

Topical issue on:

**OIL- AND PROTEIN-CROPS AND CLIMATE CHANGE**  
**OLÉOPROTÉAGINEUX ET CHANGEMENT CLIMATIQUE**

ARTICLE DE RECHERCHE – DOSSIER

OPEN ACCESS

# Le changement climatique, un défi pour la recherche : l'exemple de l'initiative « 4 ‰ »

Emmanuel Torquebiau\*

CIRAD, TA B 115 / 02, 34398 Montpellier cedex 5, France

Reçu le 7 novembre 2016 – Accepté le 6 décembre 2016

**Résumé** – L'agriculture, l'activité humaine probablement la plus dépendante du climat, est à la fois victime et responsable du changement climatique mais elle peut aussi être une solution à la crise du changement climatique. C'est dans les pays en développement, particulièrement vulnérables, que les effets du changement climatique seront les plus violents. L'agriculture émet des gaz à effet de serre, mais il est possible de diminuer ces émissions par des pratiques agro écologiques favorisant l'augmentation de la matière organique du sol. Il est également possible, grâce à ces pratiques, d'augmenter la capture de carbone atmosphérique en fixant du carbone dans le sol et ainsi contribuer à l'atténuation du changement climatique, tout en améliorant les propriétés du sol, ce qui permet simultanément d'améliorer l'adaptation de l'agriculture au changement climatique. Une augmentation de la teneur en carbone de tous les sols du monde de 4 ‰ par an permettrait de compenser toutes les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. L'initiative internationale d'origine française « 4 ‰, Les Sols pour la Sécurité Alimentaire et le Climat » se donne pour objectif de mettre en œuvre des projets permettant de montrer qu'il est possible d'augmenter la teneur en carbone du sol dans ces proportions et de répondre aux questions de recherche que cela pose, notamment en matière de mesure du taux de carbone dans le sol, de pratiques agronomiques pertinentes, du contexte socio-économique favorable à cette démarche et enfin du suivi dans le temps des changements induits.

**Mots clés** : changement climatique / sol / adaptation / atténuation / sécurité alimentaire / gaz à effet de serre

**Abstract** – **Climate change, a research challenge: the example of the 4‰ hypothesis.** Agriculture is probably the most climate-dependent human activity and is both victim and responsible for climate change, while it can also be a solution to the climate change crisis. It is in developing countries, particularly in vulnerable ones, that the effects of climate change will be most violent. Agriculture emits greenhouse gases but it is possible to reduce these emissions by agroecological practices, favoring the increase of organic matter in the soil. It is also possible, through these practices, to increase atmospheric carbon capture by fixing carbon in the soil and thus contribute to mitigating climate change while improving soil properties, thereby simultaneously improving the adaptation of agriculture to climate change. An increase in carbon content of all the world's soils of 4‰ per year would offset all anthropogenic greenhouse gas emissions. The French international initiative "4‰, Soils for Food Security and Climate" aims to implement projects to show that it is possible to increase the carbon content of the soil in these proportions and to answer the research questions that this poses, in particular as regards measurement of the carbon content in the soil, relevant agronomic practices, the enabling socioeconomic context to this approach and finally the monitoring over time of the induced changes.

**Keywords**: climate change / soil / adaptation / mitigation / food security / greenhouse gases

## 1 Introduction

Le dernier rapport du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) confirme que le réchauffement du climat est sans équivoque et que depuis 1950, la plupart des

changements observés sont sans équivalent depuis des décennies, voire des millénaires (GIEC, 2014). Le changement climatique affecte de manière prégnante un grand nombre d'activités humaines parmi lesquelles le « secteur des terres » (agriculture, foresterie, changements d'utilisation des terres) tient une place particulière, car c'est sans doute l'activité humaine la plus dépendante du climat. La production agricole, animale ou forestière subit directement les effets du

\* Correspondance : [emmanuel.torquebiau@cirad.fr](mailto:emmanuel.torquebiau@cirad.fr)

changement climatique, que ce soit l'augmentation de la température et de la teneur en gaz carbonique, l'irrégularité des précipitations ou la fréquence des événements extrêmes. Les usagers de la terre doivent faire de gros efforts d'adaptation, surtout dans les pays en développement, plus vulnérables que les pays industrialisés en raison d'un moindre degré d'artificialisation de l'agriculture et de sa plus grande dépendance à l'environnement naturel.

