (en grains) de céréales à paille, au nombre de 7 dans le modèle, qui occupent plus du tiers de la SAU de l'UE représentée dans le modèle. Environ 17 % des céréales produites sont directement consommées pour l'alimentation animale chez les polyculteurs éleveurs (cf. Figure 3). Les 83 % restants sont mis sur le marché (dont une grande partie est destinée à l'alimentation animale).

Dans le modèle et pour ce groupe de cultures, les rendements et les charges en engrais et en eau d'irrigation sont pour une majorité de groupes type recalculés, la recherche de la solution optimale faisant jouer un effet intensif (productivité par hectare de terre) et un effet extensif



**Figure 3. Production de céréales à paille dissociant l'autoconsommation et la mise sur le marché (Mt) – moyenne sur les 6 années RICA 2013-2018**

(réallocation de la terre parmi les cultures). Avec ces deux effets, la solution change quand les prix changent. À ce titre, la production augmente avec le prix des coproduits principalement au bénéfice de la mise sur le marché. Une partie de cette augmentation est cependant perdue lorsque les productions pérennes sont favorisées (SCN4), et plus encore avec l'instauration d'un prix sur les émissions de GES (SCN5), sans pour autant retomber sous le niveau de référence.

### Allocation de la SAU

La réallocation de la SAU est significative d'un scénario à l'autre et ceci dès le scénario SCN1. On propose de la mesurer en considérant les 9 groupes de cultures qui sont : (1) blé tendre, (2) maïs grain et blé dur, (3) autres céréales, (4) oléoprotéagineux, (5) cultures «industrielles» (betterave à sucre, pomme de terre, lin, coton, tabac), (6) fourrages et prairies temporaires, (7) prairies permanentes, (8) friches, (9) cultures pérennes dans le cas présent à récolte annuelle (*miscanthus* et *switchgrass*), comme illustré sur la Figure 4.

Par rapport à la référence, la surface occupée par les 3 groupes de céréales augmente jusqu'à 10 % selon les scénarios. Les autres cultures en rotation entre elles sont relativement peu impactées, à part les fourrages. Les variations les plus significatives concernent les prairies permanentes à la baisse croissante d'un scénario à l'autre (passant de 30 à 12 Mha), tandis que varient

significativement à la hausse les friches (de 5 à 12 Mha) et les cultures pérennes (de 0,5 en SCN1 à 10 Mha en SCN4 et SCN5). La variation des surfaces en prairie «permanente» doit être comprise comme représentant une perte significative de valeur en alimentation animale (par ailleurs potentiellement plus méthanogène que d'autres aliments), et comme étroitement associée aux herbivores pénalisés par les scénarios SCN4 et SCN5.

### Effectif animal

Dans le modèle, les catégories animales telles que les ovins, caprins, porcs, volailles et bovins d'âges les plus élevés (vaches et bœufs) sont directement soumises à une contrainte d'ajustement déterminant l'amplitude de variation à la hausse comme à la baisse. Les autres catégories bovines sont susceptibles de varier librement en respectant les contraintes du module de démographie bovine. Toutes les catégories sont susceptibles de varier quand le taux d'ajustement varie, en particulier sous l'effet indirect de la valorisation des effluents d'élevage et du prix des émissions de GES, via l'alimentation animale et le mode de gestion des effluents. Le taux d'ajustement retenu dans les scénarios n'est significatif (15 %) qu'à partir du scénario SCN3.

L'effectif animal, évalué en UGB\*an, agrège tous les troupeaux sur la base d'une équivalence RICA entre les différentes catégories. Comparé à

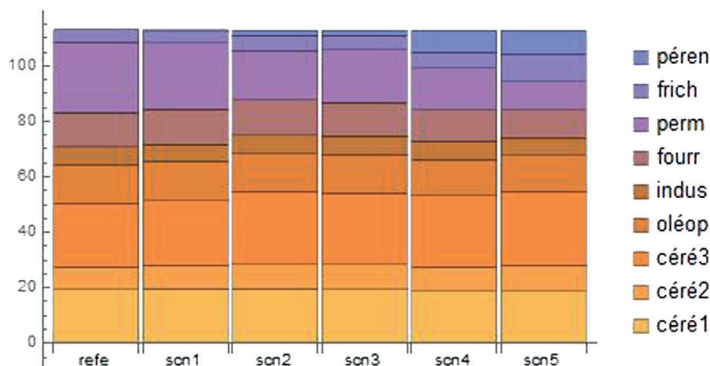


Figure 4. Allocation de la SAU entre groupes de cultures – moyenne sur 6 années RICA 2013-2018 (Mha)

