

# Trajectoire à long terme des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture française (1852-2014) : de l'agriculture traditionnelle aux systèmes spécialisés intensifs

Josette Garnier<sup>1\*</sup>, Julia Le Noë<sup>1</sup>, Audrey Marescaux<sup>1</sup>, Alberto Sanz-Cobena<sup>2</sup>, Luis Lassaletta<sup>2</sup>, Marie Silvestre<sup>3</sup>, Vincent Thieu<sup>1</sup>, Gilles Billen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, UMR Metis, Paris

<sup>2</sup> Universidad Politecnica de Madrid, CEIGRAM, ETSI Agronomos, Madrid

<sup>3</sup> CNRS/SU, FIRE, Paris

\* josette.garnier@upmc.fr

## Résumé

*L'agriculture française a connu une modernisation assez tardive, mais extrêmement rapide au cours des années 1955-1985. En 1852, les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur de l'agriculture et de la forêt étaient d'environ 30 Mton CO<sub>2</sub>-eq/an. ces émissions ont doublé entre 1955 et 2000, passant de 52 à 120 Mton CO<sub>2</sub>-eq/an. Depuis, malgré l'arrêt des politiques publiques productivistes et les mesures agro-environnementales, les émissions de GES se sont maintenues à peu près au même niveau (114 Mton CO<sub>2</sub>-eq/an en 2014). Dans le bassin de la Seine N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> sont à peu près d'égale importance dans le total des émissions ; le méthane domine dans les autres régions. L'exploration de deux scénarios prospectifs à l'horizon 2050 montre que seul celui qui implique des modifications structurelles profondes du système agro-alimentaire, incluant la réduction de la consommation de protéines animales, la reconnexion de l'agriculture et de l'élevage et la généralisation des pratiques d'agro-écologie, permet de réduire d'un facteur 2 les émissions de GES.*

*Ce rapport est le résumé d'un article soumis à Science of the Total Environment.*

## Points clefs

- ✓ *Les émissions de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> de l'agriculture ont été estimées sur la période 1852-2014 à l'échelle des régions agricoles françaises.*
- ✓ *Elles doublent durant la période 1955-2000 atteignant 120 000 ktonCO<sub>2</sub>-eq par an, puis se stabilisent malgré les mesures agro-environnementales.*
- ✓ *Seuls des changements structurels profonds pourraient permettre de réduire de moitié les émissions futures de l'agriculture.*

## Introduction

L'accroissement depuis le début de l'ère industrielle des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES), en particulier le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), est responsable du changement climatique global (IPCC, 2008 ; 2018). A l'échelle du monde, les activités agricoles et les changements d'usage du sol contribuent pour 24% au réchauffement climatique.

Les facteurs de contrôle des émissions agricoles de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> sont très différents pour ces trois gaz. Les flux de N<sub>2</sub>O sont associés aux applications de fertilisants azotés minéraux (Bouwman, 1996; Skiba et al., 1996; Smith et al., 1997; ENA, 2011) ou organiques (Aguilera et al., 2013). Les flux de méthane sont essentiellement issus de la fermentation entérique des ruminants ou du stockage des déjections animales (Moss et al., 2000; Vermorel et al., 2008, Springmann et al. 2018). Le bilan des émissions de CO<sub>2</sub> par les

sols agricoles dépend de manière complexe du bilan des apports de carbone organique humifié et de leur minéralisation à long terme (Le Noë et al., 2018) et ne sera évoqué ici qu’en discussion, mais les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l’utilisation de combustibles fossiles pour le travail du sol, le chauffage des bâtiments d’élevage, la fabrication des engrais de synthèse et le transport des intrants agricoles contribuent directement au bilan des gaz à effet de serre de l’agriculture (Gingrich et al., 2007, Dyer et al., 2010 ; Aguilera et al., 2015).

Sur la base d’une reconstitution de la trajectoire historique de l’agriculture française depuis le milieu du XIXe siècle en termes de flux d’azote, de phosphore et de carbone à l’échelle de 33 régions agricoles (Le Noë et al., 2018), nous nous attachons ici, dans la ligne de travaux antérieurs sur les émissions de GES du bassin de la Seine (Garnier et al., 2009; 2013; Marescaux et al., 2018), à établir un bilan spatialisé des émissions des trois gaz à effet de serre au cours de l’évolution historique qui a transformé l’agriculture française d’une agriculture paysanne traditionnelle à une agriculture industrielle et spécialisée. Une attention particulière a été portée sur trois régions : le bassin céréalier de la Seine, le Grand Ouest intégrant la Bretagne, spécialisé en élevage et le Grand Sud-Ouest, avec une culture de maïs dominante.

L’objectif est de mettre en évidence l’effet des principaux changements intervenus au cours de cette évolution historique et d’identifier les leviers d’une possible mitigation des émissions de GES. Dans cet esprit, nous explorerons également deux scénarios de l’avenir de l’agriculture française à l’horizon 2050 (Billen et al., 2018), l’un prolongeant les tendances historiques d’intensification, d’ouverture et de spécialisation, l’autre impliquant un changement radical du système agro-alimentaire, avec une réduction de la part de protéines animales dans le régime alimentaire humain, une reconnexion de l’agriculture et de l’élevage, et une généralisation des pratiques de l’agriculture biologique.

## 1. Méthodes

### 1.1. Les régions agricoles françaises et leurs caractéristiques

La diversité des conditions physiques du territoire français se reflète dans les 7 hydro-éco-régions qui le composent (Figure 1a).

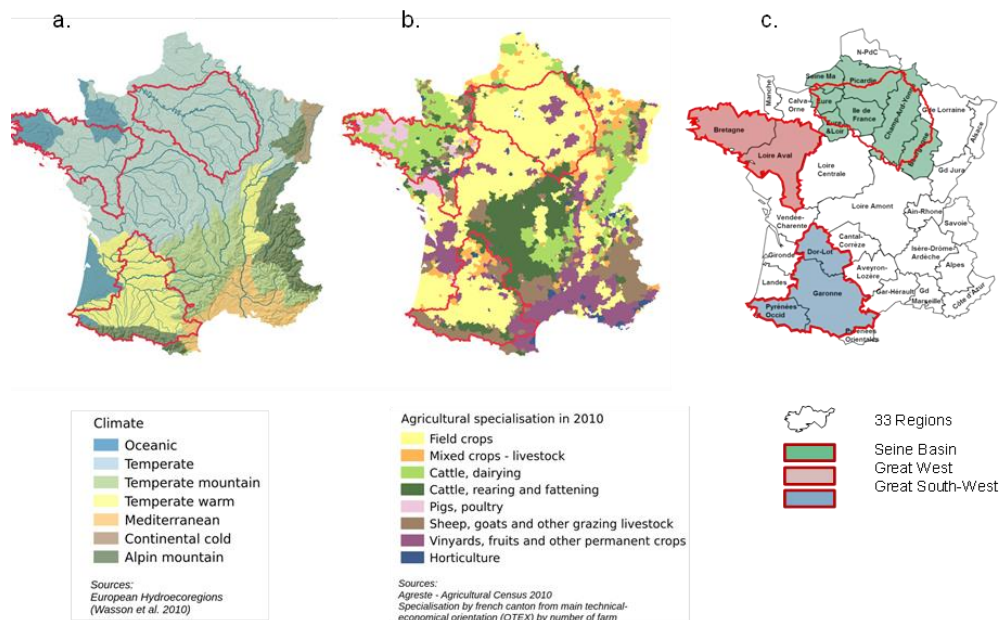


Figure 1. Caractéristiques générales du territoire agricole français (Wasson et al., 2010). a. Hydro-éco-régions et climat associé. b. Orientation techniques des exploitations agricoles actuelles (Agreste, 2010). c. Régions agricoles homogènes (Le Noë et al., 2017) et périmètre des supra-régions choisies pour leur spécialisation agricole.

