

L'AGRICULTURE ENTRE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

AGRICULTURE IN THE SCOPE OF BOTH AIR POLLUTION AND CLIMATE CHANGE

Pierre CELLIER

Sophie GENERMONT

UMR Ecosys, INRA-AgroParisTech - Université Paris-Saclay, Thiverval-Grignon,
France.

Résumé

Les agroécosystèmes sont des sources et des puits à la fois de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre et, par là-même, ils interviennent dans les relations entre climat et pollution de l'air. Cette contribution, positive ou négative, résulte de processus complexes, à la fois directs et indirects, et prend des formes très diverses : augmentation ou diminution des émissions et dépôts, augmentation attendue de la fréquence des feux, modification de la protection phytosanitaire, etc. Comme pour la plupart des processus biologiques, les incertitudes sont importantes et les verrous de connaissances restent nombreux, alors qu'une connaissance des différents facteurs d'influence, naturels et anthropiques, est nécessaire pour limiter la contribution des agroécosystèmes à la fois au changement climatique et à la pollution de l'air, tout en préservant les performances économiques de l'activité agricole. Enfin, l'agriculture est concernée par tout un ensemble de politiques publiques relatives au changement climatique et à la pollution de l'air, mais également à la pollution des eaux et à la protection de l'environnement, politiques publiques qui peuvent interagir en synergie ou être antagonistes.

Mots-clés

Ammoniac, particules, composés organiques volatils, interactions, modélisation intégrée.

Abstract

Agroecosystems are sources and sinks of atmospheric pollutants and greenhouse gases. They are therefore involved in climate change and air pollution and their cross-relations. This contribution can be positive or negative. It results from complex processes, both direct and indirect, which are related to a range of topics: increase or decrease of emission and deposition, increase in fire frequency, change in plant protection, etc. As for most of biological processes, there are large uncertainties and knowledge is lacking over a range of fields. However it is necessary to have a global overview of the involved processes and drivers when trying to limit the contribution of agroecosystem both to climate change and air pollution, with attention to the economic sustainability of agriculture under global change. Moreover agriculture activities refer to public policies related not only to climate change and air pollution but also water pollution or protection of the environment. These policies may interact positively or be antagonist.

Keywords

Ammonia, particles, volatile organic compounds, interactions, integrated modelling.

1. Les agroécosystèmes au cœur des interactions entre changement climatique et pollution de l'air

Le changement climatique et la pollution de l'air sont, par bien des aspects, très liés. Les principales sources de dioxyde de carbone (CO_2), à savoir l'extraction et la combustion de combustibles fossiles, sont non seulement des déterminants de premier ordre du changement climatique, mais aussi des sources majeures de polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote (NO_x) et les particules primaires et secondaires. De plus, les polluants néfastes pour les écosystèmes contribuent au changement climatique en affectant le potentiel de stockage de carbone dans les écosystèmes ; d'autres modifient la fraction du rayonnement

solaire réfléchi ou absorbée par l'atmosphère, affectant positivement ou négativement le bilan radiatif de l'atmosphère à l'échelle régionale et, par effet de cascade, le pouvoir de réchauffement global. Les polluants à courte durée de vie qui ont un impact sur l'effet de serre (SLCPs en anglais, pour *Short-Lived Climate-forcing Pollutants*) comprennent le méthane, le carbone-suie, l'ozone troposphérique et les aérosols. Ils ont des impacts très significatifs sur le climat, et on cherche aujourd'hui de plus en plus à aborder la question du changement climatique et de la pollution de l'air de manière conjointe (figure 1) (voir, par exemple, l'initiative « The Climate and Clean Air Coalition », Lode, 2014).

Les activités agricoles, que ce soit au niveau des agroécosystèmes ou des infrastructures des exploitations agricoles (bâtiment, stockage

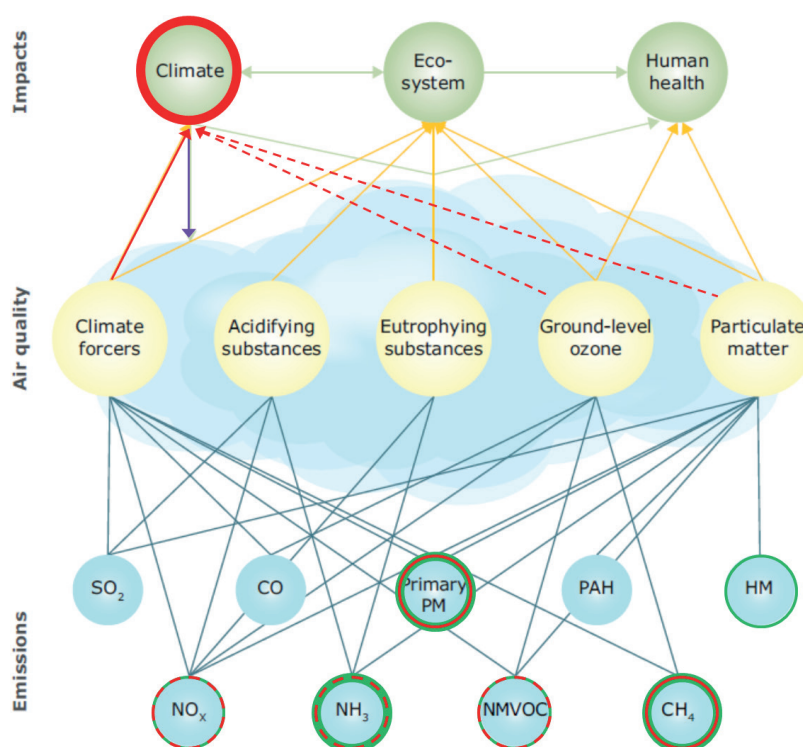


Figure 1. Illustration des liens entre les polluants atmosphériques et les impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes et le climat (adapté d'après EEA, 2012). Les composés cerclés de vert sont ceux qui concernent l'agriculture, l'épaisseur du trait étant fonction de l'importance des émissions agricoles pour ce composé. Les cercles rouges indiquent que les composés ont également un pouvoir d'effet de serre direct (cercle continu) ou indirect (cercle en tirets).

