



HAL
open science

Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriales : une revue critique de la littérature scientifique

Antonio Bispo, Benoit Gabrielle, David Makowski, Monia El Akkari, Laure Bamière, Aude Barbottin, Valentin Bellassen, Cécile Bessou, Patrice Dumas, Sabrina Gaba, et al.

► To cite this version:

Antonio Bispo, Benoit Gabrielle, David Makowski, Monia El Akkari, Laure Bamière, et al.. Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriales : une revue critique de la littérature scientifique. [0] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 2017, 68 p. hal-01562314

HAL Id: hal-01562314

<https://hal.science/hal-01562314v1>

Submitted on 13 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License



EFFETS ENVIRONNEMENTAUX DES CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES SOLS
LIÉS À DES RÉORIENTATIONS AGRICOLES, FORESTIÈRES, OU D'ÉCHELLE TERRITORIALE

UNE REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA ET L'ADEME - MARS 2017



Antonio Bispo, Benoît Gabrielle, David Makowski (pilotes scientifiques de l'étude)

Monia El Akkari (chargée d'étude)

Laure Bamière, Aude Barbottin, Valentin Bellassen, Cécile Bessou, Patrice Dumas, Sabrina Gaba, Julie Wohlfahrt (experts scientifiques principaux)

Martial Bernoux, François Chiron, Laure Cormier, Stéphane De Cara, Guillaume Decocq, Cécile Detang-Dessendre, Jean-François Dhôte, Nathalie Frascaria-Lacoste, Sophie Legras, Philippe Lescoat, Romain Melot, Claude Napoleone, Bertrand Schmitt (experts scientifiques contributeurs ponctuels)

Equipe projet DEPE : Sophie Le Perchec (documentation), Mélanie Sandoval (traitement de données documentaires) Isabelle Savini (appui rédactionnel, édition), Anaïs Tibi (suivi méthodologique), Kim Girard (suivi logistique et administratif), Olivier Réchauchère (chef de projet)

Contact : depe@inra.fr

Le présent document constitue la synthèse du rapport de l'étude sollicitée conjointement par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe) et le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF), convention n°12-60-C0004. Le contenu du rapport et du document de synthèse n'engage que la responsabilité de leurs auteurs. Le rapport d'étude, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur le site institutionnel de l'INRA (www.inra.fr)

Pour citer ce document :

Antonio Bispo, Benoît Gabrielle, David Makowski (coordinateurs), Monia El Akkari, Laure Bamière, Aude Barbottin, Valentin Bellassen, Cécile Bessou, Patrice Dumas, Sabrina Gaba, Julie Wohlfahrt, Mélanie Sandoval, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, 2017. *Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriale : une revue critique de la littérature scientifique*, Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 64 p.

Photo de couverture : Jeune plantation de palmiers à huile (Indonésie) – Crédit : Julie Wohlfahrt -INRA



Délégation à l'Expertise, à la Prospective
et aux Etudes (DEPE)

Effets environnementaux des changements d'affectation des sols liés à des réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriale

Une revue critique de la littérature scientifique

Synthèse du rapport d'étude

Antonio Bispo, Benoît Gabrielle, David Makowski (coordinateurs),
Monia El Akkari, Laure Bamière, Aude Barbottin, Valentin Bellassen,
Cécile Bessou, Patrice Dumas, Sabrina Gaba, Julie Wohlfahrt,
Mélanie Sandoval, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère

Mars 2017

Sommaire

Introduction. Impacts environnementaux des changements d'affectation des sols : recenser la diversité des situations	5
1. Identification, par analyse textuelle, de la diversité des situations et thématiques étudiées	9
1.1. Elaboration du corpus de l'étude.....	9
1.2. Objectifs et principes de l'analyse textuelle	10
1.3. Principaux résultats obtenus sur le corpus complet.....	11
1.4. Analyse textuelle complémentaire sur la thématique biomasse non alimentaire	19
1.5. Résumé des principaux enseignements de l'analyse textuelle	21
2. Bio-énergie et changements d'affectation des sols	23
2.1. Panorama des recherches actuelles.....	25
2.2. Analyses par impact environnemental	33
2.3. Enseignements, points de vigilance et lacunes	44
3. Méta-analyse des émissions de gaz à effet de serre induites par la production de biomasse à vocation énergétique	48
3.1. Principes et objectifs de la méta-analyse	48
3.2. Le choix de la variable de comparaison (taille d'effet)	49
3.3. Résultats et principaux enseignements	51
3.4. Discussion et comparaison des résultats avec ceux d'autres études	55
3.5. Conclusion	56
Conclusion générale	57
Références bibliographiques citées	62
Liste des abréviations	64
Les experts et l'équipe projet	65

Une démarche d'expertise formalisée

La présente étude a été conduite sous la responsabilité de l'INRA, dans le cadre des activités du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) "Changement d'affectation des sols" et en réponse à une commandite conjointe de l'Ademe et du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. Elle s'inscrit dans les activités de la DEPE de l'INRA et en respecte les principes : compétence et pluralité des experts, impartialité (qui repose sur l'examen des déclarations d'intérêt des experts par le comité de déontologie de l'INRA), transparence concernant la méthodologie suivie et la traçabilité des actions et moyens mis en œuvre au cours de l'étude. Ces principes sont formalisés dans la Charte INRA de l'Expertise Scientifique Institutionnelle¹ et dans les procédures de travail de la DEPE. Aucun conflit d'intérêt n'a été repéré dans les déclarations transmises par les experts.

Le suivi de cette étude a été assuré au sein du GIS "Changement d'affectation des sols" par ses deux instances de gouvernance :

- le Haut Comité de Groupement (HCG), qui réunit les membres du GIS, à savoir l'INRA, l'Ademe, les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, et FranceAgriMer ; le HCG a joué un rôle de comité de suivi de l'étude ;*
- le Comité Technique d'Orientation (CTO), qui regroupe l'ensemble des parties prenantes de la thématique des CAS et qui a joué le rôle de comité consultatif d'acteurs de l'étude.*

Une étude s'inscrivant dans le cadre de l'expertise collective et mobilisant une démarche innovante

L'étude comporte trois étapes. Les deux premières relèvent très clairement de l'expertise collective, à savoir un état des lieux critique des connaissances disponibles reposant sur l'analyse des publications scientifiques par un groupe d'experts pluridisciplinaire. La spécificité de la présente étude est d'avoir mobilisé au cours de ces deux étapes des outils et méthodes rarement utilisés dans les expertises collectives :

- une plateforme d'analyse textuelle lors de la première étape, dans le but de repérer plus rapidement, au sein d'un corpus conséquent, les principales thématiques abordées et la façon dont elles s'articulent entre elles ;*
- une méthode d'extraction systématique des informations contenues dans les articles lors de la deuxième étape, méthode apparentée aux "systematic reviews", dans le but de garantir la pleine exploitation des informations extraites et d'être en mesure d'en faire un traitement en partie automatisé. Ces informations ont été ensuite synthétisées en utilisant une méthode de cartographie des données ;*

La troisième étape, à savoir la réalisation d'une méta-analyse sur un sous-ensemble du corpus initial, est un volet complémentaire de la deuxième étape. Cette approche statistique permet d'analyser conjointement les données issues de différentes études menées sur un même sujet.

L'étude dans son ensemble relève donc du format des études au sens de la DEPE, c'est-à-dire des projets comportant un volet d'expertise scientifique collective (reposant sur l'analyse des connaissances scientifique publiées) et un volet d'étude reposant sur l'assemblage ou le traitement de données existantes (calculs, simulations, méta-analyses) afin de répondre à la demande des commanditaires dans le cas où le simple examen critique de la bibliographie disponible s'avère insuffisant.

¹ <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Tous-les-dossiers/Expertise-scientifique-collective/Charte-de-l-expertise-scientifique-institutionnelle>

Introduction. Impacts environnementaux des changements d'affectation des sols : recenser la diversité des situations

Problématique générale

Les publications traitant du changement d'affectation des sols (CAS) et de son rôle dans les évaluations environnementales sont désormais abondantes notamment dans le domaine de la production agricole. En effet, une modification des pratiques agricoles, qu'il s'agisse de simples ajustements de techniques existantes, de substitution d'une technique par une autre ou de la réorientation plus conséquente d'un système de culture ou d'élevage, peuvent entraîner un changement d'affectation des sols à diverses échelles et avoir de ce fait un effet notable sur l'environnement. De nombreuses études ont tout d'abord concerné les biocarburants de première génération et ont traité préférentiellement de leur impact environnemental en termes d'émissions de gaz à effet de serre, en comparaison aux carburants fossiles. Certains travaux plus récents étudient l'impact environnemental des biocarburants de seconde génération, par exemple (Davis *et al.*, 2012), du développement de l'élevage (Nguyen *et al.*, 2013) ou de l'urbanisation (Toth, 2012). Ces travaux cherchent à estimer les impacts environnementaux liés à différents types de changements d'affectation des sols et mobilisent, en général, les mêmes approches que celles utilisées pour étudier l'impact environnemental des biocarburants de première génération (modélisation biophysique et économique ou Analyse de cycle de vie (ACV), par exemple).

Changements d'affectation des sols (CAS) directs et indirects

On distingue en général deux types de changements d'affectation de sols, les CAS directs et les CAS indirects (Figure 0-1). Le CAS direct (CASd) décrit les situations où le développement d'une culture modifie le type d'affectation du sol, qui pouvait préalablement être occupé par exemple par une forêt ou une prairie permanente. On change donc directement de catégorie d'affectation, ce qui entraîne des impacts environnementaux sur la parcelle en question. Le changement d'affectation des sols indirect (CASi) concerne un changement de pratiques agricoles ou de finalité de la production dans une zone déjà cultivée (remplacement d'une culture alimentaire par une culture énergétique, par exemple) qui entraîne par rebond une modification d'affectation du sol dans une autre zone géographique (remplacement d'une prairie ou d'une forêt par une culture alimentaire, par exemple).

La prise en compte des CAS indirects peut entraîner une réduction ou une expansion de la surface cultivée. Ainsi, par exemple, une augmentation des rendements dans une région donnée permet que le même volume de production puisse être obtenu sur une surface moindre, libérant potentiellement des terres pour d'autres usages (Brunelle *et al.*, 2014) ; à l'inverse, le choix de réorienter une partie de la production alimentaire vers des usages non alimentaires peut conduire à un report de cette production alimentaire vers d'autres terres, induisant potentiellement un CAS dans des zones qui n'étaient pas cultivées (Lapola *et al.*, 2010 ; Plevin *et al.*, 2010).

Le bilan environnemental de la réorientation d'un système agricole peut ainsi être considéré comme la somme des effets strictement liés à la mise en œuvre immédiate de la réorientation, et des effets liés aux changements d'affectation des sols, CASd ou CASi, que cette réorientation a provoqués.

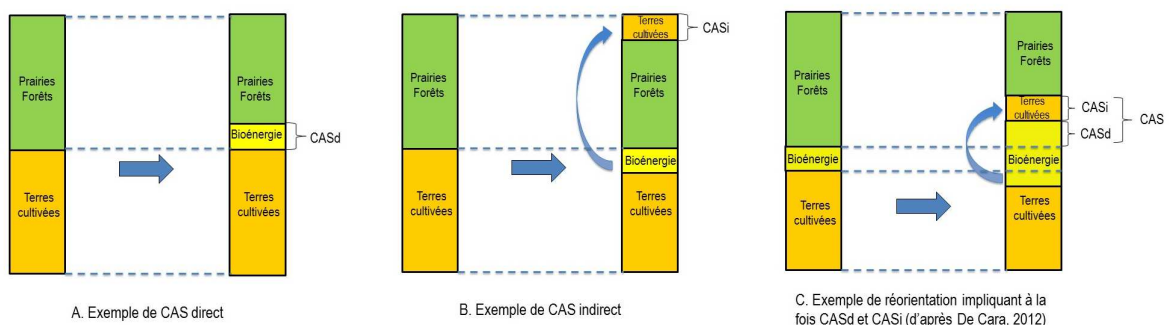


Figure 0-1. Représentation schématique d'exemples de réorientation d'une surface agricole ayant entraîné un CAS direct (A), un CAS indirect (B), une combinaison de CAS direct et indirect (C)

Différents travaux, menés par des équipes internationales et en France notamment par l'Ademe ou l'INRA (Etudes Ademe-INRA dont De Cara *et al.*, 2012) ont montré l'importance d'une meilleure prise en compte de ces changements d'affectation des sols dans les évaluations environnementales (Hellweg and Canals, 2014 ; Liu *et al.*, 2015 ; van Vliet *et al.*, 2016). En effet, l'intégration des CAS (par exemple) dans les bilans de gaz à effet de serre (GES) des filières peut conduire à reconsidérer la hiérarchie des solutions (Lapola *et al.*, 2010 ; Searchinger *et al.*, 2008).

L'intégration des impacts des CAS dans les évaluations environnementales n'est pas un exercice facile car les CAS sont sous la dépendance de multiples facteurs tels que les prix, les rendements, la nature des agroécosystèmes transformés, les régimes alimentaires, des mesures et incitations politiques (Figure 0-2). Par ailleurs, ces changements d'affectation des sols, et notamment les CASi, ne peuvent pas être facilement mesurés directement et doivent donc être généralement évalués par modélisation, faisant alors appel à des simulations plus ou moins complexes, prenant en compte des informations de natures très diverses (politiques, économiques, biophysiques ; Ben Aoun *et al.*, 2013).

La Figure 0-2 schématise les principales interactions conduisant à des changements d'affectation des sols. Dans la sphère agricole, l'évolution de la demande en produits végétaux et animaux, en énergie, en produits bio-sourcés à usage non alimentaire détermine un besoin global en surface de production. Par ailleurs, l'évolution d'un certain nombre d'usages non agricoles des sols vient également moduler la pression sur les terres cultivables. Il s'agit notamment de l'artificialisation des terres, de l'implantation d'espaces forestiers, ou encore du maintien ou de la restauration d'espaces naturels. La combinaison de l'évolution de la demande en produits agricoles, sylvicoles et autres usages va déterminer une réorientation des systèmes agricoles ou forestiers, incluant des changements d'affectation des sols, dont l'ampleur dépendra également de l'évolution des pratiques agricoles et sylvicoles, notamment parce que celles-ci vont déterminer les niveaux de rendements obtenus. L'ensemble conjugué de ces évolutions (changement d'affectation des sols et modification des pratiques agricoles ou sylvicoles) a des impacts sur l'environnement. C'est cette chaîne causale représentée en vert, **Réorientations agricoles et forestières ou d'échelle territoriale → changement d'affectation des sols → impact environnementaux**, qui est l'objet principal de la présente étude.

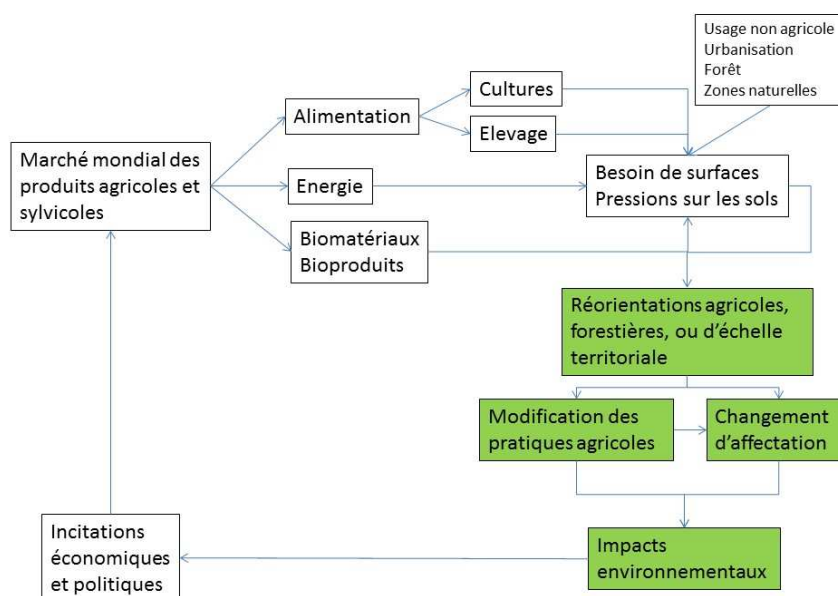


Figure 0-2. Schéma conceptuel des facteurs influant les changements d'affectation des sols

A la fin des années 2000, plusieurs études (Fargione *et al.*, 2009 ; Searchinger *et al.*, 2008) ont montré que les CAS pouvaient avoir une forte influence sur les bilans environnementaux du développement de certaines productions ou usages de la biomasse. Ces premières études se sont focalisées sur un type de réorientation bien précis, la production de biocarburants de première génération, entraînant des CASd et des CASi, et sur un type d'impact environnemental spécifique, les émissions de gaz à effet de serre. Depuis les années 2010, de nouvelles études ont été conduites en considérant des réorientations, des types de CAS et des impacts plus diversifiés. Les réorientations considérées dans ces études plus récentes concernent, par exemple, la modification des successions de cultures, l'intensification ou extensification des systèmes de culture ou d'élevage, le développement de cultures de diversification comme les biocarburants de seconde génération (issus de matières premières ligno-cellulosiques), le développement d'énergies ou

matériaux bio-sourcés, le développement ou la contraction des productions animales, l'artificialisation des terres agricoles, ou encore l'évolution de l'alimentation humaine. Ces réorientations peuvent générer des CASd ou des CASi. Certaines études récentes (van Vliet *et al.*, 2016) ne considèrent pas uniquement les impacts sur les émissions des GES, mais étudient également les impacts sur le sol, la qualité et la disponibilité de l'eau, la qualité de l'air, la biodiversité, etc.

A terme, dans un contexte de besoin en terres croissant pour répondre à des objectifs alimentaires, énergétiques, de logement et d'infrastructure (UNEP, 2014), les évaluations environnementales de réorientations dans un territoire devraient intégrer de façon plus systématique l'effet des changements d'affectation des sols. Ce questionnement monte en puissance dans la définition des politiques publiques. Ainsi, les récentes propositions de modification de la directive Energies Renouvelables, 2009/28/EC (Commission Européenne, 2009) tendent à mettre en avant et à accélérer le développement des biocarburants de deuxième génération (2G), considérés comme ayant un meilleur bilan environnemental que ceux de première génération (1G), du fait de leur moindre impact sur l'usage des sols (Harris *et al.*, 2015).

Les études publiées sur les CAS sont nombreuses, diversifiées et leurs résultats sont parfois contradictoires. Ainsi, dans l'étude de De Cara *et al.* (2012) la gamme de variation du bilan de GES des biocarburants est très large et comprend à la fois des valeurs négatives et positives. Pour éclairer le débat public et contribuer à identifier des questions de recherche pertinentes, il est donc nécessaire de synthétiser les résultats des études ayant analysé les effets des CAS sur une large gamme d'impacts environnementaux. Une analyse de la littérature internationale portant sur ces questions devrait ainsi permettre d'éclairer les débats concernant les impacts environnementaux des CASd et des CASi. Il s'agit en particulier d'être en mesure d'attribuer des impacts environnementaux à des réorientations induisant des CAS, en suivant la chaîne causale évoquée ci-dessus. L'analyse de la littérature actuelle sur ce sujet montre en effet que les étapes de cette chaîne sont abordées de façon compartimentée (van Vliet *et al.*, 2016), ce qui ne permet pas de faire un lien direct entre réorientations et impacts.

Trois niveaux d'objectifs spécifiques

L'objectif de l'étude est de réaliser une analyse systématique de la littérature internationale portant sur les effets de différentes réorientations sur les changements d'affectation des sols et leurs impacts sur l'environnement. Elle vise à faire un état des lieux des connaissances sur ce vaste sujet en vue de mieux cerner l'ampleur des phénomènes étudiés et d'identifier les questions de recherche émergentes. Elle se focalise sur les travaux publiés dans des revues scientifiques décrivant l'ensemble de la chaîne causale "réorientations agricoles, forestières, ou d'échelle territoriale → changement d'affectation des sols → impact environnemental".

L'étude adopte une démarche originale en trois étapes (Figure 0-3) qui consiste à traiter de sujets de plus en plus précis en analysant une série de corpus et de sous-corpus bibliographiques de plus en plus restreints, et en approfondissant à chaque étape l'analyse en réponse aux interrogations des commanditaires de l'étude.

Une analyse textuelle sur le corpus complet

Un premier corpus très large a été sélectionné sur la base d'une équation de recherche combinant des mots-clés liés aux CAS et à l'évaluation environnementale. Ce corpus initial a été utilisé pour identifier les types de réorientations productives ou d'aménagement étudiées dans la littérature sous l'angle des changements d'affectation des sols qu'elles engendrent et des impacts environnementaux qui leur sont liés. Les 5 730 références recueillies à cette étape ont fait l'objet d'une analyse textuelle qui vise à repérer les mots ou expressions clés qui apparaissent le plus souvent, et à en analyser les occurrences simultanées et les liens qu'ils entretiennent. Cette analyse textuelle a conduit à l'identification des thématiques majeures, des thématiques émergentes, et des principales méthodes scientifiques employées.

Une revue systématique sur un sous-corpus relatif au développement des usages non alimentaires de la biomasse

Un sous-corpus de 1 785 références extrait du corpus initial a été utilisé pour analyser les impacts environnementaux des évolutions d'usage de la biomasse. Ce sous-corpus a été constitué à partir de l'analyse lexicale et se focalise sur les réorientations vers la production de biomasse non-alimentaire. A l'issue d'un tri de ce sous-corpus, 241 articles ont été sélectionnés sur la base leur pertinence en mobilisant une démarche de type "revue systématique" (Pullin, 2012). Pour ce faire, on a procédé à un dépouillement détaillé du contenu des articles à l'aide d'une grille couvrant les différents types d'impacts environnementaux. Les impacts sur le sol, l'eau, le climat, l'air et la santé humaine, la biodiversité, les ressources non renouvelables ont été analysés ainsi que les liens entre réorientations, changement d'affectation de sols et méthodes associées.

Une analyse quantitative de l'impact climatique des bioénergies

Enfin, dans un troisième temps, une méta-analyse a été menée à partir de 50 articles inclus dans le sous-corpus "biomasse non alimentaire". Celle-ci a permis une analyse quantitative des valeurs d'émissions de gaz à effet de serre liées à la production de bioénergies et tenant compte des changements d'usage des terres.

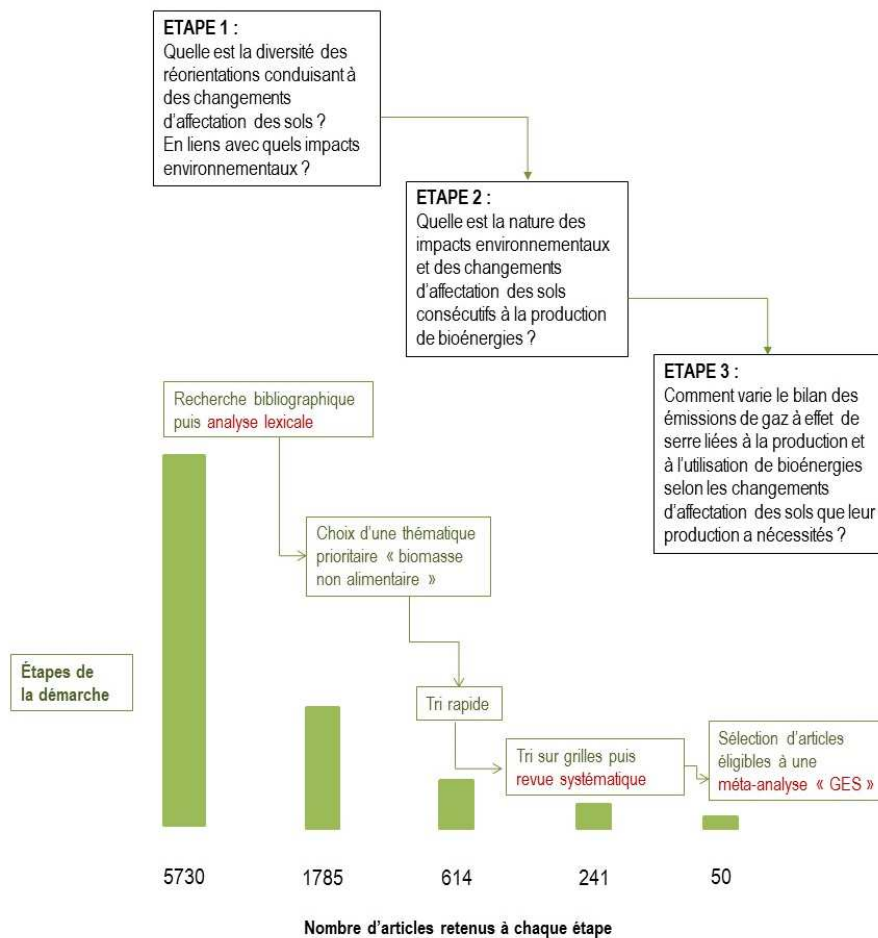


Figure 0-3. Étapes de la démarche de l'étude : réduction progressive du corpus étudié et analyses effectuées (en rouge)

La mobilisation des experts

Un premier groupe de 5 experts mais pluridisciplinaire a été mobilisé pour intervenir au cours de la première étape du travail, l'analyse lexicale. Leur rôle a consisté, avec les pilotes de l'étude, à valider les opérations menées par la chargée de projet et la documentaliste pour élaborer les index de mots-clés ainsi que pour produire et interpréter les cartes de co-occurrences de ces mots-clés.

Le groupe a ensuite été élargi (17 experts) pour la réalisation de la deuxième étape de l'étude, la revue systématique d'un sous-corpus. Cette étape comporte en effet une première phase d'extraction d'informations détaillées des articles et leur formalisation dans une grille de dépouillement qui est très coûteuse en temps. La deuxième phase de valorisation des informations consignées dans les grilles de dépouillement a alors pu être menée par un groupe plus restreint (7 experts et les trois pilotes de l'étude).

La méta-analyse, troisième phase de l'étude, a été menée par la chargée de projet et l'un des pilotes de l'étude. Les autres pilotes et les experts ont participé à l'élaboration de la démarche et l'interprétation des résultats, et sont intervenus comme relecteurs.

1. Identification, par analyse textuelle, de la diversité des situations et thématiques étudiées

L'objectif de cette première partie de l'étude est d'analyser comment la thématique des impacts environnementaux liés aux CAS est abordée dans la littérature scientifique. Ce domaine est *a priori* très vaste, et correspond à une grande diversité de situations et de méthodes d'étude. L'outil de l'analyse textuelle a été mobilisé dans le but de donner assez facilement et rapidement accès à cette diversité.

1.1. Elaboration du corpus de l'étude

• Un corpus à la croisée de l'évaluation environnementale et des changements d'affectation des sols

Le corpus bibliographique initial de l'étude a été constitué à partir d'une recherche dans le Web of Science™ (WoS) pour la période 1975-2014. La construction de l'équation de recherche a visé les articles qui sont à l'intersection des domaines de l'évaluation environnementale et du CAS. Pour s'assurer d'inclure les études qui font de l'évaluation environnementale sans le mentionner explicitement, les publications traitant conjointement de CAS d'une part, d'Analyse de cycle de vie (ACV) ou de bilan d'émissions de gaz à effet de serre (GES) d'autre part, ont été ajoutées au corpus. Cette procédure a permis d'aboutir à un corpus de 5 730 références.

• Une thématique en plein développement

Comme le montre la Figure 1-1, la thématique des impacts environnementaux des CAS a émergé récemment et est en plein développement. Les publications sur cette thématique n'apparaissent de façon conséquente qu'à partir du début des années 1990, avec une nette accélération du rythme de publication à partir de 2007. Cet accroissement du volume annuel de publications n'est pas seulement dû à l'effet mécanique de l'accroissement du volume de publications dans le WoS™. Au contraire, depuis 1990, les publications traitant de la thématique occupent une part croissante rapportée à l'ensemble des publications du WoS™, la proportion doublant environ tous les 5 ans.