Les régions de plaine sédimentaire, comme les bassins de la Seine, de la Loire et de la Garonne sont actuellement dominées par des systèmes de cultures spécialisés, largement déconnectés de l'élevage. Le Grand-Ouest, la Bretagne en particulier, s'est spécialisé dans un élevage intensif, largement dépendant d'importations d'aliments pour animaux de l'extérieur. La plus grande partie du reste du territoire, au relief plus accentué, est occupée par des systèmes de polyculture-élevage plus ou moins intensifs. Les franges méditerranéennes et la vallée du Rhône sont dominées par le vignoble (Figure 1b).

Le bilan des GES établi ici sur la période 1852-2014 utilise le découpage en 33 territoires agricoles proposé par Le Noë et al., (2017). Trois supra-régions ont en outre été définies pour faciliter les comparaisons (Figure 1c): (1) le Bassin de la Seine, caractérisé par la céréaliculture en climat tempéré, (2) le Grand-Ouest, région d'élevage intensif spécialisé en climat océanique et (3) le Grand Sud-Ouest, couvrant essentiellement le bassin de la Garonne au climat plus chaud, avec une maïsiculture exportatrice et un élevage partiellement déconnecté.

## 1.2. Reconstruction de l'usage du sol, des pratiques agricoles et des flux d'azote passés

L'approche GRAFS (pour Generic Representation of Agro-Food Systems) est une méthode de comptabilité biogéochimique des flux d'azote, de phosphore et de carbone développée d'abord à l'échelle globale pour l'azote (Billen et al., 2013, 2014, Lassaletta et al. 2014a) puis appliquée aux échelles locales (Garnier et al., 2016) et régionale (Garnier et al., 2015 ; Le Noë et al., 2017). Elle décrit les systèmes agro-alimentaires territoriaux à travers les échanges de matière entre terres arables, prairies, systèmes d'élevage et alimentation humaine. Les pertes de nutriments vers l'hydrosystème peuvent en être estimées. La présente contribution permet d'étendre la capacité de l'approche à l'évaluation des flux atmosphériques.

L'approche GRAFS a été utilisée pour décrire les trajectoires de long terme de l'agriculture française depuis le milieu du XIXe siècle à l'échelle des 33 territoires agricoles mentionnés ci-dessus (Le Noë et al., 2018). Elle offre une vision d'ensemble de l'histoire biogéochimique de l'agriculture au cours de la période, du contexte socio-politique qui l'a accompagnée et des conséquences environnementales qui en découlent.

L'évolution des surfaces forestières, qui ne faisait pas partie de l'analyse GRAFS précédente, a été retracée sur base des données statistiques récentes (1929-2014) (Agreste) complétée par des données anciennes remontant au début du XVIIIe siècle (Cinotti, 1996). A l'échelle de la France entière, la surface forestière est ainsi passée de 6.5 Mha en 1820 à 9 Mha en 1850, 10.7 en 1929 et 16.5 en 2014.

## 1.3. Reconstruction des émissions de gaz à effet de serre

Le bilan d'émission de GES de l'agriculture et de la forêt a été estimé par l'addition des émissions de N<sub>2</sub>O des terres arables, des prairies et des forêts, du CH<sub>4</sub> émis par la fermentation entérique et le traitement des déjections du bétail, et du CO<sub>2</sub> émis par la combustion des combustibles fossiles liée au travail du sol, et à la fabrication et au transport des intrants agricoles. La séquestration de C par les sols a été estimée par ailleurs (Le Noë, 2018), et sera discutée en comparaison du bilan des émissions.

### 1.3.1. Emission de N<sub>2</sub>O

Une revue de la littérature sur les émissions de N<sub>2</sub>O des terres agricoles établie par Garnier et al. (2009) et Cayuela et al. (2017) a été complétée pour un total de 208 observations d'émission annuelle de terres arables, et 138 observations de prairies, avec les valeurs associées de fertilisation azotée, de température et de pluviométrie. Pour les forêts, 38 observations annuelles ont été répertoriées.

Sur cette base, une relation empirique a été établie entre émission annuelle de N<sub>2</sub>O (N<sub>2</sub>O<sub>em</sub>, en kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>), apports d'azote sous forme organique ou minérale (N<sub>imp</sub> en kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>), pluviométrie (Rain, in mm yr<sup>-1</sup>) et température (T, in °C), de la forme :

$$N_2O_{em} = (a + b N_{imp}^d) * (Rain/Rain_{ref})^c * Q_{10}^{T/10} \quad (1)$$

où a, b, c, Rain<sub>ref</sub>, d et Q<sub>10</sub> sont des paramètres à calibrer dans une gamme de valeurs raisonnables. Cette relation suppose une relation non nécessairement linéaire avec les apports d'azote et la pluviométrie, et une

relation exponentielle avec la température. Une routine d’optimisation systématique a été établie pour définir la meilleure combinaison de valeurs de paramètres permettant de minimiser l’écart quadratique entre les observations et leur prédiction par la relation (1). Les valeurs de paramètres retenus sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1. a. Résumé des données rassemblées pour la calibration de la relation entre les émissions de N<sub>2</sub>O et leurs variables de contrôle. b. Relation et valeurs des paramètres optimisées pour (i) les terres arables et les prairies ; (ii) les forêts.

a.

n= 394	Number of values	Inputs, kgN ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Rainfall, mm yr <sup>-1</sup>	Temp, °C	N <sub>2</sub> O emission, kgN-N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>
<b>Cropland</b>	208	0-450	327-1250	2.75-18.5	0.01-11.00
<b>Grassland</b>	138	0-753	400-1837	1.0-16.0	-0.5-18.9
<b>Forest</b>	48	0	607-1239	3.6-10.1	0.17-4.90

b.

$N_2O_{Em} = (a + b \cdot N_{inputs}^d) \cdot [(Rain/Rain_{ref})^c] \cdot [Q10^{(Temp^{\circ}C/10)}]$		
<b>a</b>	kgN/ha/yr	0.15
<b>b</b>	dimless	0.02
<b>c</b>	dimless	1.20
<b>d</b>	dimless	1.00
<b>Q10</b>	dimless	1.20
<b>PLUref</b>	mm/yr	1000
<b>NRMSE</b>	dimless	0.14
<b>Bias</b>	%	0.01

c.

$N_2O_{Em} = a \cdot [(Rain/Rain_{ref})^c] \cdot [Q10^{(Temp^{\circ}C/10)}]$		
<b>a</b>	kgN/ha/yr	1.90
<b>b</b>	dimless	0.00
<b>c</b>	dimless	1.00
<b>d</b>	dimless	0.00
<b>Q10</b>	dimless	1.20
<b>PLUref</b>	mm/yr	1400
<b>NRMSE</b>	dimless	0.23
<b>Bias</b>	%	0.72

Ces relations ont été appliquées pour reconstruire les chroniques d’émission de N<sub>2</sub>O des terres agricoles d’une part et des forêts d’autre part, sur la période 1852-2014. L’évolution de la température pour chaque région agricole a été déterminée à partir des données fournies par la base EOPS pour la période 1950-2017 (<https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php>) et par les données de 28 villes pour les années antérieures (<http://meteo-climat-bzh.dyndns.org/mete100-1783-2018-3-tn-1-0-0.php>).

### 1.3.2. Emission de CH<sub>4</sub>

Les émissions de CH<sub>4</sub> sont estimées à partir des nombres de têtes de bétail et de facteurs d’émissions pour chaque classe d’animal et d’âge, corrigés pour les variations historiques de taux d’excrétion.

Les facteurs d’émissions actuels (en kgCH<sub>4</sub>/tête/an) pour la fermentation entérique et la gestion des déjections sont issus de Garnier et al. (2013, compilés principalement de Vermorel et al. (2008), IPCC (1997) et Zhou et al. (2007)). Un facteur pour les émissions humaines a également été pris en compte Crutzen et al. (1986).

Les changements de taille et de vitesse de métabolisme des espèces domestiques au cours de la période ont été pris en compte sur base du travail de Le Noë et al. (2018) (Tableau 2).