Major air pollutants clustered according to impacts on human health, ecosystems and the climate (adapted from EEA, 2012). The chemical compounds circled in green are those concerning closely agriculture, with line width related to the importance of agricultural emissions. Compounds which also have a radiative effect are circled in red (direct effect in continuous lines, indirect effect in dashed lines).

de produits agricoles ou d'effluents, engins agricoles), interviennent de manière très directe dans ces interactions entre pollution de l'air et changement climatique. Elles sont aujourd'hui clairement identifiées comme contribuant, au même titre que les autres activités anthropiques, au changement climatique et à la pollution de l'air (voir, par exemple, Faburé *et al.* (2011) ; EEA (2012) ; Cellier *et al.* (2013)). Ce sont des sources de gaz à effet de serre à longue durée de vie, telles que le CO₂ (utilisation de combustibles fossiles, respiration du sol et des cultures), le protoxyde d'azote (N₂O) (conséquence de la fertilisation azotée) et le méthane (CH₄) (fermentation entérique des ruminants, fermentation anaérobie lors de la gestion des effluents) mais aussi de SLCPs : particules primaires (travail du sol, combustion), ammoniac (NH₃) et Composés Organiques Volatils (COV), conduisant à la formation de particules secondaires (Bessagnet *et al.*, dans ce numéro), oxydes d'azote et COV conduisant à la formation d'ozone (O₃) et, là encore, de particules secondaires. Ce sont également des sources indirectes de N₂O, par le biais des émissions d'ammoniac.

La réciproque est vraie : les cultures et les forêts sont affectées par le changement climatique et la pollution de l'air. Les êtres vivants sont, par nature, en lien très direct avec l'environnement, qu'il s'agisse de facteurs climatiques ou de contaminations provenant de diverses sources de pollutions organiques ou minérales. Le fonctionnement des écosystèmes est, de manière générale, fortement dépendant du rayonnement, de la température et de la présence d'eau, donc des précipitations. Ils peuvent être significativement affectés par la pollution de l'air, de manière positive (e.g. dépôts atmosphériques et stockage de carbone) ou négative (e.g. dysfonctionnement liés à l'acidification, l'eutrophisation, la contamination par des éléments-traces métalliques ou des polluants organiques persistants, diminution du rayonnement visible). Le lien entre le changement climatique et l'effet de serre est également présent au cœur des processus biologiques de base de la biosphère. Certains mécanismes biologiques produisent simultanément des polluants et des composés à effet de serre, par exemple les transformations de l'azote par la microflore du sol, qui produisent du N₂O et des NO_x par nitrification et dénitrification. De plus, comme le changement climatique a un impact potentiellement important sur le niveau de pollution de l'air (Jacob et Winner, 2009 ; Monks *et al.*, 2009) en modifiant à la fois les sources primaires de polluants (sensibilité à la température et à la pluviométrie)

et les mécanismes chimiques conduisant à la formation de polluants secondaires, l'impact de la pollution de l'air sur les agroécosystèmes (Le Thiec et Castell, dans ce numéro) est susceptible d'évoluer significativement.

Pour illustrer la multiplicité des liens entre pollution de l'air et changement climatique au sein des agroécosystèmes, le cas de l'azote est assez illustratif. Les différentes activités anthropiques perdent de l'azote réactif¹ vers l'environnement (air, eaux, écosystèmes) sous forme oxydée (NO_x, N₂O, HNO₃) ou réduite (NH₃, NH₄⁺), source de polluants atmosphériques (NH₃, NO_x) et de composés à effet de serre (N₂O) (Cellier *et al.*, 2013 ; Générmont *et al.*, dans ce numéro). Lorsqu'on fait un bilan d'azote à l'échelle d'un pays, d'un continent ou à l'échelle globale, on voit que la majeure partie de l'azote réactif est mobilisée pour l'agriculture : production industrielle d'engrais, effluents d'élevage, transferts d'aliment pour les animaux. On peut faire le même diagnostic pour les pertes vers l'environnement. Ces différentes fuites peuvent aussi avoir des effets indirects sur l'effet de serre. Cela est illustré sur la figure 2 où un bilan a été fait à l'échelle de l'Europe (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011). On peut voir que la contribution de l'azote (donc essentiellement l'agriculture), représentée par les barres d'histogramme vertes, touche à la contribution de plusieurs composés au pouvoir de réchauffement :

- directement, par les émissions de N₂O consécutives à la fertilisation azotée ou par l'absorption de CH₄ par les sols ;
- indirectement, par la formation dans l'atmosphère de particules secondaires à partir des émissions d'ammoniac, ou d'ozone à partir des émissions de NO_x et COV biogéniques ;
- indirectement, par le biais des dépôts atmosphériques d'azote qui favorisent le stockage de carbone dans les écosystèmes.