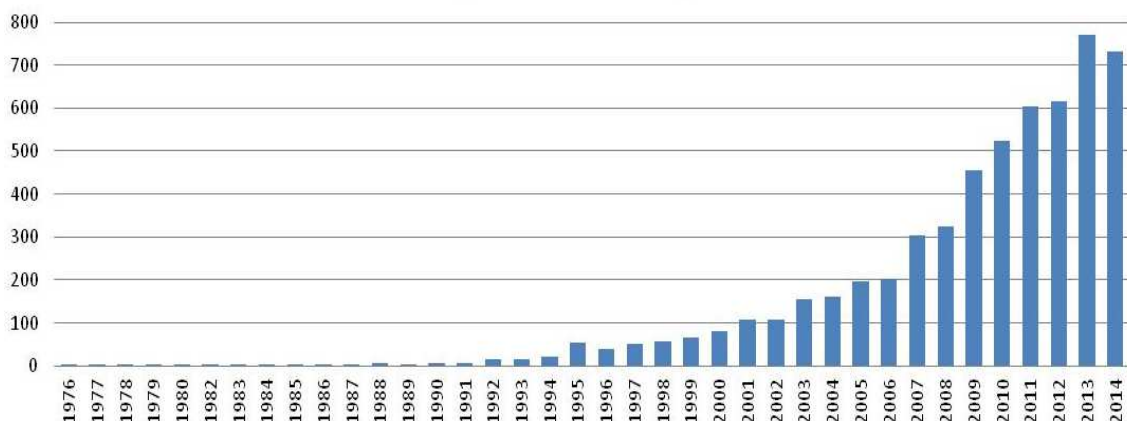


Figure 1-1. Nombre de publications du corpus 5 730 articles par année

Les articles sont issus de revues très diverses, plus ou moins spécifiques des thématiques traitées : revues généralistes (ex : "Plos One"), revues spécialisées par type de production ("Biomass & bioenergy"), revues orientées sur les impacts environnementaux en général (ex : "Science of the Total Environment", "Agriculture, Ecosystems & Environment", "Climatic Change", "Applied Geography, Environmental Research Letters"), revues traitant des politiques d'usage des sols (ex : "Land Use Policy", "Landscape and urban planning"). La majorité des articles du corpus est issue des revues spécialisées dans le domaine de l'environnement, qui traitent notamment de la partie "impacts" de la thématique de l'étude.

Principales étapes d'une analyse textuelle, intérêts et limites

Les analyses bibliographiques explorant des domaines de connaissance assez larges, comme c'est le cas pour cette étude, sont confrontées au défi du nombre d'articles qui peut atteindre plusieurs milliers et même des dizaines de milliers. Le recours à l'analyse textuelle basée sur une fouille automatisée dans les corpus est un moyen d'exploration rapide pour obtenir une première idée sur les thématiques abordées dans un corpus et les relations qui s'établissent entre elles. Plusieurs études récentes montrent l'intérêt de l'analyse textuelle pour des démarches exploratoires sur une thématique (Reboud et al., 2012 ; Sandoval and Tarot, 2014 ; Tancoigne et al., 2014). Les usages de ces méthodes, conçues initialement dans le cadre d'analyse de discours ou de corpus web par les sociologues, se sont aujourd'hui élargis à d'autres domaines et notamment à l'analyse des corpus scientifiques.

L'analyse textuelle se déroule en deux étapes principales.

L'objectif de la première étape est de repérer des mots ou groupes de mots au sein des articles (titre et résumé ou texte entier) et de calculer leur fréquence dans l'ensemble du corpus. Dans le cas de la présente étude, la fouille a été effectuée sur les titres, résumés et mots clés de chaque article, et non sur le texte entier. Les mots qui n'ont pas de sens spécifique (mots de liaison, mots présents systématiquement dans tous les articles scientifiques, etc.) sont éliminés. Après regroupement des mots ou groupes de mots synonymes, tâche qui n'est qu'en partie automatisée et qui requiert l'intervention d'experts du domaine concerné, un index de mots ou groupes de mots, appelés **identifiants thématiques (IT)**, est généré. Leur fréquence d'occurrence dans le corpus est calculée par l'outil.

La deuxième étape de l'analyse textuelle consiste à calculer les fréquences de **co-occurrences** des mots ou groupes de mots de l'index, c'est-à-dire la fréquence à laquelle ils se retrouvent simultanément dans un même article. Des cartes de co-occurrences sont ensuite tracées pour présenter les résultats de manière synthétique. Ces cartes donnent une représentation visuelle des thématiques traitées dans le corpus. Cette cartographie permet de visualiser les mots-clés les plus fréquents et les plus fréquemment co-cités en les agencant en grappes appelées **clusters**. L'analyse des mots contenus dans un cluster et de leurs relations permet d'identifier une thématique spécifique à ce groupe d'articles. Les relations entre les clusters permettent de mettre en évidence la manière dont les différentes thématiques traitées dans le corpus s'articulent.

Le nombre d'identifiants thématiques qui apparaît sur le fond de carte est un choix de l'utilisateur. Plus le nombre d'IT représentés est important, plus la carte est en théorie informative, mais plus sa lisibilité diminue ; 150 à 200 IT constituent un bon compromis.

L'analyse textuelle permet également d'obtenir des représentations de l'évolution dans le temps de thématiques traitées dans le corpus étudié.

L'analyse lexicale présente plusieurs limites.

Les cartes obtenues sont sensibles aux poids relatifs des différents identifiants thématiques et donc aux regroupements, dont une partie est effectuée manuellement. Selon que l'on aura effectué des regroupements plus ou moins larges, les cartes ne seront pas exactement les mêmes, ce qui affecte en partie la robustesse des résultats. Le choix de ces regroupements repose sur un savoir expert qui tient compte, implicitement ou explicitement, des hypothèses qui ont justifié le recours à l'analyse textuelle. Ainsi, même si le traitement de l'information est fait par l'outil au moyen de méthodes statistiques "objectives", l'intervention des experts dans cette phase de regroupement des termes incorpore une part de subjectivité qu'il s'agit d'assumer. Ce point est particulièrement important car l'analyse textuelle mobilise des outils de l'analyse des données de type ACP, AFC, CAH ; elle a ainsi la réputation d'une méthode "sans a priori", ce qui n'est pas le cas.

Les cartes sont représentées en deux dimensions alors qu'elles sont calculées en multi-dimensions puis projetées sur un plan, ce qui peut créer des chevauchements entre les différents clusters, qui ne sont qu'un effet de la projection mais rendent l'interprétation plus délicate.

De façon plus générale, l'analyse lexicale ne fait que décrire la co-occurrence de certains termes sans donner d'éléments de sens. Elle est donc utile pour repérer de grandes thématiques mais ne permet que de formuler des hypothèses sur la façon dont la littérature scientifique aborde ces thématiques, et a fortiori sur les résultats obtenus.

Dans le cadre de cette étude, c'est l'application d'analyse textuelle CorText Manager qui a été utilisée. Cette plateforme digitale d'analyse de corpus textuels a été développée par l'IFRIS (Institut Francilien Recherche, Innovation, Société). CorText Manager (<http://www.cortext.org/projects/cortext-manager>) permet ici d'explorer la littérature scientifique à grande échelle et de corrélérer de larges quantités de données.

1.2. Objectifs et principes de l'analyse textuelle

Le corpus général de l'étude est constitué d'articles qui sont à l'intersection des domaines de l'évaluation environnementale et du Changement d'affectation des sols (CAS). L'analyse textuelle (cf. Encadré ci-contre) permet alors, au sein de ce champ large, de décrire de manière visuelle les principaux thèmes abordés.

La mobilisation de cet outil a aussi pour objectif d'examiner si le champ de recherche s'est diversifié depuis les premières études qui ont pris en compte les impacts environnementaux dus aux CAS, c'est-à-dire celles qui ont fait le bilan des émissions de GES consécutives à la culture de plantes bioénergétiques, le plus souvent au moyen d'Analyses de cycle de vie (ACV). L'approche est exploratoire, mais vise également à tester quelques hypothèses de sujets en émergence : d'autres réorientations sont-elles étudiées, comme l'introduction de nouvelles cultures ligno-cellulosiques à vocation bioénergétique ou de biomatériaux, ou comme des modifications des pratiques culturales ou d'élevage (intensification - extensification), ou comme l'artificialisation des sols ? Les études concernant les CAS indirects se sont-elles développées ? Des impacts environnementaux autres que ceux liés aux émissions de GES (par exemple sur l'eau, le sol, la biodiversité) sont-ils étudiés de façon significative ?

1.3. Principaux résultats obtenus sur le corpus complet

1.3.1. Analyse des identifiants thématiques : une prédominance non exclusive du couple bioénergie - émissions de GES

La première étape de l'analyse a conduit à l'élaboration d'une liste de 1 331 identifiants thématiques (mots-clés) après extraction automatique des mots les plus fréquents puis regroupement des mots appartenant au même registre lexical. Ce regroupement a été effectué d'abord par le logiciel, puis grâce à l'intervention d'un groupe d'experts restreint mais capable de couvrir les principales facettes de la thématique : économie des filières biocarburants, élevage, écosystèmes forestiers, sol, agronomie, écologie, biodiversité. Tous les termes en rapport avec les changements d'affectation des sols directs et indirects ("*land use*", "*land use change*", "*land use expansion*", "*land grabbing*"...) ont été masqués : le changement d'affectation des sols étant le dénominateur commun de tous les articles, sa présence dans la liste des identifiants thématiques ou sa représentation sur la carte apporterait des informations qui ne sont pas celles recherchées en priorité.

L'analyse des 37 identifiants thématiques les plus fréquents dans le corpus (plus de 500 occurrences, cf. Tableau 1-1), apporte d'emblée une série de résultats.

En ce qui concerne les **réorientations**, on retrouve en premier lieu des identifiants relevant de la production d'énergie ("*biofuel*", "*bioenergy*", "*energy*"), puis de la gestion forestière ("*deforestation*", "*reforestation*", "*afforestation*") et de l'urbanisation ("*urban development*"). D'autres identifiants thématiques sont plus génériques, décrivant soit l'échelle à laquelle se déroule la réorientation ("*farm system*", "*landscape*"), soit une caractérisation plus qualitative des réorientations ("*sustainable production*"). Ainsi, si la thématique des bioénergies a probablement été la plus travaillée, d'autres réorientations agricoles ou liées au développement urbain ont été aussi l'objet de travaux importants intégrant les CAS dans leur évaluation environnementale. Le cas de "*pasture land*" est d'interprétation plus délicate : il peut être le point d'arrivée d'une réorientation vers la prairie, mais il est plus probablement le point de départ d'une réorientation où la prairie disparaît au profit d'une mise en culture.

En ce qui concerne les **impacts environnementaux**, les mots clés liés aux GES ("*GHG emissions*", mais aussi "*carbon*" et "*soil carbon stock*") dominent nettement. Cependant, les autres dimensions de l'écosystème sont présentes : les sols (dégradation et fertilité), l'eau (gestion de la ressource), la biodiversité.

Enfin, en termes de **méthodes**, la prédominance des ACV est évidente. Elle devance de loin l'évaluation des services écosystémiques ou les démarches par indicateurs (1 300 occurrences contre respectivement 941 et 907).

Certains identifiants thématiques semblent pouvoir relever de plusieurs catégories : c'est par exemple le cas du changement climatique, qui peut être vu comme un déterminant d'une réorientation du système, ou comme un impact environnemental lié à une réorientation. C'est également le cas de "*degraded land*", soit (hypothétiquement) parce qu'on cherche à valoriser les sols dégradés ou à les restaurer par un nouvel usage, soit parce que le changement d'usage a entraîné une dégradation du sol.

Identifiant thématique	Catégorie d'identifiant	Nombre d'occurrences
<i>GHG emission</i>	Impact	3 017
<i>Land use policy</i>	Contexte	2 474
<i>Biofuel</i>	Réorientation	2 462
<i>Farm system</i>	Réorientation	2 186
<i>Pasture land</i>	Réorientation	1 990
<i>Urban development</i>	Réorientation	1 583
<i>Impact on biodiversity</i>	Impact	1 576
<i>Erosion and soil degradation</i>	Impact	1 343
<i>Landscape</i>	Réorientation & Impact	1 327
<i>LCA</i>	Méthode	1 312
<i>Bioenergy</i>	Réorientation	1 183
<i>Deforestation</i>	Réorientation	1 165
<i>Climate change</i>	Contexte & Impact	1 156
<i>Soil carbon stock</i>	Impact	1 136
<i>Carbon</i>	Impact	1 114
<i>Degraded Land</i>	Contexte & Impact	991
<i>Habitat</i>	Impact	948
<i>Environmental impacts</i>	Impact	941
<i>Ecosystem service valuation</i>	Méthode	941
<i>Indicators</i>	Méthode	907
<i>Energy</i>	Réorientation	906
<i>Spatial approach</i>	Méthode	818
<i>Species</i>	Impact	801
<i>Climate change impact</i>	Impact	778
<i>Terrestrial carbon sequestration</i>	Impact	762
<i>Scenario uncertainty</i>	Méthode	728
<i>Benefits</i>	Impact	727
<i>Ground water</i>	Impact	648
<i>Reforestation and afforestation</i>	Réorientation	644
<i>Emissions</i>	Impact	632
<i>Nutrients</i>	Impact	622
<i>Water resources</i>	Impact	586
<i>Temperature change</i>	Contexte & Impact	552
<i>Soil fertility</i>	Impact	543
<i>Sustainable production</i>	Réorientation	527
<i>Drivers</i>	Contexte	521
<i>Technology</i>	Contexte	513

Tableau 1-1. Principaux identifiants thématiques (IT) de l'index, ayant des nombres d'occurrences supérieurs à 500 (à l'exclusion des identifiants thématiques se rapportant au changement d'affectation des sols)

Cette analyse de la fréquence des principaux identifiants thématiques donne ainsi une première idée du contenu du corpus, mais n'informe pas sur les articulations entre identifiants thématiques.

1.3.2. Cartographie des identifiants thématiques : huit clusters décrivant réorientations et impacts

• Construction de la carte

La carte décrivant le contenu des articles est représentée sur la Figure 1-2. La méthode vise à construire des groupes d'identifiants thématiques en s'appuyant sur leur fréquence d'apparition et surtout sur les liens qu'ils entretiennent entre eux. Le logiciel comptabilise le nombre d'apparitions conjointes d'identifiants thématiques pris deux à deux (i.e. co-occurrences) dans les titres, résumés et mots-clés de chaque article. Cela permet d'identifier des systèmes de mots-clés présentant un haut degré de co-occurrence et ainsi de donner un contenu thématique aux regroupements (clusters) qui en résultent et qui sont projetés sur une carte (Figure 1-2). Ces groupes d'identifiants thématiques peuvent ainsi réunir des éléments de contexte, de types de réorientation, d'impacts, et de méthodes employées, ou être plus ciblés sur l'une ou l'autre de ces dimensions. Les experts ont été mobilisés pour interpréter ces groupes d'identifiants. La carte permet également d'étudier les liens entre ces clusters, qui dessinent des relations entre les thématiques identifiées. Les liens entre mots-clés et entre thématiques qui apparaissent sur la carte sont des corrélations, utiles pour aider à

formuler des hypothèses, mais qui ne doivent pas être considérées comme des relations causales. La carte n'est pas élaborée en fonction d'hypothèses formulées *a priori*, mais les regroupements effectués par les experts et la description de la carte, en particulier les intitulés donnés aux clusters, tiennent compte des questionnements qui sont à l'origine de l'étude.

• **Identification de huit clusters**

Huit groupes de co-occurrences préférentielles ont été repérés par CorTexT (Figure 1-2). Une lecture détaillée des identifiants thématiques qui constituent ces huit groupes permet d'attribuer à chacun un intitulé synthétique et de caractériser la thématique qu'il aborde (Tableau 1-2). Les identifiants thématiques sélectionnés pour décrire ces clusters sont associés dans les intitulés de façon à décrire les éléments de la chaîne réorientations-CAS-impacts. Tous les clusters intègrent implicitement la thématique du changement d'affectation des sols (CAS), même si les identifiants thématiques le décrivant ont été systématiquement retirés de la carte. L'ordre dans lequel les clusters sont numérotés ici n'est pas porteur de sens, hiérarchique ou autre.

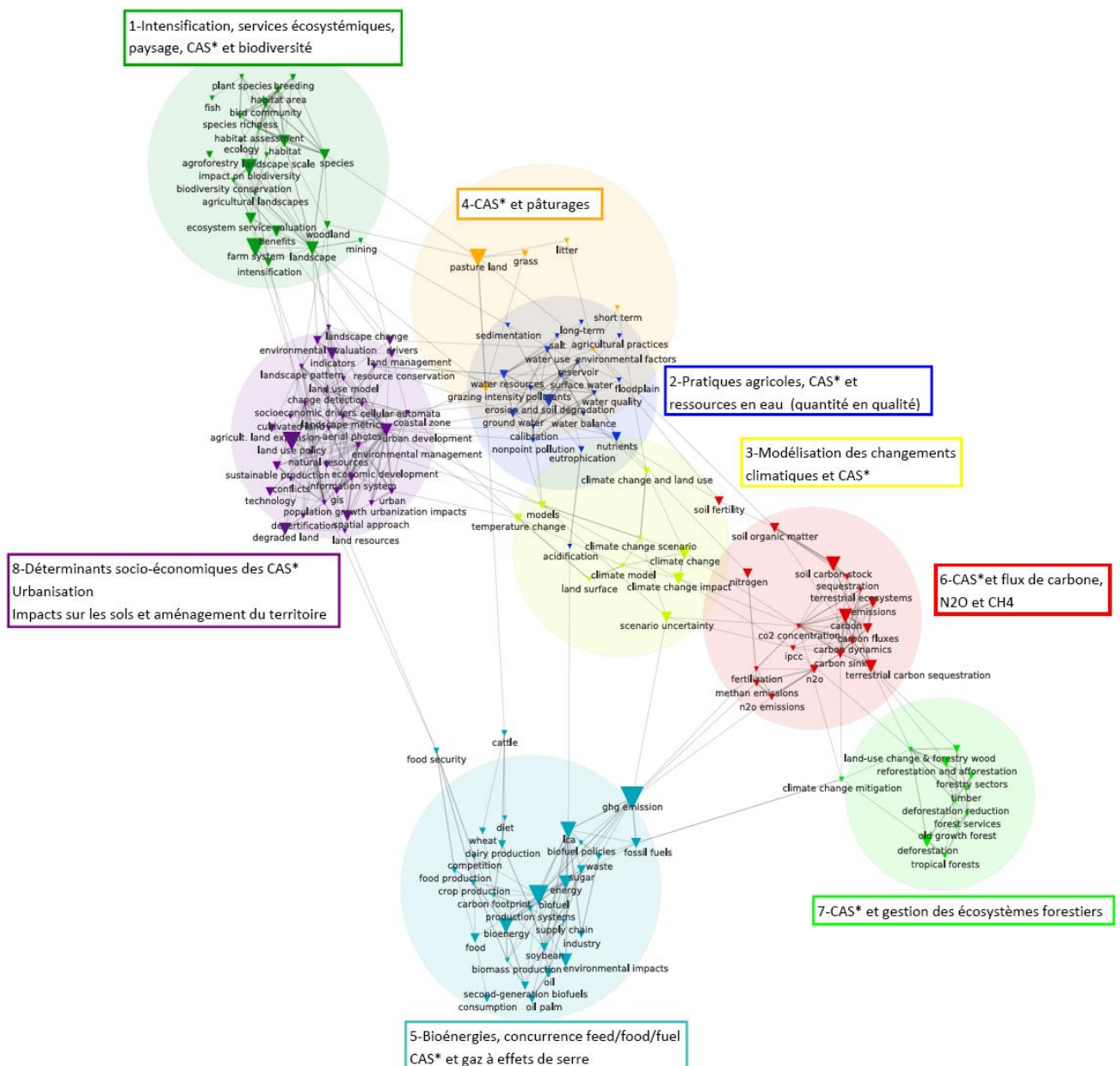


Figure 1-2. Carte du corpus global de 5 730 articles

n°	Intitulé du cluster	Breve description
1	Intensification de l'agriculture, services écosystémiques, paysages, CAS et biodiversité	Cluster agricole centré sur les impacts sur la biodiversité et incorporant des mots-clés liés aux déterminants de ces impacts
2	Pratiques agricoles, CAS et ressources en eau (quantité et qualité)	Cluster agricole décrivant des impacts sur l'eau et dans une moindre mesure sur le sol.
3	Modélisation des changements climatiques et CAS	Cluster centré sur le changement climatique comme élément de contexte biophysique général
4	CAS et pâturages	Cluster consacré à la gestion des prairies
5	Bioénergies, concurrence <i>feed / food / fuel</i> , CAS et bilan GES	Cluster structuré autour du développement des bioénergies en lien avec l'impact sur les émissions de GES
6	CAS et flux de carbone, de N ₂ O et de CH ₄	Cluster décrivant le stock et les flux de GES
7	CAS et gestion des écosystèmes forestiers	Cluster consacré à la gestion des écosystèmes forestiers (déforestation, reforestation, afforestation)
8	Déterminants socio-économiques des CAS, urbanisation et impacts sur les sols et aménagement du territoire.	Cluster faisant le lien entre un élément de contexte (<i>land use policy</i>) et une réorientation principale (<i>urban expansion</i>)

Tableau 1-2. Les clusters de mots-clés repérés par l'analyse textuelle

• Description détaillée des clusters et de leurs liens

La description des clusters se fait dans un ordre permettant de rester cohérent avec la chaîne relationnelle réorientations-CAS-impacts qui est l'objet de cette étude. Elle commence donc par les clusters ayant plutôt une dominante "réorientations et leur déterminants" (cluster 3, centré sur le changement climatique en tant que déterminant), puis clusters 5, 8, 7, 4, traitant respectivement des réorientations bioénergies, urbanisation, déforestation/reforestation, gestion des prairies, pour finir par ceux plutôt orientés "impacts" (6, 1 et 2, traitant respectivement de GES, biodiversité et eau).

Le cluster central, n°3, couvre le domaine générique des changements climatiques en tant qu'élément de contexte biophysique général, avec des identifiants thématiques (IT) qui concernent l'évaluation des changements climatiques et de leurs liens avec les CAS de type "*climate change scenario*" et "*climate model*", ou qui déterminent des réorientations et des CAS (IT "*climat change and land use*"). Ce cluster est très lié à deux clusters décrivant des impacts : sur les flux de carbone, de N₂O et CH₄ (cluster n°6) d'une part (ce qui est logique puisqu'il s'agit de GES impliqués dans le changement climatique) et sur les ressources en eau (cluster n°2) d'autre part (ce qui peut s'expliquer si l'on considère que le changement climatique a un effet sur le régime des précipitations et sur la demande évaporative).

Le cluster n°5 intitulé "Bioénergies, concurrence *feed/food/fuel*, CAS et gaz à effet de serre" est structuré autour de la réorientation liée aux bioénergies. S'y retrouvent les IT "*energy*", "*bioenergy*", "*biofuels*", "*second generation biofuels*". Cette réorientation est fortement liée, au sein du cluster, à un impact principal, les émissions de gaz à effet de serre qu'on reconnaît via les IT "*carbon footprint*" mais surtout "*GHG emission*", ce dernier étant fortement articulé avec le cluster n°6 qui détaille les flux des principaux GES (CO₂, N₂O, NH₄) et les flux de carbone associés. Enfin, ce cluster inclut des identifiants en relation avec le domaine alimentaire comme "*diet*", "*food security*" et "*food production*", ce qui amène à faire l'hypothèse d'une relation de concurrence entre les valorisations alimentaires et non alimentaires de la biomasse, sans que l'on puisse à ce stade prédire si cette concurrence est traitée dans les articles comme une préoccupation qu'il faut avoir lorsque l'on aborde le sujet de la production de bioénergie, ou si elle est vraiment étudiée comme un impact des réorientations bioénergies sur la sécurité alimentaire. On note aussi que ce cluster est lié à celui concernant l'urbanisation via l'identifiant thématique "*food security*". Cet item occupe une position charnière entre la grappe de publications qui concerne l'urbanisation via sa cooccurrence avec l'identifiant thématique "*population growth*" et celle qui concerne la bioénergie via son lien avec les identifiants thématiques "*food*" et "*competition*". Le contexte des "*biofuels policy*" est également présent dans le cluster. En termes de méthodes d'étude associées, de façon attendue, les analyses de cycle de vie (ACV) apparaissent le plus (IT "LCA").

Le cluster n°8 intitulé "Déterminants socio-économiques des CAS, urbanisation, impact sur les sols et aménagement du territoire" est défini par un grand nombre d'identifiants thématiques ce qui dénote la complexité de cette thématique ; cela peut signifier aussi une grande pluridisciplinarité du thème. L'identifiant le plus fréquent de ce cluster est "*land use policy*" très fortement articulé avec l'identifiant "*urban developpement*" : ce cluster est ainsi polarisé sur le lien entre un élément de contexte socio-économique et une réorientation de l'usage de l'espace. Il inclut également un impact environnemental principal traduit par l'identifiant "*degraded land*". Ce cluster est par ailleurs très lié à deux clusters traitant d'impacts environnementaux : le cluster n°1 (impacts sur la biodiversité) et le cluster n°2 (impacts sur les sols et

la ressource en eau). Du point de vue des méthodes mobilisées, ce sont les outils de l'approche spatiale qui dominent (SIG, *aerial photos*, etc.).

Le cluster n°7 intitulé "CAS et gestion des écosystèmes forestiers" concerne les réorientations des systèmes forestiers et s'équilibre entre la déforestation (IT "*deforestation*") et la reforestation (IT "*reforestation and afforestation*"). Ce cluster est fortement lié au cluster n°6 qui décrit les impacts en termes de flux de carbone et de GES, et au cluster n°5 qui décrit les relations entre bioénergie, CAS et émissions de GES. Par ailleurs, à l'interface des clusters n°7 et n°5, on trouve l'IT "*climat change mitigation*" qui traduit probablement l'existence d'études évaluant le potentiel de la gestion forestière et des bioénergies pour réduire l'ampleur du changement climatique.

Le cluster n°4 intitulé "CAS et pâturage", ne contient que peu d'identifiants thématiques qui ancrent clairement ce cluster dans le domaine des réorientations : "*grass*", "*grazing intensity*" et "*pasture land*"; il y a semble-t-il une homogénéité concernant le vocabulaire clé chez les auteurs de cette grappe de publications. "*Pasture land*" représente l'identifiant le plus fréquent du cluster. Il le relie à d'autres clusters, celui sur les bioénergies via l'identifiant thématique "*cattle*" d'une part, et le cluster des impacts sur la biodiversité d'autre part où une co-occurrence avec l'identifiant thématique "*species*" apparaît. L'IT "*grazing intensity*" relie ce cluster avec celui traitant de l'eau et de la dégradation des sols.

Le cluster n°6 intitulé "CAS et flux de carbone, N₂O et CH₄" est fortement lié au cluster n°3 concernant le changement climatique, le caractère causal de ce lien étant très probable. En effet, ce cluster est majoritairement centré sur la description des stocks et flux de carbone, et de façon beaucoup plus minoritaire sur les flux de deux autres GES, le CH₄ et le N₂O. Ce cluster fonctionne essentiellement comme un cluster d'impacts en termes de flux de GES pour le compte des clusters axés sur des "réorientations" avec lesquels il s'articule : le cluster n°5 des bioénergies, via les émissions de tous types de GES ("*CO₂ concentration*", "*methane emissions*" et "*N₂O emissions*"), le cluster n°7 des réorientations forestières (via l'IT "*terrestrial carbon sequestration*"), le cluster n°4 des réorientations "pâturages" (via l'IT "*soil organic matter*").

Le cluster n°1 intitulé "Intensification, services écosystémiques, paysage, CAS et biodiversité" est centré sur les impacts sur la biodiversité, par l'IT "*impact on biodiversity*" et toute une série d'IT rattachés à cet impact, auxquels on peut ajouter de façon plus indirecte l'IT "*ecosystem services valuation*". Les réorientations les plus reliées à cet impact sont, au sein du cluster, l'intensification des pratiques agricoles (IT "*farming systems*" et "*intensification*") et en dehors du cluster, le développement urbain (cluster n°8) et les pratiques de pâturages (cluster n°4). De façon plus secondaire, se retrouve dans ce cluster un identifiant thématique qui concerne l'activité minière (IT "*mining*"). Cette dernière réorientation n'est pas représentée par un cluster autonome compte tenu du faible nombre de publications. Cependant, le fait qu'elle apparaisse dans la carte dénote son emprise sur les CAS et ses impacts sur la biodiversité.

Le cluster n°2 intitulé "Pratiques agricoles, CAS et ressources en eau (quantité et qualité)" décrit une série d'impacts sur la qualité de l'eau (IT "*water quality*", "*non point pollution*", "*eutrophication*"...), sur la gestion quantitative de l'eau (IT "*water balance*", "*water resources*", "*water use*"...) et sur les effets de la dégradation des sols par l'érosion qui affecte la qualité de l'eau (IT "*erosion and soil degradation*"), tous types d'impacts qui sont fortement dépendants des pratiques agricoles mises en œuvre. Ce cluster est lié, à des degrés divers, à diverses réorientations (hormis la gestion des écosystèmes forestiers) : le développement urbain (cluster n°8), via les IT concernant la gestion quantitative de l'eau et l'IT "*erosion and soil degradation*"; la bioénergie (cluster n°5) via les analyses de cycle de vie; la production animale via le pâturage (cluster n°4), de façon moins claire. Par ailleurs, le cluster n°2 est fortement lié au cluster n°3 sur le changement climatique, ce dernier ayant un effet sur le régime de précipitations et l'évolution des zones propices à différentes cultures.

• Principaux enseignements

Des **réorientations** dans l'espace agricole et, plus généralement, dans le territoire apparaissent très liées à des changements d'affectation des sols : l'urbanisation, le développement des bioénergies (apparues dans la littérature dans les années 2000), les changements dans la gestion des écosystèmes forestiers, et, dans une moindre mesure, la gestion des prairies.