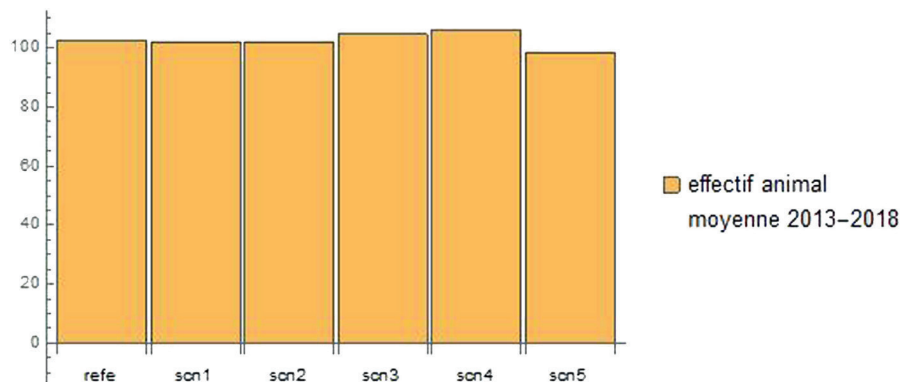


Figure 5. Effectif animal – moyenne sur 6 années RICA 2013-2018 (M UGB)

son niveau de référence, le troupeau augmenterait de 5 % dans le cas SCN4 qui lui est le plus favorable, et baisserait de 5 % dans le scénario SCN5 (cf. Figure 5). Les deux scénarios qui ne diffèrent que par l'introduction d'un prix sur les émissions de GES ont des impacts contrastés traduisant la complexité des processus pris en compte par le modèle (entre autres, la valeur implicite des aliments du bétail produits et consommés sur la ferme, la valeur implicite des apports d'azote organique, l'effectif animal, la répartition des cultures selon leur rentabilité relative).

### Sécurité alimentaire

On oppose souvent aux politiques de promotion des biocarburants et aux politiques à finalité environnementale de fragiliser la sécurité alimentaire. Sur la base de données de la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), on estime des bilans nets en calories alimentaires et en protéines alimentaires. Ces bilans sont crédités des productions de l'agriculture (grains) et de l'élevage (lait et viande) qui « sortent » de l'exploitation agricole. Ils sont débités des quantités entrantes (aliments concentrés du bétail). Les prairies, les fourrages et l'autoconsommation de céréales sont neutres. Ces bilans sont calculés en équivalent blé tendre et les résultats sont présentés sur la Figure 6.

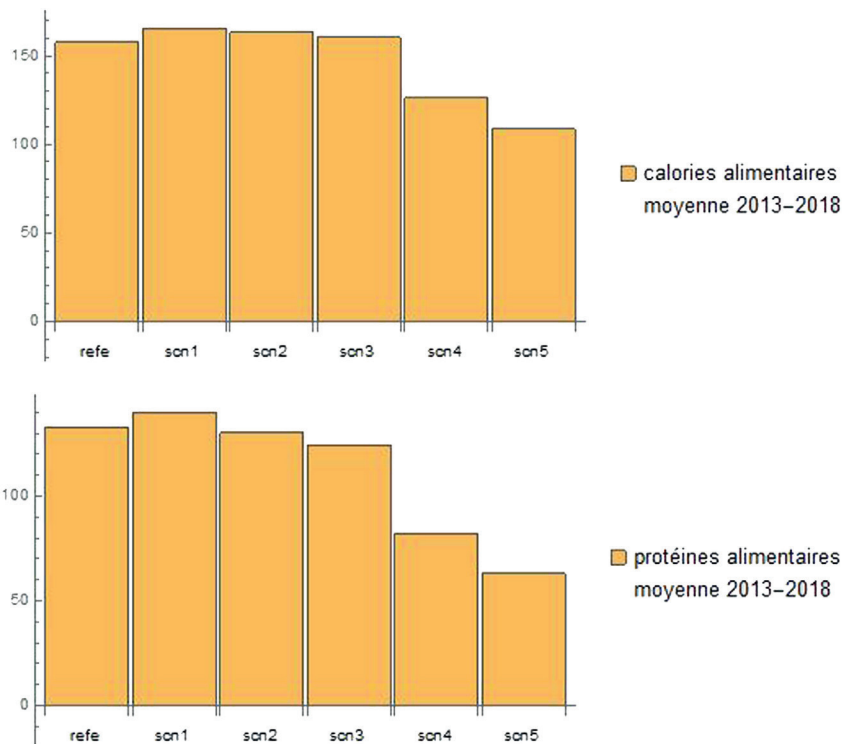
Il convient de noter que ce sont ces résultats qui présentent une forte variabilité entre