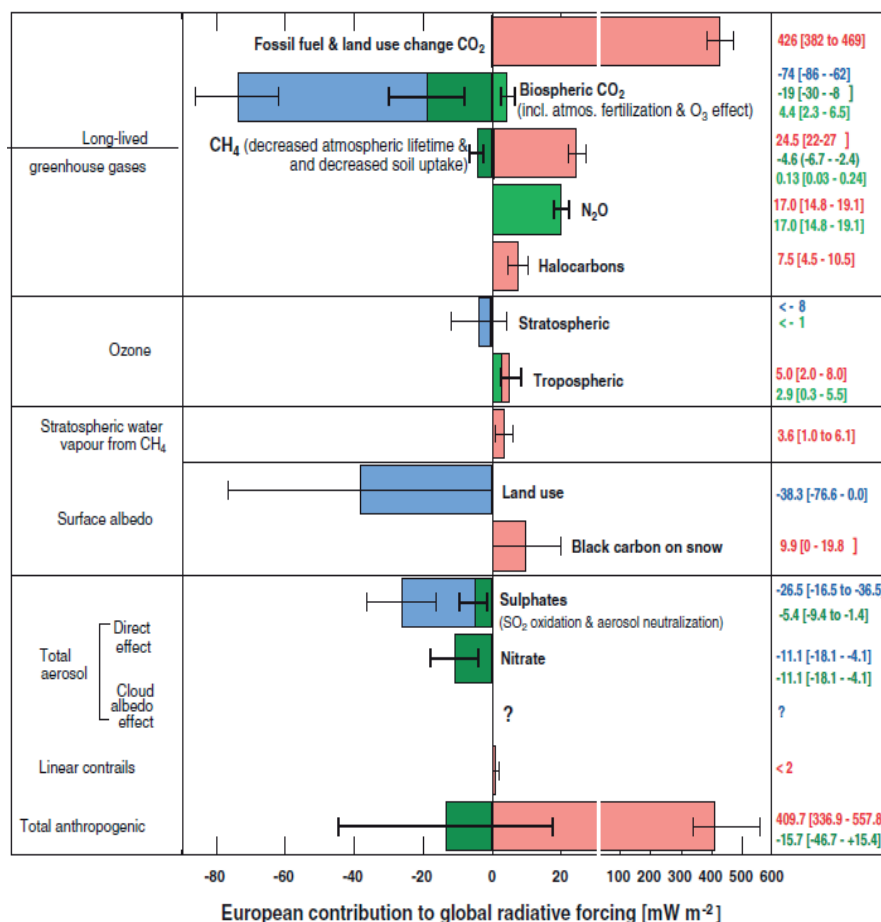


Figure 2. Contribution de différents composés chimiques présents dans l'atmosphère et de différentes caractéristiques des surfaces continentales sur le pouvoir de réchauffement à l'échelle de l'Europe. La contribution de l'azote est indiquée en vert (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011).

*Estimate of the change in global radiative forcing (RF) due to European emissions and the effect of European anthropogenic reactive N emissions to the atmosphere. Light green bars: positive radiative forcing due to direct/indirect effects of reactive N. Dark green bars: negative radiative forcing due to direct / indirect effects of reactive N (Butterbach-Bahl *et al.*, 2011).*

Dans cet article, nous chercherons à montrer en quoi les agroécosystèmes interviennent dans les relations entre climat et pollution de l'air, et quelles sont les principales incertitudes et les verrous de connaissances. Cette interrogation générale couvre différentes questions : en quoi les émissions et dépôts de polluants atmosphériques dans les agroécosystèmes contribuent-ils à une modification du climat régional ou global (e.g. Fowler *et al.*, 2009 ; Sutton *et al.*, 2013) ? Dans quelle mesure le changement climatique modifierait-il les émissions de polluants dans les agroécosystèmes ? Quelles sont les interactions et rétroactions entre émissions et impacts, entre polluants et composés à effet de serre au sein des agroécosystèmes (Arneth *et al.*, 2012) ? Ces

relations peuvent être directes (e.g. un accroissement de la température produit une augmentation des émissions) ou indirectes (e.g. le changement climatique produit une modification de la composition ou du fonctionnement des agroécosystèmes, qui produit une modification des émissions ou dépôts de polluants). Nous ne traiterons pas spécifiquement des émissions de gaz à effet de serre majeurs (CO₂, N₂O, CH₄) mais nous considérerons leurs interactions possibles avec la pollution de l'air. Nous nous situerons à différentes échelles d'espace, avec toutefois un focus sur la France et l'Europe qui représentent des zones d'agriculture plutôt intensive.

	Énergie	Industrie	Résidentiel	Agriculture/ Forêt	Transport	
Particules*	PM ₁	--	11	62	6	17
	PM _{2,5}	--	22	48	9	17
	PM ₁₀	--	29	33	20	14
	TSP	--	29	11	53	5
Polluants gazeux	COVNM*	--	36	41		10
	NH ₃	--			97	
	NO _x	8	13	10	10	54
	SO ₂	45	38	12		
Gaz à effet de serre	N ₂ O	--	5	--	89	--
	CH ₄	--	19	--	76	--
	CO ₂	14	23	24	--	34
	PRG*	11	21	20	21	26

* PM₁/PM_{2,5}/PM₁₀ = particules dont le diamètre est inférieur à 1/2,5/10 µm ;

TSP = poussières totales en suspension ;

COVNM = Composés Organiques Volatils Non Méthaniques ;

PRG = Pouvoir de Réchauffement Global

Tableau 1. Distribution sectorielle des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre pour l'année 2014 en France. La contribution de l'agriculture et des forêts est en vert. Les chiffres (en %) indiquent la contribution de l'agriculture et de la forêt aux émissions nationales. L'absence de chiffre indique une contribution faible (source : Citepa, 2014).