Tableau 2. Relations pour le calcul des taux d’excrétion (y) des bovins, ovins, porcins et équins au cours du temps sur la période 1852-2014. t<sub>max</sub> est le temps en années et dti, a, b, a’ sont des paramètres de la relation sigmoïde ajustée sur les observations empiriques disponibles (voir Le Noë et al., 2018, SMI).

$$\text{Formule générale : } y = b + a(t - 1850) + a' \exp[-(t - t_{max})^2 / dt^2]$$

	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>a'</b>	<b>t<sub>max</sub></b>	<b>dt</b>
	kgN head <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	kgN head <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	yr	yr	yr
<b>Cattle</b>	45	0.05	65	2010	40
<b>Sheep</b>	4	0.02	9	2020	45
<b>Pig</b>	56	0.034	-	-	-
<b>Horse</b>	480	0.3	-	-	-

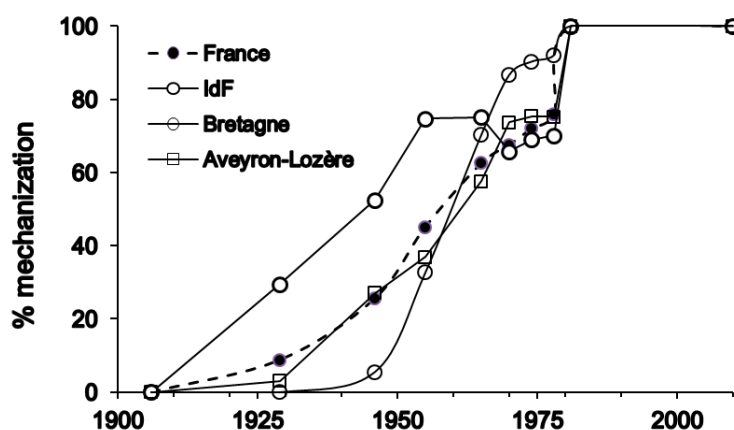
### 1.3.3. Emission de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> liées directement ou indirectement à la combustion des combustibles fossiles par le secteur agricole ont été calculées selon l'approche officielle CLIMAGRI (Doublet et al., 2011) sur base de facteurs d'émission établis pour le travail mécanique du sol et les activités d'élevage, ainsi que pour la production et le transport des intrants agricoles (engrais et aliments pour bétail) (Tableau 3).

*Tableau 3. Coefficients d'émission de CO<sub>2</sub> pour les principales activités agricoles ou agro-industrielles émettrices. 'Fertilizers N' et 'fertilizers P' concernent la production des engrais de synthèse, 'feed to livestock' l'importation d'aliments pour bétail, 'machinery' correspond au coût énergétique de la fabrication des équipements mécaniques, 'energy for cropland, grassland and livestock' à la consommation de combustible fossile pour le travail du sol ou les activités d'élevage (d'après Doublet et al., 2011).*

Major sectors emitting CO <sub>2</sub>	Units	Coefficients
<b>Fertilizers N</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /tonN	1.12
<b>Fertilizers P</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /tonP	0.46
<b>Feed to livestock</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /tonN imported	1.339
<b>Machinery</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /ha/yr	0.026
<b>Energy for cropland</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /ha AUL/yr	0.077
<b>Energy for grassland</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /ha AUL/yr	0.055
<b>Energy for livestock</b>	tonC-CO <sub>2</sub> /LU/yr	0.056

Ces données sont relatives à la situation actuelle de l'agriculture. En ce qui concerne les périodes historiques, elles ont été appliquées en tenant compte d'un degré de mécanisation établi sur base de l'évolution du nombre des chevaux de traits entre 1906 (mécanisation zéro) et 1980 (100% de mécanisation) (Figure 2).



*Figure 2. Evolution du coefficient de mécanisation de 1906 (zéro mécanisation) à 1980 (100% mécanisation), calculé pour quelques régions à partir de l'évolution du nombre de chevaux. La mécanisation intervient plus tôt en Ile de France que dans le reste de la France.*

### 1.4. Scénarios futurs

Les deux scénarios contrastés établis par Billen et al. (2018) pour l'avenir du système agro-alimentaire français à l'horizon 2050 ont été évalués en termes d'émission de GES. Le premier (O/S) s'inscrit dans la poursuite des tendances d'Ouverture et de Spécialisation, soit en grandes cultures sans élevage, soit en élevage intensif spécialisé dépendant d'importations de fourrage exogène, que l'on observe au cours des 50 dernières années. Il reflète une vision libérale de l'avenir de l'agriculture dans une recherche de croissance économique et d'intégration dans la mondialisation, concomitante d'une métropolisation des grandes villes. Le second (A/R/D) imagine une alternative basée sur la recherche de l'Autonomie locale des exploitations vis-à-vis des intrants et des engrais de synthèse, de la Reconnexion de l'agriculture et de l'élevage, et sur une modification du régime alimentaire humain avec une part moins importante de protéines animales.

Le changement climatique à l’horizon 2050 considère une augmentation générale de température de 1.5°C, mais sans changement de la pluviométrie moyenne.

Les deux scénarios sont construits dans le respect des réglementations environnementales actuelles concernant la fertilisation azotée. Dans le scénario OS, la fertilisation est minérale et limitée à un bilan d’azote au sol (surplus) de 50 kgN/ha/an. Dans le scénario A/R/D, les rotations culturales sont celles utilisées dans chaque région en agriculture biologique, avec un recours important aux légumineuses fourragères. La taille du cheptel est limitée à la possibilité de le nourrir localement, soit à l’herbe, soit avec les cultures fourragères locales.

## 2. Résultats

### 2.1. Tendances à long terme de l’agriculture

Les figures 3 et 4 montrent l’évolution des facteurs de contrôle des émissions de GES (température, pluviométrie, apports de fertilisants azotés organiques ou minéraux, nombre de têtes de bétail), et d’un certain nombre de caractéristiques du système agro-alimentaire au cours de la période étudiée. Ces données illustrent le passage d’une agriculture traditionnelle, dominée partout par la polyculture-élevage, à une agriculture spécialisée et intensive, avec ségrégation spatiale des activités de grande culture et d’élevage. Les prairies permanentes reculent partout, alors que la forêt s’étend en surface au détriment des terres agricoles.

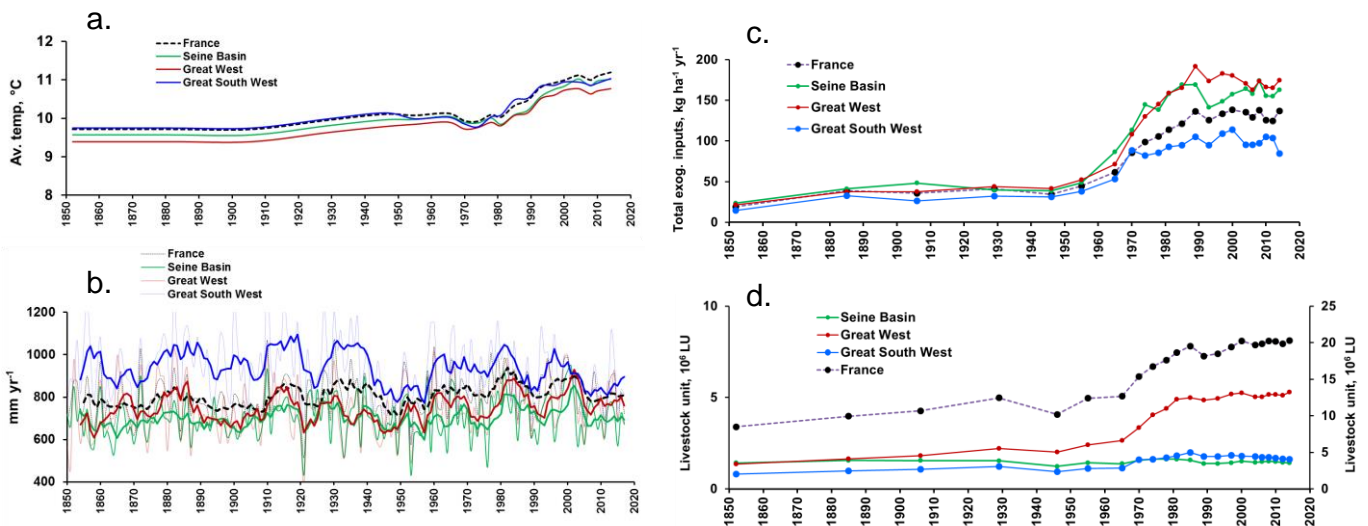


Figure 3. Evolution à long terme (1852-2014) pour la France et les 3 supra-régions: (a) de la température moyenne annuelle ; (b) de la pluviométrie ; (c) des apports d’azote aux sols arables sous forme d’engrais minéraux, de déjections animales ou de retombées atmosphériques ; (d) de la taille du cheptel en termes d’unités gros bétail (LU) définies exog comme correspondant à une excrétion de 85 kgN/an.