## 2 Impact du changement climatique sur l'agriculture

En Afrique, par exemple, les chercheurs ont montré que les prévisions d'un impact fortement négatif du changement climatique sur la majorité des cultures se confirme, même si dans certaines zones des effets positifs peuvent apparaître, par exemple en raison d'une pluviométrie plus élevée (Müller *et al.*, 2011 ; Sultan et Gaetani, 2016). Des résultats récents montrent que le processus classique de sélection–dissémination–adoption d'une culture comme le maïs est trop long (parfois jusqu'à 30 ans) pour prendre en compte l'impact de l'augmentation de température sur la durée du cycle de la culture en conditions réelles (Challinor *et al.*, 2016). Les observations en Afrique de l'Ouest indiquent que ce changement est déjà en cours, caractérisé par un réchauffement généralisé, un changement dans le régime de la mousson et une augmentation des extrêmes climatiques (Sultan et Gaetani, 2016). Les travaux de modélisation montrent que de gros changements dans la répartition des zones climatiques sont attendus, par exemple en Afrique de l'Ouest (Sylla *et al.*, 2016), même si demeurent de nombreuses incertitudes sur les effets du changement climatique au niveau local.

## 3 Impact de l'agriculture sur le changement climatique

Le secteur des terres est aussi responsable d'environ 24 % des émissions de gaz à effet de serre (Smith *et al.*, 2014). Il est à ce titre en partie responsable du changement climatique. Environ la moitié de ces émissions est directement issue d'activités agricoles, comme les émissions liées à la fertilisation minérale des sols et à la fabrication des engrais, la fermentation entérique des ruminants, la décomposition anaérobie de la matière organique des cultures inondées ou la mécanisation agricole. L'autre moitié des émissions de ce secteur est liée aux changements d'utilisation des terres, essentiellement dans les pays en développement où l'exploitation non durable d'espaces forestiers ou naturels ouvre la voie à des fronts pionniers agricoles. Entre le quatrième et le cinquième rapport du GIEC (2007 à 2014) cependant, les émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) d'origine agricole ont augmenté, alors que les émissions de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) liées à la déforestation et au changement d'utilisation des terres ont diminué (GIEC, 2014). En effet, l'agriculture est responsable de 16 % des gaz à effet de serre émis par la France en 2013 (18 % hors utilisation des terres, leurs changements et la forêt) et de 87 % des émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). L'apport de fertilisants azotés représente de 70 à 90 % des gaz à effet de serre d'une production végétale fertilisée (Willmann *et al.*, 2014).