Deux **déterminants** principaux semblent pouvoir expliquer l'origine de ces réorientations : (i) le changement climatique, parce qu'il implique une adaptation des pratiques ou une évolution de la nature et de l'usage des productions, qui peuvent aller jusqu'à une remise en cause importante des systèmes agricoles existants et des changements forts des espaces qui leur sont dédiés ; (ii) les politiques d'aménagement du territoire parce qu'elles sont susceptibles d'autoriser voire de stimuler, ou à l'inverse d'interdire ou de réduire, des changements d'affectation des sols, notamment entre les usages terre arable / prairie / forêt / zone artificialisée.

Les impacts environnementaux les plus étudiés dans le corpus concernent principalement l'évolution des teneurs de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la biodiversité et la ressource en eau ; l'impact sur les sols apparaît de façon plus diffuse, en lien avec l'urbanisation et la gestion des prairies.

La problématique de l'alimentation semble interagir fortement avec la production de bioénergie (hypothétiquement *via* des concurrences ou l'utilisation de co-produits).

L'analyse de cette carte globale confirme la présence de thématiques très étudiées et décrites dans la littérature, comme notamment le contexte global du changement climatique, les réorientations liées à l'urbanisation ou à la production de bioénergies ainsi que les impacts des CAS sur les flux de GES, les stocks de carbone ou encore la biodiversité.

L'importance prise par la thématique des ressources en eau est plus difficile à interpréter : soit elle est à mettre en lien avec le contexte de changement climatique, celui-ci se traduisant hypothétiquement par une moindre disponibilité en eau rendant nécessaires des changements d'affectation des sols (l'eau est alors plutôt un déterminant), soit des changements d'affectation des sols ont un impact sur la disponibilité de la ressource, en entraînant une augmentation de la consommation d'eau.

On note enfin une faible présence de thématiques telles que celles liées aux CAS et au développement de l'élevage (hormis par le truchement du rôle des prairies) ou aux CAS et aux évolutions de la consommation alimentaire. L'hypothèse est qu'il s'agit de sujets en émergence qui ne sont donc pas ou peu visibles sur une carte représentant des articles publiés sur une longue période, et pour lesquels un focus a été réalisé.

1.3.3. Focus sur les thématiques liées à l'élevage et à l'alimentation humaine

• Des thématiques qui n'apparaissent que de façon marginale dans la carte principale

Ces deux thématiques apparaissent peu dans les représentations cartographiques du corpus, mais leur probable émergence présente un intérêt important d'un point de vue prospectif : l'évolution des modes de consommation alimentaire humaine ou le développement de l'élevage sont-ils des facteurs susceptibles d'induire des CAS et d'éventuels impacts environnementaux associés ?

Pour les faire apparaître sur les cartes CorText, deux stratégies ont été utilisées : porter à 500 le nombre d'identifiants thématiques représentés sur la carte et y localiser les IT se rapportant à l'alimentation ou à l'élevage ; ou choisir les identifiants thématiques en rapport avec l'élevage et la consommation alimentaire dans l'index global de 1 331 termes et voir comment ils s'articulent avec les principaux identifiants thématiques du corpus.

• Un traitement préférentiel sous l'angle des compétitions pour l'usage des terres (entre alimentation humaine, alimentation animale et bioénergies)

Sur la carte des 500 IT, le cluster "Bioénergie" se scinde en deux clusters correspondant respectivement aux biocarburants de première et de seconde générations. Dans ce dernier, un lien fort apparaît entre "*biomass production*" et "*degraded land*" lui-même très lié à l'identifiant thématique "*farm system*". Il s'agit probablement de références traitant de la valorisation des terres dégradées par les cultures de plantes ligno-cellulosiques relevant des filières 2G. Parallèlement, les identifiants thématiques liés à la consommation alimentaire sont uniquement présents dans le cluster traitant des biocarburants de première génération. La consommation alimentaire semble ainsi être uniquement abordée sous l'angle de la compétition pour l'usage des terres entre "*food*" et "*fuel*". Ceci confirme les hypothèses déduites de la carte précédente.

Les impacts de la modification des régimes alimentaires n'apparaissent pas. Les identifiants thématiques liés au régime alimentaire comme "*diet*" sont associés à l'alimentation animale "*animal feed*" et sont très liés aux identifiants thématiques évoquant l'occupation d'espaces dédiés à la production d'alimentation animale.

Sur la carte affichant sélectivement les identifiants thématiques en rapport avec l'élevage et la consommation alimentaire, un cluster semble se concentrer sur la nutrition et les régimes alimentaires, autour du mot-clé "*diet*". Les IT "*biofuel*" et "*GHG emission*" apparaissent parmi les 5 IT les plus fréquents de ce cluster. On retrouve de nouveau l'idée selon laquelle le thème de l'alimentation semble plutôt traité sous l'angle des impacts de la demande accrue de bioénergie sur les marchés alimentaires.

On peut donc en conclure, de façon hypothétique, que les articles traitant directement de l'impact de l'évolution de la demande et des comportements alimentaires sur les changements d'affectation des sols sont assez peu présents dans

le corpus. Sont plutôt étudiés les usages autres qu'alimentaires (biocarburant, alimentation animale) et les CAS qu'ils induisent, la demande alimentaire n'étant qu'abordée que sous l'angle de la concurrence qu'elle subit de ces deux réorientations dominantes.

1.3.4. Evolution des thématiques traitées dans le corpus au cours du temps

• Construction de la carte dynamique : tracer des trajectoires de publication

Afin de dégager les évolutions dans le temps des thématiques prises en compte dans la littérature et les éventuelles filiations qui peuvent exister entre elles, l'analyse textuelle a été prolongée en utilisant un module spécifique de la plateforme CorTexT permettant une représentation diachronique du corpus.

En découpant le corpus en trois sous-périodes au cours desquelles les nombres d'articles publiés sur les CAS sont sensiblement égaux, on constate que, durant les trente premières années (1976-2007), il y a eu moins de publications que sur les deuxième et troisième périodes qui s'étendent chacune sur 4 ans (2008-2011 ; 2012-2015). A partir de ce découpage temporel, les cartes représentatives de chacune des trois périodes peuvent être connectées entre elles en un schéma de l'évolution des différents clusters d'une période à l'autre (Figure 1-3). Cette schématisation prend la forme de "tubes" reliant les clusters délimités pour chaque période.

La structuration des clusters de la période la plus récente (2012-2015) reproduit d'assez près la structuration de la carte générale : de bas en haut, on retrouve à l'identique les clusters n°6, 7, 1, 5 et 8 ; le cluster intitulé ici "Ressources en eau dans un contexte de changement climatique" résulte de la fusion des clusters n°2 et 3 (que l'on retrouve d'ailleurs séparés lors de la période précédente) ; le cluster "Effet sur les sols" est finalement très similaire au cluster n°4 de la carte principale, qui traite de prairie mais s'articule avec des IT qui concernent la dégradation des sols

Cette représentation permet ainsi de visualiser l'augmentation ou la diminution du nombre de publications pour chaque thématique, l'autonomisation et la fusion des différentes thématiques au cours des différentes périodes ; elle permet aussi de distinguer les sujets émergents ou en régression.

Tubes Layout

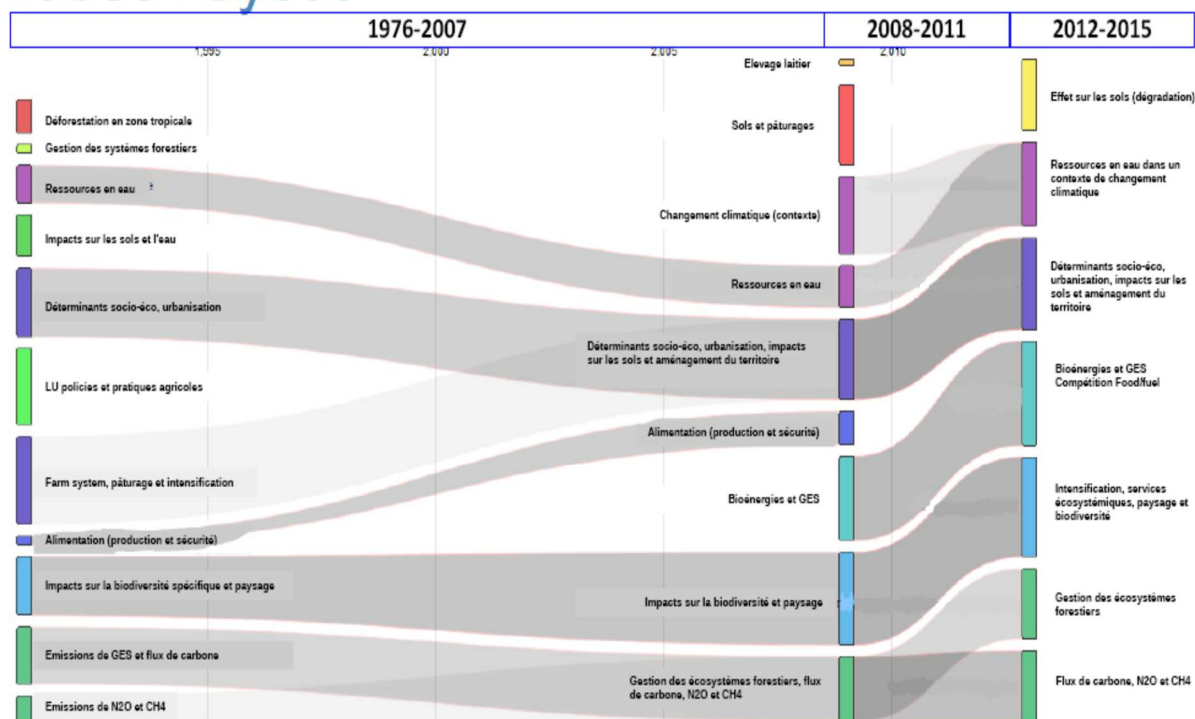


Figure 1-3. Schéma présentant l'évolution des différentes thématiques sur différentes périodes sous forme de tubes.

La largeur des tubes est proportionnelle au nombre de publications présentes dans le cluster. Les tubes sombres relient les clusters (thématiques) dont la permanence d'une période à l'autre est forte, et qui structurent ainsi la dynamique d'évolution du champ de l'étude.

• Analyse de la carte dynamique : évolution des thématiques au cours du temps

De la photosynthèse aux GES : le changement de statut du CO₂

Jusqu'en 2007 (première sous-période), les émissions de CH₄ et de N₂O liées à des CAS sont traitées séparément des émissions de CO₂. Cela peut s'expliquer si l'on considère que le CO₂, avant d'être étudié en tant que GES, a longtemps été étudié comme un élément du cycle du carbone, le substrat de la photosynthèse, ce qui justifiait des études spécifiques, plus centrées sur la fixation du CO₂ dans la biomasse et dans le sol et moins axées sur le bilan des émissions. Ce n'est que dans la deuxième période que semblent se développer des études faisant des bilans complets sur tous les GES, et ce dans deux contextes : (i) sur les écosystèmes forestiers d'une part, ce que traduit la fusion des deux clusters "Emissions de GES et flux de carbone" et "Emissions de N₂O et CH₄", et la disparition des petits clusters "Gestion des écosystèmes forestiers" et "Déforestation en zone tropicale" ; (ii) sur les bioénergies d'autre part, ce que traduit l'apparition d'un cluster "Bioénergie et GES" dans la deuxième période. Dans la troisième période, les thématiques de la gestion forestière et des flux de gaz à effet de serre s'autonomisent : on peut faire l'hypothèse que la thématique "Gestion des écosystèmes forestiers" de la 3^e période aborde des questions de type déforestation ou afforestation qui ne se limitent pas au seul bilan des GES, et parallèlement que les bilans de GES complets constituent désormais une thématique qui n'est plus seulement liée à la forêt, ce que confirme la permanence du cluster "Bioénergie et GES". On obtient donc, dans la troisième période, trois clusters qui sont assez proches, dans leur constitution, des clusters n°5, 6 et 7 de la carte générale.

CAS et sécurité alimentaire : la montée de la concurrence avec les bioénergies

Cette thématique, présente de façon continue quoique discrète dans les première et deuxième périodes, semble néanmoins s'interrompre. En fait, on la retrouve intégrée dans le cluster apparu au cours de la deuxième période et traitant des bioénergies et GES : cela peut traduire le fait que l'impact des CAS sur la sécurité alimentaire est désormais préférentiellement traité sous l'angle de la compétition pour l'usage de la terre entre les productions alimentaire et non alimentaire.

Eau et changement climatique : des interactions qui se renforcent

Les études traitant des impacts des CAS sur l'eau sont présentes sur les trois périodes, avec une forte amplification sur la troisième période, où le cluster "Ressources en eau" fusionne avec un cluster "Changement climatique" apparu au cours de la deuxième période : on se retrouve donc avec un cluster traitant de façon conjointe des deux thématiques. Cette dynamique permet de mieux comprendre la carte générale de l'ensemble du corpus, où l'on a identifié deux clusters très fortement reliés : le cluster n°2 ("Ressources en eau") et le cluster n°3 ("Changement climatique") : dans une vision dynamique, ces deux clusters qui étaient effectivement bien distincts durant la deuxième période vont fusionner dans la troisième, ce que la carte globale, qui ne tient pas compte de la dynamique temporelle, ne traduit qu'imparfaitement. Ce lien renforcé entre le changement climatique et la thématique "ressource en eau" peut hypothétiquement s'expliquer de deux façons complémentaires : un des déterminants des CAS liés au changement climatique étant la modification des régimes de précipitations, on peut penser que des publications font le lien entre eau et changement climatique et expliquent ainsi les CAS ; par ailleurs, le changement climatique sur les zones de cultures a très probablement un impact sur la consommation d'eau, ce que des études sont susceptibles d'aborder. Les publications relevant de ce deuxième type font partie de la thématique de l'étude puisque mesurant un impact environnemental, ce qui n'est pas forcément le cas des publications relevant du premier type.

Impacts sur la biodiversité : l'émergence de la thématique des services écosystémiques

L'impact des CAS sur la biodiversité est une thématique présente sur l'ensemble des trois périodes, de façon continue. D'un point de vue plus qualitatif, on note, dans la période la plus récente, l'apparition d'études traitant des services écosystémiques (dont le concept a été rendu visible par le rapport du *Millennium Ecosystem Assessment* en 2005 ; MEA - Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Urbanisation : la montée des concurrences pour l'usage des sols

Cette thématique, présente dès la première période, s'enrichit dans les périodes récentes de la question de l'impact sur les sols, évolution qui semble cohérente avec la montée récente de la préoccupation de la société au sujet de la disparition des terres agricoles. Cette évolution est aussi à mettre en rapport avec un rapprochement, dans la deuxième période, avec un cluster traitant de pratiques agricoles, notamment de l'"intensification" : c'est probablement l'indice de l'apparition d'études sur l'occupation des sols à l'échelle territoriale, et notamment des approches en termes de *land sharing / land sparing*, dans lesquelles le degré d'intensification de la production est un facteur essentiel.

Pâturages et sols : des trajectoires peu lisibles

Pour ces deux thématiques, la lecture de la dynamique temporelle n'est pas très facile et ne donne pas d'informations claires. Les publications qui traitent d'impact sur les sols semblent être liées à deux types de réorientations : l'urbanisation et la modification de l'intensité du pâturage, sans que le lien aux changements d'affectation des sols ne soit très clair dans ce dernier cas.

• Principaux enseignements

La carte générale (Figure 1-2) est constituée de clusters qui ne tiennent pas compte de la date de publication, ce qui gomme la dynamique temporelle. L'analyse dynamique permet donc d'enrichir l'information de la carte générale. On comprend ainsi mieux que la thématique "CAS et impacts environnementaux" soit si dynamique quand on observe les tendances récentes : émergence du statut du CO₂ comme GES, développement d'études autour de la problématique de la concurrence pour l'usage des terres de différentes orientations (ville, énergie, alimentation).

1.4. Analyse textuelle complémentaire sur la thématique biomasse non alimentaire

1.4.1. Améliorer la description d'un domaine d'intérêt stratégique

La thématique des impacts environnementaux de la production de biomasse non alimentaire a été retenue pour une analyse systématique approfondie qui est présentée dans le Chapitre 2 de cette synthèse. Le corpus qui a servi de base à cette analyse systématique est constitué des articles ayant participé à la constitution du cluster n°5 centré sur les bioénergies (cf. Figure 1-2). Afin d'avoir une meilleure idée de la diversité de ce champ scientifique, une analyse textuelle du sous-corpus a été menée préalablement à l'analyse systématique, afin d'appréhender les différents types de bioénergies étudiées, les types de CAS considérés, la gamme des impacts étudiés, au-delà de la thématique dominante de l'effet de la production de bioénergie sur les émissions de GES. Il est notamment intéressant de voir si les recherches sur les biocarburants de deuxième génération se développent. Les biocarburants de première génération sont en effet de plus en plus questionnés, y compris dans les politiques publiques. L'UE propose de les limiter et à terme de les exclure de ses politiques de transition énergétique.

Le sous-corpus analysé contient des articles qui ne se limitent pas à la seule thématique pointée par les mots-clés présents au sein du cluster, les articles ayant participé à la construction du cluster pouvant aborder d'autres sujets. Comme pour le corpus global, ce sous-corpus a été analysé avec l'outil CorText, ce qui a conduit à l'élaboration d'une nouvelle carte de co-occurrences (Figure 1-4).

1.4.2. Principaux enseignements : une concurrence de la bioénergie avec d'autres usages du sol

La carte peut être lue en considérant qu'elle est structurée en quatre pôles de clusters (Figure 1-4).

• Un pôle constitué d'un cluster centré sur la réorientation bioénergie relié, d'une part, à un cluster associant les enjeux de "*land use policy*" et "*food security*" aux questions de gestion des ressources en eau et, d'autre part, à un cluster décrivant les impacts sur la biodiversité et les méthodes pour les étudier. On retrouve donc les deux tendances des études consacrées aux bioénergies : leur concurrence avec les autres usages des sols, notamment la production alimentaire, et leurs principaux impacts, sur la biodiversité et l'eau, en sus des émissions de GES.

Comparé avec son équivalent sur la carte générale, le cluster "Bioénergies" est constitué d'un ensemble d'identifiants thématiques plus resserrés autour de la problématique de l'énergie et des bioénergies, avec deux identifiants thématiques assez fréquents, "*bioenergy*" et "*biofuel*", et où les biocarburants de seconde génération (2G) sont présents. Le fait de restreindre le corpus à la thématique de la biomasse non alimentaire permet ainsi de rendre plus visibles sur les cartes des IT très importants pour la compréhension du sujet. Les 2G sont bien reliés à l'IT des terres dégradées qui apparaît dans ce cluster et qui est lui-même relié au cluster "*land use policy*" par des IT du domaine de la sécurité alimentaire. Cela peut traduire le fait que l'on cherche des solutions pour éviter la compétition entre la production de biomasse énergie et la production alimentaire en valorisant des terres dégradées pour la production de biocarburants, notamment de 2G, censés s'accommoder de terres moins fertiles.

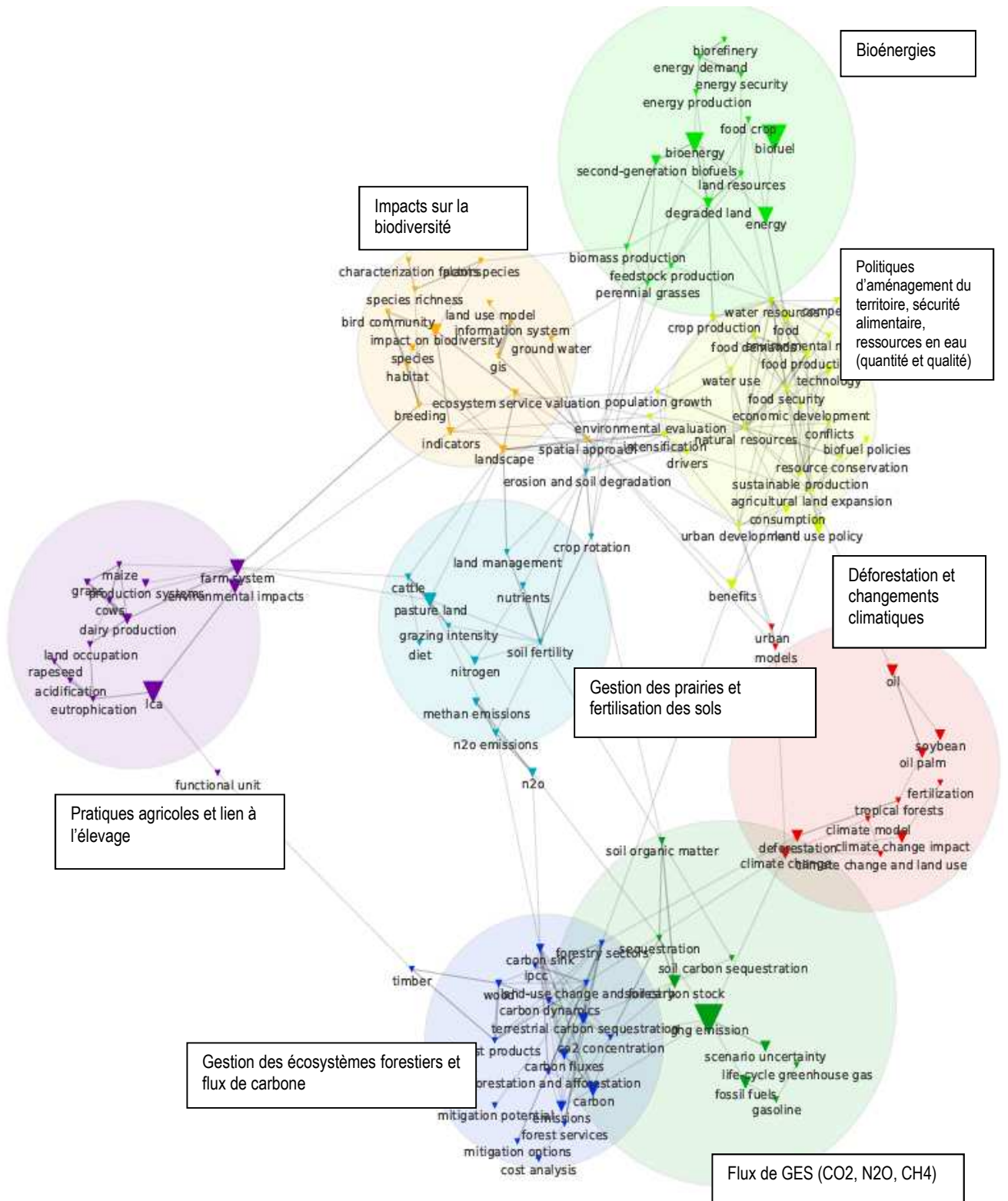


Figure 1-4. Cartographie du sous-corpus bioénergies sur la période globale

• **Un pôle des flux de carbone** regroupant trois clusters, très liés entre eux, consacrés au CO₂ en tant que flux de GES donc plutôt centrés sur les impacts. Ce pôle est articulé autour d'un cluster de taille importante qui concerne les émissions de GES mais aussi la séquestration du carbone dans le sol. Il est relié à un cluster consacré à la déforestation en zone tropicale, citant notamment la production de soja et d'huile de palme. Il s'articule enfin à un troisième cluster déclinant spécifiquement la question de la séquestration de carbone par les forêts présentant des options de mitigation. Ce pôle n'est donc pas directement relié à celui des bioénergies : le lien entre bioénergie et GES "passe par" la forêt et la prairie : cela traduit le fait que les études sur le développement des bioénergies se consacrent de plus en plus à leur impact en terme de CAS et non plus seulement à leurs émissions directes de GES.

• **Un pôle** au centre de la carte, constitué du cluster **sur la gestion des prairies et les émissions de CH₄ et N₂O**. Ce pôle concerne la gestion des prairies et des sols ; il occupe une place centrale, reliée aux trois autres pôles :

- les identifiants thématiques "*methane emissions*" et "*N₂O emissions*" le rattachent au pôle sur les flux de gaz à effets de serre ;
- les identifiants thématiques "*cattle*" et "*pasture*" sont liés au pôle sur l'élevage ;
- les identifiants thématiques "*soil fertility*" et "*erosion and soil degradation*" font le lien avec le pôle sur les bioénergies et sur l'impact sur la biodiversité.

Ces identifiants thématiques expliquent ainsi la position centrale de ce cluster qui concerne la gestion des prairies et les impacts environnementaux induits par leur transformation en zone de culture ou leur utilisation pour l'élevage, ou encore la comparaison entre prairies et forêts, en termes de stockage de carbone sous forme organique dans les sols. Le lien entre le cluster de la gestion des prairies d'une part, les clusters des bioénergies, des impacts sur la biodiversité et de celui concernant la sécurité alimentaire d'autre part, se fait de façon très intéressante via l'IT "*erosion and soil degradation*". Une double interprétation est ici possible : soit il s'agit d'études montrant les impacts environnementaux négatifs du retournement des prairies pour produire de la bioénergie, soit il s'agit de valoriser des terres de prairies dégradées et peu productives pour y produire des bioénergies, sans entrer trop fortement en concurrence avec la production alimentaire.

• **Un pôle des réorientations vers l'élevage**. Ce pôle est composé d'un seul cluster centré sur les "*farming systems*" et en lien avec l'élevage notamment laitier. Il est relié à celui sur la gestion des prairies via "*cattle*", "*pasture land*" et "*farm system*". Il est également lié au cluster qui concerne les impacts sur la biodiversité. Il englobe le couple d'identifiants thématiques "*LCA*" et "*environmental impact*", qui témoigne de la place privilégiée des ACV dans les études d'impact environnemental ; il est cependant plus difficile d'interpréter le positionnement de ces deux IT en lien direct avec les questions d'élevage plutôt qu'avec celles de bioénergie.

La présence d'un cluster élevage peut sembler surprenante s'agissant d'un corpus centré sur la biomasse non alimentaire. Le fait de restreindre le corpus à une thématique plus limitée a permis de faire apparaître des liens qui n'étaient pas lisibles sur la carte générale. L'analyse fine des liens entre IT fait ainsi apparaître un lien entre ce cluster "élevage" et celui des bioénergies via la chaîne des IT *pasture land - soil fertility - soil degradation - degraded land*. Cela peut traduire une forme de compétition entre l'élevage et les bioénergies pour l'usage des terres de prairies, ou bien l'hypothèse de la valorisation des prairies dégradées évoqué ci-dessus, ou encore que les co-produits issus de la production des biocarburants (tourteaux de soja ou de colza, drêches de céréales, par exemple) sont utilisés en alimentation animale.

1.5. Résumé des principaux enseignements de l'analyse textuelle

L'analyse textuelle d'un large corpus de 5 730 articles académiques parus entre 1976 et 2015 nous a permis d'identifier à la fois différents types de réorientations qui conduisent à des CAS, et les impacts environnementaux qui en découlent. Les résultats de l'analyse textuelle ont été présentés sous forme de cartes de co-occurrences lexicales, interprétées à partir d'une chaîne causale élargie (déterminants biophysiques et socio-économiques → réorientations → changements d'affectation des sols → impacts environnementaux).

Les cartes nous ont permis d'identifier huit groupes de mots-clés correspondant à différents types de travaux scientifiques :

- un premier groupe traitant respectivement de la séquestration de carbone dans les sols et du changement climatique, à la fois déterminant biophysique (le changement climatique modifie les conditions de culture, ce qui peut entraîner des CAS) et impact (les CAS peuvent entraîner un stockage ou un déstockage de carbone, ce qui a un effet sur le climat) ;

- un second groupe associant étroitement une réorientation (production de bioénergie) et un impact environnemental (émissions de gaz à effet de serre) ;
- trois autres groupes plutôt centrés sur des réorientations, traitant du développement urbain, de la conduite des prairies, de la gestion forestière ;
- enfin deux groupes où dominent les dimensions "impacts", traitant respectivement des impacts sur la biodiversité et sur la ressource en eau, fortement en lien avec les pratiques agricoles.

Le focus sur les thématiques liées à l'élevage et à l'alimentation humaine confirme les enseignements des analyses générales : une place importante de la thématique bioénergie, avec un lien potentiellement fort entre la production de biocarburants 2G et la thématique des terres dégradées, une demande alimentaire abordée préférentiellement sous l'angle de la concurrence qu'elle subit de la part de la production de bioénergie ou d'aliments pour les animaux, mais assez peu sous l'angle de l'évolution des comportements alimentaires.