les années RICA. Le niveau de référence (REFE) varie de 92 millions de tonnes de blé ( $Mt_{blé}$ ) (en 2016) à 220  $Mt_{blé}$  (en 2018) en calories et de 69  $Mt_{blé}$  (en 2016) à 193  $Mt_{blé}$  (en 2018) en protéines alimentaires. Dans le scénario SCN5, ces bilans restent positifs mais faibles en calories pour les années 2015 et 2018 (respectivement 56 et 29  $Mt_{blé}$ ) et fragiles en protéines pour ces mêmes années (respectivement 2 et -25  $Mt_{blé}$ ). On notera que le bilan en protéines est déjà négatif (-6  $Mt_{blé}$ ) dans le scénario SCN4 pour l'année 2018. Dans ces estimations, il est probable que les contextes météorologique (sécheresses, vagues de chaleur, inondations) et économique (prix) jouent un rôle important, mais les scénarios impactent fortement ces bilans.

### Apports d'azote aux cultures

Dans notre analyse, les apports d'azote sont à prendre en considération de par leur poids dans les émissions de GES et dans les interactions entre productions animales et végétales via les effluents d'élevage et les coproduits de la fermentation méthanique. Ils sont également importants dans la mesure où ils sont à l'origine, en amont de l'agriculture, de l'émission significative de  $CO_2$  lors de la fabrication industrielle d'engrais de synthèse. Ils ont pu jouer à ce titre un rôle dans la controverse alimentée par [Crutzen et al., 2008].

Comparée au niveau de référence, la dépense en engrais de synthèse augmenterait en moyenne



**Figure 6. Bilan net de calories (G) et protéines (D) alimentaires – moyenne sur 6 années RICA 2013-2018 (Mt<sub>blé</sub>)**

de 7 % sous l'effet de la hausse du prix des coproduits dans le scénario SCN1 et diminuerait de 4 % dans les trois scénarios favorisant le biométhane et les productions pérennes. Cependant, la variation interannuelle est forte avec une amplitude supérieure à 35 % de la valeur moyenne. L'évolution de la fraction azotée d'origine minérale est proche de ces valeurs pour les mêmes scénarios. Elle diminuerait de 35 % avec le scénario instaurant le prix du dioxyde de carbone.

L'apport d'origine organique provenant des effluents d'élevage et digestats est évalué en équivalent azote de référence (fonction de l'assimilabilité comparé à l'azote de synthèse). Il augmente fortement (triple) dès que le prix du biométhane fait émerger cette filière (SCN2 à SCN5). Dans le dernier scénario SCN5, la part de la consommation d'azote organique par les cultures passe de 6 à 30 % de la consommation d'azote de synthèse. Ces résultats sont illustrés par la Figure 7. Il est à noter que tout

l'azote issu des effluents d'élevage peut ne pas être consommé, en particulier sous l'effet d'une limite d'épandabilité de l'azote d'origine organique fixée à 170 kgN/ha.

### Autres indicateurs de coût et d'externalité

La sollicitation du système agricole pour qu'il produise des biens à finalité énergétique a des répercussions modérées sur les autres charges variables que sont l'eau d'irrigation et les pesticides. En termes de dépense, le scénario le plus demandeur de pesticides est SCN2, à 6 % en moyenne annuelle au-dessus de la moyenne de référence (REFE). SCN2 conduit à la plus grande part de cultures de vente dans la SAU (cf. Figure 4), il est également le scénario le plus demandeur en eau d'irrigation, avec une hausse de 10 % comparé à la référence.