## 4 L'atténuation du changement climatique par l'agriculture

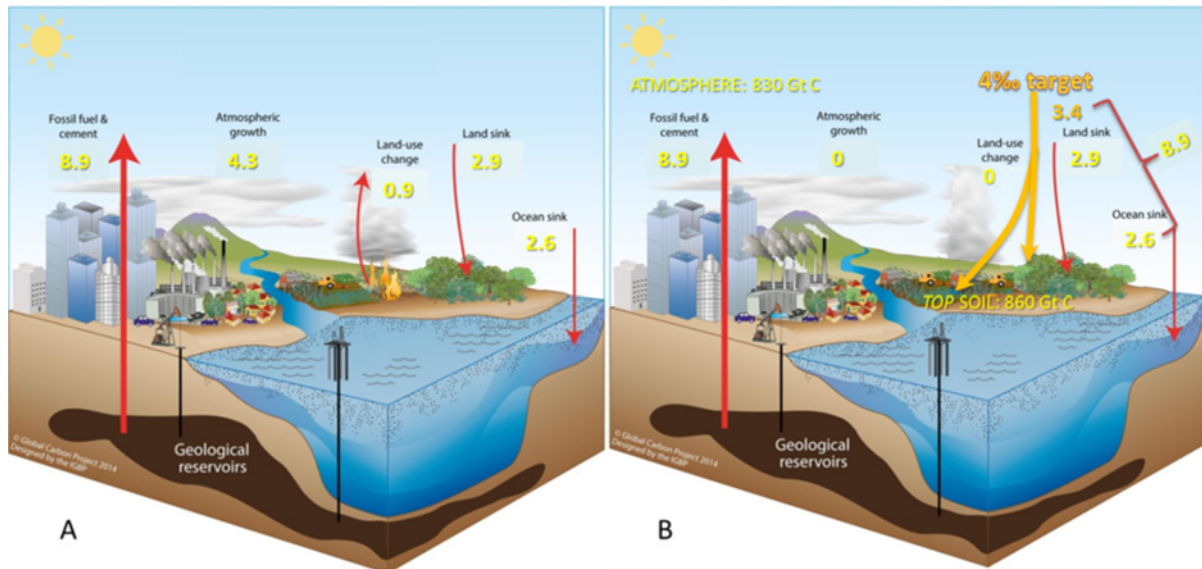
Cette responsabilité non négligeable dans les émissions globales de gaz à effet de serre impose aux agriculteurs et forestiers de diminuer leurs émissions, afin de contribuer à atténuer le changement climatique. Des pratiques agro écologiques et économes en intrants artificiels peuvent contribuer à cette diminution, par exemple l'utilisation de mulch (paillage), les cultures intermédiaires et intercalaires, les bandes enherbées, l'agroforesterie, le biochar, l'agriculture de conservation (ou le travail réduit du sol), la couverture permanente du sol, les cultures associées ou en relais, l'amélioration des rations animales et des pratiques de mise au pâturage.

Les cultures des légumineuses dans les systèmes arables ou les pâturages ont été identifiées en France comme deux des dix mesures les plus significatives pour réduire les gaz à effet de serre en agriculture (Pellerin *et al.*, 2013). En plus de ce rôle à jouer dans l'atténuation du changement climatique, les légumineuses (protéagineux, soja, légumes secs, luzerne, trèfles ou vesces en couvert ou en pâturage) apportent aussi des co-bénéfices *via* une palette de services écosystémiques rendus aux systèmes de culture, renforçant la durabilité des systèmes agricoles et agroalimentaires (Schneider et Huyghe, 2015).

Par ailleurs, le secteur des terres a, sur la question des émissions de gaz à effet de serre, une autre carte maîtresse. Il peut atténuer le changement climatique en stockant du carbone sous forme de matière organique dans le sol, grâce à la photosynthèse qui consiste à produire de la biomasse en absorbant le gaz carbonique avec l'énergie du soleil. Les pratiques agro écologiques citées ci-dessus ont en effet pour point commun de favoriser le stockage du carbone organique dans le sol. Or ce sol enrichi en matière organique est un sol mieux adapté au changement climatique qu'un sol appauvri par un usage intensif, amendé à base de fertilisants minéraux ou contaminé par des herbicides ou autres produits phytosanitaires. Ce sol est plus fertile, plus résilient aux aléas climatiques, notamment parce qu'il retient l'humidité, l'azote et le phosphore mieux et plus longtemps qu'un sol minéral et contient potentiellement plus de microorganismes utiles avec des conséquences positives (circulation des nutriments, régulations naturelles, etc.) sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle et la protection de l'environnement. Il est donc possible, dans le secteur des terres, de faire le lien entre adaptation au changement climatique et atténuation du changement climatique.