Distribution of atmospheric pollutants and greenhouse gas emissions according to the activity sectors in France in 2014. The contribution of agriculture and forestry is highlighted in green. The numbers give the contribution of agriculture and forestry to national emissions. No number stands for a low contribution (from Citepa, 2014).

2. Les agroécosystèmes sont des sources et des puits de polluants atmosphériques, qui contribuent aux cycles des composés à effet de serre

2.1. Des sources de composés primaires et de précurseurs

2.1.1. Particules primaires et précurseurs de particules secondaires

Les agroécosystèmes sont des sources primaires de particules, telles que celles qui sont issues de l'érosion éolienne ou du travail du sol, des opérations de récolte ou des activités d'élevage (manutention, déplacement des animaux) (Faburé *et al.*, 2011). Cette contribution est très significative au niveau français (Citepa, 2014 ;

voir tableau 1), mais la part de l'agriculture est plus faible pour les particules fines qui sont les plus nocives pour la santé humaine et les plus impactantes pour le climat, positivement ou négativement. Ce sont également des sources de précurseurs : l'agriculture est de loin la principale source d'ammoniac qui conduit à la formation de particules secondaires (nitrate d'ammonium, sulfate d'ammonium...). Alors qu'elles étaient autrefois peu prises en considération, on sait aujourd'hui que les particules secondaires contribuent fortement à la charge atmosphérique en particules, voire même aux pics de pollution particulaire, que ce soit à l'échelle régionale (zone urbaine et périurbaine) ou à l'échelle globale (Paulot et Jacob, 2013 ; Petit *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2015). Hormis les particules primaires issues de la combustion, ce sont surtout des particules à effet réfléchissant pour le rayonnement solaire, donc refroidissantes, qui sont produites par les activités agricoles.

2.1.2. Composés organiques volatils et composés dérivés

Les agroécosystèmes, mais surtout les forêts, sont des sources importantes de composés organiques volatils, conduisant également à la formation de particules organiques secondaires et d'ozone (Fowler *et al.*, 2009). Les émissions d'oxydes d'azote par les sols, si elles ne représentent pas une fraction importante au niveau d'un pays comme la France, contribuent également à la formation d'ozone, avec une efficacité d'autant plus importante qu'elles sont souvent la principale source de NO_x dans les zones rurales, où la formation d'ozone est limitée par les NO_x (Rolland, 2008).

2.1.3. Le cas du méthane

Enfin, l'élevage des ruminants, principalement l'élevage bovin, est une source importante de CH_4 , à la fois gaz à effet de serre et composé réactif intervenant dans le cycle de l'ozone (Fiore *et al.*, 2002 ; Fowler *et al.*, 2009). Il peut y avoir des corrélations fortes entre les émissions de méthane et d'ammoniac.

2.2. Des émissions directement affectées par l'augmentation des températures et la modification de la pluviométrie

Les principales causes des impacts du changement climatique sur les écosystèmes terrestres peuvent se résumer en une augmentation de la température moyenne, une variation des régimes pluviométriques et des occurrences plus élevées d'événements extrêmes (canicules, sécheresse, inondations...). Tous ces changements présentent une forte variabilité aux échelles continentales et régionales, d'une part, à l'échelle saisonnière, d'autre part. Les processus naturels étant très dépendants des facteurs climatiques, les écosystèmes vont présenter une réponse forte au changement climatique. L'un des impacts du changement climatique sur la pollution de l'air est notamment une augmentation des sources de polluants primaires et de précurseurs. Sutton *et al.* (2013) estiment ainsi que les émissions d'ammoniac pourraient être doublées d'ici 2100, pour partie en raison de l'augmentation de la température, le reste étant dû à l'augmentation nécessaire de la production agricole et de l'usage d'intrants (combustibles fossiles, fertilisants, produits phytosanitaires) qui en résultera.

Une augmentation des émissions de COV par la végétation et des oxydes d'azote par les sols (Karl *et al.*, 2009), toutes deux consécutives à l'augmentation de la température, devrait conduire à un accroissement des teneurs en ozone et en particules secondaires dans l'atmosphère (Jacob et Winner, 2009). Ces tendances peuvent toutefois être affectées par les changements de régime pluviométrique et leurs conséquences sur les teneurs en eau dans les sols, qui affectent fortement les mécanismes physicochimiques (e.g. volatilisation d'ammoniac) et le fonctionnement des plantes et de la microflore du sol, à l'origine de la plupart des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre dans les agroécosystèmes et les forêts. Des événements extrêmes, tels que les sécheresses estivales ou les canicules, sont souvent accompagnés de pics d'ozone, mais leur effet sur la végétation pourrait être limité par le fait que la fermeture des stomates (qui permet jusqu'à un certain point de résister à la sécheresse) limite l'absorption d'ozone par la végétation et donc les impacts associés.