Les pertes d'azote peuvent être estimées dans le modèle par couplage avec un modèle

## Agroénergie et émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne

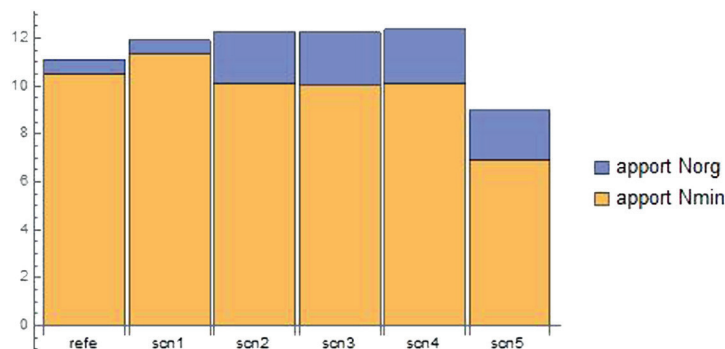


Figure 7. Apports d'azote aux cultures – moyenne sur 6 années RICA 2013-2018 (millions de tonnes d'azote – MtN)

de culture. Elles varient de manière contrastée selon les scénarios. Les niveaux les plus élevés, comparativement à la référence, sont atteints avec les trois scénarios SCN2, SCN3, SCN4, avec des accroissements de 14 %, 17 % et 19 % concernant respectivement les pertes de N sous forme  $N_2O$ ,  $NH_3$  et  $NO_3$  (en moyenne annuelle pour chacun de ces trois scénarios). Ces accroissements sont imputables en partie au recyclage des digestats dont les facteurs de perte sont complexes à estimer. Notons que, rapportées aux apports d'azote, les pertes d'azote associées aux surfaces cultivées sont, en moyenne sur les six années, respectivement de l'ordre de 1,9 % ( $N_2O$ ), 3,5 % ( $NH_3$ ), 4,5 % ( $NO_3$ ).

### Marge, subvention bioénergie et taxe « carbone »

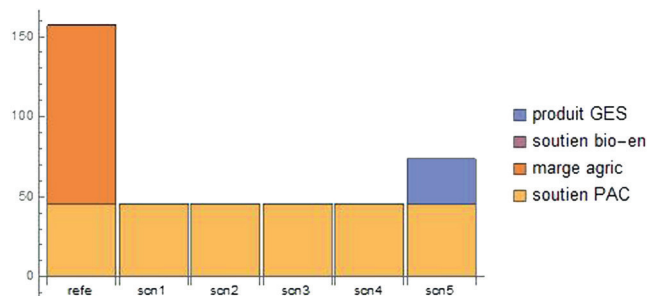
Le résultat économique du système productif est présenté en dissociant l'ensemble des aides « PAC » de la marge brute, leur montant s'élevant

à 45,5 milliards d'euros environ et variant peu d'un scénario à l'autre. On retire également de la marge brute ce que l'on peut considérer comme un soutien des prix des produits destinés à la bioénergie. Les niveaux de soutien correspondent à la hausse de prix proposée entre les scénarios SCN3 et SCN4. Les soutiens pour les trois catégories de produits — coproduits de culture, cultures pérennes, biométhane — et pour les 5 scénarios figurent dans le Tableau 2.

La marge nette varie sensiblement d'un scénario à un autre avec l'hypothèse ajoutée quant à la détermination du soutien à la bioénergie. Dans le scénario SCN3, la hausse rapportée à la référence atteint 14 % en moyenne sur les 6 années. Le gain généré par les soutiens à la bioénergie, hausse des prix et subventions confondues, atteint deux fois le soutien de la PAC dans le scénario SCN4, à mettre en rapport avec un fort potentiel de bioénergie d'origine agricole. La restitution aux agriculteurs de façon forfaitaire du produit de

	SCN1	SCN2	SCN3	SCN4	SCN5
coproduits	15 €/tMS	15 €/tMS	15 €/tMS	32,5 €/tMS	32,5 €/tMS
pérennes	20 €/tMS	20 €/tMS	20 €/tMS	55 €/tMS	55 €/tMS
biométhane		0,5 €/m <sup>3</sup>	0,5 €/m <sup>3</sup>	1 €/m <sup>3</sup>	1 €/m <sup>3</sup>

Tableau 2. Tableau récapitulatif des soutiens apportés aux produits destinés à la bioénergie, par scénario



**Figure 8. Marge nette, soutiens PAC et bioénergie, taxe GES – moyenne sur 6 années RICA 2013-2018 (10<sup>9</sup> €)**

la «taxe» sur les GES (100 €/tCO<sub>2</sub>eq), pour un total de 28,3 milliards d’euros en moyenne sur les 6 années, approche l’augmentation du soutien aux bioénergies entre SCN3 et SCN4. Introduire un prix des GES affecterait plus le bilan de calories alimentaires que la production de bioénergies, mais le bénéfice environnemental est notable avec la baisse de 18 % des émissions de GES. La Figure 8 résume tous ces résultats.