## 5 Le rôle du carbone du sol

À partir d'un calcul fait pour la France (Balesdent et Arrouays, 1999), les chiffres montrent qu'une augmentation de 4 % (0,4 %) par an du stock de carbone dans les 40 premiers centimètres de tous les sols de la planète permettrait de compenser l'ensemble des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, à condition que l'on arrête également la déforestation tropicale. En effet, grâce aux plantes et autres organismes vivants, les sols de la planète contiennent 1 500 Gt (milliards de tonnes) de carbone (2 à 3 fois plus que l'atmosphère ; 860 Gt dans les 40 premiers centimètres de sol)



**Fig. 1.** Cycle du carbone avant (A) et après (B) mise en place d'une séquestration annuelle de carbone à hauteur de 4‰ du stock (0–40 cm) des sols mondiaux. (A) Perturbation du cycle global du carbone par les activités humaines en gigatonnes (Gt) de carbone, en moyenne sur la décennie 2004–2013 (Gt C/an). Noter le rôle des 2 puits de carbone naturels que sont les continents et les océans (Le Quééré *et al.*, 2014 ; Global Carbon Budget 2014). (B) En stockant chaque année un quatre millièmes du stock de carbone présent dans l'horizon de surface (0–40 cm) des sols mondiaux (860 Gt), le puits supplémentaire de carbone des continents augmenterait de 3,4 Gt C/an. La somme des 3 puits de carbone (8,9 Gt C/an) compenserait alors les émissions de CO<sub>2</sub> issues de la combustion des énergies fossiles et de la production de ciment, à condition de stopper également les émissions nettes liées aux changements d'usage des sols (0,9 Gt C/an).

alors que les émissions anthropiques annuelles de carbone sont de 4,3 Gt. De nombreux sols mal cultivés ont néanmoins perdu leur matière organique et donc leur carbone. Une augmentation de 4‰ par an est réaliste et peut être obtenue par des pratiques agro écologiques, telles que la couverture permanente du sol par des plantes annuelles (agriculture de conservation) ou des arbres (agroforesterie), la restauration des sols dégradés, l'utilisation de légumineuses fixatrices d'azote en association avec d'autres cultures, l'emploi du fumier ou du compost ou encore les pratiques de collecte de l'eau de pluie ou de ruissellement (<http://www.inra.fr/Grand-public/Rechauffement-climatique/Tous-les-magazines/Quatre-pour-1000.-Stockage-du-carbone-dans-le-sol>). À ce titre, l'agriculture apparaît comme une forme de géo-ingénierie douce permettant de « décarboner » la planète, à côté de solutions beaucoup plus radicales comme le stockage de CO<sub>2</sub> par la production de bioénergie (Anderson et Peters, 2016) ou dans les couches géologiques.

## 6 Le défi de l'hypothèse 4‰

L'hypothèse 4‰ est ambitieuse mais réalisable et présente l'intérêt d'associer le développement économique et la réduction des gaz à effet de serre (Lal, 2016). L'idée d'une initiative connue sous le nom de « 4‰, Les Sols pour la Sécurité Alimentaire et le Climat » a été soumise par le ministre français de l'Agriculture, Stéphane le Foll, lors du Congrès *Climate-smart agriculture* de mars 2015 à Montpellier, puis lancée par le gouvernement français lors de la 21<sup>e</sup> Conférence des Nations unies sur les Changements Climatiques (COP 21) à Paris en décembre 2015. L'initiative

est depuis devenue un programme international. Elle comprend un plan d'action et un programme de recherche dont l'ambition globale est de faire de l'agriculture l'une des solutions à la crise climatique (<http://4p1000.org/>), en réconciliant les objectifs de lutte contre le changement climatique et ceux de la satisfaction de la sécurité alimentaire mondiale. De nombreux signataires (États, organisations internationales, établissements de recherche, ONG, universités, organisations professionnelles, fondations) ont rejoint l'initiative 4‰ dès son lancement en décembre 2015 à la COP 21. L'étape suivante a été franchie lors de la COP 22 de Marrakech (novembre 2016), avec des engagements concrets des partenaires, le lancement d'opérations de recherche et de développement et la constitution d'un comité scientifique et technique international dont le rôle sera de donner un avis argumenté sur les recherches mises en œuvre. L'objectif de cette initiative internationale est de fournir un cadre scientifique, organisationnel et politique pour que des acteurs divers puissent se saisir de l'importante question de la gestion durable des sols de la planète.