Toutes ces thématiques n'ont pas été au centre de l'intérêt des chercheurs au même moment, et l'analyse met au jour **leur évolution temporelle**, leur reconfiguration, ainsi que l'émergence de nouvelles thématiques :

- Le traitement de la problématique des émissions de GES a évolué au cours du temps. On observe, d'une part, une généralisation des études à l'ensemble des GES d'origine agricole (CO₂, N₂O, CH₄) et, d'autre part, une spécialisation des articles selon le type de réorientation (écosystème forestier, production de bioénergie qui émerge à partir de 2008) ;
- Les préoccupations relatives à la concurrence pour l'usage des sols entre alimentation humaine, alimentation animale et production de bioénergie semblent avoir pris de l'importance, notamment à partir de 2008 ;
- De même, on observe également, à partir de 2008, l'émergence du lien entre les éléments de contexte de changement climatique et la question de l'impact sur l'eau ;
- Certaines thématiques persistent, quant à elles, au cours du temps ; c'est le cas de l'impact des CAS sur la biodiversité ou de l'effet de l'urbanisation sur les CAS.

Un approfondissement de l'analyse textuelle sur la réorientation vers la production de "biomasse non alimentaire" met en évidence qu'elle s'inscrit dans les politiques d'usage des terres et dépend à la fois de réglementations nationales ou supranationales (UE). Ce type de réorientation s'inscrit également dans un contexte lié à la dégradation des terres, ce qui peut s'expliquer par le développement d'études sur la valorisation des terres dégradées pour la production de bioénergie (notamment biocarburants de seconde génération) entrant peu en concurrence avec la production alimentaire. L'analyse détaillée du sous-corpus "Réorientation biomasse non alimentaire" a, par ailleurs, mis en évidence la prédominance des analyses de cycle de vie comme méthode d'étude des impacts de la production de bioénergies. On dispose ainsi d'un ensemble important d'études partageant une méthodologie commune, susceptible de faire l'objet d'études approfondies.

2. Bio-énergie et changements d'affectation des sols

A l'issue de la phase d'analyse textuelle, le thème des usages non alimentaires, notamment énergétiques, de la biomasse a été retenu pour une analyse approfondie. Ce choix des commanditaires de l'étude était essentiellement motivé par la volonté d'actualiser les connaissances sur l'impact environnemental des bioénergies et plus largement du développement de la bio-économie, en s'inscrivant dans la suite des études menées par l'Ademe et l'INRA depuis 2010 sur le bilan des émissions de GES liées à la production et l'utilisation des biocarburants. Il a semblé important d'avoir une vision précise d'un ensemble d'impacts environnementaux induits par les CAS liés à la production de biomasse non alimentaire. En effet, c'est la globalité des impacts qu'il faut considérer pour anticiper les effets du développement de la bio-économie.

La production de biomasse s'est considérablement développée au cours des dernières décennies pour répondre aux besoins croissants du secteur de la bio-économie (bio-énergie, biomatériaux ou produits chimiques bio-sourcés), et cette tendance devrait se poursuivre pour compenser la raréfaction des ressources fossiles (Chum *et al.*, 2011). Les interrogations apparues concernant les conséquences de cette production sur l'usage des sols (Searchinger *et al.*, 2008), par exemple) ont induit la publication de nombreux articles scientifiques au cours de ces 10 dernières années (cf. Figure 2-1).

L'objectif de l'analyse est d'examiner la manière dont les recherches sur les liens entre la production de biomasse non alimentaire, les changements d'affectation des sols (CAS), et leurs impacts environnementaux sont actuellement structurées en termes d'objets d'étude (filières, matières premières, régions du monde...), de types de CAS examinés, de diversité des impacts étudiés et de méthodologies employées. L'analyse vise à évaluer les pratiques scientifiques actuelles, à révéler les tendances émergentes dans les études disponibles, et à mettre en évidence les éventuelles lacunes et biais des travaux actuels, ainsi que les voies d'amélioration potentielles.

La particularité de l'analyse proposée est de mettre l'accent sur les mécanismes reliant la production de matières premières aux changements d'affectation et de gestion des sols et à leurs impacts environnementaux. Si des études de synthèse (*reviews*) ont été récemment publiées sur l'effet du développement des bioénergies sur les CAS (Berndes *et al.*, 2013 ; Broth *et al.*, 2013, par exemple), aucune ne comporte de revue systématique de la littérature englobant toute la chaîne de causalité, des déterminants de l'expansion de la biomasse jusqu'à ses impacts environnementaux. Une revue récente de ces "méta-études" (van Vliet *et al.*, 2016) a d'ailleurs mis en évidence cette lacune et la dissociation entre les déterminants des CAS et leurs impacts qui existe dans les recherches actuelles en "*land use science*". Le cadre de lecture proposé ici est ainsi caractérisé par la chaîne de causalité en trois étapes : réorientations vers la production de biomasse non alimentaire → changements d'affectation des sols (directs ou indirects) induits par cette réorientation → impacts environnementaux.

Par ailleurs, ces *reviews* récentes ne prennent en compte qu'un petit nombre d'études (6 pour Broth *et al.*, 2013 ; 15 pour Djomo and Ceulemans, 2012), en raison de critères très stricts de sélection des articles. La présente étude complète donc ces synthèses de deux manières : i) en incluant systématiquement tous les articles revus par des pairs qui couvrent toute la chaîne de causalité et traitent des usages non alimentaires y compris non énergétiques, et ii) en n'appliquant aucun autre critère de qualité afin de retenir un corpus large.

Parmi les 1 785 références bibliographiques classées par l'analyse lexicale automatique dans le cluster "*biomass / bioenergy*", les experts ont ainsi sélectionné, après deux phases de tri, 241 articles.

La méthode d'analyse de ce corpus bibliographique est celle de la revue systématique, qui consiste à dépouiller le contenu des articles à l'aide d'une grille afin d'en extraire les informations pertinentes pour répondre à la question posée.

L'analyse du corpus procède en trois étapes : une description globale, sur l'ensemble du corpus, des types de biomasses, des usages finaux de la biomasse, des types de CAS, des aires géographiques concernées et des méthodes d'évaluation mobilisées ; une analyse de chacun des impacts environnementaux étudiés, sur le changement climatique, les ressources non renouvelables, la qualité du sol, les ressources en eau, la qualité de l'air et la santé humaine, la biodiversité, en lien avec les types de CAS et de biomasse produite ; une analyse transversale aboutissant à un inventaire des lacunes et pistes de recherche.

Correspondance typologie CAS*	Biomasses	Usages finaux non alimentaires possibles					
		Carburant 1G	Carburant 2G	Chaleur	Electricité	Biogaz	Biomatériaux
Cultures (hors CEP)	Blé (tendre ou dur)	X					
	Orge	X					
	Maïs (grain ou plante entière)	X				X	X
	Colza	X					
	Cameline	X					
	Soja	X					
	Betterave sucrière	X					
	Manioc	X					
	Autres biomasses biocarb. 1G	X					
	Sorgho	X	X			X	
Cultures énergétiques pérennes (CEP)	Jatropha	X					
	Canne à sucre	X	X	X	X	X	
	Palmier à huile	X	X	X	X	X	
	Miscanthus		X	X	X	X	X
	Switchgrass (Panic érigé)		X	X	X	X	X
	Taillis à courte rotation (TCR)		X	X	X		X
	Autres biomasses biocarburants 2G		X	X	X		X
Surface en herbe / CEP	Autres herbacées		X	X	X	X	X
Forêt / CEP	Saule		X	X	X		X
	Peuplier		X	X	X		X
	Eucalyptus		X	X	X		X
	Autres feuillus		X	X	X		X
	Résineux		X	X	X		X
	Bois		X	X	X		X
Sans lien direct avec les CAS	Résidus forestiers		X	X	X		X
	Résidus de cultures		X	X	X	X	X
	Effluents d'élevage					X	
	Autres biomasses						

* voir la typologie des usages des sols retenue pour définir les CAS (Section 2.1.2)

Cultures hors CEP
 Cultures énergétiques pérennes
 Surfaces en herbe
 Forêts

Tableau 2-1. Les types de biomasses et leurs usages finaux non alimentaires potentiels (la catégorie d'usage final sous forme de spécialités pour l'industrie chimique n'est pas représentée)

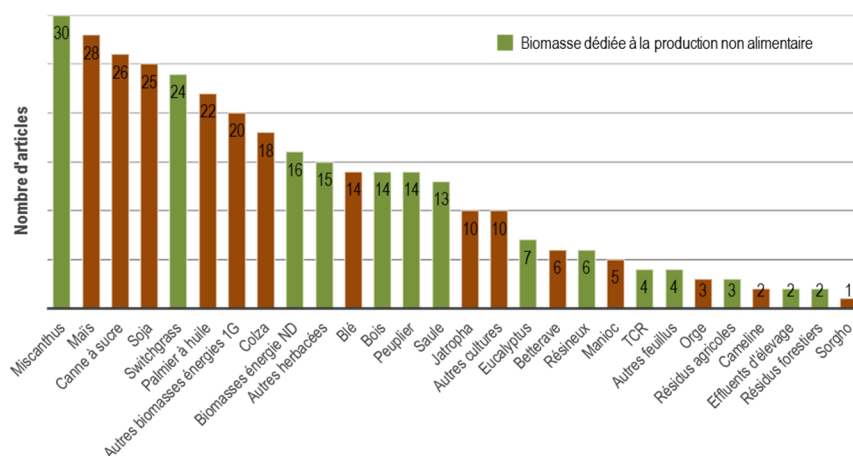


Figure 2-2. Distribution des articles du corpus selon les types de biomasse considérés (biomasses exclusivement dédiées, ou non, aux usages non alimentaires)

2.1. Panorama des recherches actuelles

La prise en compte des CAS dans les recherches sur la production de biomasse non alimentaire est récente : très peu d'articles ont été publiés avant 2008 (Figure 2-1). Cette année a clairement marqué un tournant après lequel les effets des CAS indirects pour les biocarburants 1G ont fait l'objet d'un examen minutieux (Searchinger *et al.*, 2008), se traduisant par une forte augmentation des publications sur le sujet.

Pour procéder à l'analyse systématique des articles, une grille de dépouillement a été élaborée collectivement. Elle comporte 226 items, pour lesquels des listes de modalités ont été définies (typologies de biomasses, d'usages des sols, de grains d'analyse, de méthodes...). Les articles de type *review* ayant été exclus de l'analyse, le corpus traité compte 236 articles.

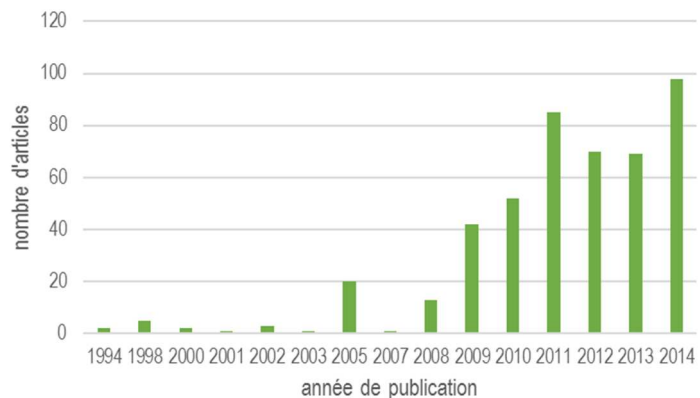


Figure 2-1. Années de publication des articles du corpus "Biomasse-bioénergie"

2.1.1. Les réorientations des productions : types de biomasses et d'usages finaux

• Les typologies de biomasses et d'usages finaux

Les sources et systèmes de production de biomasse sont très diversifiés, allant du maïs pour produire de l'éthanol à la sylviculture. Les filières de valorisation non alimentaire de la biomasse sont aussi multiples. Un type de biomasse peut permettre plusieurs de ces usages finaux, et un produit final peut être obtenu à partir de différentes biomasses. Afin de pouvoir comparer les impacts environnementaux à la fois des différentes productions de biomasse et de leurs différentes utilisations, deux typologies distinctes ont été définies : pour les biomasses et pour les usages finaux de la biomasse.

Les types de **biomasse** ne sont identifiables que dans 185 des 236 articles, 183 précisant également leur usage final. Les biomasses fréquemment mentionnées dans les études sont traitées séparément (cas du miscanthus ou du switchgrass, par exemple), alors que celles qui sont peu représentées dans le corpus ont été regroupées (une classe générique "Herbacées" rassemble ainsi le ray-grass, la luzerne et des espèces cellulosiques non spécifiées). La typologie des biomasses retenue comprend 28 classes (Tableau 2-1).

La typologie d'**usages finaux** comporte 7 classes : biocarburants de première génération (1G ; bioéthanol et biodiesel produits respectivement à partir de sucre/amidon et d'huile), biocarburants de deuxième génération (2G ; bioéthanol et biodiesel produits à partir de biomasse lignocellulosique), chaleur, électricité, biogaz (méthane), bois (en tant que matériau ou à usage énergétique non spécifié), et de façon plus marginale composés pour l'industrie chimique.

• Les réorientations étudiées : l'accent mis sur les biocarburants et une approche mono-usage, mono-ressource

Dans le corpus, 111 articles traitent d'une seule biomasse, 33 en traitent 2, et 41 en traitent au moins 3. L'analyse par espèce ou groupe d'espèces montre que 68 articles (~37% du corpus) traitent des cultures à destination bioéthanol 1G les plus courantes : le maïs, la canne à sucre et le blé. Concernant le biodiesel 1G, les cultures les plus étudiées sont le soja, le palmier à huile et le colza. Bien que globalement les espèces portant sur les biocarburants 1G prédominent dans le corpus (Figure 2-2), l'espèce la plus étudiée est le miscanthus (30 articles), et le switchgrass se trouve en 5^e position (24 articles). L'importante présence dans le corpus de ces deux espèces destinées à la production de biocarburants 2G indique que les recherches sur ces nouvelles matières premières et leurs impacts sont particulièrement soutenues.

Concernant les **usages finaux** (Figure 2-3), 38% des articles traitent des biocarburants 1G, tandis que 52% traitent d'autres utilisations énergétiques (biocarburants 2G, chaleur ou biogaz) et 10% d'usages non énergétiques (biomatériaux ou produits chimiques) ou d'usages énergétiques non spécifiés (bois).

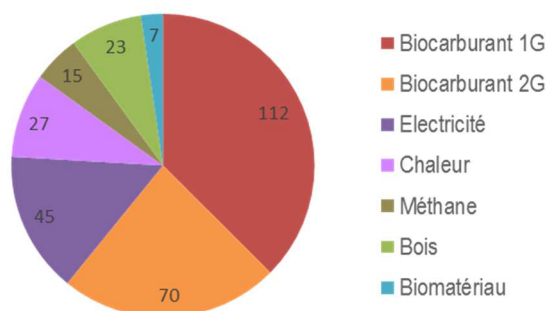


Figure 2-3. Usages finaux de la biomasse étudiés dans le corpus (nombre d'articles)

Bien que la méthanisation fasse l'objet de politiques de développement, cette filière énergétique n'apparaît que dans 5% des articles. Excepté dans des systèmes intensifs impliquant la digestion de la plante entière, la production de biogaz est considérée comme un moyen de valoriser des résidus (effluents d'élevage, paille, sous-produits divers des processus agricoles ou agroalimentaires). La faible représentation de l'usage final "méthane" dans le corpus peut être liée au fait que, par essence, l'usage des résidus induit peu de CAS.

Seuls 75 articles traitent d'au moins deux usages finaux (Tableau 2-2) : 56 comparent différentes espèces pour plusieurs utilisations (33 articles comparent ainsi les impacts des productions de biocarburants de première et deuxième générations), tandis que 19 comparent différentes valorisations énergétiques d'une même matière première (production de bioéthanol ou de chaleur à partir de la canne à sucre, par exemple). Quelques références seulement mentionnent des liens avec les systèmes de production alimentaire.

	Carburant 1G	Carburant 2G	Bois	Chaleur	Electricité	Biogaz	Biomatériau	Total
1 seul usage final	66	19	12	2	4	2	3	108
2 usages finaux	35	33	3	7	18	1	1	49
Plus de 2 usages finaux	11	18	8	18	23	12	3	26
Total	112	70	23	27	45	15	7	183

Tableau 2-2. Répartition des articles selon le nombre d'usages finaux considérés (nombre d'articles)

La littérature scientifique s'intéresse donc particulièrement aux changements d'usage des sols liés à l'augmentation de la production de cultures énergétiques pérennes et de biomasses à destination de biocarburants 1G.

Les **déterminants des réorientations** vers des productions non alimentaires sont les politiques publiques, notamment européennes (directives de l'Union européenne sur les biocarburants et sur les énergies renouvelables de 2009) et américaines (*Energy Policy Act* de 2005 et normes sur les différentes énergies renouvelables aux Etats-Unis, programme éthanol au Brésil).

2.1.2. Les changements d'affectation des sols analysés

• Les types de changements d'affectation des sols

Six types d'**usage des sols** ont été définis : Cultures (ensemble des cultures annuelles ou pluri-annuelles à l'exception des cultures énergétiques pérennes) ; Cultures énergétiques pérennes (espèces herbacées pérennes et espèces ligneuses à destination énergétique ; CEP) ; Surfaces en herbe (prairies permanentes ou de longue durée, "naturelles" ou exploitées, friches) ; Forêts ("naturelle" ou gérée pour la production de bois, à destination non spécifiquement énergétique ou matériaux bio-sourcés) ; Zones artificielles (zones urbaines et friches industrielles) et Zones humides. Les changements d'usage des zones humides ou urbanisées sont peu étudiés (et ne sont donc pas représentés dans les Figures 2-4 et 2-5).

La distinction entre les classes "Cultures" et "Cultures énergétiques pérennes" a été faite pour traiter la spécificité des CPE et les enjeux propres à ces nouvelles cultures (pérennité de l'usage énergétique par rapport à une culture annuelle énergétique, impact environnemental spécifique lié à un type de conduite particulier de ces cultures – faible niveau d'intrants notamment). En fonction des considérations de pratiques et de statut de ces biomasses, les experts ont pu classer certaines espèces ligneuses soit comme des Forêts (gestion légère, plantations plurispécifiques ou recrues naturelles, bois d'œuvre comme destination principale, par exemple) soit comme des CEP (conduite à destination énergétique ou produits bio-sourcés, plantations mono-spécifiques, par exemple). De même, certaines cultures herbacées peuvent être classées en Surfaces en herbe ou en CEP (destinées à la méthanisation, par exemple).

Les **CAS** sont décrits en référence à cette typologie, comme le changement d'un type à un autre. Trente CAS sont ainsi possibles : conversion de Cultures (hors CEP) en Cultures énergétiques pérennes (CEP), de Surfaces en herbe en Cultures... Six autres "réorientations" ont également été prises en compte bien qu'elles ne soient pas associées à un CAS direct : le changement concerne la gestion des cultures (passage à l'agriculture biologique, par exemple) ou leur utilisation (réorientation de cultures annuelles alimentaires vers une valorisation énergétique, par exemple). Trente-six types (ou scénarios) de CAS sont donc considérés. Selon les études, les CAS sont simulés *ex ante* ou observés *ex post*.

• **Les CAS étudiés : un large éventail de cas analysés, mais peu de données de terrain originales**

Dans le corpus, 38 articles ne précisent pas le type de CAS direct ou n'analysent que des CAS indirects, et 4 études ne traitent que de modifications dans les pratiques de gestion ou l'utilisation de la biomasse en l'absence de CAS. Des CAS directs sont donc spécifiés pour seulement 194 articles. La plupart de ces études n'examinent qu'un ou deux types d'usage final des sols (70 et 64 articles, respectivement). Seuls 31 articles considèrent plus de deux CAS simultanément ; généralement ces CAS sont comparés dans le cadre d'études prospectives ou pour anticiper l'effet de politiques publiques. Le corpus totalise près de 500 scénarios.

La majeure partie des **CAS directs** analysés (Figure 2-4) traite de la transition de Cultures ou Surfaces en herbe vers des CEP (respectivement 16 et 14% des CAS analysés), ou de Surfaces en herbe ou Forêts vers des Cultures (respectivement 14% et 11% des CAS analysés). La littérature scientifique sélectionnée s'intéresse donc particulièrement aux changements d'usage des sols liés à l'augmentation de la production de CPE et de biomasses à destination de biocarburants 1G.

L'existence de CASd de Cultures vers Forêts peut être liée à deux phénomènes : l'attribution par les experts de la classe d'usage des sols Forêt pour des plantations forestières à destination énergétique partielle (voir section précédente), ou l'existence de scénarios de reboisement.

Les **CAS indirects** sont décrits de façon moins précise, et ils ne sont identifiés que dans 36 articles, dont 25 considèrent simultanément des CAS directs et indirects. Ces CASi (Figure 2-5) concernent en premier lieu des conversions de Forêts, en Cultures (35 occurrences), CEP (16 occurrences) ou Surfaces en herbe (15 occurrences) ; les autres sont des remplacements de Surfaces en herbe (56 occurrences en tout) ou de Cultures (32 occurrences). Les changements correspondant à une extension des surfaces agricoles sont donc prédominants. Dans 11 des 36 articles, seuls des CAS indirects sont spécifiés (sans CAS direct) ; il s'agit de conversions vers des Cultures, des Forêts ou des CEP, ou de transformations de zones naturelles, suite à des réorientations d'utilisation finale de la production intervenues dans une autre aire géographique.

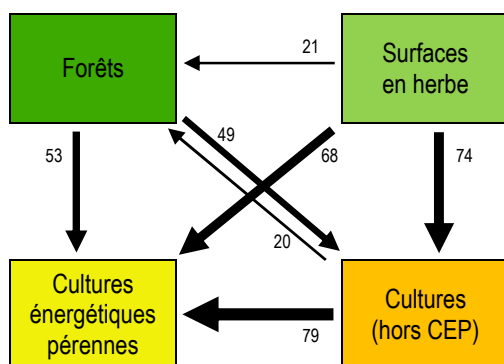


Figure 2-4. Occurrences des 7 principaux types de CAS directs identifiés dans le corpus analysé. Seuls les CAS présents dans plus de 3% des articles sont figurés. Ces 7 types couvrent 74% de tous les CASd identifiés.

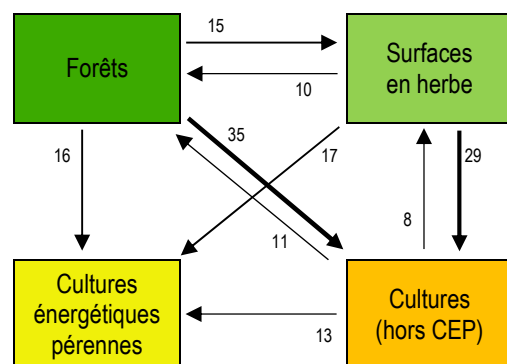


Figure 2-5. Occurrences des 9 principaux types de CAS indirects identifiés dans le corpus analysé. Seuls les CAS présents dans au moins 3 articles sont figurés. Ces 9 types représentent 83% de tous les CASi identifiés.

La montée en puissance des recherches sur les biocarburants 2G, produits potentiellement à partir de cultures énergétiques pérennes, est visible dans le nombre croissant des études visant à évaluer l'impact de CAS vers ces CEP, qui dépassent à partir de 2011 celles des CAS vers des Cultures (Figure 2-6). Les articles traitant de la production de biomasse à partir de Forêts ou de la conversion vers cet usage du sol s'avèrent marginaux dans le corpus.

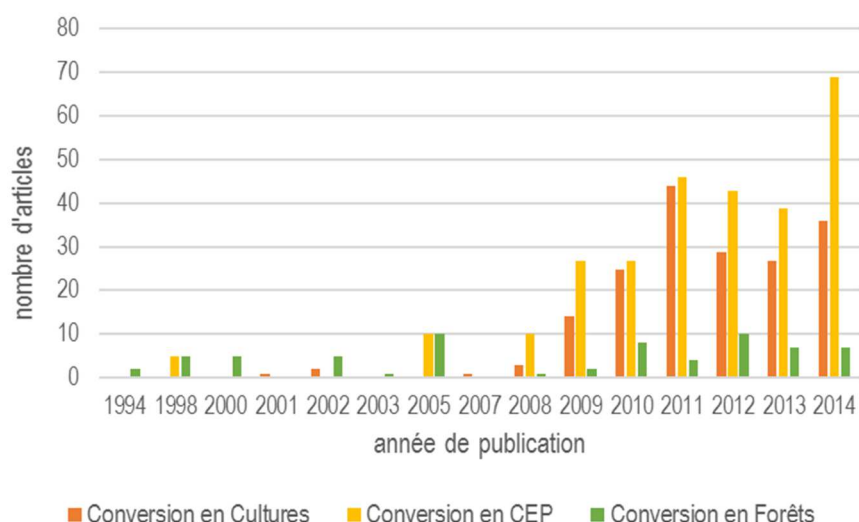


Figure 2-6. CAS directs identifiés selon l'année de publication des articles. CAS vers des cultures annuelles, pérennes ou forestières. Une publication donnée peut traiter un ou plusieurs de ces types de CAS.

Différents types de **données** sur l'usage des sols sont utilisés dans les articles examinés. Une part mineure des études ne précise pas la source de ses données, alors qu'une majorité combine différentes sources de données (98 articles sur 194 en mentionnent au moins deux). Ces sources comprennent des statistiques publiques (47 articles), des bases de données sur l'usage des sols ou sur les sols (57 et 4 articles respectivement), des enquêtes sur l'usage des sols (35 articles) ou des avis d'experts (39 articles). Enfin, des données issues de la bibliographie sur les CAS sont utilisées dans 124 articles.

Quatre-vingt-treize articles portent sur les trajectoires historiques (rétrospectives) ou des scénarios prospectifs de CAS. L'intervalle entre l'occurrence d'un CAS et l'évaluation de son impact varie de l'année au siècle. 77 articles ont développé des scénarios uniquement prospectifs et 22 articles traitent de scénarios uniquement rétrospectifs. Là encore, l'intervalle de temps entre les CAS et l'évaluation de leur impact est très variable (respectivement d'un à 2000 ans, et d'un à 45 ans).

2.1.3. Les zones géographiques d'étude des CAS

L'Europe (74 articles) et l'Amérique du Nord (70) représentent ensemble la majorité des CAS étudiés (Tableau 2-3). L'Afrique est peu représentée dans le corpus. Environ 18% des articles ne spécifient pas de localisation pour les CAS ou considèrent des échelles très larges (respectivement 19 et 21 articles). 94% des articles étudiant les CAS en Amérique du Nord portent sur les États-Unis, seules 3 publications se rapportent au Canada. Les articles concernant l'Europe traitent de 17 pays, dont l'Allemagne (9 articles), le Royaume-Uni (9 articles), l'Irlande (7 articles) et le Danemark (5 articles). La France ne figure que dans quelques références.

Localisation des CAS	Nombre d'occurrences
Europe	74
Amérique du Nord	70
Amérique du Sud	44
Asie	30
Afrique	10
Monde	21
Non précisé	19

Tableau 2-3. Localisation des CAS étudiés

Quelle que soit la zone géographique concernée, les CAS considérés sont en premier lieu des conversions de Cultures, Surfaces en herbe ou Forêts en Cultures énergétiques pérennes, et en second lieu des transformations de Forêts ou de Surfaces en herbe en Cultures. La majorité des conversions en Forêts étudiées ont lieu en Europe, où elles représentent 23% des CAS analysés ; les recherches portent donc plus fréquemment sur les impacts de l'augmentation de la production de bois énergie en Europe que dans les autres régions du monde. Les CAS se produisant en Amérique du Sud comportent des transformations de zones naturelles ou humides en cultures annuelles ou pérennes.

Dans 18 des 25 articles qui considèrent simultanément des CAS directs et indirects, les deux types de CAS interviennent dans la même aire géographique ou le même pays (Tableau 2-4). Les cas où ces localisations sont différentes impliquent surtout l'Europe, dont les CAS induisent des CAS situés très majoritairement hors d'Europe (et notamment en Amérique du sud), et l'Amérique du Sud, dont une partie importante des CAS sont la conséquence de CAS qui se sont produits ailleurs (et notamment en Europe).

Localisation des CASi → ↓ Localisation des CASd	Amérique du Nord	Amérique du Sud	Asie	Afrique	Europe	Ailleurs dans le monde, non spécifié
Amérique du Nord	1	1	1			5
Amérique du Sud		8				
Asie			4			
Afrique				2		
Europe	2	5	2		3	5
Monde ou non spécifié						11

Tableau 2-4. Localisation des CAS indirects en fonction des CAS directs (nombre d'occurrences)

2.1.4. Les impacts évalués

Les différents impacts environnementaux faisant l'objet de l'analyse approfondie des contenus des articles (Section 2.2), seuls la typologie des impacts et leurs poids respectifs dans le corpus sont mentionnés ici.

La grille de dépouillement comporte 8 catégories d'impacts environnementaux, qui concernent : le changement climatique, la consommation de ressources non renouvelables, la qualité des sols, les ressources en eau, la qualité de l'air, la santé humaine, la biodiversité et la production de déchets. Au sein de chaque catégorie, une liste est établie des différents critères d'impacts utilisés pour l'évaluation des effets des CAS (la consommation d'eau, l'eutrophisation des milieux aquatiques... pour les impacts sur l'eau, par exemple).