### 3. Discussion

Il apparaît donc que le secteur agricole européen a un fort potentiel de production de biomasse énergie, en sortie d’exploitation, et ce sans fortement dégrader l’offre alimentaire ni les impacts sur l’environnement. Si tout le potentiel était effectivement transformé, 20 % de la demande européenne en carburant routier et en gaz pourrait être satisfaite. La première limite vient avec le fait qu’après être mise en bord de champ, la biomasse doit être stockée et transportée pour être transformée et utilisée. De ce point de vue, le potentiel «biogaz» apparaît bien plus aisément mobilisable que le potentiel «biocarburant». Ce dernier dépend d’un secteur de transformation mobilisant des capacités industrielles à développer et auxquelles il conviendra de garantir la sécurité d’un approvisionnement variable dans le temps et dispersé géographiquement. La présente analyse n’intègre pas ces éléments mais elle montre que le secteur agricole, indispensable à court et moyen terme pour la production de bioénergies, a la capacité de satisfaire la

demande de biomasse pour l’énergie sans dommage additionnel pour l’environnement.

Sur le plan environnemental, en insistant sur le fait que notre approche se limite au périmètre de l’exploitation, les émissions de GES directement liées aux activités agricoles diminuent légèrement en moyenne annuelle dans les 4 scénarios ne taxant pas les émissions, même quand des prix incitatifs élevés sont proposés pour les produits «2G». Si les cultures de vente et leurs intrants sont sollicités et développés en conséquence, les changements d’occupation des terres agricoles au détriment des fourrages et prairies compensent par une baisse des émissions de méthane une hausse modérée des émissions de protoxyde d’azote. Il est cependant difficile d’attribuer de façon simple ces évolutions aux processus pris en compte par le modèle, dans lesquels interviennent le caractère plus méthanogène des aliments produits puis consommés directement à la ferme et les facteurs d’assimilation de l’azote par les cultures variant selon l’origine organique ou minérale des apports d’azote.

Le changement important d’allocation des terres quand il affecte les prairies permanentes est souvent critiqué au regard des bénéfices environnementaux qui leur sont conférés [Schils et al., 2022]. À effectif animal constant, une production animale plus intensive affecterait le bien-être animal, la biodiversité et le stockage de carbone dans les sols. Ces impacts sont atténués du fait de la baisse de l’effectif animal dans les scénarios proposés. Les cultures pérennes de type miscanthus

permettent de satisfaire à moindre coût des objectifs énergétiques bien plus ambitieux que ce qu'offrent les coproduits de type paille dont la production, liée aux céréales, est limitée. Outre le fait qu'elles se substituent en partie à des cultures traditionnelles, les cultures pérennes pourraient se révéler problématiques quant à leurs besoins en eau susceptibles d'affecter à terme les nappes.

La sécurité alimentaire est primordiale dans le questionnement des politiques publiques impliquant l'agriculture et l'élevage. En termes de calories nettes disponibles pour l'alimentation humaine, et plus encore en termes de protéines, l'UE pourrait être confrontée à une baisse importantes de ses marges de manœuvre, et, certaines années (1 sur 6 dans nos scénarios), le solde pourrait être négatif. Cela tient à nos hypothèses, il suffirait d'augmenter l'amplitude de variation de l'effectif animal pour retrouver des marges plus importantes. Le secteur des productions animales joue un rôle clé quand on cherche à combiner sécurité des approvisionnements pour l'alimentation et pour la bioénergie, et réduction des émissions de GES. Diminuer l'effectif animal signifie que diminue également l'alimentation des animaux, en particulier les céréales dont cette alimentation est un des principaux débouchés. Dans cette perspective, les activités animales apparaissent fragiles et susceptibles d'être fortement réduites dès que l'on pénalise les émissions de GES. Cette fragilité est en partie compensée par la valeur implicite des effluents de l'élevage avec la méthanisation et la production jointe de digestats qui sont des apports d'azote facilement assimilables par les cultures. Le secteur industriel de l'alimentation animale ne serait pas pour autant pénalisé, bénéficiant du report des aliments du bétail vers les aliments achetés. En effet, les dépenses d'aliment du bétail augmentent de 2 à 8 % selon les années RICA et les scénarios. On retrouve la problématique *food-feed-fuel* déjà abordée par [Ben Fradj et al., 2016].