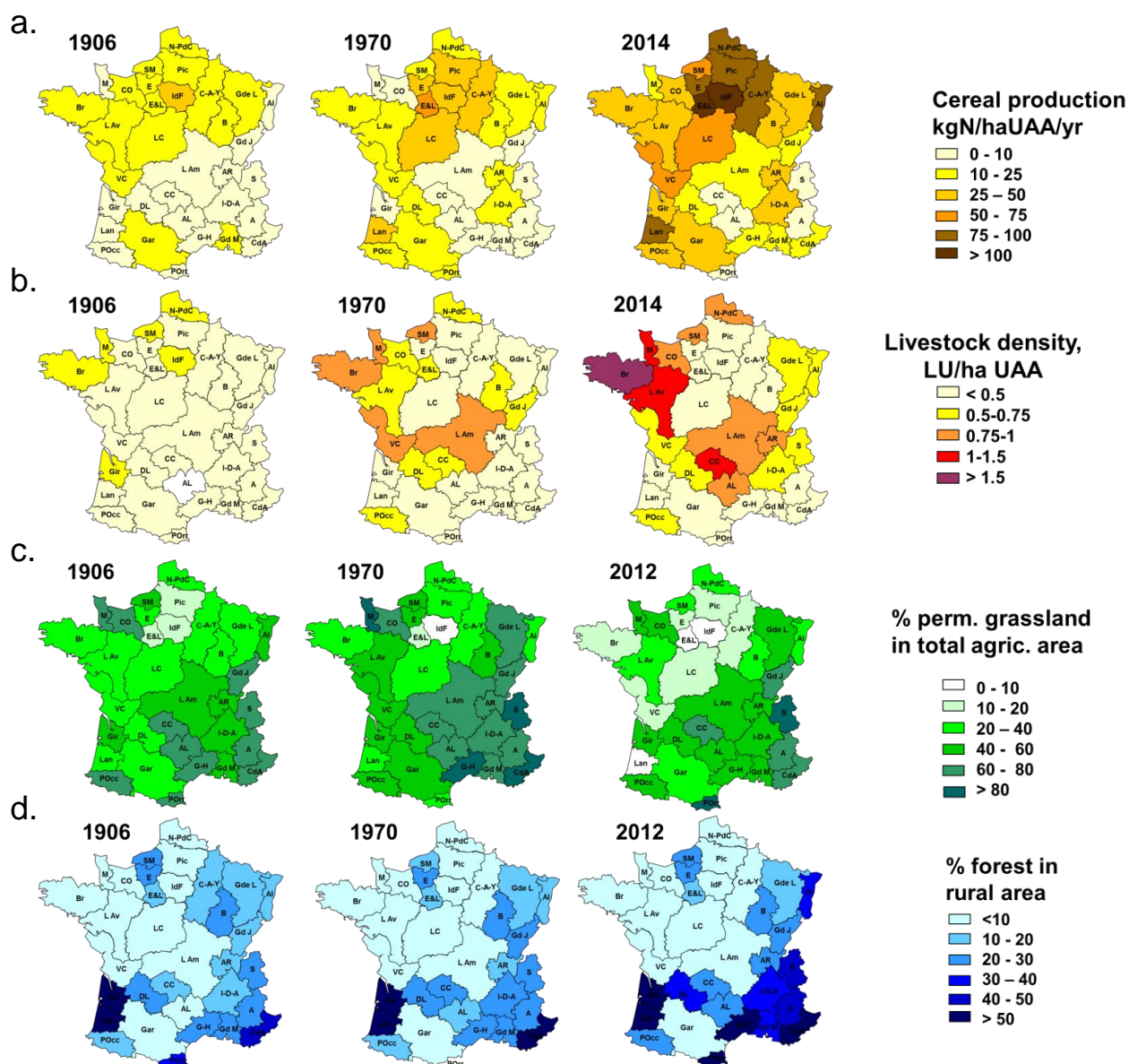


Figure 4. Distribution par régions agricoles de quelques indicateurs de l’agriculture et de la foresterie pour 3 dates représentatives au cours de la période étudiée (1906, 1970, 2014). a. production de céréales ; b. densité du cheptel ; c. pourcentage de surface agricole utile occupée par les prairies permanentes ; d. pourcentage de surface forestière dans la surface rurale totale (terres arables + prairies permanentes + forêts).

## 2.2. Tendances à long terme des émissions de GES

Les variations à long terme des émissions de  $N_2O$  (Figure 5a) reflètent essentiellement celles de la fertilisation des terres agricoles et de la température. En 1906, les valeurs les plus hautes, supérieures à 75  $kgN-N_2O/km^2/an$ , estimées pour l’Île-de-France reflètent l’usage précoce d’engrais minéraux azotés à cette époque, tandis que celles trouvées en Côte-d’Azur résultent d’une combinaison de températures élevées et de fertilisation organique importante. Ces niveaux sont largement dépassés dans toutes les régions dès 1970, et plus encore en 2014, où ils excèdent 175-250  $kgN/km^2/an$ .

La distribution des émissions de  $CH_4$  et son évolution temporelle reflète les tendances de spécialisation régionale et la concentration de l’élevage dans certaines régions périphériques des grandes plaines de culture céréalières dont il est progressivement exclu. A partir d’une valeur assez uniforme de 2000  $kgC-CH_4/km^2/an$  caractéristique des systèmes de polyculture-élevage traditionnels, les émissions de  $CH_4$  culminent actuellement au-dessus de 6000  $kgC-CH_4/km^2/an$  dans les régions d’élevage intensif.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub>, l'absence de mécanisation et le peu de recours aux engrais de synthèse explique les valeurs très faibles estimées pour 1906. La progression de la mécanisation et le recours aux engrais industriels est particulièrement nette, dès 1970, dans le quart nord-est de la France, et plus encore en 2014. L'importation d'aliments pour bétail est responsable d'émissions de CO<sub>2</sub> importantes dans le Grand Ouest en 2014.