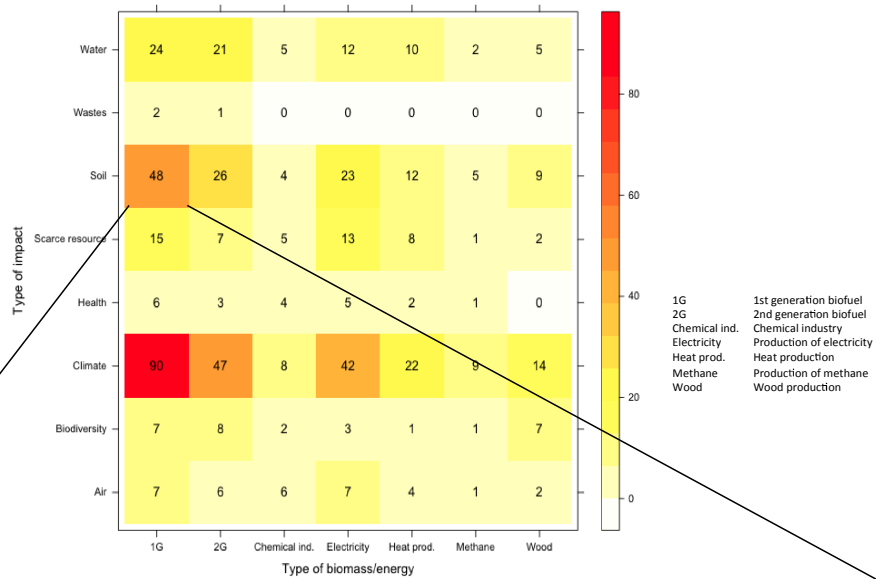
La bibliographie apparaît inégalement répartie entre les types d'impacts, avec une prépondérance des études consacrées aux effets sur le changement climatique, et dans une moindre mesure, aux impacts sur les sols et sur l'eau (Tableau 2-5). Les impacts sur la biodiversité, la qualité de l'air et la santé humaine et sont nettement moins représentés. Les effets sur la production de déchets ne sont abordés que dans 3 publications. La répartition est également inégale en ce qui concerne les usages finaux, où les biocarburants dans leur ensemble représentent plus de la moitié des situations étudiées, tandis que la production d'électricité et de chaleur totalise un tiers. En conséquence, la combinaison de ces 4 usages finaux les plus fréquents avec les 4 impacts les plus fréquents (climat, sol, eau, ressources non renouvelables) totalise près des trois quarts des situations étudiées.

	Carburant 1G	Carburant 2G	Electricité	Chaleur	Méthane	Bois	Pr. chimiques	Total
Changement climatique	90	47	42	22	9	14	8	166
Ress. non renouvelables	15	7	13	8	1	2	5	28
Sols	48	26	23	12	5	9	4	52
Eau	24	21	12	10	2	5	5	54
Air	7	6	7	4	1	2	6	17
Santé humaine	6	3	5	2	1	0	4	9
Biodiversité	7	8	3	1	1	7	2	15
Déchets	2	1	0	0	0	0	0	3
Total	112	70	45	27	15	23	8	241

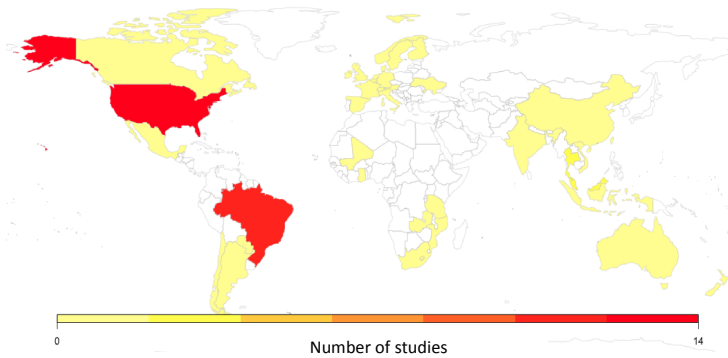
Tableau 2-5. Répartition des articles selon les usages finaux et les types d'impact étudiés (nombre d'articles)

Ce tableau a également été exploité, en figurant des informations complémentaires pour chaque case, dans une démarche de cartographie de données ("*evidence mapping*") visant à fournir un aperçu synthétique des sujets traités (cf. Encadré pages suivantes).

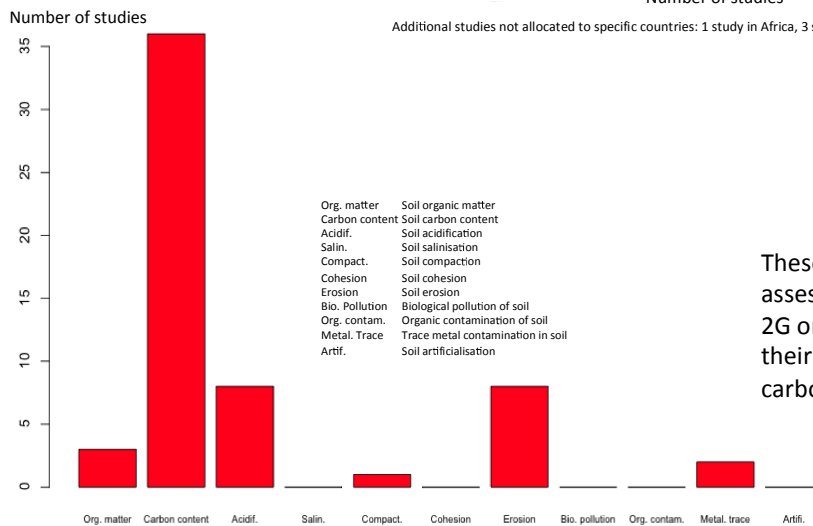
241 studies were included in the evidence map on the basis of systematically designed selection criteria.



48 studies were about the impact of 1G biomass crops on soil. A search of these studies by country indicates where in the world they have been carried out.



Additional studies not allocated to specific countries: 1 study in Africa, 3 studies in Europe, 5 studies in the world



These 48 studies assessed the impact of 2G on soil, mainly across their effects on soil carbon content.

Figure 2-7. Cartographie des données des impacts sur le sol des CAS associés à la production de biocarburants de première génération

La cartographie de données ("evidence mapping")

• Principe et construction

La cartographie de données est une méthode développée récemment pour la synthèse d'études scientifiques. Son objectif est de réaliser "une recherche systématique sur un vaste domaine permettant d'identifier les lacunes dans les connaissances et/ou les besoins de recherches futures, et présentant les résultats sous une forme facile à appréhender, souvent un schéma ou un graphique, ou sous forme de base de données consultable" (Miake-Lye et al., 2016). Dans un article récent, McKinnon et al. ont recommandé aux scientifiques et aux parties prenantes d'utiliser la cartographie de données sur des sujets essentiels au développement durable, tels que les énergies renouvelables (McKinnon et al., 2015).

Cette approche a été appliquée dans notre étude à partir d'un tableau décrivant les 241 articles sélectionnés. Chaque étude a été caractérisée par ses types d'usage de la biomasse et ses types d'impact environnemental. Au total, sept types d'usage de la biomasse (bois, biocarburants 1G, biocarburants 2G, méthane, industrie chimique, production de chaleur, production d'électricité) et aux huit types d'impacts environnementaux (sols, eau, air, biodiversité, santé humaine, climat, ressources non renouvelables, production et élimination des déchets) ont été distingués. La combinaison de ces usages de la biomasse et impacts environnementaux définit 56 catégories d'études. Les nombres d'études disponibles dans chaque catégorie sont décomptés puis reportés dans un tableau de contingence.

Pour chaque combinaison d'usage et d'impact, une cartographie des données est produite, en assemblant trois éléments : i) le tableau de contingence, ii) un histogramme indiquant le nombre d'articles évaluant l'effet de la production de biomasse sur différents critères d'impact, et iii) une mappemonde donnant le nombre d'études par pays. Trois brefs textes en explicitent les conclusions principales.

Parmi les 56 catégories définies, les six plus fréquemment étudiées sont "Impact du biocarburant 1G sur le climat" (90 articles), "Impact du biocarburant 1G sur les sols" (48), "Impact du biocarburant 2G sur le climat" (47), "Impact sur le climat de la production d'électricité à partir de la biomasse" (42), "Impact du biocarburant 2G sur les sols" (26) et "Impact du biocarburant 1G sur l'eau" (24). Une cartographie de données a été produite pour chacune de ces catégories, dont un exemple est présenté ici (Figure 2-7).

• Résultats

Les cartographies indiquent que dans les sources documentaires, l'accent est mis principalement sur les biocarburants 1G et 2G et sur leurs impacts sur le climat et les sols (cf. le tableau de contingence, Figure 2-7). Cependant, un nombre conséquent d'études porte sur l'utilisation de la biomasse pour la production d'électricité et sur son impact sur le climat et les sols. L'impact sur l'eau est également évalué dans un nombre relativement élevé d'études. En revanche, les impacts sur les déchets, la santé humaine, l'air et la biodiversité ne sont que rarement étudiés, de même que les impacts de la production de méthane, de bois et de l'industrie chimique.

Les études sont réparties sur tous les continents, mais concernent surtout l'Amérique du Nord et du Sud, notamment les États-Unis et le Brésil. Les travaux portant sur l'Europe et l'Asie sont moins nombreux, et seules quelques études traitent de l'Afrique (de l'Ouest et du Sud-Est). Le pays affichant le plus grand nombre d'articles est en général les États-Unis, à une exception près : c'est le Brésil qui présente le plus grand nombre d'articles pour la catégorie "Électricité/Climat". Plusieurs études ne traitent pas d'un pays en particulier, mais de régions plus vastes (ex. : Europe, Afrique).

L'impact sur le climat du changement d'affectation des sols pour les biocarburants 1G, les biocarburants 2G et la bioélectricité a été essentiellement étudié en analysant les émissions de GES générées par ces types de bioénergie ; l'effet sur l'albédo de surface est rarement évalué. Dans le cas des biocarburants 1G (Figure 2-7), l'impact du CAS sur la teneur en carbone des sols est fréquemment étudié ; certains autres critères d'impact sur la qualité des sols comme l'érosion et l'acidification sont aussi souvent pris en compte. D'autres critères (le compactage, la présence de traces de métaux...) sont en revanche peu étudiés (moins de 5 articles par catégorie). Les effets sur l'eau de CAS pour les biocarburants 1G sont étudiés selon un grand nombre de critères, notamment l'eutrophisation et la pollution chimique, mais aussi la régulation des flux d'eau et la pollution biologique.

2.1.5. Les méthodes d'évaluation des CAS et de leurs impacts

• Les types de méthodes utilisés

L'analyse textuelle du corpus initial de références a mis en évidence un large éventail de méthodes employées pour examiner la chaîne réorientations-CAS-impacts. Ces méthodes ont été regroupées en six catégories (Tableau 2-6), définies par le type de traitement des données utilisé (calculs simples, analyse statistique ou modèles basés sur les processus), ou le recours à des cadres plus élaborés tels que l'analyse du cycle de vie (ACV) ou les modèles économiques.

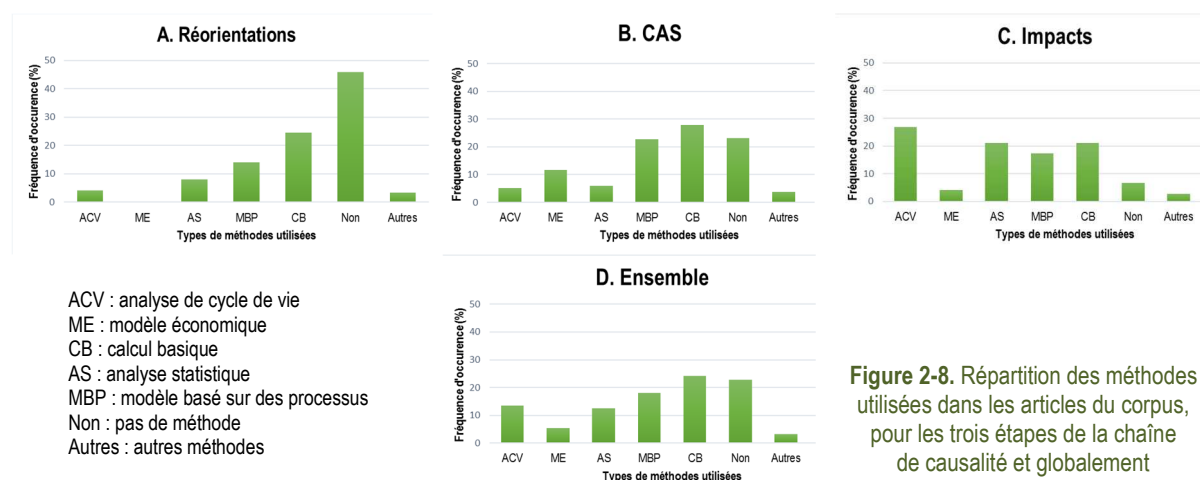
Catégorie de méthode	Méthodes
Modèle économique	Modèle d'équilibre général ou partiel, modèle microéconomique, modèle d'exploitation agricole
Modèle basé sur les processus	Modèle biophysique, modèle écosystémique, modèle de surface terrestre, modèles écologiques, modèle hydrologique
Analyse de cycle de vie (ACV)	Évaluation des impacts sur le cycle de vie, ACV conséquentielle
Calculs basiques	Relations linéaires, ratios simples
Analyse statistique	Analyse d'incertitude et de sensibilité, régression, méta-analyse, utilisation de données statistiques
Autre	Analyse multicritère (autre que les ACV)

Tableau 2-6. Les catégories de méthodes utilisées

Les interactions possibles entre la localisation des CAS et les méthodes utilisées pour évaluer leurs effets ont été étudiées en comparant les deux grandes régions du monde les plus étudiées dans le corpus : l'Europe et les États-Unis. La répartition des méthodes y est comparable, à quelques exceptions près : les modèles biophysiques sont utilisés plus fréquemment dans les études nord-américaines pour estimer les CAS *per se* ; l'ACV est employée plus souvent dans les études européennes pour l'évaluation de l'impact.

• Une absence de consensus méthodologique favorisant les calculs *ad hoc* simples

La Figure 2-8 fait état de l'occurrence des différentes catégories de méthodes utilisées, pour chacune des étapes de la chaîne de causalité réorientations-CAS-impacts, et globalement.



Globalement (Figure 2-8 D), les catégories dominantes sont "calculs basiques" et "sans méthode", avec une occurrence cumulée de près de 45%. Environ une étude sur cinq (hors articles de *review*) se fonde sur des données issues de la bibliographie pour estimer au moins l'une des trois étapes de la chaîne de causalité. Une proportion similaire utilise des relations très simples. Elles consistent, par exemple, à calculer les CAS indirects en remplaçant un hectare de cultures alimentaires réaffecté à la bioénergie par une surface "équivalente" d'un écosystème naturel nécessaire pour produire la même quantité d'aliments. Ces raisonnements simples sont particulièrement fréquents pour la **première étape** de la chaîne, les réorientations (Figure 2-8 A), leurs déterminants étant souvent considérés comme exogènes dans les études.

Des méthodes plus sophistiquées mobilisent des modèles économiques, qui considèrent des cadres stratégiques plus larges (liés à l'atténuation du changement climatique, par exemple), des modèles basés sur les processus ou l'ACV.

Cette dernière est mobilisée dans sa variante conséquentielle², qui vise à prendre en compte les implications des décisions de développement d'un produit fini particulier, y compris les CAS ; cette approche a été largement appliquée à la biomasse durant la dernière décennie, ce qui explique la présence (toutefois marginale) de l'ACV dans l'étape d'évaluation des CAS. Pour cette **deuxième étape** on note, outre la fréquence des méthodes simples (ou de l'absence de méthode), l'importance, attendue, des modèles économiques, ainsi que celle des modèles basés sur les processus. Ces derniers sont souvent utilisés en combinaison avec des modèles économiques (dans 11 des 35 études mobilisant des modèles économiques), afin de déterminer la fonction de production des différents types d'usage des sols, et d'identifier les conversions les plus rentables en fonction des variations des prix du marché. Les modèles biophysiques sont toutefois utilisés seuls dans la plupart des cas, ou avec des méthodes plus simples (calculs basiques ou analyses statistiques).

Pour la **troisième étape** d'évaluation des impacts des CAS (Figure 2-8 C), l'ACV occupe une place importante, avec 25% des méthodes utilisées. Les méthodes plus simples restent toutefois majoritaires (avec une part cumulée de 40%), tandis que les modèles basés sur les processus sont présents dans près de 20% des études. La catégorie "sans méthode" est à son niveau le plus bas (10%), ce qui indique que, lorsqu'ils traitent toute la chaîne de causalité, les auteurs utilisent des méthodes plus spécifiques pour l'évaluation des impacts que pour les deux premières étapes.

Les chiffres d'utilisations de la plupart des catégories de méthodes sont en hausse après 2008, ce qui indique qu'aucun cadre spécifique n'a été établi (Figure 2-9). Malgré une disponibilité croissante de méthodes pour quantifier les CAS (modèles économiques), la plupart des auteurs ont choisi de ne pas les mettre en œuvre et de suivre des méthodes simples (regroupées sous la catégorie "calculs basiques"), qui restent largement utilisées sur toute la période. Toutefois, deux autres catégories ont nettement augmenté après 2008 : l'ACV et les modèles basés sur les processus. L'utilisation des modèles économiques a également augmenté, mais elle reste deux fois moins fréquente que celles des deux catégories précédentes.

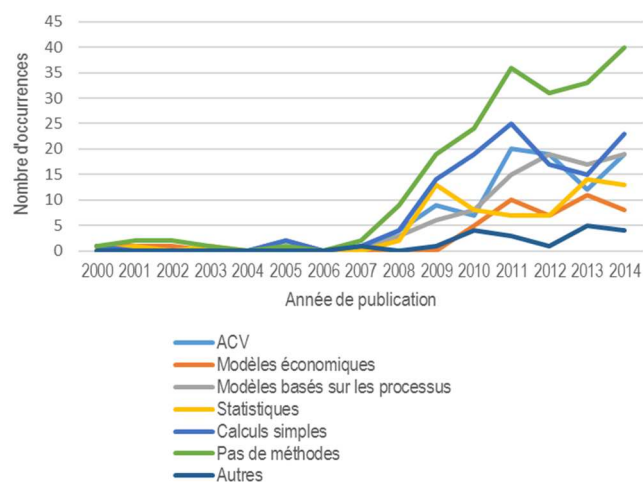


Figure 2-9. Evolution des méthodes utilisées (selon l'année de publication des articles du corpus)

2.2. Analyses par impact environnemental

Pour chacune des catégories d'impacts, sont examinés : le détail des impacts évalués, les situations étudiées (réorientations, CAS, localisations), les données et méthodes d'évaluation mobilisées, et les résultats ou tendances qui se dégagent de l'analyse.

L'un des objectifs de l'analyse approfondie des articles est de déterminer si les résultats des différentes études disponibles permettent de dégager des conclusions, ou au moins des tendances, concernant les impacts environnementaux comparés des différentes productions de biomasse ou filières énergétiques. Pour les différents critères d'impact évalués, l'expert lecteur note pour chaque article (ou pour chaque type de scénario examiné dans l'article) les conclusions auxquelles parviennent les auteurs : le(s) CAS envisagé(s) ont-ils pour effet d'aggraver l'impact ("augmentation"), de le réduire ("baisse"), sont-ils sans effet ("neutre") ou les effets sont-ils différents selon les situations ou scénarios analysés ("variable") ? Si le critère est renseigné dans un nombre suffisant d'études, les pourcentages des quatre réponses sont calculés.

² L'ACV conséquentielle décrit la manière dont seront affectés les échanges de flux physiques entre le système évalué et l'environnement, en tenant compte des effets de ce système (une filière bioénergie par exemple) sur d'autres produits ou secteurs de l'économie (elle évalue donc l'effet des possibles décisions stratégiques). Alors que l'ACV attributionnelle cherche à associer au même produit des émissions et impacts liés exclusivement aux étapes propres au cycle de vie de ce produit.

2.2.1. Les impacts sur le changement climatique

L'impact sur le climat des productions de biomasse non alimentaire, et notamment l'intensité carbone des biocarburants, est l'un des enjeux les plus mis en avant pour la biomasse non alimentaire. Un moindre impact carbone des biocarburants a été le principal argument des soutiens accordés à leur développement, jusqu'à sa remise en question, en particulier en raison de la concurrence avec la production alimentaire. Plus généralement, les performances comparées des différentes filières, et notamment des biocarburants de 1^{re} et 2^e générations, font l'objet de nombreuses études et débats.

Les impacts sur le changement climatique sont traités dans 166 articles, soit près de 70% du corpus, loin devant les impacts sur l'eau (54 articles). Les publications commencent en 2008.

Les *reviews* disponibles (Berndes *et al.*, 2013 ; Broth *et al.*, 2013 ; Djomo and Ceulemans, 2012) permettent de réduire la liste des déterminants clés de l'intensité carbone des biocarburants, mais pas d'établir si elle est plus faible que celle des combustibles fossiles en général. Cette impossibilité de conclure pourrait tenir au petit nombre d'études considérées (6 pour Broth *et al.*, 15 pour Djomo et Ceulemans), résultant de l'application de critères très stricts de sélection des articles.

• Les impacts évalués

Les impacts sur le climat les plus souvent évalués concernent les émissions de GES au sens large, qui comprennent les émissions de CO₂ issues de la combustion de ressources fossiles et celles liées à d'autres postes (N₂O émis principalement par la fertilisation azotée), mais aussi la séquestration ou libération de carbone sous forme organique (dans la biomasse végétale ou le sol). Toutefois, le périmètre choisi est très variable selon les études : ainsi certaines se cantonnent au carbone organique, d'autres ignorent les variations de carbone dans le sol... Cette variabilité dans le périmètre complexifie considérablement l'interprétation des résultats.

Quelques autres critères sont évalués plus ponctuellement comme la modification de l'albédo des surfaces (paramètre biophysique qui mesure la part de rayonnement solaire réfléchi par les écosystèmes), examinée dans 6 articles.

Les impacts sur le climat sont souvent étudiés seuls. Sinon, les impacts sur l'eau, sur les sols (autres que le stockage de carbone) et sur la consommation de ressources fossiles sont les trois catégories d'impacts les plus fréquemment évaluées conjointement avec l'impact sur le climat.

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Climat"

Les principaux **usages finaux** étudiés sont les productions de biocarburants 1G et 2G (58% des occurrences), mais aussi d'électricité ou de chaleur ; les usages non énergétiques sont minoritaires (8% des cas). Les **biomasses** les plus étudiées sont donc logiquement les cultures flexibles utilisées pour les biocarburants 1G (céréales, oléoprotéagineux et canne à sucre) et les cultures lignocellulosiques employées par les autres filières énergétiques (espèces herbacées et nombreuses ligneuses, conduites en taillis à courte rotation ou non).

Les **CAS directs** (CASd) prédominants sont les conversions de Forêts et Surfaces en herbe en cultures, avec des taux similaires pour les Cultures et les CEP, ainsi que la conversion de Cultures en CEP (Figure 2-10). Ces observations valent aussi pour les **CAS indirects** (CASi), à l'exception près que la forêt y est le principal usage initial du sol et les cultures annuelles le principal usage final. La conversion de zones humides est relativement peu étudiée ; quand elle l'est, il s'agit le plus souvent de conversion vers des cultures pérennes comme le palmier à huile.

La plupart des articles traitant les CASi les évaluent à l'échelle mondiale. C'est particulièrement le cas lorsque le CASd se produit en Europe ou en Amérique du Nord ; lorsqu'il a lieu en Amérique du Sud ou en Asie du Sud-est, les articles qui traitent du CASi sur le même continent sont au moins aussi nombreux que ceux qui adoptent une approche globale.

Les **continents** les plus fréquemment étudiés sont l'Amérique du Nord (47 articles) et l'Europe (45), mais un nombre significatif d'articles évalue des CAS se produisant en Amérique du Sud (30 articles) ou en Asie du Sud-est (25). Les autres zones sont peu étudiées : 7 articles abordent l'Afrique, 3 l'Asie de l'Est et 2 l'Océanie.

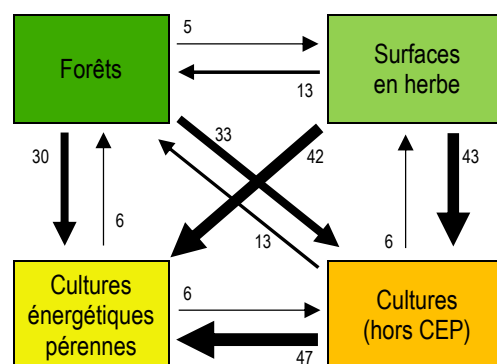


Figure 2-10. Les principaux CAS directs étudiés (% d'articles) dans le sous-corpus "Climat". Seuls les CAS examinés dans au moins 5% des 166 articles sont représentés.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

73% des articles ne collectent pas de données originales, et utilisent des données secondaires ou des sorties de modèles pour quantifier les émissions de GES ou la séquestration de carbone suite aux CAS (voir la Section 2.2.3., consacrée aux impacts sur la qualité des sols). Cette rareté des données primaires va de pair avec celle des études réalisées à une échelle fine (exploitation, parcelle) ; 85% des CAS sont étudiés à des échelles larges (région, pays ou au-delà).

Plus de la moitié des articles recourent à l'ACV (principalement pour l'évaluation des impacts). Les modèles biophysiques et économiques sont utilisés dans 20% des articles, et le sont conjointement dans environ 10% des cas. Seuls 20% des articles n'emploient aucune de ces trois méthodes.

• Les tendances

Les publications académiques revues par les pairs ne donnent pas une vision tranchée de l'impact de la production de biomasse non alimentaire sur les émissions de GES. Près de la moitié des études conclut à une réduction des émissions de GES ou à une augmentation de la séquestration de carbone suite à une conversion de cultures dédiées à l'alimentation humaine ou animale en cultures non alimentaires. Mais l'autre moitié des études conclut soit à une augmentation des émissions, soit à un effet variable, dépendant du scénario considéré (Figure 2-11).

Étant donné que l'intensité carbone des biocarburants liée aux CAS dépend fortement de l'endroit où la biomasse est cultivée et de l'usage des sols qu'elle remplace, il est intéressant de voir si des types spécifiques de CAS peuvent être associés à certains types de biomasses. De façon inattendue, la conversion directe de forêts et surfaces en herbe est moins fréquente pour les cultures lignocellulosiques ou le bois. Seules les implantations de jatropha et de palmier à huile sont plus souvent associées à la déforestation que d'autres cultures. La localisation de la réaffectation n'est corrélée à aucune différence nette concernant l'origine (forêt, culture annuelle ou prairie) des CAS, directs ou indirects.

Finalement, la stratégie d'examen d'un grand nombre d'articles ne s'avère pas plus conclusive que la sélectivité appliquée par les *reviews* antérieures. Cela justifie l'intérêt de conduire une méta-analyse sur ce sous-corpus (cf. Chapitre 3) en extrayant les données de chaque scénario décrit dans l'article.

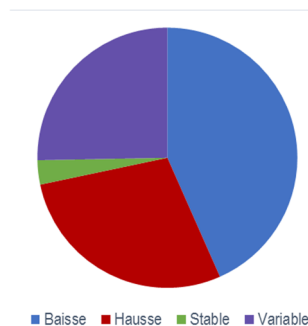


Figure 2-11. Effets des CAS sur les émissions de GES (nombre d'études concluant à leur baisse, à leur augmentation, à l'absence d'effet ou à des effets variables)

2.2.2. Les impacts sur les ressources non renouvelables

La question de la production de biomasse non alimentaire est fortement liée aux problématiques de diminution des ressources non renouvelables car la biomasse peut substituer des combustibles fossiles (pour la production de biocarburant ou de bioélectricité). D'autres ressources non renouvelables sont mobilisées dans la production agricole, en particulier le phosphore utilisé comme fertilisant provenant de mines, cependant peu d'études s'intéressent à cet impact.

La consommation des ressources non renouvelables est quantifiée dans 28 références du corpus. Ces articles sont en fait plutôt focalisés sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources fossiles étant un résultat collatéral. Ils ont été publiés à partir de 2010, avec 5 ou 6 articles par an à partir de 2011.

• Les impacts évalués

Sur les 28 références traitant de l'épuisement des ressources non renouvelables, une seule concerne le phosphore, toutes les autres portent sur les hydrocarbures fossiles utilisés pour la production d'énergie et la chimie organique. Elles évaluent toutes les émissions de GES, c'est-à-dire pas seulement celles issues de la combustion de ressources fossiles.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

Pour la **quantification des CAS**, les données utilisées sont majoritairement tirées de la littérature (20 études), mais également de données d'occupation des sols (8 études), de dires d'experts (7 études) et d'autres sources diverses (11 études) ; la plupart des travaux utilisent au moins deux sources de données. Les méthodes sont essentiellement des calculs simples, qui peuvent aussi être complétés par des modèles fondés sur les mécanismes.