La distribution géographique des résultats n'est pas dans le propos de l'article. Des études de même nature l'ont abordée par ailleurs ([Isbasoiu et al., 2021]). Si les impacts des écarts importants entre régions sont absorbés par les circuits déjà

développés d'échange des produits agricoles à finalité alimentaire entre bassins de production et bassins de transformation ou de consommation, le secteur de la transformation des produits agricoles en énergie reste en grande partie à développer. Cela limite la portée de l'article, fragilise toute extrapolation qui pourrait être faite des résultats et justifie les études en cours incorporant les industries transformant les biomasses en agrocarburants.

### Conclusion

L'étude réalisée montre que le secteur agricole européen offre un potentiel important de ressources mobilisables pour satisfaire une demande d'énergie renouvelable en conformité avec la politique énergétique de l'UE, en particulier la directive RED II. Tant qu'il n'est fait appel qu'aux coproduits de l'agriculture et de l'élevage respectant le caractère renouvelable du système de production, on peut considérer que la conformité est acquise pour un potentiel significatif. Il est possible d'augmenter ce potentiel avec la mobilisation de ressources issues de plantes pérennes, la plus importante étant le miscanthus. Cette dernière apparaît d'autant plus profitable qu'elle est produite sur des terres de qualité propices aux cultures conventionnelles. Cependant, par le jeu de la réallocation des terres intégrant fourrages et prairies, la surface et la production conventionnelles agrégées à l'échelle de l'UE pourraient ne pas diminuer. Le potentiel énergétique européen obtenu en «bord de champ», dans le cadre de scénarios limitant à 10 % la part de la culture énergétique la plus profitable dans la SAU, pourrait atteindre 20 % des demandes en carburant et en gaz de substitution.

L'un des aspects novateurs de l'étude porte sur l'arbitrage entre les biomasses à finalité carburant et à finalité gaz de substitution que pourraient offrir les exploitations agricoles. La compétition est cependant limitée par le processus de production, à la fois du côté des coproduits de cultures dont la valorisation dépend principalement de la valorisation des produits conventionnels, et du côté des effluents d'élevage qui, du moins dans le modèle, ne sont valorisables pour l'énergie que

par la méthanisation. La complexité des processus pris en compte dans le modèle implique différents niveaux d'interactions au sein des exploitations agricoles, il est alors difficile d'évaluer la nature «substitut» ou «complément» des produits lors de leur transformation. Ainsi, une partie des céréales est consommée à la ferme pour l'alimentation animale en complément ou substitut des fourrages et des aliments concentrés achetés, impactant la rentabilité des activités de l'élevage et celle des produits joints tels que les effluents, source d'azote directement pour les cultures ou indirectement via les digestats issus de la méthanisation. Au sein du nexus «*feed-food-fuel*», l'élevage et l'alimentation animale sont un élément clé avec des acteurs qui, sans être systématiquement les «perdants», offrent des marges de manœuvre au système agricole dans son ensemble et auxquels il est demandé de produire des aliments et de l'énergie.

La controverse soulevée par [Crutzen et al., 2008], quant à l'augmentation des émissions de GES attribuée à un hectare de culture dont le produit principal est valorisé en énergie («1G») se substituant à des ressources fossiles, est également revisitée dans cet article. Notre approche diffère en ce sens que nous retenons le système agricole dans son ensemble et, dans un premier temps, la valorisation énergétique des seuls coproduits de l'agriculture et de l'élevage («2G»). L'important potentiel de production d'énergie qu'il est possible d'obtenir pour remplacer les ressources fossiles n'entraîne pas de hausse des émissions de GES d'origine agricole. Ce serait encore le cas si l'on favorisait les cultures pérennes à finalité énergétique, avec une hausse du potentiel bioénergétique en bord de champ sans hausse des émissions de GES. C'est la résultante de la réallocation des terres agricoles entre cultures, de l'ajustement des effectifs animaux et de la modification des apports azotés aux cultures. Mais l'insertion des cultures énergétiques pérennes dans le système productif affecterait sensiblement le bilan net en calories et protéines alimentaires de l'UE.