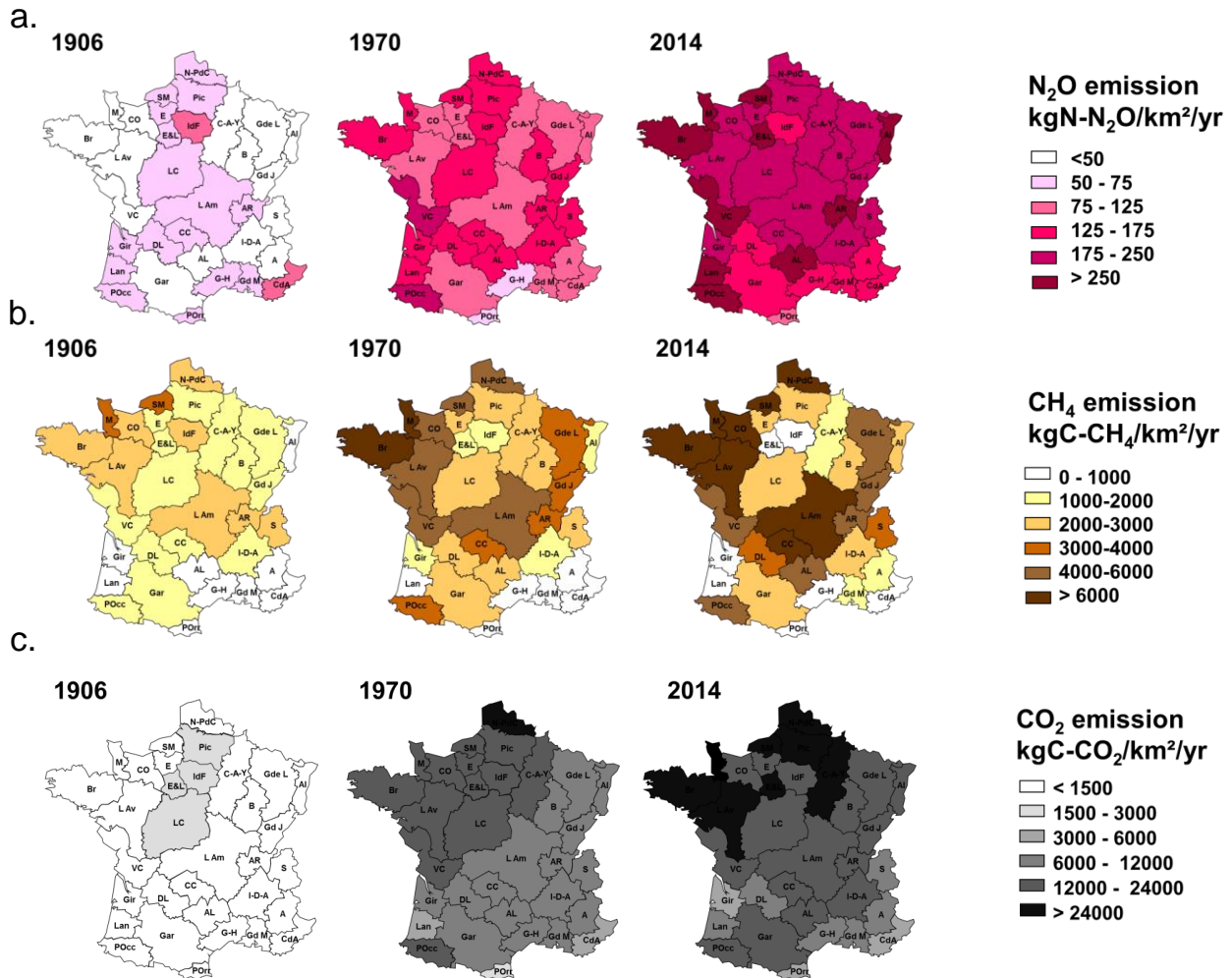


Figure 5. Distribution régionale pour 3 dates représentatives (1906, 1970, 2014) des émissions de GES par km<sup>2</sup> de territoire rural (terres arables, prairies et forêt) (a). N<sub>2</sub>O ; (b) CH<sub>4</sub> ; (c) .CO<sub>2</sub>

### 2.3. Emissions de GES dans deux scénarios contrastés

Dans le scénario Ouverture et Spécialisation (O/S) (Figure 6), les émissions de N<sub>2</sub>O s'accroîtraient de plus de 20% par rapport au niveau actuel à l'horizon 2050, non en raison d'un accroissement de la fertilisation synthétique, qui augmente peu dans ce scénario grâce aux réglementations environnementales, mais à cause des apports accrus aux terres agricoles de déjections d'un cheptel plus abondant. Les émissions de CH<sub>4</sub> suivent la distribution du cheptel, exclu des plaines céréalières, mais concentré dans les zones d'élevage où il atteint systématiquement la densité maximale de 2 UGB/ha SAU. Les émissions de CO<sub>2</sub> s'accroissent considérablement dans les zones d'élevage, surtout en raison de l'importation d'aliments pour bétail.

Dans le scénario d'Autonomie, de Reconnexion et d'un régime Demitarien (A/R/D), les émissions de N<sub>2</sub>O diminuent considérablement, grâce à l'arrêt du recours aux fertilisants de synthèse qui, comme l'abandon des importations de fourrage, limite également les émissions de CO<sub>2</sub>. La réduction du cheptel entraîne une diminution des émissions de CH<sub>4</sub>.



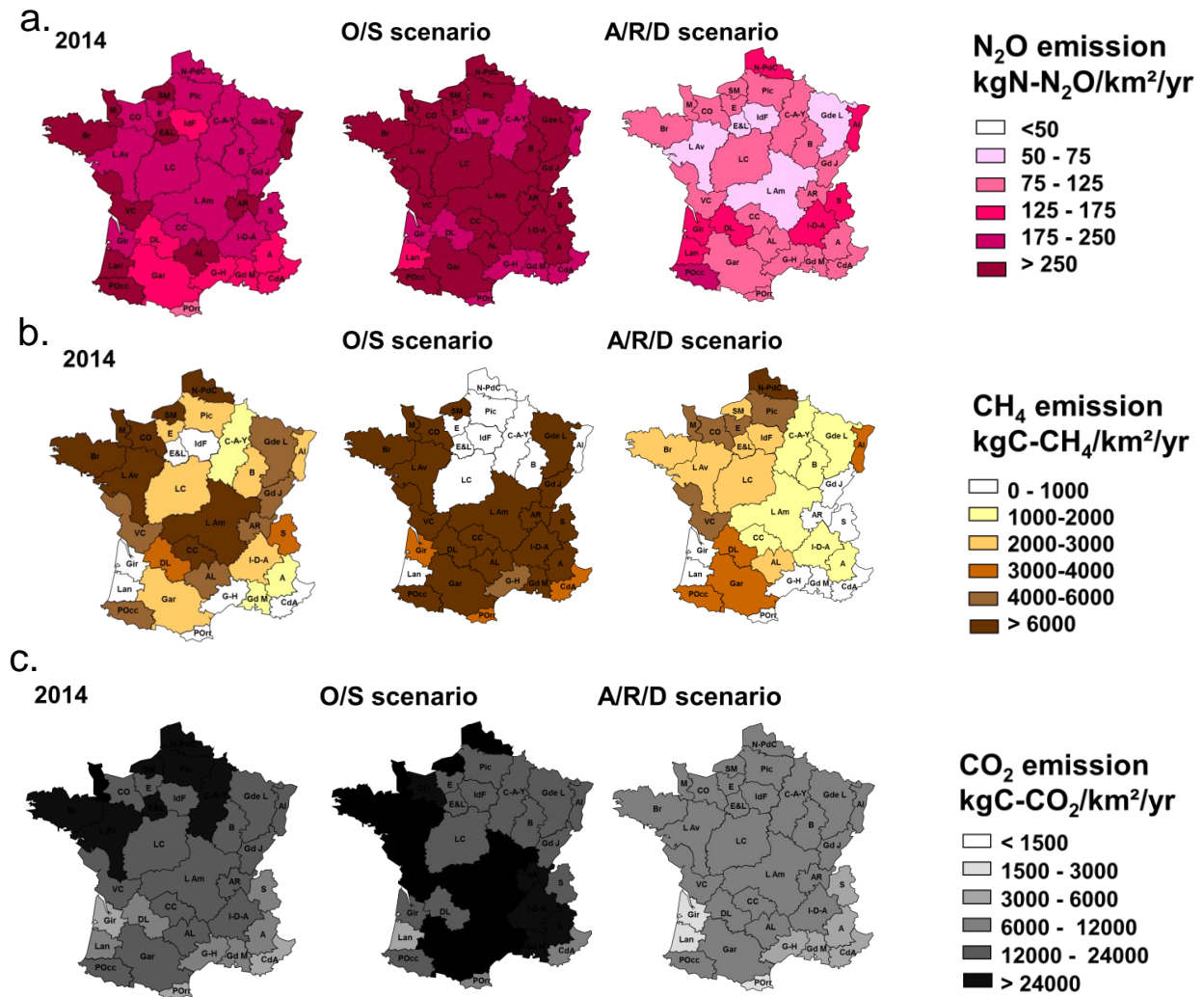


Figure 6. Distribution régionale des émissions de GES actuelles (2014) et pour les deux scénarios prospectifs à l'horizon 2050 (O/S : Ouverture et spécialisation; A/R/D: Autonomie, Reconnexion, régime Demitarien) (a) : N<sub>2</sub>O ; (b) : CH<sub>4</sub> ; (c) : CO<sub>2</sub>.