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Ressources non renouvelables"

Les sources de biomasse issues des réorientations sont partagées entre cultures à grains récoltés et plantes entières, bois et résidus. Dans les **usages finaux**, les produits pour l'industrie (qui proviennent de résidus et de grains) sont un peu plus représentés (10% des articles) que dans les autres sous-corpus.

Les **CAS directs** (Figure 2-12) les plus nombreux sont des conversions en cultures énergétiques pérennes, qui remplacent surtout des Surfaces en herbe et des Cultures, mais également des Forêts et, dans un cas, une zone humide. Trois articles envisagent la conversion de terres en déprise, polluées ou salées. Les **CAS indirects**, moins souvent renseignés, concernent majoritairement les transitions de Forêts ou Surfaces en herbe vers des Cultures.

L'Europe est fortement représentée dans ce sous-corpus avec 11 références, l'Amérique également avec 6 références pour le Brésil, 5 pour les USA, 2 pour l'Argentine, 1 pour le Mexique. L'Asie et l'Afrique sont peu ou pas étudiées.

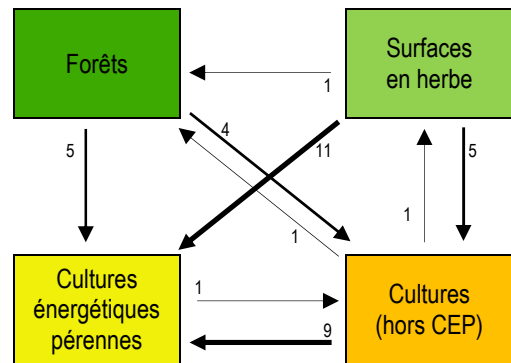


Figure 2-12. Les CAS directs étudiés dans le sous-corpus "Ressources non renouvelables"

Pour la **quantification des impacts**, toutes les études utilisent l'approche ACV, en général complétée par diverses méthodes (calculs simples...). Ce recours commun à l'ACV ne garantit toutefois pas la comparabilité des études, qui diffèrent par les limites des systèmes considérés (en particulier pour la prise en compte du CAS indirect), les choix d'imputation des coproduits, de durée d'amortissement pour les CAS...

Un quart des références ne mentionne pas le niveau de résolution géographique. Lorsqu'il est spécifié, il s'agit d'**échelles** fines (exploitation, parcelle, plantation) pour 6 articles, intermédiaires (provinces, régions) pour 5 articles, pays pour 8 articles et continent pour 1 cas. Comme les travaux utilisent l'ACV, les différences d'échelle ne sont pas forcément discriminantes, les études portant *in fine* souvent sur une filière.

• Les tendances

Pour les **productions énergétiques**, le résultat est toujours une diminution de la consommation de ressources fossiles lorsque l'énergie produite est substituée à des énergies fossiles. En général les émissions de GES baissent par rapport à la référence fossile, mais ce n'est pas systématique : les émissions liées aux CAS s'ajoutant à celles dues aux combustibles fossiles utilisés pour la production, les émissions totales peuvent être plus élevées que pour la référence fossile malgré la consommation plus faible d'énergie fossile. Dans les articles examinés, les filières 1G (utilisant des grains ou des sucres) ont tendance à émettre plus de GES que les filières 2G, et elles peuvent, en fonction des cultures et des procédés de transformation considérés, consommer plus de ressources fossiles. La comparaison n'est cependant pas aisée, car seules deux études comparent directement les deux filières.

Les ACV de **bioplastiques** concluent à une consommation d'énergie fossile plus importante que pour les références pétrochimiques tout en produisant moins d'émissions de GES.

Les méthodes utilisées pour évaluer les impacts sont souvent celles associées aux ACV, qui permettent l'estimation d'une large gamme d'impacts environnementaux. Malgré l'emploi généralisé de l'ACV, les choix de modélisation ne sont pas forcément homogènes, concernant la prise en compte de CAS indirects notamment. Comparer les résultats des différentes études semble donc assez difficile, en particulier pour les émissions de GES. Le manque de diversité des méthodes utilisées laisse également penser que les biais méthodologiques liés à l'utilisation de l'ACV ne sont pas compensés dans l'échantillon d'études examiné. Les ACV, en particulier parce qu'elles sont statiques et centrées sur une filière, ne prennent pas en compte de façon satisfaisante un certain nombre d'éléments, comme l'opportunité d'un usage alternatif des terres converties en CAS direct, les possibles difficultés d'approvisionnement, les progrès techniques et les changements techniques induits par les variations de prix, ou encore les évolutions dans le contenu carbone et énergétique des références fossiles. Tous ces éléments pourraient jouer dans l'évaluation des impacts sur la consommation de ressources fossiles.

2.2.3. Les impacts sur les sols

Bien que le sol soit la première ressource affectée par l'usage des terres et les CAS, la caractérisation des impacts sur les sols et leur qualité reste limitée : seuls 52 articles sur 241, soit à peine un quart du corpus, abordent ces impacts. Les 3/4 de ces références ont été publiés dans les 4 dernières années du recensement de l'étude (2011-2014).

• Les impacts évalués

Dans le corpus examiné, peu d'impacts sur le sol sont concrètement renseignés. Les plus couverts sont les teneurs en matière et carbone organiques, l'acidification et l'érosion (Figure 2-13). Seuls 37 des 52 articles quantifient les impacts ; 70% d'entre eux traitent des effets sur le carbone du sol, 22% de l'érosion.

La dominance des impacts sur les **teneurs en matière et carbone organiques** peut être reliée aux enjeux du changement climatique, auxquels stockage et déstockage de carbone organique du sol (COS) peuvent contribuer. Elle s'explique aussi par le rôle prépondérant de la matière organique dans la capacité du sol à remplir diverses fonctions (structure du sol, rétention de l'eau, activité biologique et biodiversité...). Ainsi la teneur en COS, directement corrélée à la matière organique, est un indicateur intégrant potentiellement plusieurs changements dans les propriétés et fonctions du sol. D'autre part, le COS est un paramètre relativement facile à mesurer.

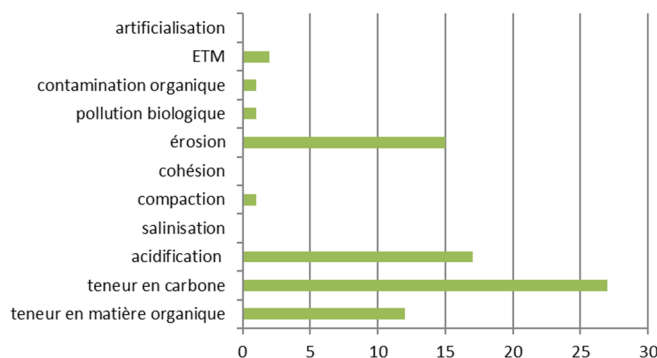


Figure 2-13. Critères d'impacts considérés dans les 52 articles (nombre d'articles abordant ces critères)

L'**acidification** des milieux terrestres est un impact potentiel global, non localisé, dû aux émissions dans l'air d'ammoniac et d'oxydes de soufre et d'azote. La contribution des filières bioénergie au potentiel d'acidification est majoritairement liée aux apports d'engrais azotés et à la combustion de diesel par les opérations motorisées.

L'**érosion**, considérée comme un risque majeur pour les sols au niveau mondial, figure logiquement parmi les impacts les plus étudiés. Le risque d'érosion hydrique est fonction du type de couvert, du système racinaire des cultures, de la durée des périodes de sols nus et de l'importance de leur surface, du travail du sol.

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Sols"

Les **biomasses** étudiées sont, par ordre décroissant : des herbacées pérennes (miscanthus, switchgrass et canne à sucre ; 39%), soja, colza et maïs (grains), le peuplier (bois), le blé (résidus de culture), et la betterave (racine). Les principaux **produits finaux** étudiés sont les biocarburants 1G et 2G.

Les **CAS directs** (CASd) étudiés (Figure 2-14) sont principalement les conversions de Forêts, Cultures ou Surfaces en herbe en CEP (34%), puis les transformations de Forêts ou Surfaces en herbe en Cultures (16%). Environ 18% des changements recensés ne portent que sur les pratiques de gestion, sans CAS au sens strict. Les **CAS indirects** sont 4 fois moins étudiés que les CASd, mais les tendances en termes de types d'usage examinés sont similaires.

Les **zones** les plus étudiées sont les Amériques (54% des localisations) et l'Europe (30%), loin devant l'Afrique (5%), l'Asie (5%), et l'Océanie (2%). Deux études (4%) se placent à l'échelle mondiale. La majorité des CAS étudiés se situent aux Etats-Unis (30%) ou au Brésil (14%), pays où les filières biocarburants sont plus anciennes. Les développements plus récents dans les pays européens sont également étudiés. En revanche, peu de travaux portent sur les zones tropicales, où les CAS pour développer l'agriculture sont pourtant les plus rapides (Indonésie, Malaisie, Congo). Les fronts historiques sont donc plus représentés que les nouveaux fronts pionniers. Les **échelles d'étude** sont majoritairement larges : environ 60% des études dont la résolution spatiale est renseignée sont menées à des échelles supérieures ou égales à une région (comté).

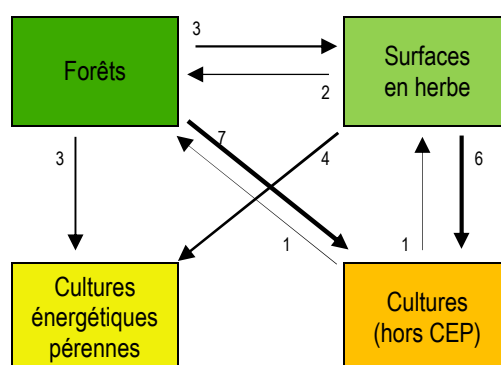


Figure 2-14. Les CAS directs étudiés dans le sous-corpus "Sols"

Pour ces trois catégories d'impacts, des méthodes d'évaluation sont disponibles. Toutefois, les mécanismes d'impact reliant les conditions du milieu et les pratiques aux variations des propriétés du sol et à leurs conséquences sur le fonctionnement du sol restent partiellement caractérisés. En comparaison, les connaissances et modèles concernant d'autres mécanismes d'impact environnemental, intégrant notamment des cycles biogéochimiques complexes et la biodiversité du sol, demeurent limitants pour caractériser l'impact des pratiques sur le sol.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

Les **données** utilisées sont majoritairement des références bibliographiques et des données statistiques (notamment d'occupation des sols). Néanmoins, les données de terrain (issues d'expérimentations ou d'enquêtes, données climatiques) représentent près du tiers des sources. La dernière étape de la chaîne causale concentre l'effort de caractérisation, avec le plus grand nombre de données bibliographiques et de terrain.

Le panorama des **méthodes** montre que globalement l'effort de modélisation des impacts finaux sur le sol est plus important que pour la caractérisation de l'amont de la chaîne. La réorientation des usages du sol est en effet majoritairement non renseignée ou estimée selon des calculs basiques de type observation/supposition de CAS sans modélisation globale. Les modèles économiques, souvent employés pour évaluer les réorientations, voire aussi les CAS, sont ici peu représentés.

Les **méthodes utilisées pour quantifier les impacts** sur le sol sont, dans l'ordre décroissant :

- L'ACV (mobilisée dans 31% des articles), qui propose des indicateurs "*midpoint*" standards pour les impacts "changement climatique", "acidification", "eutrophisation" et "énergie fossile". Dans le corpus, 22% des ACV ne traitent toutefois qu'une ou deux de ces catégories d'impact ACV, "changement climatique" étant le seul commun à toutes les études ;

- Les "calculs basiques", fondés notamment sur des changements de stocks de biomasse ou de carbone des sols (20% des articles). Ces approches, très employées pour les calculs de bilans de GES, présentent d'importantes limites : la différence de stocks de carbone est calculée entre deux usages du sol selon l'hypothèse que ces usages sont établis depuis suffisamment longtemps pour que les stocks de matière organique soient à l'équilibre ; souvent, les données utilisées sont des valeurs par défaut extraites de bases de données globales, donc prenant mal en compte les conditions spécifiques (système de culture, pratiques agricoles...) et locales des usages agricoles du sol ;

- La modélisation mécaniste (environ 20% des articles), qui comprend des modèles axés sur le fonctionnement physico-chimique et hydrique du sol (permettant d'estimer le risque d'érosion hydrique ou le stockage de carbone), et des modèles plus intégrateurs, simulant les principaux processus et échanges des compartiments sol-plante-atmosphère à l'échelle de l'agro-écosystème. Le recours à ces derniers est limité par les nombreuses valeurs de paramètres qu'ils requièrent.

L'ensemble des **résultats** reste peu détaillé ; les données sont majoritairement accessibles sous forme de tableaux qui ne distinguent pas les 3 étapes, ou de figures et cartes présentant des résultats plus ou moins agrégés. La robustesse statistique des résultats et leurs domaines de validité sont peu discutés.

• Les tendances

Comme attendu, les études du corpus montrent globalement que les plantes pérennes tendent à mieux préserver, voire à augmenter, les **teneurs en COS**, comparées aux cultures annuelles. Toutefois, les résultats quantifiés sont très variables ; ils dépendent du contexte pédoclimatique (type de sol, précipitations...) et agronomique (espèce cultivée, rotation culturale, pratiques de travail du sol et de fertilisation...). Certains résultats montrent des variations de COS sensibles au type de sol. L'analyse fine de l'influence de ce facteur nécessite des études larges (méta-analyses, protocoles de mesures couvrant de nombreux terrains...). Ce format d'étude est peu présent dans le corpus, qui fournit de fait peu d'éléments robustes sur l'influence du type de sol dans les mécanismes d'impact sur le sol liés au CAS.

Les autres impacts sur le sol sont globalement peu renseignés : celui sur la teneur en carbone mis à part, ils sont à plus de 67% non quantifiés. Il est donc impossible de tirer des conclusions généralisables à un type d'impact, et même de dégager des tendances globales (toutes filières et CAS confondus) sur ces impacts.

Des résultats expérimentaux ou de modélisation mettent aussi en évidence l'importance de l'historique et de l'évolution du CAS (équilibre antérieur au CAS, gestion ultérieure de la parcelle). Pourtant, de nombreux travaux s'appuient sur des valeurs par défaut : ainsi, 30% des études quantifiant le COS se fondent sur les coefficients "Tier 1" du GIEC³. L'utilisation de simples différences de stocks statiques fondées sur des coefficients par défaut ne peut fournir qu'une approximation

³ Dans ses recommandations pour la réalisation des inventaires nationaux d'émissions de GES (éditées en 2006), le GIEC a proposé des valeurs ou coefficients à utiliser par défaut, dits de niveau 1 ("Tier 1").

très incertaine des évolutions de COS, en particulier si les usages des sols comparés ne sont pas à l'équilibre en termes de propriétés et de fonctionnement du sol. La prise en compte des dynamiques de variation du COS par une démarche de modélisation fondée sur les processus semble indispensable ; elle requiert une approche plus holistique à la fois du COS (différenciant les profondeurs, les fractions de la matière organique...), et de ses liens avec d'autres propriétés du sol (connexions des cycles du carbone et de l'azote, activité biologique...). L'impact des CAS sur les variations de COS, bien que globalement mieux renseigné que d'autres impacts sur la qualité des sols, pourrait être largement amélioré.

D'autres impacts nécessitent aussi d'être pris en considération et mieux modélisés. L'exemple de certaines cultures pérennes a mis en exergue des impacts potentiellement antagonistes, entre le maintien de la qualité des sols *via* l'augmentation du COS et la réduction des risques de pertes par érosion et ruissellement, et l'impact sur les ressources en eau. Ce cas est révélateur des nécessaires arbitrages et compromis dans les évaluations multicritères. Les effets sur le sol doivent être analysés en parallèle d'autres impacts, sur l'eau ou la biodiversité par exemple, d'autant que les mécanismes intervenant dans ces compartiments environnementaux sont connectés, *via* les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau, et *via* la modification des habitats.

2.2.4. Les impacts sur l'eau

La modification des milieux a des conséquences sur les flux et la qualité de l'eau : la mise en culture de milieux naturels ou l'afforestation de surfaces agricoles change obligatoirement le cycle de l'eau, quantitativement (modification des besoins des cultures, irrigation, ruissellement, réduction de l'interception...) ou qualitativement (eutrophisation, contaminations...).

Après les impacts sur le climat et le carbone du sol, ces impacts sur l'eau sont les plus étudiés dans le corpus : ils sont traités dans 54 références, soit plus de 20% des articles du corpus. L'étude des impacts sur l'eau commence réellement après 2008 et progresse plus ou moins vite jusqu'en 2014 (pour atteindre une vingtaine d'articles par an).

• Les impacts évalués

La consommation d'eau (21 articles) et l'eutrophisation des milieux aquatiques (27 articles) sont les impacts les plus souvent étudiés ; ces deux critères représentent plus de 65% des situations analysées (Figure 2-15). Les contaminations chimiques ou biologiques des eaux, en dehors des effets d'eutrophisation, sont moins étudiées.

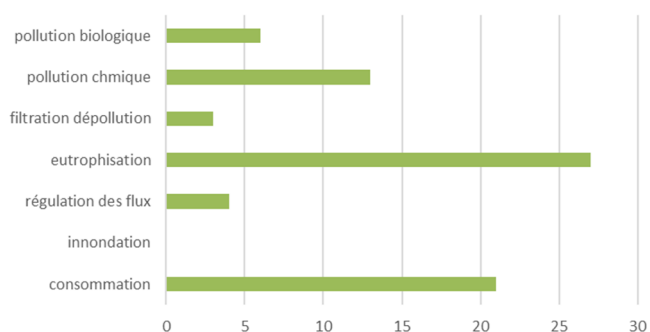


Figure 2-15. Critères d'impacts considérés dans les 54 articles (nombre d'articles intégrant ces critères).

La **consommation en eau**, qui peut être issue de l'atmosphère (pluie) ou de la nappe (irrigation), est en général comptée comme la quantité d'eau nécessaire à la production de la biomasse concernée. Elle est exprimée en volume d'eau par tonne de biomasse ou quantité d'énergie produite. En fonction de la zone géographique et de la plante cultivée, cette consommation peut être très variable : pour le maïs par exemple, elle varie de 153 à 3 363 m³/tonne selon le pays producteur.

L'**eutrophisation** des milieux aquatiques, qui résulte des apports d'éléments nutritifs (azote et phosphore), dépend par conséquent de la fertilisation des cultures et des transferts d'éléments par le ruissellement et l'érosion des sols.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

Les **données** utilisées sont, dans la grande majorité des études, des données publiques (séries climatiques, occupation des sols et types de sols... ; 43% des articles) ou des références issues de la littérature et de bases de données (inventaires de cycle de vie... ; 37% des articles) ; 16% des travaux sont fondés sur des avis d'experts ou des enquêtes. Moins de 5% des études utilisent des données d'observation ou d'expérimentation pour évaluer les impacts. Les études de terrain sont donc rares, y compris parmi celles menées à l'échelle de la région ou de la parcelle/plantation – qui utilisent donc en général des modèles biophysiques couplés pour produire les évaluations.

Les **échelles** considérées sont principalement (70% des articles) celles du pays ou d'une grande région (bassin hydrographique par exemple). Moins de 20% des articles considèrent des échelles plus fines, plantation, parcelle ou exploitation agricole. L'échelle globale ou mondiale est peu étudiée (moins de 5% des références).

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Eau"

Les principales **espèces** étudiées sont les cultures pérennes (38 articles), avec notamment divers ligneux (eucalyptus, saule, peuplier... ; 10 articles), le miscanthus (10 articles) et le switchgrass (8) ; la canne à sucre et le palmier à huile sont relativement moins abordés. Concernant les plantes annuelles, les travaux les plus nombreux portent sur le maïs et le soja (9 références chacun), cultures les plus consommatrices d'eau (notamment si elles sont irriguées). Les **usages finaux** envisagés sont majoritairement les productions de biocarburants (1G ou 2G), mais aussi d'électricité ou de chaleur ; les autres usages (matériaux ou chimie verte...) sont moins documentés.

Les **CAS directs** (CASd) sont plus souvent étudiés que les CAS indirects (CASI) : 88 scénarios s'intéressent aux premiers contre seulement 33 aux seconds. Les principaux CASd étudiés (Figure 2-16) affectent les Forêts, Cultures et Surfaces en herbe, qui sont converties très majoritairement en CEP. La conversion des zones naturelles comme les zones humides n'est que peu étudiée. Pour les **CAS indirects**, les trois milieux affectés sont également les Forêts, les Cultures et les Surfaces en herbe, mais les scénarios considèrent en priorité la conversion de milieux forestiers.

Les **zones de production** étudiées se situent principalement en Amérique du Nord et du Sud (plus de 50% ensemble) et en Europe (28%). Les pays concernés sont : les États-Unis (19 articles) ; le Brésil (6) ; l'Argentine, le Danemark et le Royaume-Uni (3 chacun) ; la France, l'Indonésie et la Thaïlande (2 chacune). Quatre travaux ne ciblent pas des zones géographiques particulières mais abordent les surfaces mondiales.

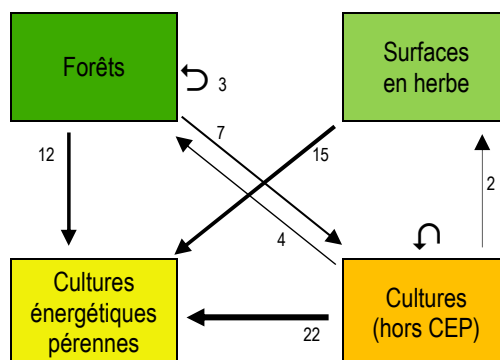


Figure 2-16. Les principaux CAS directs étudiés dans le sous-corpus "Eau". Seuls les CAS examinés dans au moins 2 articles sont représentés.

Ces travaux de recherche sont généralement réalisés pour produire une vision prospective du développement des cultures énergétiques (85% des articles). Cependant, pour construire ces visions, la moitié des études intègrent et analysent des données rétrospectives.

Les **méthodes** d'évaluation les plus mobilisées sont les ACV (35% des articles) et les modèles biophysiques (39%) ; 16% des études s'en tiennent à des "calculs basiques" utilisant des facteurs fixes de consommation d'eau ou d'eutrophisation, en fonction des surfaces transformées et des plantes cultivées. Seuls 9 des 54 articles mentionnent la réalisation d'analyses d'incertitude et de sensibilité. Les méthodes utilisant des modèles économiques sont sous-représentées pour cet impact (3%) par rapport à d'autres impacts comme le climat (20%).

Les modèles biophysiques employés peuvent être très simples, à l'échelle d'un ou plusieurs processus (ex : rétention d'eau, dégradation de la matière organique et nutrition des plantes) ou plus complexes (ex : dynamique de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère-aquifère). Parmi ces derniers, les modèles EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*), SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), et Agro-ibis sont les plus souvent utilisés (12 articles).

Le périmètre des articles est divers, et si certains cherchent à comparer, dans une approche de type ACV, l'effet sur la quantité et la qualité de l'eau de l'utilisation de la biomasse en substitution aux énergies fossiles, d'autres travaux étudient les effets sur l'eau des changements d'usage des sols (ex : modification d'un écosystème). Ces travaux ne sont donc pas tous comparables.

• Les tendances

Concernant le critère **consommation d'eau**, les études concluent dans 57% des cas (12 des 21 articles) à une augmentation des prélèvements d'eau (Figure 2-17a). Sur ces 12 cas, 7 correspondent à des cultures servant aux biocarburants 1G, et 3 seulement à des cultures produisant des biocarburants 2G (ou de la chaleur). Ces dernières sont aussi en jeu dans les 2 articles rapportant une baisse de la consommation. Indépendamment de l'usage final, les CAS directs (conversion d'une forêt ou d'une prairie en cultures énergétiques, par ex.) conduisent dans plus de la moitié des études à augmenter les consommations en eau. Le choix de la méthode d'évaluation mobilisée ne semble pas avoir d'effet sur l'estimation de la consommation en eau.

Pour le critère **eutrophisation**, l'analyse conclut dans la moitié des cas (13 des 27 articles) à une augmentation du phénomène (Figure 2-17b). Sur ces 13 cas, 7 correspondent à des cultures dédiées à des biocarburants 1G, 2 seulement à des cultures servant à produire des biocarburants 2G (ou de la chaleur). Les situations de baisse de l'eutrophisation

sont associées, dans 7 cas sur 8, à des espèces pérennes ; la culture de switchgrass ou de miscanthus par exemple, en limitant les apports d'engrais et l'érosion des sols, réduit l'eutrophisation des milieux aquatiques. Le remplacement d'une culture annuelle par une pérenne (miscanthus, afforestation...) diminue l'eutrophisation (dans 5 cas sur 8), mais elle l'augmente si on remplace une prairie (dans 6 cas sur 9).

L'évaluation de ce critère d'impact apparaît sensible à la méthode utilisée : les "calculs basiques" concluent préférentiellement à un effet moindre des CAS (baisse de l'eutrophisation dans 6 cas sur 10) que les 2 autres méthodes (ACV et modèles biophysiques), qui concluent plutôt à des augmentations dans plus de 60% des cas. Il pourrait donc exister un biais méthodologique, ce qui en l'absence d'une méthode reconnue incite à utiliser et comparer plusieurs approches.

Il est délicat, pour les deux critères, de tirer des conclusions très affirmées, car beaucoup de situations (entre 20 et 30%) sont classées comme "variables", et correspondent à des scénarios contrastés décrits au sein d'un même article. C'est assez logique car les effets sur la consommation d'eau et l'eutrophisation dépendent de l'espèce cultivée, du scénario climatique, et bien évidemment de l'écosystème remplacé.

Cette difficulté à conclure et à généraliser tient aussi au fait que les périmètres des études sont différents, certaines cherchant à mesurer l'impact sur l'eau de la transformation d'un milieu alors que d'autres visent à comparer l'usage des biomasses à celui des énergies fossiles. Dans cette dernière situation, la consommation en eau et l'eutrophisation générées par la phase de production des cultures sont forcément supérieures à celles des références fossiles, alors que lorsqu'on s'intéresse au changement d'usage d'un sol, la pression sur la ressource en eau est variable, selon l'écosystème transformé et les cultures mises en place (pérennes ou annuelles, irriguées ou pas...).

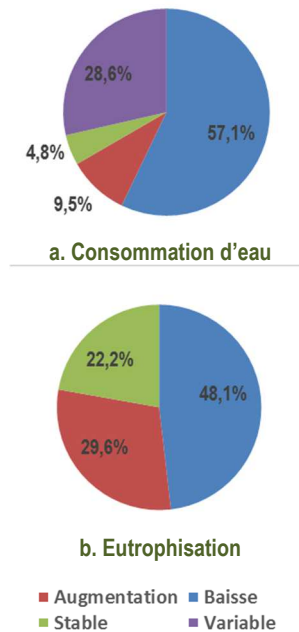


Figure 2-17. Effets des CAS sur les critères d'impact "Consommation d'eau" (21 articles) et "Eutrophisation" (27 articles)

2.2.5. Les impacts sur la qualité de l'air et la santé humaine

Les impacts sur la pollution atmosphérique et la santé humaine sont rarement rapportés dans le corpus, alors que le thème de la qualité de l'air est actuellement très présent dans l'agenda politique en matière d'environnement. Pollution de l'air et effets sur la santé sont des questions importantes pour les produits bio-sourcés, des doutes étant apparus quant aux bénéfices réels du remplacement des carburants fossiles par des biocarburants. Il a ainsi été montré aux Etats-Unis que des mélanges contenant du bioéthanol induisaient une augmentation des concentrations d'ozone dans la troposphère aux basses températures, et donc des impacts sanitaires plus négatifs que l'essence pure. La plupart de ces études ignorent toutefois les effets des CAS associés à la production de la biomasse, alors que les changements d'usage ou de gestion des sols sont susceptibles d'affecter les émissions de polluants atmosphériques primaires tels que l'oxyde nitrique ou l'ammoniac, ou de contaminants toxiques comme les pesticides.

Pollution atmosphérique et santé humaine ne sont traitées que dans 17 et 9 articles respectivement, soit moins de 8% et 5% du corpus. Six références étant communes aux deux thèmes, le nombre total d'articles qui les abordent est de 20. Tous ont été publiés après 2008, et 13 sont parus en 2014 ou 2015.

• Les impacts évalués

Dans les 17 articles traitant les impacts sur l'air, la pollution est la seule catégorie d'impact identifiée. D'autres catégories d'impact telles que les odeurs, le bruit ou la présence de pollen ne sont jamais mentionnées.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

Dans l'évaluation des **CAS**, les méthodes simples telles que les "calculs basiques" sont prédominantes ; et un quart des articles ne comporte pas de méthodes identifiables. Les modèles économiques, qui constituent l'une des principales options pour évaluer les CAS, ne sont utilisés que dans un seul article ; les modèles biophysiques sont mentionnés dans seulement 3 références.