Les politiques publiques européennes sont définies de façon à ne pas dégrader la durabilité du système de production. En termes d'émissions

de GES, il serait cohérent de «taxer» les émissions de GES à hauteur du «soutien» dont pourraient bénéficier les productions d'énergie d'origine agricole sur la base de la réduction d'émission permise par la substitution de ressources fossiles. Le prix proposé de 100 €/tCO<sub>2</sub>eq montre que l'on peut obtenir un niveau élevé de biomasse à finalité énergétique tout en diminuant sensiblement, de 18 %, les émissions de GES. La contrepartie est une dégradation accrue de la sécurité alimentaire. D'autres critères environnementaux devront être pris en compte. Les résultats évoqués sur les pertes d'azote autres que le protoxyde d'azote, sur la demande en pesticides et sur l'eau d'irrigation ne sont qu'une amorce de ce qu'il conviendrait d'approfondir. L'analyse agrégée à l'échelle européenne ne suffirait pas, en particulier lorsque l'on s'intéresse aux ressources en eau et à leurs polluants. Même si le modèle permet une analyse géographique plus fine, elle n'est pas dans le périmètre de la présente étude.

Il apparaît intéressant et important de revisiter les arbitrages entre la sécurité énergétique, la sécurité alimentaire et l'environnement qui pourraient être proposés par les autorités publiques. Les marges de manœuvre apparaissent importantes, tant que l'on ne priorise pas les échelons nationaux et régionaux. Ces marges et leur financement semblent d'autant plus importants que l'équilibre entre produit des taxes environnementales et dépense en subventions est compatible avec tout ou partie de la redistribution du solde, afin de compenser les pertes économiques des «perdants».

#### **REMERCIEMENTS**

Les auteurs remercient le groupe TTE-OT pour le soutien apporté à l'enrichissement du modèle AROPAj, en particulier dans le domaine de la production de bioénergie. Cet article est également redevable à IFPEN dans le cadre du projet BIOC4M financé par l'ADEME.

## NOTES

1. [https://di.unfccc.int/time\\_series](https://di.unfccc.int/time_series).
2. Les biocarburants de 1<sup>re</sup> génération sont élaborés à partir d'une matière première en concurrence avec l'alimentation humaine ou animale (par exemple le blé pour le bioéthanol ou le colza pour le biodiesel), tandis que les biocarburants de 2<sup>e</sup> génération (ou «avancés») sont issus de la transformation de la lignocellulose contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers, dans des plantes provenant de cultures dédiées (e.g., miscanthus, *switchgrass*) ou de la valorisation des déchets industriels.
3. L'UGB est une unité employée pour pouvoir comparer ou agréger des effectifs animaux d'espèces ou de catégories différentes. Par exemple 1 vache laitière équivaut à 1 UGB et 1 truie reproductrice à 0,5 UGB.
4. Eurostat, Final energy consumption in transport – detailed statistics, [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final\\_energy\\_consumption\\_in\\_transport\\_-\\_detailed\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_transport_-_detailed_statistics).

## BIBLIOGRAPHIE

Ben Fradj N., Jayet P.-A., 2018. “Optimal management of perennial energy crops by farming systems in France: A supply-side economic analysis”, *Biomass and Bioenergy*, (116):113–121, doi: 10.1016/j.biombioe.2018.06.003.

Ben Fradj N., Jayet P.-A., Aghajanzadeh-Darzi P., 2016. “Competition between food, feed, and (bio)fuel: a supply-side model-based assessment at the European scale”, *Land Use Policy*, 52:195-205, 10.1016/j.landusepol.2015.12.027.

Cour des comptes européenne, 2023. Rapport spécial 29/2023 : Aide de l'UE en faveur des biocarburants durables dans les transports – Une trajectoire imprécise, [https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-29/SR-2023-29\\_FR.pdf](https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-29/SR-2023-29_FR.pdf).

Crutzen P.J., Mosier A.R., Smith K.A., Winiwarter W., 2008. “N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, issue 2.

De Cara S., Henry L., Jayet P.-A., 2018. “Optimal coverage of an emission tax in the presence of monitoring,

reporting, and verification costs”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 89 :71-93, doi:10.1016/j.jeem.2018.03.001.

EU, 2018. RED II : Directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables.

EU, 2023. RED III : Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique et modifiant le règlement (UE) 2023/955 (refonte).