En effet, les études sur l'état des sols du monde conduisent à un constat alarmant : la dégradation des sols menace plus de 40 % des terres émergées et les sols cultivés ont perdu de 50 à 70 % de leur stock initial de carbone, les sols tropicaux étant les plus affectés (Lal, 2004). Appliquée à l'horizon de surface (0–40 cm) des sols mondiaux, soit à un stock d'environ 860 Gt de carbone, la cible 4‰ correspond à un stockage de carbone dans les sols de 3,4 Gt C/an, soit l'équivalent de l'ensemble des engagements des états à la COP 21. Ce « puits » de carbone supplémentaire de 3,4 Gt C/an permettrait, en théorie, d'arrêter la croissance actuelle de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> (Fig. 1). Le calcul suppose d'arrêter également la

déforestation tropicale, ce qui est l'objectif de l'initiative REDD+ des Nations unies (réduction des émissions liées à la déforestation et la dégradation des forêts dans les pays en développement) et représente un défi de taille (Karsenty *et al.*, 2014).

## 7 Comment augmenter le carbone dans le sol ?

Pour atteindre l'objectif de l'hypothèse 4 ‰, tous les sols de la planète devraient être concernés (agriculture, forêts, tourbières, sols dégradés, etc.). La littérature scientifique confirme que l'objectif de séquestration annuelle de carbone de 4 ‰ du stock de l'horizon de surface du sol peut être atteint par l'adoption des meilleures pratiques agronomiques, que ce soit en région tropicale ou en région tempérée, telles que le zéro labour, les plantes de couverture ou l'amélioration des pâturages (Stockmann *et al.*, 2013). Il est également important de noter que certaines pratiques peuvent contribuer à augmenter le stock de carbone de manière pérenne dans la partie aérienne (et pas uniquement dans la partie souterraine) de la culture. En agroforesterie, par exemple, le potentiel de stockage du carbone dans les parties aériennes des plantes est de 2,1 Gt/an en conditions tropicales et de 1,9 Gt/an en conditions tempérées (Oelbermann *et al.*, 2004). Ce sont des centaines de millions d'exploitations agricoles et de plantations forestières du monde qui sont potentiellement concernées.

L'intérêt de l'hypothèse 4 ‰ réside par ailleurs dans ce qu'on appelle dans le jargon des négociations sur le changement climatique les « co-bénéfices ». Il s'agit d'associer le potentiel d'atténuation du changement climatique lié à la séquestration du carbone au potentiel d'adaptation au changement climatique qui permet un sol de meilleure qualité. En effet, les pratiques qui améliorent la matière organique du sol permettent de meilleurs rendements grâce à des effets positifs sur la capacité de rétention d'eau du sol, la capacité d'échange cationique, les agrégats du sol et sa sensibilité à l'érosion (Lal, 2006). Cette conjonction (on parle parfois de synergie) entre atténuation et adaptation est l'un des atouts de l'hypothèse et permet donc de penser qu'elle pourrait apporter une contribution significative à la sécurité alimentaire. C'est aussi le fondement de ce que l'on a appelé « agriculture intelligente face au climat » (*climate-smart agriculture*) dont la définition, qui s'apparente à celle du 4 ‰, est : « Agriculture qui augmente la productivité et la résilience (adaptation) des cultures de manière durable, favorise la réduction/élimination des gaz à effet de serre (atténuation), améliore la sécurité alimentaire nationale et contribue à la réalisation des objectifs de développement du pays » (FAO, 2011).

Sommer et Bossio (2014) ont montré qu'une stratégie volontariste du séquestration de carbone dans les sols se traduirait par un pic de séquestration quelques décennies plus tard et une augmentation de la productivité primaire de la biosphère continentale qui amortirait la croissance atmosphérique du CO<sub>2</sub> pendant plusieurs décennies, si les pratiques étaient maintenues. Il est cependant important de prendre en compte le fait qu'une fois un taux important de carbone atteint dans un sol donné, celui-ci ne peut pas continuer à croître

indéfiniment. L'ensemble des calculs concernant le 4 ‰ est donc empreint d'un assez fort niveau d'incertitude, en raison de l'utilisation de nombreuses valeurs spécifiques à certaines conditions utilisées ensuite en tant que moyennes à l'échelle du globe. Il convient donc de prendre ces calculs pour ce qu'ils sont, c'est-à-dire des hypothèses à vérifier. C'est la raison pour laquelle l'initiative 4 ‰ comprend un important programme de recherche.