Le bilan n'est donc pas toujours facile à établir. Prendre en compte l'ensemble des effets liés au changement climatique dans les modèles de prévision de la qualité de l'air demande donc de modéliser de manière aussi explicite que possible le fonctionnement des écosystèmes et en particulier des sols (Fowler *et al.*, 2009 ; Arneth *et al.*, 2012 ; Sutton *et al.*, 2013).

2.3. Des effets indirect sur le changement climatique par le biais des dépôts atmosphériques

Dans le cycle des polluants atmosphériques, les dépôts sont un terme essentiel car ils constituent un puits souvent important quantitativement et quasi définitif (les composés sont absorbés et

dégradés par les plantes et les micro-organismes du sol). Ces dépôts prennent différentes formes, sèches (gaz ou particules) ou humides (composés dissous ou particulaires dans les précipitations). Les proportions de ces différentes formes varient selon les molécules déposées : en Europe de l'Ouest, les dépôts d'azote sont partagés entre forme humide et forme sèche, avec un dépôt sec particulaire marginal (Asman *et al.*, 1992), alors que les dépôts d'éléments non volatils, tels que le calcium ou le magnésium, se font uniquement sous forme particulaire (Fowler *et al.*, 2009). Les dépôts atmosphériques ont des impacts généralement négatifs sur les écosystèmes (acidification, eutrophisation, atteinte à la biodiversité) lorsqu'ils dépassent certaines limites appelées charges critiques (Bobbink et Hettelingh, 2011). Mais ce sont aussi une source de nutriments (azote, soufre, calcium, magnésium...) qui peut

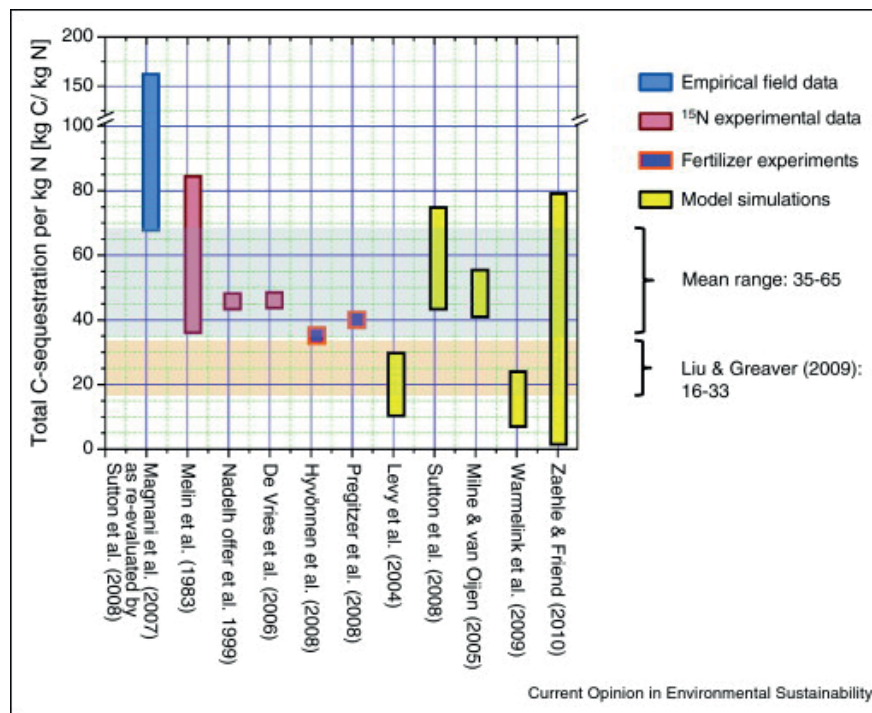


Figure 3. Gammes observées ou calculées de la séquestration de carbone par kg d'azote apporté dans la biomasse aérienne et le sol, pour des forêts et des landes (Erisman *et al.*, 2011).

Observed or calculated ranges in C sequestration per kg N addition in above-ground biomass and in soil organic matter for forests and heathlands (from Erisman et al., 2011).

être très significative et augmenter leur productivité et donc le stockage de carbone dans la biomasse aérienne (forêts, en particulier) et le sol.

Ils ont, par ce biais, un impact positif sur le changement climatique. Une synthèse de la littérature montre que les écosystèmes stockent en moyenne de 35 à 65 kg de carbone par kg d'azote total déposé sur les écosystèmes (Erisman *et al.*, 2011) (figure 3). Cet effet positif des dépôts atmosphériques est surtout significatif pour les écosystèmes naturels, forestiers et agricoles à bas niveaux d'intrants. Les systèmes agricoles conventionnels reçoivent en effet des quantités d'azote bien supérieures aux dépôts atmosphériques, par l'épandage d'engrais minéraux ou organiques. Mais cette capacité de stockage de carbone peut être fortement impactée par des événements climatiques extrêmes lorsque des événements de sécheresse ou de canicule affectent profondément la production primaire des écosystèmes, ou accélèrent les processus de dégradation des matières organiques (Ciais *et al.*, 2005).

À l'inverse, les dépôts d'ozone affectent très significativement la photosynthèse, qui est à l'origine du stockage de carbone dans les sols. Par ce biais, ils pourraient avoir un effet significatif sur le climat en diminuant le potentiel de stockage de carbone des écosystèmes. Sitch *et al.* (2007) ont évalué que cet effet pourrait être supérieur au potentiel de réchauffement de l'ozone, qui est pourtant le 3^e après le dioxyde de carbone et le méthane.