Les **impacts** sont presque exclusivement évalués par des approches de type ACV, ce qui ne reflète pas la diversité des méthodes d'évaluation utilisées en général pour étudier les effets sur la pollution atmosphérique ou sur la santé humaine.

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Qualité de l'air et santé humaine"

Les **biomasses** les plus étudiées sont les cultures annuelles, destinées à la production de biocarburants 1G principalement, mais aussi de bio-plastiques. Les cultures lignocellulosiques arrivent en seconde place, avec des herbacées pérennes (miscanthus et switchgrass) et des espèces ligneuses conduites en taillis à courte rotation (peuplier notamment), avec de nombreuses utilisations : chauffage et électricité combinés, bio-plastiques ou biocarburants 2G. Dans les **usages finaux**, les biocarburants dominent, avec une part cumulée de 45% ; les valorisations par l'industrie chimique sont plus représentées que dans le corpus général.

Les **CAS directs** les plus examinés (Figure 2-18) sont les conversions de Cultures ou de Surfaces en herbe en CEP (14 cas sur un total de 31). Le corpus ne comporte que 14 cas de **CAS indirects**, principalement des conversions de Forêts, en cultures annuelles, herbagères ou pérennes (8 cas), et de Surfaces en herbe (4 cas). Hors CAS, des modifications des pratiques de gestion des sols sont aussi rapportées, notamment la conversion à l'agriculture biologique (4 articles).

Toutes les études examinent plusieurs scénarios en termes de types de biomasses, d'usages finaux et/ou de CAS directs. Un article en examine une centaine, comprenant 20 scénarios de CAS aux Etats-Unis.

L'Europe est le continent le plus étudié (40% des articles), suivie par l'Amérique du Sud (30%) et du Nord (20%). La plupart des travaux sont conduits à une **échelle** nationale, avec des différenciations régionales pour environ un tiers d'entre eux.

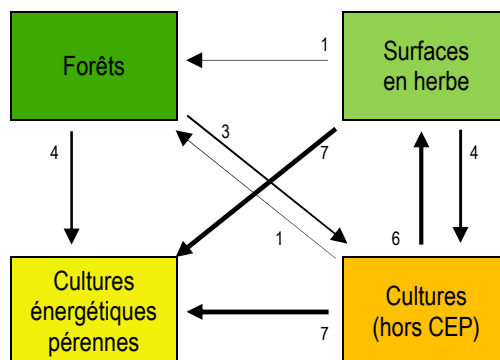


Figure 2-18. Les CAS directs étudiés dans le sous-corpus "Qualité de l'air et santé humaine"

La plupart des études comparent des produits bio-sourcés à des équivalents d'origine fossile ; seuls deux articles évaluent juste les effets de l'implantation d'espèces lignocellulosiques sur des terres improductives sur la qualité de l'air et la santé.

• Les tendances

Pollution atmosphérique, biomasse et CAS : résultats mitigés et très dépendants des types de produits finaux et des délimitations du système étudié. Les résultats du développement de la biomasse sont globalement très variables : 7 études concluent à une réduction de la pollution atmosphérique, 5 à son augmentation, et 5 à un effet variable. Cette variabilité est liée au type de produits finaux évalués mais aussi au type de comparaison effectuée : 5 études comparent de la biomasse agricole et des matières premières forestières, alors que les 7 autres travaillent sur la substitution des produits d'origine fossile par des équivalents bio-sourcés.

Effets sur la santé humaine : des données insuffisantes. Sur les 7 études comparant des produits fossiles et bio-sourcés, deux concluent que la substitution par la biomasse entraîne une amélioration de la santé humaine, deux montrent des effets préjudiciables, une des résultats neutres et deux des effets variables. La répartition est similaire quel que soit le produit final considéré. Seuls les biocarburants 2G présentant une absence d'effets indésirables, mais il est difficile de conclure à des tendances significatives sur la base de 7 études. De manière prévisible, les deux études examinant l'expansion de la production de biomasse en soi (sans comparaison avec une alternative fossile) concluent à un effet délétère sur la santé, en raison de l'augmentation de la pression exercée sur des terres non exploitées auparavant.

Etant donné la faible taille du corpus et la diversité des situations considérées, il est difficile de dégager des tendances nettes. Globalement, les effets d'une substitution de ressources fossiles par de la biomasse apparaissent mitigés. Bien que toutes les études recourent à la même méthode d'évaluation – ce qui pourrait induire un certain biais –, la fiabilité des estimations est assez faible et incertaine, ce cadre de l'ACV étant peu adapté pour aborder la pollution de l'air ou la santé humaine. En particulier, les effets liés aux CAS indirects se produisant en dehors de la région où la biomasse a été produite sont difficiles à traiter, ce qui fragilise les conclusions.

2.2.6. Les impacts sur la biodiversité

La biodiversité, qui joue un rôle crucial dans la fourniture de nombreux services écosystémiques (production primaire, pollinisation, séquestration de carbone, formation des sols) est de plus en plus menacée par le changement climatique et par les activités humaines, *via* notamment la conversion des habitats et l'utilisation massive de pesticides. Dans ce contexte, le développement des productions non alimentaires peut affecter la biodiversité par une extension supplémentaire des cultures aux dépens d'écosystèmes "naturels", mais il pourrait aussi avoir des impacts moins négatifs que les cultures annuelles destinées à l'alimentation, les cultures énergétiques pluriannuelles fournissant des habitats plus pérennes et recevant moins de pesticides.

Dans le corpus, 15 articles seulement étudient l'impact sur la biodiversité de l'usage des sols ou des changements d'affectation des sols en vue de la production de bioénergie. Plus de 80% ont été publiés après 2009. La période la plus récente est marquée par le développement d'études examinant la biodiversité et les services écosystémiques.

• Les impacts évalués

Certaines études abordent la biodiversité de manière directe. Elles traitent principalement de l'impact du CAS sur une guild⁴ unique ou sur un plus petit nombre d'espèces – à l'exception d'une étude qui retient un ensemble de 754 espèces considérées comme représentatives de la biodiversité terrestre européenne. Plusieurs métriques sont alors employées : l'évolution de la richesse spécifique (c'est-à-dire du nombre d'espèces ou de familles) ou de l'abondance d'une espèce donnée, ou le changement de groupes d'espèces. D'autres études procèdent à des estimations indirectes de la biodiversité, par (i) une évaluation du potentiel des habitats (la valeur de la biodiversité étant plus élevée dans les prairies que dans les plantations), (ii) les impacts des activités humaines (risque de pollution par les pesticides, modification du bilan hydrique...) comme approximation de leurs effets sur la biodiversité, ou (iii) des valeurs issues de l'évaluation par ACV, dans laquelle la biodiversité est estimée en fonction de l'usage des sols.

Seules 2 des 15 études traitent les effets des CAS sur la configuration du paysage, c'est-à-dire la distribution spatiale des nouveaux usages du sol (agrégation *versus* répartition au hasard) et/ou leurs surfaces (taille des patches de cultures énergétiques).

Les situations étudiées dans le sous-corpus "Biodiversité"

Les cultures énergétiques étudiées sont des cultures annuelles destinées à la production de biocarburants 1G (maïs, colza et canne à sucre) mais surtout des espèces pluriannuelles herbacées ou ligneuses à croissance rapide, productrices de biomasse lignocellulosique. Dans les **usages finaux**, "biocarburants 2G" et "bois" ont des poids relatifs plus importants que dans le corpus général.

En tout, 14 scénarios différents de **CAS** sont étudiés. Les CAS les plus fréquents concernent la conversion de Forêts, en plantations forestières, CEP, Surfaces en herbe ou Cultures (Figure 2-19). Deux cas (non représentés) examinent la conversion de zones humides.

Les études sont généralement menées dans des pays développés (Europe et États-Unis). Les échelles spatiales considérées sont très diverses, de petits territoires (300 km²) jusqu'à l'échelle continentale en passant par des bassins hydrographiques.

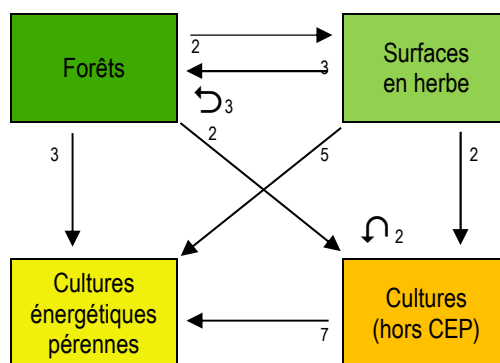


Figure 2-19. Les principaux CAS directs étudiés dans le sous-corpus "Biodiversité". Seuls les CAS examinés dans au moins 2 articles sont représentés.

• Les données et méthodes d'évaluation mobilisées

Trois méthodes sont utilisées pour caractériser les **CAS** : (i) des modèles paramétrés avec des données issues de méta-analyses ou de *reviews* (méthode employée dans la plupart des articles), (ii) une analyse empirique de données d'occupation des sols (d'après des photographies aériennes par exemple) ou (iii) des mesures effectuées *in situ* (par quelques études seulement).

⁴ Ensemble d'espèces appartenant à un même groupe taxonomique ou fonctionnel qui partagent la même niche écologique.

La plupart des estimations de l'**impact des CAS** sur la biodiversité sont réalisées à l'aide de modèles mécanistes ou d'une évaluation de l'impact sur le cycle de vie. L'impact est étudié soit directement, soit *via* une approche comparative, entre la culture de biomasse et un autre usage des sols dans le même paysage.

Les résultats des études reposent principalement sur des estimations des paramètres généralement issues de la bibliographie – sans analyse de la sensibilité des résultats aux valeurs des paramètres. De plus, l'approche de modélisation considère généralement des paysages fixes, alors que les espaces agricoles sont des environnements très variables (notamment s'ils sont en cultures annuelles). La nature dynamique de la biodiversité n'est aussi que rarement prise en compte, alors que le temps de réponse des populations aux CAS peut être long, par exemple pour les grands organismes tels que les oiseaux, ou pour la flore qui dispose de réservoirs de graines dans le sol.

La majorité des études (9) étudient l'impact des CAS en utilisant à la fois une approche rétrospective et une approche prospective ; deux seulement n'adoptent qu'une approche rétrospective.

• Les tendances

Le premier enseignement majeur de l'analyse est le constat, inattendu, du **faible nombre d'études disponibles** sur l'impact sur la biodiversité des CAS liés aux cultures énergétiques. Le fait de n'avoir sélectionné que les articles prenant en compte toute la chaîne de causalité, des réorientations aux impacts, élimine probablement un nombre important d'article ne traitant que certains segments de cette chaîne.

Le second est que, malgré ce nombre réduit d'études, il se dégage un **consensus sur l'impact négatif** des CAS induits par la production de bioénergie sur la biodiversité, et ce quelles que soient les méthodologies ou les métriques de la biodiversité employées. Ce diagnostic est en accord avec les résultats d'études antérieures évaluant l'impact sur la biodiversité des cultures bioénergétiques ou d'usages des sols pour la production alimentaire (Mendenhall *et al.*, 2014 ; Newbold *et al.*, 2015). Toutefois, dans des agroécosystèmes déjà gérés de manière intensive, le remplacement des céréales d'hiver par des cultures énergétiques telles que du miscanthus ou du colza peut favoriser les pollinisateurs grâce à la disponibilité de ressources florales.

L'analyse du corpus met en évidence plusieurs limites méthodologiques. La plupart des études utilisent des relations qualitatives ou empiriques entre les caractéristiques de l'habitat et la biodiversité, ou des référentiels mondiaux concernant les richesses spécifiques des milieux ou les changements dans l'abondance moyenne des espèces locales. La richesse spécifique, très utilisée, peut ne pas être suffisante pour évaluer précisément l'impact des CAS, car elle ne prend pas en compte des aspects tels que le renouvellement des espèces et l'effet sur des espèces rares, ou l'évolution de l'abondance des espèces. En outre, aucun article n'étudie les effets sur la diversité fonctionnelle.

2.3. Enseignements, points de vigilance et lacunes

2.3.1. Impacts des CAS

Les articles considérés dans l'analyse ne donnent pas une vision tranchée de l'impact de la production de biomasse non alimentaire sur les émissions de GES. Près de la moitié des études concluent à une réduction des émissions de GES ou à une augmentation de la séquestration de carbone suite à une conversion de cultures dédiées à l'alimentation humaine ou animale en cultures non alimentaires. Mais l'autre moitié des études conclut soit à une augmentation des émissions, soit à un effet variable, dépendant du scénario considéré.

La consommation des ressources non renouvelables est quantifiée dans 11% références du corpus, mais ces articles sont en fait plutôt focalisés sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources fossiles étant un résultat collatéral.

Les études du corpus montrent globalement que les plantes pérennes tendent à mieux préserver, voire à augmenter, les teneurs en carbone du sol, comparées aux cultures annuelles. Toutefois, les résultats quantifiés sont très variables ; ils dépendent du contexte pédoclimatique (type de sol, précipitations...) et agronomique (espèce cultivée, rotation culturale, pratiques de travail du sol et de fertilisation...). Les autres impacts sur le sol sont globalement peu renseignés.

Concernant le critère consommation d'eau, les études concluent dans un peu plus de la moitié des cas à une augmentation des prélèvements d'eau. Environ la moitié des articles traitant d'eutrophisation conclut à une augmentation du phénomène. Il est cependant délicat, pour les deux critères, de tirer des conclusions tranchées, car beaucoup de situations (entre 20 et 30%) sont classées comme "variables" et correspondent à des scénarios contrastés décrits au sein d'un même article.

Les impacts sur la pollution atmosphérique et la santé humaine sont trop rarement rapportés dans le corpus pour qu'une conclusion puisse être formulée.

L'effet des CAS induits par la production de bioénergie sur la biodiversité a été considéré dans un nombre réduit d'études. Celles-ci concluent généralement à un impact négatif (diminution de la biodiversité) quelles que soient les méthodologies ou les métriques de la biodiversité employées.

2.3.2. Les orientations dominantes et évolutions récentes des recherches

L'analyse fait ressortir plusieurs tendances qualitatives dans les études actuelles sur la production de biomasse non alimentaire et sur les impacts environnementaux liés aux CAS.

Les recherches apparaissent très orientées sur les biocarburants, par rapport à d'autres usages finaux, ce qui ne reflète pas la structure actuelle de l'utilisation des bioénergies dans le monde, où le chauffage et l'électricité prédominent en termes d'énergie produite (Chum *et al.*, 2011). Bien que l'augmentation de la production de chaleur ou d'électricité à partir de la biomasse pose les mêmes questions que le développement des biocarburants en termes de CAS (Fritsche *et al.*, 2010), l'attention politique est davantage portée sur les biocarburants, ce qui a suscité l'émergence d'un domaine de recherche très productif. Parmi les principaux facteurs contribuant à la production de biocarburants figurent le programme brésilien sur l'éthanol, et la Directive de l'Union européenne sur l'énergie (CE/2003), qui fixait un objectif d'incorporation de 5,75% de biocarburants dans les carburants utilisés pour les transports avant 2010. L'augmentation spectaculaire de la production de biocarburants 1G qui s'en est suivie a soulevé d'importantes questions sur la durabilité d'un tel accroissement, et suscité de nombreuses études visant à affiner l'analyse de leurs impacts environnementaux. Par ailleurs, le poids des biocarburants 2G dans les articles examinés montre que bien que cette filière ne soit pas encore commerciale, les recherches prospectives sur ses impacts potentiels sont importantes.

La plupart des publications sont focalisées sur un produit final unique (biocarburant ou bioplastique par exemple) et ne prennent en considération qu'une seule catégorie d'impact. Les usages multifonctionnels de la biomasse sont présents *via* les coproduits générés par le processus de transformation (tourteaux valorisés en alimentation animale, résidus d'extraction utilisés pour la production d'électricité ou de chaleur, par exemple), mais rarement en considérant une utilisation en cascade de la biomasse, qui est pourtant souvent recommandée pour améliorer les performances économiques et environnementales des produits bio-sourcés.

2.3.3. La sensibilité des résultats aux méthodes mobilisées et au contexte des études

• Effets des choix méthodologiques

Le lien possible entre le type de méthode utilisé et le résultat de la comparaison entre les produits bio-sourcés et un produit d'origine fossile, a été testé pour les émissions de GES, impact le plus étudié dans le corpus (Figure 2-20).

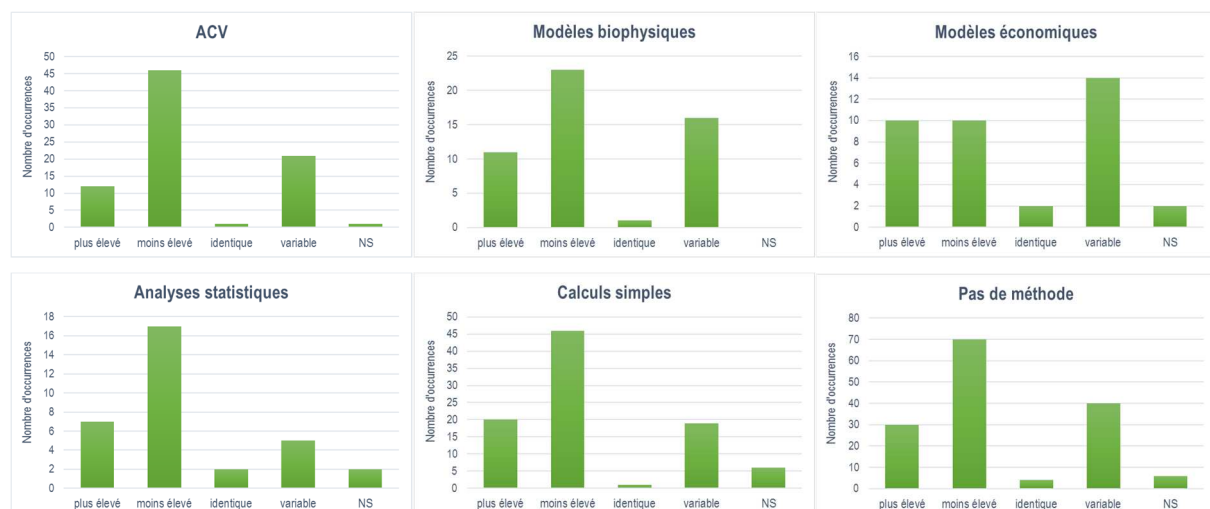


Figure 2-20. Résultats des comparaisons, pour les émissions de GES, entre scénarios de produits bio-sourcés et un produit d'origine fossile, en fonction des méthodes d'évaluation utilisées. NS : non spécifié.

Toutes méthodes confondues, 43% des articles concluent à une réduction des émissions de GES par rapport aux fossiles, 29% à une augmentation, 3% à des émissions équivalentes et 25% à des résultats variables (cf. Section 2.2.1). Ces proportions diffèrent pour les modèles économiques, qui se distinguent par une répartition équivalente entre des niveaux d'émissions supérieurs et inférieurs aux énergies fossiles, et des résultats plus variables qu'avec les autres méthodes.

Une méta-analyse récente sur les CAS indirects des biocarburants 1G a conclu de manière similaire que des méthodes économiques conduisaient à des estimations d'émissions de GES plus élevées que d'autres méthodes dans la prise en compte de ces CAS (De Cara *et al.*, 2012).

• Effets de la gamme de situations étudiées

Les résultats des études dépendent fortement des hypothèses retenues pour les CAS directs – selon que les cultures non alimentaires sont installées par exemple sur des terres marginales, des terres déjà cultivées ou des prairies permanentes.

2.3.4. Lacunes en matière de recherche et pistes pour de futurs travaux

• Améliorer la connaissance des mécanismes en jeu et les mesures des impacts

Sur le plan méthodologique, il apparaît clairement nécessaire d'améliorer la compréhension des déterminants et des mécanismes conduisant aux CAS, notamment dans leur composante indirecte.

Comme l'a montré cette analyse et d'autres analyses antérieures (Gabrielle *et al.*, 2014a), les études tendant à anticiper la production de biomasse énergie et sa localisation sont nombreuses mais traitent pour la plupart soit de CAS non spatialisés (estimation de quantité de biomasse à partir de modèles économiques et CAS affecté arbitrairement sur les zones marginales, par exemple), soit des potentialités biophysiques des territoires pour la production de biomasse (cartes de potentiels de production du miscanthus, par exemple) et usent d'hypothèses fortes pour délimiter les zones de production (ne produire du miscanthus que sur les terres marginales...). Très peu d'études prennent en compte la localisation actuelle de ces cultures et donc l'impact réel des CAS associés à l'augmentation de la production de biomasse non alimentaire (Scheffran and BenDor, 2009). Cette faible prise en compte et la pénurie de données réelles sur ces CAS sont liées essentiellement à la nouveauté du phénomène étudié. En effet, par exemple, les études portant sur les CAS liés à la production de biocarburants ont été menées au même moment que le développement de ces cultures (à partir du milieu des années 2000). La communauté scientifique ne dispose donc peut-être pas encore du recul nécessaire à l'analyse des déterminants de ces CAS pour pouvoir les anticiper de manière précise spatialement et temporellement. Or c'est bien la précision spatiale et temporelle qui permettra d'améliorer grandement l'évaluation des impacts de ces CAS.

L'analyse pointe également un manque de connaissance sur les processus agro-environnementaux associés aux CAS qui induisent des impacts.

Concernant la **qualité des sols**, dont le carbone du sol, de nombreux travaux de recherche restent nécessaires pour améliorer les modèles car, d'une part, certains utilisent encore des paramètres par défaut non nécessairement calibrés pour toutes les conditions pédoclimatiques et les potentiels usages de la biomasse et l'effet des CAS associés et, d'autre part, tous les processus impliqués dans les variations de la qualité des sols (au-delà du carbone du sol) ne sont pas encore décryptés.

Il est aussi nécessaire que les futures études caractérisent mieux la **biodiversité** en utilisant des métriques intégrant ses différentes dimensions (richesse en espèces, abondance des espèces, diversité fonctionnelle...). En outre, les espèces de différents groupes pouvant réagir différemment aux changements de composition et de configuration des paysages, l'impact des CAS devrait être étudié sur plusieurs espèces couvrant le réseau trophique. Dans la mesure où le suivi de plusieurs espèces n'est pas toujours possible, les études peuvent également se focaliser sur les oiseaux spécifiques des zones agricoles ou sur des espèces emblématiques ou "clés de voûte" ayant des exigences particulières en matière d'habitat. Coupler des modèles avec un suivi à long terme de la biodiversité est une voie de recherche prometteuse pour améliorer les connaissances à différentes échelles spatiales et temporelles.

• Clarifier les domaines de validité des différentes méthodes d'évaluation

Dans le corpus, les méthodes simples (ou l'absence de méthode spécifiée) prédominent, ce qui signifie que beaucoup d'estimations sont assez sommaires. Des approches plus sophistiquées telles que la modélisation économique ou l'ACV

conséquentielle sont de plus en plus mobilisées, mais elles semblent difficiles à concilier, ayant évolué à partir de deux domaines de recherche et d'objectifs différents. La seconde vise à traiter les impacts environnementaux de la bioénergie, tandis que la première s'intéresse aux effets du développement de la bioénergie sur les émissions de GES et le climat, en général à l'échelle mondiale.

L'analyse a aussi mis en évidence qu'aucun article du corpus ne se réfère au cadre conceptuel des services écosystémiques, qui est pourtant largement utilisé dans les études sur l'usage des sols (van Vliet *et al.*, 2016). L'ACV et les modèles économiques ne sont généralement pas appropriés pour traiter des impacts locaux tels que les effets sur la biodiversité ou les ressources en eau, pour lesquels une approche en termes de services écosystémiques semble plus adaptée. De plus, l'étude des impacts locaux nécessite de s'appuyer sur des situations réelles pour paramétrer les modèles d'impact et/ou de disposer de jeux de données de terrain. L'intérêt assez récent de la communauté scientifique pour les impacts des CAS liés à l'augmentation de la production de la biomasse énergie explique une faible disponibilité de données expérimentales ou issues d'observations. Une partie importante des articles étant des études prospectives, notamment celles concernant les biocarburants 2G, les cas d'études basés sur des données expérimentales ou sur des observations directes sont actuellement très limités. En conséquence, ces impacts n'ont été abordés que dans une minorité d'articles du corpus. Cela apparaît comme une lacune majeure dans les recherches actuelles sur la biomasse et les CAS. Là encore, cela reflète une séparation entre les différentes communautés scientifiques, cette fois en termes d'impacts étudiés et de méthodologies employées.

• **Elargir la gamme des systèmes de production et de valorisation de la biomasse**

Très peu d'articles traitent de biomasses ou d'usages finaux multiples dans le contexte des effets des CAS. Bien que les approches de bioraffinerie, qui visent à optimiser la valorisation de toutes les composantes des agro-ressources transformées et combinent donc les utilisations, fassent actuellement l'objet d'un nombre croissant de publications, elles ne sont pas considérées comme un moyen de réduire les impacts des CAS dans la littérature scientifique actuelle. L'une des raisons peut être que la bioraffinerie met généralement l'accent sur les produits non énergétiques, comme les composés chimiques ou les biomatériaux, qui sont considérés comme des marchés de niche générant peu de pression sur l'usage des sols. Cependant, il serait intéressant d'inverser la perspective et d'examiner la manière dont les bioraffineries pourraient réduire l'empreinte écologique des produits bioénergétiques.

La non-mention des systèmes alimentaires dans les articles examinés met quant à elle en évidence l'absence de relations entre les communautés de recherche travaillant sur l'énergie et celles traitant de la sécurité alimentaire, ce qui reflète également les cadres politiques sectoriels actuels. Il existe peu d'incitations à rechercher des synergies entre les deux systèmes au-delà de la valorisation des coproduits du secteur alimentaire. Des stratégies intégrées mériteraient plus d'attention : l'usage multifonctionnel des sols (systèmes agroforestiers par exemple), la logistique intégrée et/ou le co-traitement de la biomasse pour l'alimentation animale, humaine ou les carburants, ou des systèmes en circuit fermé.

Appréhender la diversité des situations étudiées

Hormis pour l'impact des bioénergies sur le changement climatique *via* les émissions de GES, la littérature scientifique du champ de l'étude reste assez parcellaire et difficile à synthétiser. Cette difficulté peut s'expliquer par la multiplicité, à la fois, des matières premières végétales en jeu et de leurs liens au sol (cultures annuelles, pérennes, forestières...), des types de changements d'affectation des sols (directs/indirects, forêts/prairies-pérennes/annuelles), des procédés de transformation et des formes d'énergie, des grandes catégories d'impacts, des phénomènes sous-jacents et des indicateurs nécessaires pour les appréhender, des méthodes...

Il est donc très difficile de suivre l'ensemble de la chaîne de causalité avec la même précision à tous les niveaux et pour tous les types d'impacts. Une stratégie pour résoudre ce problème serait de s'appuyer sur des études décrivant des segments de la chaîne causale de cette étude sans la considérer dans sa totalité.

3. Méta-analyse des émissions de gaz à effet de serre induites par la production de biomasse à vocation énergétique

L'agriculture peut potentiellement fournir de la biomasse soit à partir de cultures énergétiques dédiées, soit à partir des résidus de la production à vocation alimentaire. L'Union Européenne a mis en œuvre des politiques relatives aux bioénergies, visant à la fois à promouvoir leur utilisation et à diminuer simultanément sa dépendance aux combustibles fossiles. La directive UE (2009/28 / EC) sur les énergies renouvelables fixe ainsi un objectif d'intégrer une part de 10% d'énergies renouvelables dans le secteur du transport en 2020. Les biocarburants doivent respecter certains critères de durabilité, notamment une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 50% par rapport aux combustibles fossiles remplacés, à compter du 1^{er} janvier 2017 (Directive 2009/30/EC sur la qualité des carburants).

Bien que la biomasse représente une alternative intéressante aux carburants fossiles, cette source d'énergie peut avoir un impact environnemental important lié, notamment, à son incidence sur les changements de l'affectation des sols directs et indirects (Havlik *et al.*, 2011 ; Searchinger *et al.*, 2008). Les émissions liées aux CAS sont dites directes lorsqu'elles résultent de conversions de terres destinées à produire des biocarburants, ou indirectes lorsqu'elles sont dues à des conversions vers d'autres usages (alimentaires par exemple) qui n'auraient pas eu lieu sans le développement des biocarburants. Plusieurs études ont calculé les émissions de gaz à effet de serre des filières bioénergies, surtout celles conduisant à la production de biocarburants. De Cara *et al.* (2012) ont montré que les estimations des émissions induites par les changements d'affectation des sols étaient très variables entre études. Les émissions de GES de la filière bioénergie peuvent varier en fonction du type de culture (Gabrielle *et al.*, 2014b), du type de biomasse (première ou deuxième génération) (Gelfand *et al.*, 2013 ; van Dam *et al.*, 2009 ; Wang *et al.*, 2012), du type de bioénergies (biodiesel, bioéthanol, bioélectricité et biogaz) (Delivand and Gnansounou, 2013) et du type de changement d'affectation des sols induit (ex : remplacement d'une forêt ou d'une prairie par des cultures énergétiques) (Lange, 2011 ; Silalertruksa and Gheewala, 2011 ; Wicke *et al.*, 2008).