Les résultats obtenus pour les deux scénarios sont mis en perspective avec l'évolution historique pour la France entière et les 3 supra-régions à la figure 7, qui montre également la part relative des principaux postes d'émissions. Dans tous les cas, les terres arables sont les principales sources d'émission de N<sub>2</sub>O. La fermentation entérique des ruminants domine dans les émissions de CH<sub>4</sub>. Le travail du sol et le chauffage des bâtiments d'élevage, l'énergie nécessaire à la fabrication des engrais de synthèse et le transport des fourrages importés sont responsables pour des parts relativement égales des émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle de la France.

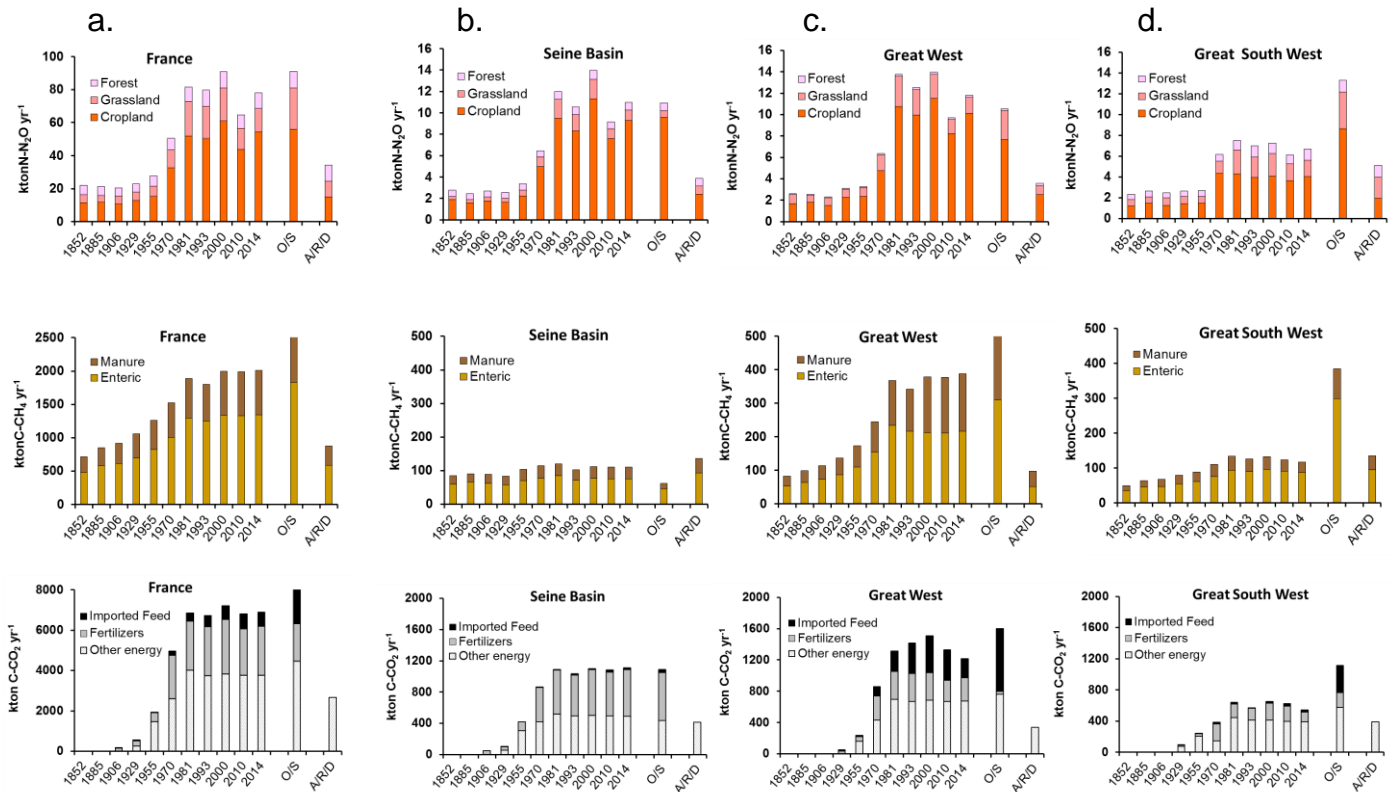


Figure 7. Evolution à long terme (1852-2014) pour la France entière (a.) et pour les 3 supra-régions (b., c., d.) de la moyenne annuelle des émissions de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> (de haut en bas). Pour N<sub>2</sub>O on distingue les 3 principaux usages du sol (forêt, prairie, terres arables), pour CH<sub>4</sub> on distingue la fermentation entérique et la gestion des excréments en étable, pour le CO<sub>2</sub> on distingue l’énergie pour l’importation d’aliments pour bétail, la fabrication des engrais industriels et les autres postes.

## 2.4. Emissions de GES de l’agriculture en CO<sub>2</sub> équivalent

Les émissions des trois gaz à effet de serre étudiés peuvent être exprimées comparativement en termes de contribution au réchauffement climatique, en tenant compte de leur pouvoir de réchauffement potentiel sur une période de 100 ans. Par rapport au CO<sub>2</sub> pris comme référence, le pouvoir de réchauffement potentiel du N<sub>2</sub>O est de 265, celui du CH<sub>4</sub> de 28.

Les émissions de GHG du secteur de l’agriculture en France en 2014 s’élèvent alors à 114 000 ktCO<sub>2</sub> equ/an, dont 49% pour le CH<sub>4</sub>, 29% pour le N<sub>2</sub>O et 22% pour le CO<sub>2</sub> (Figure 8a, Tableau 4). Pour les 3 supra-régions, de surface sensiblement identique, le Grand-Ouest présente des émissions deux fois plus élevées que les deux autres, avec la plus haute proportion d’émissions de CH<sub>4</sub> (59%). Les émissions de N<sub>2</sub>O dominent dans le bassin de la Seine (37%) spécialisé dans la grande culture, et le CH<sub>4</sub> dans le Grand Sud-Ouest (48%).

Le scénario O/S augmenterait les émissions de GES d’un facteur 1.5 à l’échelle de la France, d’un facteur 1.2 pour le Grand Ouest, d’un facteur 2.5 pour le Grand Sud-Ouest, mais pourraient diminuer légèrement dans le bassin de la Seine. Le scénario A/R/D permettrait au contraire une réduction très importante des émissions de GES dans toutes les régions et de l’ordre de 50% à l’échelle de la France (Figure 8, Tableau 4).

Tableau 4. Emission totale de GES en CO<sub>2</sub> équivalent du secteur agricole en France et dans les 3 supra-régions dans la référence actuelle et dans les deux scénarios prospectifs. La contribution relative du N<sub>2</sub>O, du CH<sub>4</sub> et du CO<sub>2</sub> est indiquée.