Gérard M., Jayet P.-A., 2023. “European farmers' response to crop residue prices and implications for bioenergy policies”, *Energy Policy*, 177 :113561.

Isbasoiu A., Jayet P.-A., De Cara S., 2021. “Increasing food production and mitigating agricultural greenhouse gas emissions in the European union: impacts of carbon pricing and calorie production targeting”, *Environmental Economics and Policy Studies*, 23 : 409-440.

Jayet P.-A., Petsakos A., Chakir R., Lungarska A., De Cara S., Petel E., Humblot P., Godard C., Leclère D., Cantelaube P., Bourgeois C., Clodic M., Bamière L., Ben Fradj N., Aghajanzadeh-Darzi P., Dumollard G., Isbasoiu A., Adrian J., Pilchak G., Bounaffaa M., Barberis D., Assaiante C., Ollier M., Henry L., Florio A., Chiadmi I., Gossiaux E., Ramirez E., Gérard M., Reineix J., Zuravel O., Baldi L., Weng M., 2023. The European agro-economic model AROPAj, <https://hal.science/hal-04109872v1>.

Quinet A., et al., 2019. The value for climate action: a shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies, <https://www.strategie.gouv.fr/files/files/Publications/English%20Articles/The%20value%20climate/fs-the-value-for-climate-action-final-web.pdf>.

Schils R.L., Bufe C., Rhymer C.M., Francksen R.M., Klaus V.H., Abdalla M., Milazzo F., Lellei-Kovács E., ten Berge H., Bertora C., Chodkiewicz A., Dămătîrcă C., Feigenwinter I., Fernández-Rebollo P., Ghiasi S., Hejduk S., Hiron M., Janicka M., Pellaton R., Smith K.E., Thorman R., Vanwalleghem T., Williams J., Zavattaro L., Kampen J., Derckx R., Smith P., Whittingham M.J., Buchmann N., Price J.P.N., 2022. “Permanent grasslands in Europe: Land use

change and intensification decrease their multifunctionality”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330 : 107891.

## BIOGRAPHIES

Directeur de recherche INRAE, **PIERRE-ALAIN JAYET** est actuellement chargé de mission dans l'unité Paris-Saclay Applied Economics. Diplômé de l'École des Mines Paris et de l'ENSAE, docteur ingénieur en physico-chimie des matières premières, il est l'auteur de nombreuses publications, portant entre autres sur les relations entre l'agriculture européenne et l'environnement. Il a développé le modèle agroéconomique ARO-Paj mobilisé récemment pour évaluer le coût de réduction des émissions agricoles de gaz à effet de serre et le potentiel de production énergétique à partir des biomasses agricoles.

**OLGA ZURAVEL** est titulaire du master EEET en économie de l'énergie. Engagée comme ingénieure de recherche à l'INRAE, elle a contribué à l'évaluation du potentiel en biométhane et en biocarburants offert par l'agriculture de l'Union européenne. Elle prépare actuellement un doctorat à l'Université Paris-Saclay, dans le cadre d'un projet piloté par IFP Energies nouvelles sur l'analyse de cycle de vie des performances environnementales des carburants alternatifs liquides.

**LAURE BAMIÈRE** est agroéconomiste, ingénieure de recherche INRAE au sein de l'unité Paris-Saclay Applied Economics. Titulaire d'un master en économie de l'environnement et des ressources naturelles et d'un doctorat en économie de l'environnement d'AgroParisTech, elle a rejoint l'INRAE en 2003, où ses travaux portent sur les liens entre l'agriculture, l'énergie et l'environnement. Elle a été la pilote économiste de deux études nationales de référence sur le potentiel d'atténuation du changement climatique du secteur agricole français. Elle s'intéresse également aux arbitrages entre les différents usages possibles de la biomasse agricole.

### À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- L'industrie des hydrocarbures face aux enjeux de la transition énergétique, *Fabrice Bertoncini, Jean-Pierre Burzynski, Pierre Marion, Jérôme Sabathier (n° 645, juillet-août 2019)*
- Biomasse et neutralité carbone : méthode d'aide à la décision pour les choix publics et privés, *Monique Axelos, Patrice Geoffron, Pierre Vaiss (n° 666, mai-juin 2023)*
- Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion, *Nikolaos Papastefanakis, Valentin Russeil, Sandrine Selosse (n° 670, janvier-février 2024)*

À retrouver sur [www.larevuedelenergie.com](http://www.larevuedelenergie.com).