3. Le changement climatique peut avoir d'autres conséquences sur la contribution des agroécosystèmes à la pollution de l'air

Le changement climatique agit également en modifiant d'autres composantes des écosystèmes, conduisant par là même à des émissions potentiellement accrues de polluants atmosphériques. Nous en avons retenu ici deux exemples.

En augmentant la période de végétation des écosystèmes et la durée des périodes sèches

dans certaines zones écoclimatiques, le changement climatique pourrait augmenter très sensiblement les risques de feux, en particulier sur forêts, et donc les émissions de particules et autres composés organiques ou minéraux produits par ces feux. Utilisant un modèle couplé de scénario de changement climatique et de sensibilité de la forêt au feu, Flannigan *et al.* (2000) estiment que la surface de forêts brûlées pourrait doubler dans certaines zones du Canada à la fin du XXI^e siècle. En Europe du Sud, Bedia *et al.* (2014) prévoient une augmentation très substantielle du risque de feux dans l'ensemble des régions du pourtour méditerranéen avec, sur certaines régions, des dépassements de seuils critiques (FWI > 50) (figure 4).

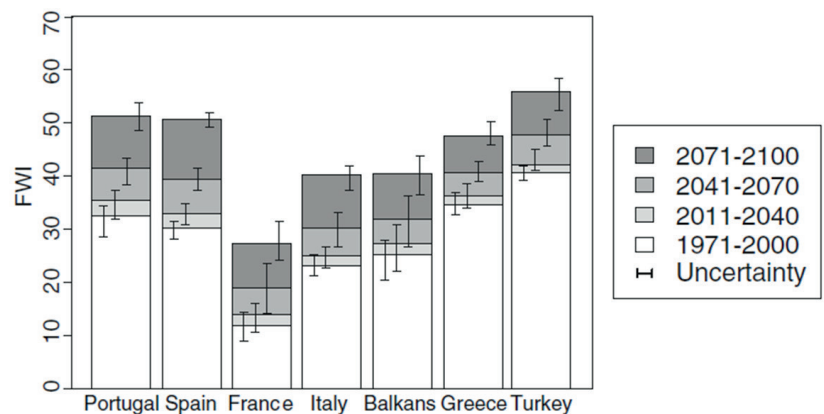


Figure 4. Valeur moyenne de l'indice de risque de feux FWI (*Fire Weather Index*) dans différentes régions du pourtour méditerranéen, pour la situation actuelle (1971-2000) et trois périodes futures pour le scénario A1B (2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100). Les lignes verticales indiquent les valeurs minimum et maximum des quatre périodes analysées (Bedia *et al.*, 2014).

Mean values of the fire danger index in different countries/regions of the Mediterranean, for the present (1971-2000) and the three future periods of the A1B emission scenario (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100). Vertical lines indicate the minimum and maximum values of the four periods analysed (Bedia et al., 2014).

L'un des effets attendus du changement climatique est une modification de la propagation des ravageurs des cultures, qu'il s'agisse de maladies fongiques ou d'insectes, avec notamment l'apparition d'espèces invasives. Il en résultera une évolution des stratégies de protection des cultures. En dépit de ses impacts sur l'environnement et la santé, la protection des cultures est importante pour la production alimentaire mondiale, mais

aussi pour le bilan de gaz à effet de serre des agroécosystèmes. En augmentant la production par unité de surface, elle améliore ce bilan par unité de produit, même si des besoins accrus en azote peuvent modérer cet effet. Cela pourrait limiter le besoin d'extension des zones agricoles (Berry *et al.*, 2010 ; Hughes *et al.*, 2011). Ces évolutions pourraient cependant aboutir à une augmentation des usages des produits phytosanitaires, facteur de pollution de l'air (Bedos *et al.*, 2002 ; Lichiheb *et al.*, 2015), en contradiction avec l'objectif actuel de réduction de leur usage (plan Ecophyto en France ; Millet et Bedos, dans ce numéro).

4. Agroécosystèmes, pollution de l'air, changement climatique et politiques publiques

L'agriculture est concernée actuellement, ou le sera dans un proche avenir, par de nombreuses politiques publiques liées à la qualité des eaux, de l'air, au changement climatique, à la qualité des milieux... (figure 5). Ces politiques publiques émettent généralement des recommandations, voire des obligations, visant à réduire les émissions de polluants de l'air et des eaux, et de gaz à effet de serre. Alors que la problématique de la qualité des eaux est depuis plusieurs décennies bien ancrée dans la profession agricole et l'opinion publique, celle de la contribution de l'agriculture au changement climatique est émergente, en particulier *via* les émissions de N₂O par les sols agricoles, et de méthane par l'élevage bovin. La problématique de la pollution de l'air a émergé encore plus récemment, avec des focus particuliers sur la contribution des émissions d'ammoniac à la formation de particules secondaires au printemps (Faburé *et al.*, 2011 ; Bessagnet *et al.*, dans ce numéro) et l'impact d'applications de pesticides à proximité de zones habitées. La prise de conscience, à la fois des professionnels de l'agriculture et de la société, a toutefois été rapide, et des actions devraient se mettre en place à des échéances relativement courtes.