CO <sub>2</sub> Eq.		2000-2014	O/S scn	A/R/D scn
France 540498 km <sup>2</sup>	% N <sub>2</sub> O	28	23	25
	% CH <sub>4</sub>	49	57	58
	% CO <sub>2</sub>	22	20	17
	<b>ktCO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup></b>	<b>113939</b>	<b>165010</b>	<b>56678</b>
Seine Basin 69713 km <sup>2</sup>	% N <sub>2</sub> O	37	42	20
	% CH <sub>4</sub>	32	21	62
	% CO <sub>2</sub>	31	37	18
	<b>ktCO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup></b>	<b>12909</b>	<b>10872</b>	<b>8246</b>
Great West 59109 km <sup>2</sup>	% N <sub>2</sub> O	20	15	23
	% CH <sub>4</sub>	59	65	57
	% CO <sub>2</sub>	21	20	19
	<b>ktCO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup></b>	<b>24123</b>	<b>29471</b>	<b>6397</b>
Great South West 65437 km <sup>2</sup>	% N <sub>2</sub> O	29	23	25
	% CH <sub>4</sub>	48	60	59
	% CO <sub>2</sub>	23	17	17
	<b>ktCO<sub>2</sub> yr<sup>-1</sup></b>	<b>9662</b>	<b>23937</b>	<b>8582</b>

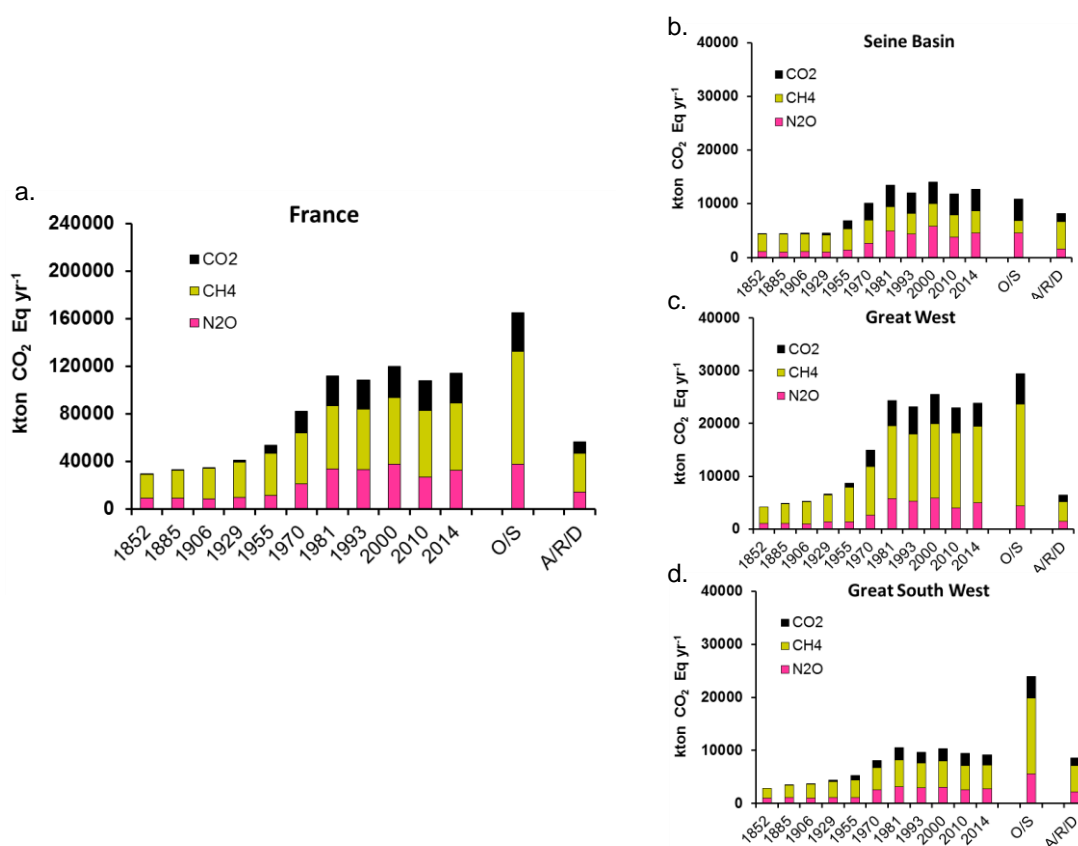


Figure 8. Evolution à long terme (1852-2014) pour la France entière (a.) et les 3 supra-régions (b., c., d.) des émissions de GES exprimées en CO<sub>2</sub> équivalent par an.

### 3. Discussion et conclusion

A cause de la complexité des processus responsables des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture, et de la difficulté de la mesure directe des flux émis sur le terrain, les approches de modélisation de ces émissions (par ex., NOE, DNDC, Gu et al., 2014; Gihlespy et al., 2014; Zimmerman et al., 2018) restent aujourd'hui très incertaines, particulièrement quand il s'agit d'évaluer les émissions à l'échelle territoriale. L'approche de comptabilité biogéochimique proposée ici, basée sur les données disponibles dans les statistiques agricoles et sur des facteurs d'émissions calibrés sur des observations locales, est donc la seule disponible actuellement.

Trois grandes périodes peuvent être distinguées dans la trajectoire historique de l'agriculture française des émissions de GES.

- i. La première période, de 1852 à 1955, caractérisée par un système généralisé de polyculture-élevage, avec de petites fermes familiales et peu de recours aux intrants exogènes, ne montre que de très faibles émissions de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub>, cependant que les émissions de CH<sub>4</sub> augmentent progressivement en raison de l'accroissement régulier de la densité d'élevage.
- ii. La période des Trente Glorieuses est celle de la grande accélération, au cours de laquelle se généralisent la mécanisation, le recours aux engrais de synthèse, l'agrandissement des exploitations et la spécialisation des territoires, dans un contexte d'accessibilité à bas prix de l'énergie et d'expansion des marchés internationaux (Dyer et Desjardins, 2009). Les émissions de GES explosent et atteignent leur maximum vers 1990.
- iii. La dernière période marque l'arrêt des politiques publiques productivistes et l'établissement de réglementations environnementales, qui n'enrayent cependant pas le processus d'intensification et de spécialisation, mais se limitent à stabiliser les émissions de GES à leur niveau des années 1990.

Deux scénarios contrastés ont été construits pour l'avenir de l'agriculture française. Le premier poursuit les tendances d'intensification, d'ouverture et de spécialisation des territoires agricoles, dans le respect toutefois des réglementations environnementales actuelles. Il conduit à une augmentation significative des émissions de GES. Le second est un scénario de généralisation de l'agro-écologie recherchant l'autonomie des exploitations d'élevage reconnecté aux cultures, combiné avec une réduction de moitié de la part de protéines animales dans le régime alimentaire humain. Ce scénario conduit à une réduction de moitié des émissions nationales de GES. Il avait été montré par ailleurs qu'il permet une diminution importante de la contamination nitrique des aquifères et des cours d'eau et donc de l'eutrophisation côtière (Desmit et al., 2018 ; Garnier et al., 2018).

### Bibliographie

Aguilera, E., Guzmán, G., Alonso, A., (2015). Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. II. Fruit tree orchards. *Agron. Sustain. Dev.* (2015) 35:725–737. DOI 10.1007/s13593-014-0265-y

Aguilera, E., Lassaletta, L., Sanz-Cobena, A., Garnier, J., Vallejo, A., (2013). The potential of organic fertilizers and water management to reduce N<sub>2</sub>O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. *Agric Ecosyst Environ.*;164. doi:10.1016/j.agee.2012.09.006

Billen, G., Garnier, J., Lassaletta, L., (2013). Modelling the nitrogen cascade from watershed soils to the sea: from regional to global scales. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2013 368, 20130123. DOI: 10.1098/rstb.2013.0123