## 8 Les perspectives de recherche sur l'hypothèse 4 ‰

Le programme de recherche 4 ‰ est articulé avec un plan d'action afin d'instruire au mieux les décisions. L'objectif est de développer une expertise collective basée sur un référentiel afin de mettre en œuvre un dispositif visant à faciliter le financement des projets. Le programme de recherche et de coopération scientifique internationale se déploie dans quatre directions parallèles :

- la connaissance spatialisée des mécanismes et du potentiel de séquestration de carbone organique dans les sols ;
- la connaissance, la définition et la co-construction à différentes échelles de pratiques agricoles et forestières correspondant aux objectifs de l'initiative ;
- l'élaboration et l'évaluation des mesures favorisant l'adoption ou la transition vers ces pratiques ;
- la conception et la mise en œuvre des méthodes de suivi simple de la séquestration du carbone organique des sols à différentes échelles.

L'initiative pourra par exemple contribuer à la consolidation des engagements des états pris lors de la COP 21 dans le document « Contribution déterminée au niveau national » en termes d'atténuation du changement climatique (réduction des émissions de gaz à effet de serre ou séquestration de carbone). Près de 130 pays ont pris des engagements dans le secteur des terres, soit par l'agriculture (103 pays), soit par la forêt (128 pays) et selon les cas sur l'atténuation, sur l'adaptation ou sur les deux. Dans les faits, ce sont 95 % des pays en développement qui ont choisi d'inscrire dans ce document un besoin d'adaptation au changement climatique, perçu comme le principal enjeu lié au climat. Ce taux atteint 100 % en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud-Est alors qu'aucune des contributions soumises par les pays développés n'inclut une section sur l'adaptation (FAO, 2016).

## 9 Le cas des grandes cultures

Des études par analyse de cycle de vie sur le palmier à huile, par exemple, ont montré que le bilan de gaz à effet de serre peut être positif ou négatif selon le fonctionnement des différents postes de la filière, depuis la production d'huile jusqu'à la sortie de l'huilerie (Bessou *et al.*, 2015). Le compartiment sol est particulièrement important avec un risque quasiment prohibitif lors de plantation sur tourbe en raison de grosses pertes de carbone lors de la mise en culture. Le potentiel éventuel séquestration du carbone dans le sol des plantations de palmier à huile devra donc s'apprécier en fonction de l'utilisation préalable de la terre. En Europe,



l'agriculture connaît aussi les premières secousses d'une augmentation de la fréquence des aléas climatiques et ne peut pas sous-estimer le risque que ce soit une tendance qui se maintienne à l'avenir. Le secteur des élevages, mais aussi celui des grandes cultures doivent repenser leur contribution et positionnement dans ce contexte de changement climatique (Schneider *et al.*, 2017).

## 10 Conclusion

La transition vers une gestion des terres « orientée carbone du sol » suppose qu'une série de conditions connexes soit réunie. Il semble en premier lieu qu'un engagement fort d'institutions soit indispensable afin de sensibiliser les décideurs sur l'enjeu des sols mondiaux et ainsi mobiliser des financements conséquents, notamment en associant les financements climatiques, agricoles, forestiers et ceux de l'aide au développement. L'acceptabilité par les gestionnaires des terres des nouvelles pratiques agro écologiques à mettre en œuvre doit être soigneusement vérifiée. C'est là un travail interdisciplinaire qui doit faire appel aux sciences humaines plus qu'aux sciences dures. Enfin, le programme 4 % suppose que les effets de l'impact du changement climatique sur les cultures et les forêts soient maîtrisés, afin que les acteurs du changement soient motivés. En effet, l'atténuation du changement climatique par le stockage du carbone demeurera toujours un objectif abstrait et non visible par les utilisateurs de la terre, alors que les solutions d'adaptation au changement climatique auront des conséquences concrètes en termes de revenus ou de sécurité alimentaire.