Outre le fait que cette multiplicité de politiques et de mesures peut conduire à une certaine inefficacité et à des réactions négatives de la part des professionnels, il y a de vrais risques d'antago-

nismes entre ces différentes politiques conduisant à des transferts de pollution et d'impacts.

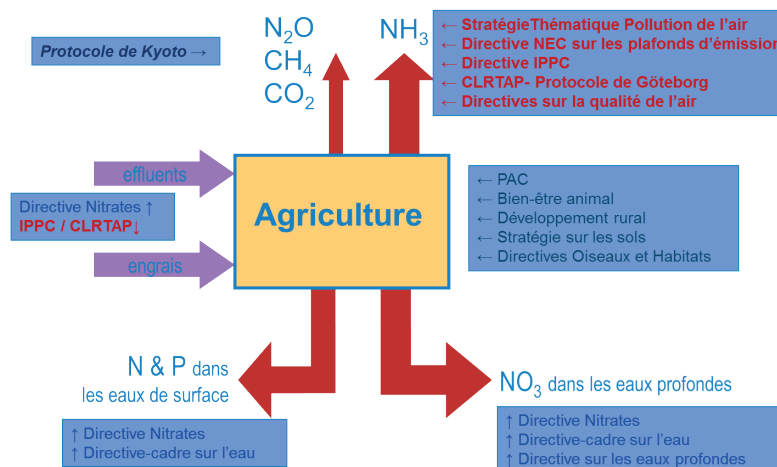


Figure 5. Vue d'ensemble des politiques publiques et directives concernant l'agriculture (source : Oenema *et al.*, 2007). Les noms en caractères rouges concernent la pollution de l'air, ceux en caractères italiques le changement climatique, les autres d'autres problématiques environnementales.

*Overview of the EU policy instruments directly and indirectly acting on the use and losses of N in agriculture. The directives in red are related to air pollution, those in italics to climate change and the others to other environmental policies (from Oenema *et al.*, 2007).*

Oenema *et al.* (2009) ont, par exemple, montré que les mesures visant à limiter les émissions d'ammoniac (limitation de la pollution de l'air) pouvaient avoir un impact négatif sur la lixiviation de nitrate (donc la qualité des eaux) et les émissions de N₂O (donc le climat).

Au-delà des mesures monothématiques, il est donc important de tenter d'approcher ces questions de manière intégrée. C'est, par exemple, le sens d'actions conduites depuis quelques années dans le cadre de la convention de Genève pour une approche intégrée multi-impact sur l'azote (<http://www.clrtap-tfrn.org/>), ou l'initiative « The Climate and Clean Air Coalition », (Lode, 2014).

Conclusions : une nécessaire intégration entre processus d'émission, de dépôts et d'impacts à différentes échelles pour l'action et la prospective

La forte dépendance des écosystèmes, et notamment les systèmes agricoles et les forêts, aux facteurs du climat et du sol les rend très sensibles au changement climatique, d'une manière qui peut être positive ou négative. Cette sensibilité au climat prend des voies très diverses, directes et indirectes, et affecte les émissions et les dépôts de polluants ainsi que les impacts dans ces écosystèmes et, par différentes rétroactions, leur contribution au changement climatique. Devant la multiplicité des processus et des interactions, il convient d'améliorer ces connaissances par une meilleure prise en compte des processus à l'interface végétation-atmosphère et des pratiques anthropiques de gestion de ces milieux. L'un des verrous majeurs se situe aujourd'hui dans notre capacité à prendre en compte dans des modèles l'ensemble des facteurs influençant les émissions, qu'ils soient d'origine naturelle (sols, climat, biosphère) ou anthropique (pratiques culturelles dont les apports d'intrants, choix de systèmes de

production...). Cela est nécessaire pour identifier les leviers et trouver les meilleurs compromis permettant de limiter l'impact des activités agricoles sur le changement climatique et la pollution de l'air, tout en évitant d'affecter la qualité des eaux et la biodiversité. Cette réflexion doit également prendre en compte les possibles modifications d'usage des sols.

Compte tenu de la sensibilité des agroécosystèmes aux facteurs du climat et à la pollution de l'air, il est également nécessaire d'intégrer ces connaissances pour élaborer différents scénarios climatiques. Ces scénarios doivent être régionalisés, parfois à des échelles fines, pour prendre en compte la diversité des situations. Ces outils doivent aussi permettre de faire la part entre les différents effets sur le climat et la pollution de l'air, mais considérant également d'autres questions environnementales (par exemple, qualité des eaux, limitation de l'usage des pesticides...). De telles approches sont nécessaires pour trouver les meilleurs compromis pour aider à la décision publique. Cela passe aussi par le dialogue entre des communautés d'acteurs différents (climat, pollution de l'air, écologie, agriculture, forêts, économistes, aménageurs, décideurs publics...).