- Bille, G., Lassaletta, L., Garnier, J., (2014). A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*: 209–219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>.
- Billen, G., Le Noë, J., Garnier, J., (2018). Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *Science of the Total Environment* 637–638: 695–705. [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043).
- Bouwman, A.F., (1996) Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 46: 53-70
- Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., Griffioen, J., et al. Global trends and uncertainties in terrestrial denitrification and N<sub>2</sub>O emissions (2013). *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2013;368(1621). [doi:10.1098/rstb.2013.0112](https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0112)
- Cayuela, M.L., Aguilera, E., Sanz-Cobena, A., Adams, D.C., Abalos, D., Barton, L., Ryals, R., Silver, W.L., Alfaro, M.A., Pappa, V.A., Smith, P., Garnier, J., Billen, G., Bouwman, L., Bondeau, A., Lassaletta, L., (2017). Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: emission factors based on a meta-analysis of available. *AEE*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.006>
- Cinotti, B., (1996). Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle. *Rev. For. Fr.* XLVIII - 6-547-562.
- Crutzen, P.J., Aselmann, I., Seiler, W., (1986). Methane Production by Domestic Animals, Wild Ruminants, Other Herbivorous Fauna, and Humans. *Tellus*, 38B: 271-284.
- Desmit, X., Thieu, V., Dulière, V., Ménesguen, A., Campuzano, F., Lassaletta, L., Sobrinho, J.L., Silvestre, M., Garnier, J., Neves, R., Billen, G., Lacroix, G., (2018). Reducing marine eutrophication may require a paradigmatic change. *Science of the Total Environment*, 635: 1444–1466. [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.181](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.181).
- Doublet, S., (2011). CLIMAGRI : bilan énergies et GES des territoires ruraux, la ferme France en 2006 et 4 scénarios pour 2030. Rapport ADEME. Available at : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/climagri-la-ferme-france-en-2006-et-4-scenarios-pour-2030.pdf>.
- Dyer, J. A., Desjardins, R. L., (2009). A Review and Evaluation of Fossil Energy and Carbon Dioxide Emissions in Canadian Agriculture, *Journal of Sustainable Agriculture*. 33: 210 - 228.
- Dyer, J.A., Kulshreshtha, S.N., McConkey, B.G., Desjardins, R.L., (2010). An assessment of fossil fuel energy use and CO<sub>2</sub> emissions from farm field operations using a regional level crop and land use database for Canada. *Energy* 35: 2261-2269.
- ENA (2011). European Nitrogen Assessment, Ed. Sutton et al. \_Cambridge University Press. London, 612pp.
- Garnier, J., Billen, G., Vilain, G., Martinez, A., Mounier, E., Silvestre, M., Toche, F., (2009). Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in the Seine river and basin: observations and budgets. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133 : 223–233. [doi:10.1016/j.agee.2009.04.024](https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.024).
- Garnier, J., Vilain, G., Jehanno, S., Silvestre, M., Billen, G., Poirier, D., Martinez, A., Decuq, C., Cellier, P., Abril, G., (2013). Methane emissions from land use, livestock farming, and the river network of the Seine basin (France), *Biogeochemistry*, 116:199–214. DOI 10.1007/s10533-013-9845-1
- Garnier, J., Lassaletta, L., Billen, G., Romero, E., Grizzetti, B., Némery, J., Le Q.L.P., Pistocchi, C., Aissa-Grouz, N., Luu M.T.N., Vilmin, L., Dorioz, J.-M., (2015). Phosphorus budget in the water-agro-food system at nested scales in two contrasted regions of the world (ASEAN-8 and EU-27). *Global Biog. Cycle*. [10.1002/2015GB005147](https://doi.org/10.1002/2015GB005147)

- Garnier, J., Anglade, J., Benoit, M., Billen, G., Puech, T., Ramarson, A., Passy, P., Silvestre, M., Lassaletta, L., Trommenschlager, J.-M., Schott, C., Tallec, G., (2016). Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses in river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France). *Environmental Science and Policy*. 63: 76–90. doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.019
- Garnier, J., Ramarson, A., Billen, G., Théry, S., Thiéry, D., Thieu, V., Minaudo, C., Moatar, F., (2018). Nutrient inputs and hydrology together determine biogeochemical status of the Loire River (France): current situation and possible future scenarios. *Science of the Total Environment*, 637–638: 609–624. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.045
- Gu J., Denis Loustau, Catherine Hénault, Philippe Rochette, Pierre Cellier, Bernard Nicoullaud, Agnes Grossel, Guy Richard (2014). Modeling nitrous oxide emissions from tile-drained winter wheat fields in Central France. *Nutr Cycl Agroecosyst*, : 98:27–40.
- Gingrich, S, Erb, K-H, Krausmann, F., Gaube, V., Haberl, H. Long-term dynamics of terrestrial carbon stocks in Austria: a comprehensive assessment of the time period from 1830 to 2000. *Reg Environ Chang*. 2007;7(1):37-47. doi:10.1007/s10113-007-0024-6
- Gilhespy, S.L., Anthony, S., Cardenas, L., Chadwick, D., del Prado, A., Li, C.S., Misselbrook, T., Rees, R.M., Salas, W., Sanz-Cobena, A., Smith, P., Tilston, E.L., Topp, C.F.E., Vetter, S., Yeluripati, J.B., (2014). First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution. *Ecol. Modell.* 292, 51–62.
- Gu J., Loustau D., Hénault C., Rochette P., Cellier P., Nicoullaud B., Grossel A., Richard G., (2014). Modeling nitrous oxide emissions from tile-drained winter wheat fields in Central France. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 98:27–40. DOI 10.1007/s10705-013-9593-6
- IPCC (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual. IPCC <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html> (accessed 27.10.18.).
- IPCC (2008). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – A primer, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Miwa K., Srivastava N. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer\\_2006GLs.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf). (accessed 27.10.18.).
- IPCC (2018). Global Warming of 1.5 °C. Summary for Policymakers, approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018. Allen M. et al. 33pp. <https://www.ipcc.ch/>
- Lassaletta, L., Billen, G., Romero, E., Garnier, J., Aguilera, E., (2014a). How changes in diet and trade patterns have shaped the N cycle at the national scale: Spain (1961–2009). *Reg Environ Chang.*, 14:785-797. doi:10.1007/s10113-013-0536-1
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J., (2017). Nitrogen, phosphorus and carbon fluxes through the French Agro-Food System: an application of the GRAFS approach at the territorial scale. *Sci. Tot. Env.*, 586: 42–55. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040
- Le Noë, J., Billen, G., Esculier, F., Garnier J., (2018). Long term socio-ecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows: the case of French regions from 1852 to 2014. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 265: 132–143. doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.006
- Le Noë, J., (2018). Biogeochemical functioning and trajectories of French territorial agricultural systems. Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes (1852-2014) Ph-D, ED 398 " Géosciences et Ressources Naturelles et Environnement, Sorbonne University (UPMC), 272pp.
- Marescaux, A., Thieu, V., Garnier, J., (2018). Carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from the human-impacted Seine watershed in France. *Science of the Total Environment*. 643: 247–259. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.151.

- Moss, A.R., Jouany, J.-P., Newbold, J., (2000). Methane production by ruminants: its global contribution to global warming. *Ann Zootech.*, 49 (3), 231-253. DOI: 10.1051/animres:2000119.
- Skiba, U., McTaggart, I.P., Smith, K.A., Hargreaves, K., Fowler, D., (1996). Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the UK. *Energy Conserv. Mgmt.* 37, 1303–1308.
- Smith, K.A., McTaggart, I.P., Tsuruta, H., (1997). Emissions of N<sub>2</sub>O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use Mgmt.* 13, 296–304.
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Boudry, B.L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S.J., Herrero, M., Carlson, K.M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L.J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., Godfray, H.C.J., Tilman, D., Rockström, J., Willett W., (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Vermorel, M., Jouany, J., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., Dourmad, J., (2008). Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Productions Animales*. 21, 403-418.
- Zhou, J.B., Jiang, M.M., Chen, G.Q., (2007). Estimation of methane and nitrous oxide emission from livestock and poultry in China during 1949–2003. *Energy Policy* 35: 3759–3767.
- Zimmermann, J., Carolan, R., Forrestal, P., Harty, M., Lanigan, G., Richards, K.G., Roche, L., Whitfield, M.G., Jones, M.B., (2018). Assessing the performance of three frequently used biogeochemical models when simulating N<sub>2</sub>O emissions from a range of soil types and fertiliser treatments. *Geoderma* 331, 53–69.