## Références

- Anderson K, Peters G. 2016. The trouble with negative emissions. *Science* 354(6309): 182–183, doi: [10.1126/science.aah4567](https://doi.org/10.1126/science.aah4567).
- Balesdent J, Arrouays D. 1999. An estimate of the net annual carbon storage in French soils induced by land use change from 1900 to 1999. *C R Acad Agri* 85: 265–277.
- Bessou C, Basset-Mens C, Benoist A, Biard Y, Burte J, Feschet P, *et al.* 2015. L'analyse de cycle de vie pour élucider les liens entre agriculture et changement climatique. In : Torquebiau E, ed. *Changement climatique et agricultures du monde*. Versailles : Éditions Quae, pp. 246–256.
- Challinor AJ, Koehler AK, Ramirez-Villegas J, Whitfield S, Das B. 2016. Current warming will reduce yields unless maize breeding and seed systems adapt immediately. *Nat Climate Change* 6(10): 954–958.
- FAO. 2011. *Climate-smart agriculture sourcebook*. Rome: FAO, 560 p.
- GIEC. 2014. *Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse*. Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième. In: *Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. Genève, Suisse : GIEC, 161 p.
- Karsenty A, Vogel A, Castell F. 2014. "Carbon rights", REDD+ and payments for environmental services. *Environ Sci Policy* 35: 20–29.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623–1627.
- Lal R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degrad Dev* 17: 197–209.
- Lal R. 2016. Beyond COP 21: potential and challenges of the "4 per Thousand" initiative. *J Soil Water Conserv* 71(1): 20A–25A, doi: [10.2489/jswc.71.1.20A](https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A).
- Le Quéré C, *et al.* 2014. Global Carbon Budget 2014. *Earth System Science Data Discussions*, doi: [10.5194/essdd-7-521-2014](https://doi.org/10.5194/essdd-7-521-2014).
- Müller C, Cramer W, Hare WL, Lotze-Campen H. 2011. Climate change risks for African agriculture. *Proc Natl Acad Sci* 108(11): 4313–4315.
- Oelbermann M, Voroney RP, Gordon AM. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agric Ecosyst Environ* 104: 359–377.
- Pellerin S, *et al.* 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse d'étude. Paris : Inra, 92 p.
- Schneider A, Huyghe C. 2015. *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Versailles : Éditions Quae, 473 p.
- Schneider A, Perrin AS, Le Gall C. 2017. Grandes cultures : comment allier atténuation du changement climatique et nécessité d'adaptation à ce changement ? *OCL* 24(1).
- Smith P, Bustamante M, *et al.* 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Edenhofer O, *et al.*, eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Sommer R, Bossio D. 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *J Environ Manag* 144: 83–87.
- Stockmann U, Adams MA, Crawford JW, Field DJ, Henakaarchchi N, Jenkins M, *et al.* 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric Ecosyst Environ* 164: 80–99.
- Sultan B, Gaetani M. 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: climate change, impact scenarios and potential for adaptation. *Front Plant Sci* 7: 1262, doi: [10.3389/fpls.2016.01262](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262).
- Sylla MB, Elguindi N, Giorgi F, Wisser D. 2016. Projected robust shift of climate zones over West Africa in response to anthropogenic climate change for the late 21st century. *Climatic Change* 134: 241–253, doi: [10.1007/s10584-015-1522-z](https://doi.org/10.1007/s10584-015-1522-z).
- Willmann S, Dauguet S, Tailleur A, Schneider A, Koch P, Lellahi A. 2014. LCIA results of seven French arable crops issued from the public programme AGRIBALYSE® – Contribution to enhanced agricultural practices. In: *9th International Conference LCA of Food San Francisco, USA, 8–10 October 2014*.

**Citation de l'article** : Torquebiau E. 2017. Le changement climatique, un défi pour la recherche : l'exemple de l'initiative « 4 % ». *OCL*, 2017, 24(1) D108.