Références

- Arneth A, Mercado L, Kattge J, Booth BB, (2012). Future challenges of representing land-processes in studies on land-atmosphere interactions. *Biogeosciences*, n° 9, p. 3587-3599.
- Asman WA, van Jaarsveld JA. (1992). A variable-resolution transport model applied for NHx for Europe. *Atmospheric Environment*, n° 26A, p. 445-464.
- Bedia J, Herrera S, Camia A *et al.* (2014). Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change*, n° 122, p. 185-199.
- Bedos C, Cellier P, Calvet R *et al.* (2002). Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. *Agronomie*, n° 22, p. 21-33.
- Berry PM, Kindred DR, Olesen JE *et al.* (2010). Quantifying the effect of interactions between disease control, nitrogen supply and land use change on the greenhouse gas emissions associated with wheat production. *Plant Pathology*, n° 59, p. 1365-3059.
- Bobbink R, Hettelingh JP. (2011). Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010. Bilthoven: RIVM, (n° 680359002), 246 p.
- Butterbach-Bahl K, Nemitz E, Zaehle S, *et al.* (2011). Nitrogen as a Threat to the European Greenhouse Balance. Dans

- Sutton MA, Howard CM, Erisman JW *et al.* *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 434-462.
- Cellier P, Rochette P, Hénault C *et al.* (2013). Les émissions gazeuses dans le cycle de l'azote à différentes échelles du territoire : une revue. *Cahiers Agricultures*, n° 22(4), p. 258-271.
 - Ciais P, Reichstein M, Viovy N *et al.* (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, n° 437, p. 529-533.
 - Citepa. (2014). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues. Format Secten. 333 p. Document téléchargeable : <http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv1>
 - EEA. (2012). European Environment Agency, 2012. Air quality in Europe - 2012 report. 104 p. [En ligne] : <http://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2012>
 - Erisman JW, Galloway J, Seitzinger S *et al.* (2011). Reactive nitrogen in the environment and its effect on climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, n° 3, p. 281-290.
 - Faburé J, Rogier S, Loubet B *et al.* (2011). Synthèse bibliographique sur la contribution de l'agriculture à l'émission de particules vers l'atmosphère : identification de facteurs d'émission. Rapport final, INRA/ADEME, 164 p.
 - Fiore AM, Jacob DJ, Field BD *et al.* (2002). Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane. *Geophysical Research Letters*, n° 29(19), p. 1919.
 - Flannigan MD, Stocks BJ, Wotton BM. (2000). Forest fires and climate change. *Science of the Total Environment*, n° 262, p. 221-230.
 - Fowler D, Pilegaard K, Sutton MA *et al.* (2009). Atmospheric composition change: Ecosystems-atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, n° 43(33), p. 5193-5267.
 - Hauglustaine DA, Balkanski Y, Schulz M. (2014). A global model simulation of present and future nitrate aerosols and their direct radiative forcing of climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, n° 14, p. 11031-11063.
 - Hughes DJ, West JS, Atkins SD *et al.* (2011). Effects of disease control by fungicides on greenhouse gas emissions by UK arable crop production. *Pest Management Science*, n° 67, p. 1082-1092.
 - Karl M, Guenther A, Köble R *et al.* (2009). A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models. *Biogeosciences*, n° 6, p. 1059-1087.
 - Jacob DJ, Winner DA. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, n° 43, p. 51-63.
 - Lichiheb N, Bedos C, Personne E, Barriuso E. (2015). Synthèse des connaissances sur le transfert des pesticides vers l'atmosphère par volatilisation depuis les plantes, *Pollution atmosphérique*, n° 224. [En ligne] : <http://odel.irevues.inist.fr/pollution-atmosphérique/index.php?id=4732>
 - Lode B. (2014). Increasing Integration in Global Climate Governance – The Climate and Clean Air Coalition, IASS Working Paper, 12 p. [En ligne] : http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/working_paper_ccac.pdf
 - Monks PS, Granier C, Fuzzi S *et al.* (2009). Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, n° 43, p. 5268-5350.
 - Oenema O, Oudendag DA, Witzke HP *et al.* (2007). Integrated Measures in Agriculture to Reduce Ammonia Emissions. Dans Alterra-Report 1663. 4, Alterra, Wageningen.
 - Oenema O, Witzke HP, Klimont Z. (2009). Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, Ecosystems and the Environment*, n° 133, p. 280-288.
 - Paulot F, Jacob DJ. (2013). Hidden Cost of U.S. Agricultural Exports: Particulate Matter from Ammonia Emissions, *Environmental Science and Technology*, n° 48, p. 903-908.
 - Petit JE, Favez O, Sciare J *et al.* (2015). Two years of near real-time chemical composition of submicron aerosols in the region of Paris using an Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM) and a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, n° 15, p. 2985-3005.
 - Rolland MN. (2008). « Modélisation biophysique des émissions de NO par les sols agricoles, spatialisation et impact sur la chimie troposphérique à l'échelle régionale ». Thèse de doctorat, université Paris 6, UMR INRAAgroParisTech Environnement et Grandes Cultures de Grignon, soutenue le 29 mai 2008, 224 p.
 - Sitoh S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C. (2007). Indirect climatic forcing through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, n° 448, p. 791-794.
 - Sutton MS, Reis S, Riddick SN *et al.* (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission and deposition.

Philosophical Transactions of the Royal Society of London - B Biological Sciences, 368, article n° 20130166, 13 p. Special issue "The global nitrogen cycle in the 21st century".

- Wang S, Nan J, Shi C *et al.* (2015). Atmospheric ammonia and its impacts on regional air quality over the megacity of Shanghai, China. *Scientific Reports*, n° 5, p. 15842.

Notes

1. On entend par azote réactif (Nr) tous les composés azotés biologiquement, photochimiquement ou radiativement actifs dans l'atmosphère et la biosphère terrestre et aquatique (NH_3 , NH_4^+ , NO_x , HNO_3 , N_2O , NO_3^- ...) et les formes organiques (*e.g.* urée, amines, protéines et acides nucléiques).