La revue systématique (*cf.* Chapitre 2) ne permet pas de conclure sans ambiguïté sur les différences d'émissions entre les filières fossiles et bioénergie. Même si dans plus de 40% des articles les bioénergies présentent un bilan de GES meilleur que leur équivalent fossile (i.e. des émissions inférieures sur le cycle de vie), un nombre non négligeable conclut à l'inverse (environ 30%). De plus, beaucoup d'articles présentent une gamme de scénarios de culture à vocation bioénergétique dont les bilans de GES sont contrastés, soit meilleurs soit moins bons que ceux des énergies fossiles. Cela justifie l'intérêt d'une analyse statistique approfondie de l'ensemble des scénarios d'usage des terres étudiés dans les articles.

3.1. Principes et objectifs de la méta-analyse

3.1.1. Principes et étapes d'une méta-analyse

Une méta-analyse est une approche statistique qui permet d'analyser conjointement des résultats d'études menées indépendamment les unes des autres, mais concernant un même sujet. Le fait de rassembler ainsi un grand nombre de données permet d'augmenter la robustesse des conclusions et d'analyser la variabilité des résultats entre études.

Une méta-analyse se déroule en plusieurs étapes :

- Définition de la variable sur laquelle va être menée la méta-analyse, c'est-à-dire celle qui va permettre la comparaison des données entre tous les articles. Cette variable, dite taille d'effet (*effect size*) est calculée à partir des données extraites de chaque article et permet de tester une hypothèse ou de répondre à une question. Elle se présente souvent comme une différence par rapport à une valeur témoin, ou comme un ratio de variables de même dimension. Ici, la taille d'effet est la différence relative entre les émissions de gaz à effet de serre résultant de la production et de l'utilisation de bioénergie et celles résultant du recours à des carburants fossiles ;
- Revue bibliographique pour sélectionner les études incluant potentiellement des données d'intérêt ;
- Sélection des études et extraction des informations (données permettant de calculer la taille d'effet de chaque étude ainsi que des co-variables permettant potentiellement d'expliquer la variabilité observée) ;
- Analyse statistique comprenant généralement une analyse descriptive de la distribution des tailles d'effet et une analyse inférentielle qui permet d'estimer les moyennes des tailles d'effet et leurs intervalles de confiance, et d'étudier l'origine

de la variabilité de la taille d'effet. Ici, le modèle statistique utilisé combine des effets fixes caractérisant différents groupes de scénarios et un effet aléatoire "article". Les intervalles de confiance décrivent les incertitudes associées aux estimations, et dépendent du nombre de données disponibles et de la variabilité des tailles d'effet.

3.1.2. Les objectifs de la méta-analyse et hypothèses à tester

L'intérêt principal de la méta-analyse conduite dans le cadre de cette étude est de pouvoir analyser conjointement les valeurs d'émissions de gaz à effet de serre liées à la production de bioénergies (en incluant les émissions liées aux CAS) extraites d'un grand nombre d'articles et obtenues dans différentes conditions. Les données publiées sont utilisées pour calculer les différences relatives entre les émissions de GES des filières bioénergies et celles des énergies fossiles. L'analyse de ces différences d'émission permet donc de tester si, statistiquement et sur la base des données sélectionnées, les bioénergies conduisent à des émissions de GES significativement inférieures ou supérieures à leur équivalent fossile. La plupart des articles analysent une gamme de situations, appelées "scénarios", en faisant varier les différents paramètres pouvant modifier le bilan des GES : type de CAS, type de culture bioénergétique, conduite de la culture, procès de transformation...

Les différences d'émissions obtenues pour plusieurs groupes de scénarios sont analysées pour identifier les situations conduisant à de fortes émissions et celles conduisant à de faibles émissions, par rapport à celles produites avec les carburants fossiles.

Des catégories de scénarios étudiés ont été créées pour répondre à plusieurs questions complémentaires :

- Les catégories de scénarios "bioéthanol", "biodiesel", "bioélectricité" sont comparées pour déterminer si les niveaux d'émissions de GES dépendent du type de produit final ;
- Les catégories de scénarios "biocarburant 1G" et "biocarburant 2G" sont comparées pour déterminer si les émissions dépendent du type de filière de production du biocarburant ;
- Afin de déterminer si les CAS, directs ou indirects, induits par la production de biomasse ont une influence sur la production de GES, plusieurs catégories de scénarios concernant les CAS les plus fréquemment associés à la production de biomasse énergétique, mis en évidence dans le Chapitre 2, sont comparées : "occupation initiale : prairie" et "occupation initiale : forêt", ainsi que leur complémentaires ("occupation initiale : pas de prairie" et "occupation initiale : pas de forêt") ;
- Enfin, une dernière catégorie a été créée, pour estimer si les biocarburants issus de culture de palmier à huile induisaient des émissions de GES plus importantes que d'autres types de culture. Ce choix a été motivé par le développement important des plantations de palmier à huile dans les dernières années, mis en évidence dans le Chapitre 2, et l'existence de controverses sur l'impact environnemental de cette filière.

L'effet de l'année de publication des articles a également été étudié, pour tester l'hypothèse selon laquelle les valeurs des émissions de GES des publications les plus récentes seraient proportionnellement moins élevées que pour les premières publications ayant abordé le sujet.

3.1.3. Les études retenues pour la méta-analyse

Parmi les 241 articles constituant le sous-corpus des réorientations vers la production de biomasse non alimentaire élaboré au cours de la deuxième phase de l'étude (cf. Chapitre 2), 127 articles traitaient de l'impact sur le climat et tenaient compte des effets dus à des CAS. Parmi ces articles, 50 contenaient des résultats quantitatifs sur les émissions de gaz à effet de serre. Ce groupe de 50 articles a été retenu pour la méta-analyse. Chaque article comporte un ou plusieurs scénarios caractérisés par un type de CASd et CASi, et un type de bioénergie. Le nombre total de scénarios est égal à 380 (dont 114 en Europe, 110 en Amérique du Sud, 67 en Amérique du Nord, 74 en Asie, 2 en Australie, 1 en Afrique du Sud).

3.2. Le choix de la variable de comparaison (taille d'effet)

3.2.1. Le calcul et l'interprétation de la variable

La taille d'effet "R" retenue correspond à la différence relative entre les émissions de GES résultant de la production et de l'usage de bioénergie et celles résultant du recours à des carburants fossiles. Elle est définie par $R = \frac{E_b - E_f}{E_f}$, avec E_b l'émission résultant de la production de bioénergie, E_f l'émission associée au carburant fossile.

• L'interprétation des valeurs de R

La taille d'effet R est un écart relatif entre les émissions de GES des bioénergies et des fossiles. Cette variable permet ainsi de tester si les bioénergies conduisent à des émissions de GES inférieures ou supérieures à leur équivalent fossile, et dans quelles proportions. Le Tableau 3-1 donne quelques valeurs clés de R et leur signification.

Valeur de R	Signification
	Les émissions de GES liées à la production et l'utilisation de la biomasse :
$R > 0$	sont supérieures à celles du recours au carburant fossile
$R < 0$	sont inférieures à celle du carburant fossile
$R = 5$	sont 6 fois plus importantes que celle du carburant fossile
$R = 1$	représentent le double de celles du carburant fossile
$R = 0$	sont identiques à celle du carburant fossile
$R = -0.5$	sont de 50% inférieures à celles du carburant fossile
$R = -1$	sont nulles
$R < -1$	représentent une captation nette de GES
$R = -2$	représentent une captation nette de GES équivalente à ce que le carburant fossile induit comme émissions
$R < -2$	représentent une captation nette de GES supérieure à ce que le carburant fossile induit comme émissions

Tableau 3-1. Valeurs de R et leur signification

• Le choix des valeurs d'émissions de la référence fossile

Dans la mesure où tous les articles ne précisent pas le niveau des émissions liées à l'usage d'un équivalent fossile à la forme de bioénergie évaluée, la taille d'effet R est calculée pour chaque scénario de chaque article selon deux stratégies : (i) en utilisant les valeurs de E_f extraites des articles sélectionnés quand celles-ci sont précisées (notées $E_{f_{art}}$), (ii) en utilisant des valeurs de E_f fixes et appliquées aux données extraites de tous les articles. Dans ce deuxième cas, des couples de valeurs ($E_{f_{min}}$, $E_{f_{max}}$) ont été retenus pour chaque type d'énergie fossile de référence. Ces valeurs proviennent du rapport de l'IPCC sur les énergies renouvelables (Chum *et al.*, 2011) (pour l'électricité et la chaleur) ou des valeurs de $E_{f_{art}}$ extraites des articles pour les carburants fossiles. Ainsi, pour le bioéthanol et le biodiesel, la comparaison se fait par rapport à l'essence et au diesel, pour lesquels les valeurs de $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$ retenues sont 84 et 94 gCO₂.MJ⁻¹. Ces deux valeurs sont proches de celles utilisées dans l'Union Européenne et aux USA (respectivement) pour comparer les performances des biocarburants à celles de leurs équivalents en énergie fossile. L'essentiel des valeurs E_f extraites des articles pour ces carburants fossiles se situent dans la gamme 84-95 gCO₂.MJ⁻¹.

Cette seconde stratégie a permis d'augmenter le nombre de données utilisables car, dans 21 articles, les valeurs de E_f étaient manquantes. La première stratégie limite l'analyse à 29 articles représentant 209 scénarios pour lesquels la valeur de R est directement disponible. La seconde stratégie permet d'inclure dans l'analyse les 50 articles et les 380 scénarios qu'ils proposent, tout en normalisant les valeurs d'émissions de leur référence fossile. On n'analyse donc pas, avec les valeurs de E_f issues des articles ($E_{f_{art}}$), le même ensemble d'articles qu'avec les valeurs $E_{f_{min}}$ ou $E_{f_{max}}$, ce qui explique une partie des différences observées. Le fait de choisir deux valeurs de référence appliquées à un même jeu de scénarios permet de tester la sensibilité de R aux valeurs retenues pour les émissions des énergies fossiles.

3.2.2. Les valeurs de R disponibles

Les nombres d'articles et de valeurs de R sont présentés pour différentes catégories de scénarios dans le Tableau 3-2. Le nombre de valeurs de R est systématiquement supérieur au nombre d'articles, car chaque article comporte généralement plusieurs scénarios, permettant le calcul d'autant de valeurs de R .

Les catégories de scénarios ont été élaborées afin de répondre aux questions posées (*cf.* Section 3.1.2). Elles déclinent des catégories de produit finis, des procès de transformation (1G, 2G), une culture, le palmier à huile, sur laquelle il a semblé important de faire un focus, et les deux catégories de CAS (directs ou indirects) prédominants, ceux pour lesquels l'occupation initiale est une forêt ou une prairie, et dont l'occupation finale est une culture énergétique, annuelle ou pérenne.

Les catégories "occupation initiale : pas de forêt", "occupation initiale : pas de prairie" et "sans palmier à huile" sont juste des catégories complémentaires des trois catégories de scénarios "positifs" auxquels ils se réfèrent. La catégorie "sans palmier à huile" regroupe ainsi tous les scénarios ne mobilisant pas du palmier à huile. La catégorie "occupation initiale : pas de prairie" inclut notamment les occupations initiales forêt. Ces scénarios regroupent donc un ensemble très

hétérogène, et doivent être utilisés avec précaution. Ils peuvent être intéressants pour une comparaison globale avec les scénarios positifs auxquels, respectivement, ils se rattachent.

Catégorie de scénarios	Nombre d'articles	Nombre de valeurs de (R)
Bioéthanol	28	169
Biodiésel	19	149
Bioélectricité	7	28
Biocarburant 1G	36	258
Biocarburant 2G	24	111
Biodiésel	19	149
Occupation initiale : prairie	20	120
Occupation initiale : pas de prairie	27	159
Occupation initiale : forêt	11	59
Occupation initiale : pas de forêt	34	222
Avec palmier à huile	13	64
Sans palmier à huile	42	316

Tableau 3-2. Nombres d'articles et de valeurs de R disponibles selon le type de scénarios (cas où E_f est fixée aux valeurs de référence).

3.3. Résultats et principaux enseignements

Les résultats associent une analyse de statistique **descriptive** s'appuyant principalement sur les caractéristiques des distributions de R selon les différentes catégories de scénarios (cf. Tableau 3-3, Figures 3-1, 3-2 et 3-3) et une **estimation** des valeurs moyennes de R assorties d'intervalles de confiance, pour tous les scénarios confondus et pour chaque catégorie de scénarios séparément (Figure 3-4). L'approche **descriptive** permet de répondre à des questions du type : quelle proportion de scénarios de biocarburants issus d'une filière donnée émettent moins de GES que leur équivalent fossile ? L'approche par **estimation** permet de répondre à des questions du type : les biocarburants issus d'une filière donnée émettent-ils en moyenne moins de GES que leur équivalent fossile et, si oui, dans quelle proportion et cette différence est-elle significative ?

Les résultats reposent sur des données extraites des articles. Ces données constituent donc un échantillon de scénarios que les auteurs des articles ont considéré pertinent d'étudier pour comprendre l'effet des bioénergies en termes d'émissions de GES. Les résultats de la méta-analyse dépendent donc des choix effectués par les auteurs des articles quant aux scénarios étudiés et à la gamme des alternatives traitées.

Description générale des données extraites des articles

Les valeurs des tailles d'effet R obtenues à partir des valeurs d'émission des énergies fossiles E_f extraites des articles sont comprises entre -2,97 et 6,95 (Tableau 3-3). La gamme de variation de R est donc très large (quoique la gamme de variation des 1^{er} et 3^e quartiles soit assez resserrée, cf. Figure 3-1) ; elle couvre à la fois des situations où les émissions sont très inférieures aux émissions obtenues avec les carburants fossiles (allant jusqu'à des cas de captation nette de GES), et des situations où les émissions sont très supérieures. La gamme de variation définie par les 1^{er} et 3^e quartiles indique que 50% des valeurs de R sont comprises entre -0,72 et 0,58 avec $E_{f_{art}}$, -0,86 et 0,14 avec $E_{f_{min}}$, et -0,91 et -0,14 avec $E_{f_{max}}$ (Tableau 3-3, Figure 3-1).

Origine de E_f	Valeurs de R				
	Min.	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	Max.
Valeurs extraites des articles ($E_{f_{art}}$)	-2,97	-0,72	-0,34	0,58	6,95
Valeur minimale de référence ($E_{f_{min}} = 84 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$)	-4,31	-0,86	-0,59	0,14	6,93
Valeur maximale de référence ($E_{f_{max}} = 94 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$)	-3,96	-0,91	-0,65	-0,14	6,09

Tableau 3-3. Gammes de variation des tailles d'effet R (différence relative d'émission par rapport au carburant fossile) en fonction de l'origine de E_f (émission associée au carburant fossile).

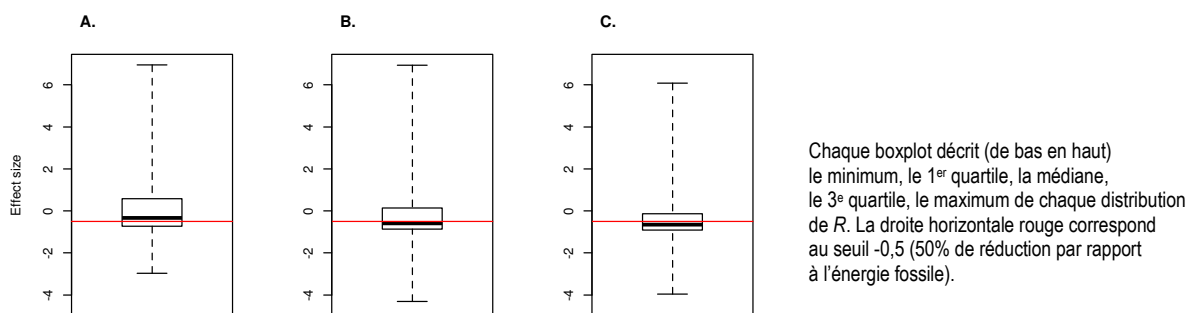


Figure 3-1. Distributions des valeurs de R sous forme de boxplots pour les valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$) (A), pour les valeurs de référence minimum ($E_{f_{min}}$) (B) et maximum ($E_{f_{max}}$) (C).

Les bioénergies dans leur ensemble conduisent-elles à des émissions de GES inférieures ou supérieures à leur équivalent fossile ?

Selon la valeur retenue pour E_f , dans 60% à 80% des scénarios étudiés dans les articles, les bioénergies présentent un bilan d'émissions de GES inférieur à celui du carburant fossile de référence (c'est-à-dire moins d'émissions ; Figure 3-2).

Les valeurs moyennes de réduction des émissions sont présentées sur les Figures 3-4 A, B, C, lignes "All". Avec $E_{f_{max}}$ et $E_{f_{min}}$, la réduction par rapport aux énergies fossiles est respectivement de 42% et 31% et est significative. Avec $E_{f_{art}}$, on obtient une augmentation moyenne de 9% des émissions ($R = 0,09$), qui n'est cependant pas significativement différente de zéro.

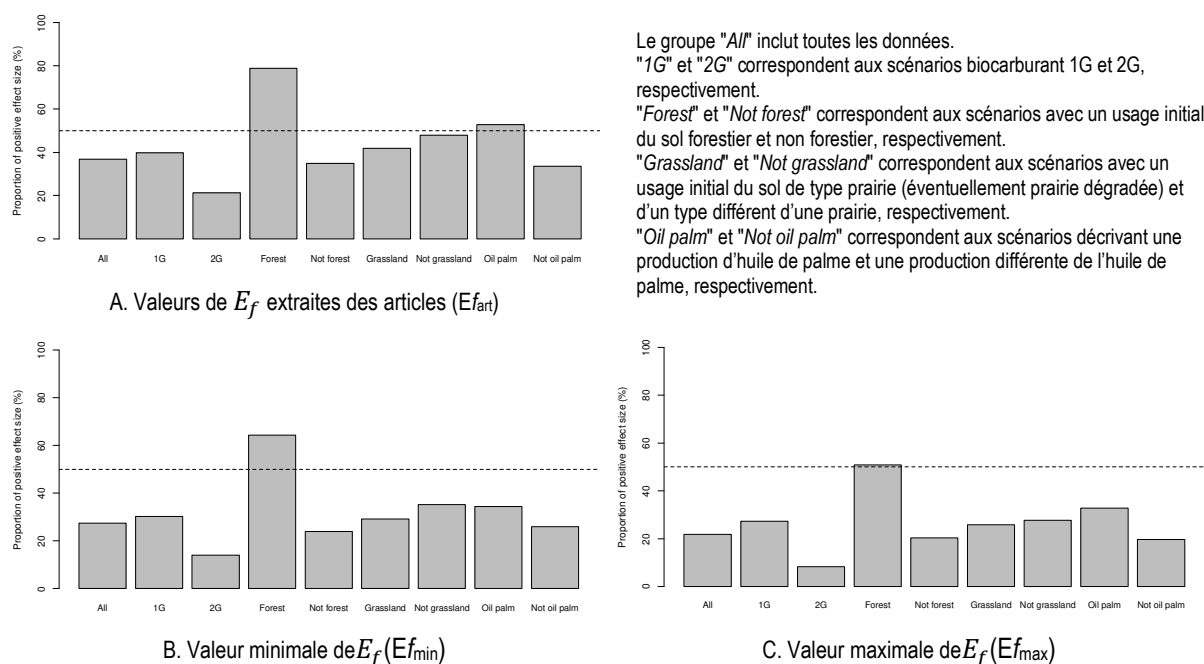
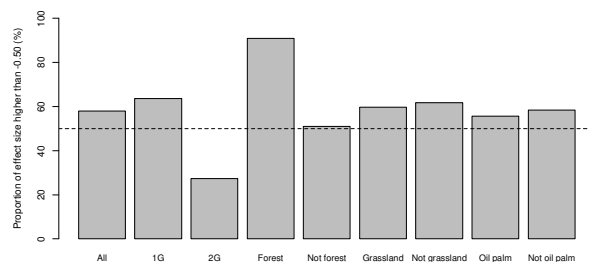


Figure 3-2. Proportions de scénarios où la taille d'effet est positive ($R > 0$) pour différents groupes (c'est-à-dire pour lesquels les émissions sont supérieures à celles du carburant fossile). Ces proportions correspondent aux fréquences empiriques calculées respectivement avec les valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$) (A), ou avec les valeurs de référence de E_f , minimale ($E_{f_{min}}$) (B) ou maximale ($E_{f_{max}}$) (C)

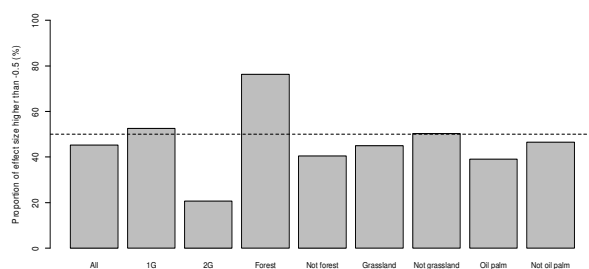
Les bioénergies dans leur ensemble permettent-elles une réduction de 50% des émissions ?

Un peu plus de 50% des scénarios atteignent ce niveau de réduction lorsqu'on les compare à la valeur $E_{f_{min}}$, 60% si l'on se réfère à $E_{f_{max}}$. En revanche, si l'on se réfère aux valeurs de E_f citées dans les articles ($E_{f_{art}}$), ce niveau de réduction n'est pas atteint dans près de 60% des cas (Figure 3-3). En ce qui concerne les valeurs moyennes de réduction, les résultats sont concordants : quelle que soit la référence retenue pour E_f ($E_{f_{art}}$, $E_{f_{min}}$ ou $E_{f_{max}}$), la réduction moyenne d'émission n'atteint pas le chiffre de 50% (Figure 3-4 A, B, C, lignes "All").

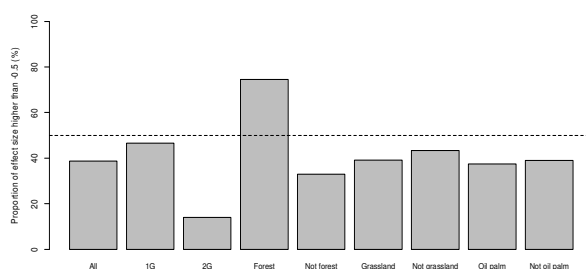


A. Valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$)

Le groupe "All" inclut toutes les données.
 "1G" et "2G" correspondent aux scénarios biocarburant 1G et 2G, respectivement.
 "Forest" et "Not forest" correspondent aux scénarios avec un usage initial du sol forestier et non forestier, respectivement.
 "Grassland" et "Not grassland" correspondent aux scénarios avec un usage initial du sol de type prairie (éventuellement prairie dégradée) et d'un type différent d'une prairie, respectivement.
 "Oil palm" et "Not oil palm" correspondent aux scénarios décrivant une production d'huile de palme et une production différente de l'huile de palme, respectivement.



B. Valeur minimale de E_f ($E_{f_{min}}$)



C. Valeur maximale de E_f ($E_{f_{max}}$)

Figure 3-3. Proportions de scénarios où la taille d'effet est supérieure à -0,5 pour différents groupes (c'est-à-dire pour lesquels une réduction de 50% des émissions par rapport aux énergies fossiles n'est pas atteint). Ces proportions correspondent aux fréquences calculées respectivement avec les valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$) (A), ou avec les valeurs de référence de E_f , minimale ($E_{f_{min}}$) (B) ou maximale ($E_{f_{max}}$) (C).

Les niveaux d'émissions de GES dépendent-ils du type de produit final (bioéthanol, biodiesel ou bioélectricité) ?

Les émissions moyennes dues au bioéthanol et au biodiesel sont légèrement supérieures aux valeurs des émissions des carburants fossiles citées dans les articles ($E_{f_{art}}$), sans que cette différence ne soit significative (Figure 3-3 A). En revanche, rapportées aux valeurs de référence $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$, les émissions du bioéthanol sont significativement inférieures à celles des carburants fossiles. Avec ces références, les émissions du biodiesel sont elles aussi inférieures à celles des carburants fossiles, mais sans que cette différence soit significative dans ce cas. Les émissions dues à la bioélectricité n'ont pu être comparées qu'à $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$. Elles sont significativement inférieures à ces deux références fossiles (Figure 3-3 B et C, ligne "bioelectricity").

Les niveaux d'émissions de GES dépendent-ils du type de filière de production du biocarburant (1G, 2G) ?

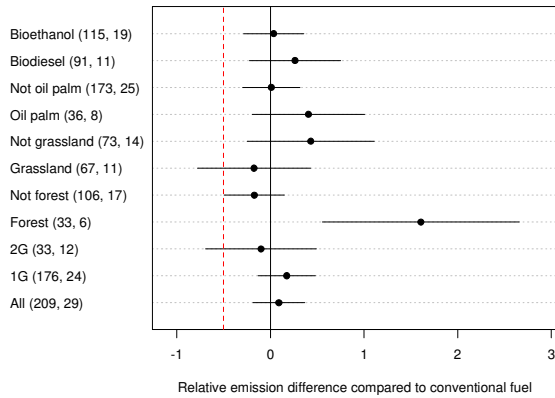
Dans plus de 80% des scénarios étudiés, les 2G présentent un bilan d'émissions de GES inférieur à celui du carburant fossile de référence (Figure 3-2 A, B et C). Pour les 1G, ce chiffre varie de 60 à 75% selon la référence de E_f choisie (Figure 3-2 A, B et C). Une réduction de 50% des émissions est possible pour la majorité des scénarios 2G quelle que soit la référence fossile choisie, alors que pour les 1G, ce niveau de réduction n'est atteint dans la majorité des scénarios qu'avec la référence $E_{f_{max}}$ (cf. Figure 3-3 A, B et C).

Les valeurs d'émission moyennes des 2G sont inférieures à celles des 1G, quelle que soit la référence retenue pour E_f ($E_{f_{art}}$, $E_{f_{min}}$ ou $E_{f_{max}}$), mais cet écart n'est significatif qu'avec $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$. Pour les 1G, la diminution des émissions par rapport au carburant fossile n'est significative qu'avec $E_{f_{max}}$ tandis que pour les 2G cette diminution est significative pour $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$.

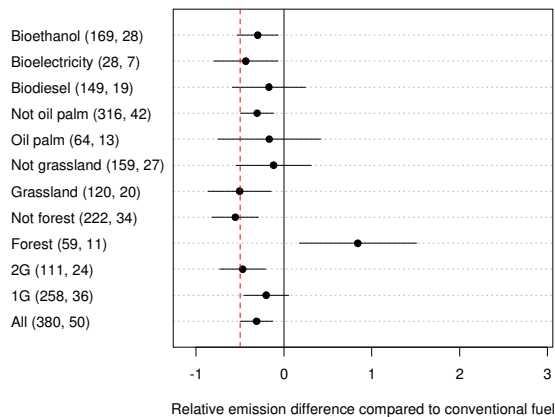
Les niveaux d'émissions de GES dépendent-ils du type de CAS (occupation initiale forêt ou prairie) que la production de biomasse a induits ?

Occupation initiale "forêt"

Quelle que soit la valeur retenue pour les émissions dues au carburant fossile, la proportion de scénarios présentant des émissions plus faibles que le carburant fossile n'est jamais supérieure à 50% lorsque l'occupation initiale est "forêt" (Figure 3-2 A, B, C). Dans ce cas, plus de 75% des scénarios n'atteignent pas une réduction de 50% des émissions par rapport à l'énergie fossile et quelle que soit la référence retenue pour E_f ($E_{f_{art}}$, $E_{f_{min}}$ ou $E_{f_{max}}$) (Figure 3-3 A, B, C).



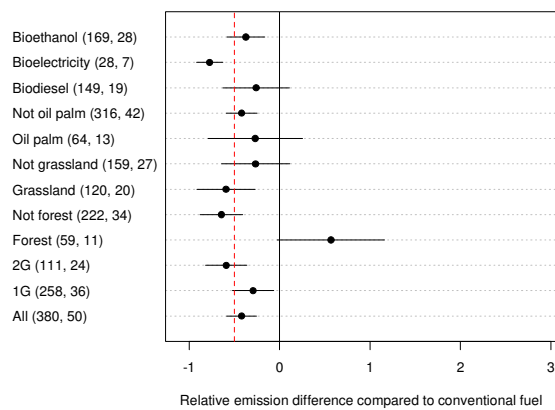
A. Valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$)



B. Valeur minimale de E_f ($E_{f_{min}}$)

Le groupe "All" inclut toutes les données.
 "1G" et "2G" correspondent aux scénarios biocarburant 1G et 2G, respectivement.
 "Forest" et "Not forest" correspondent aux scénarios avec un usage initial du sol forestier et non forestier, respectivement.
 "Grassland" et "Not grassland" correspondent aux scénarios avec un usage initial du sol de type prairie (éventuellement prairie dégradée) et d'un type différent d'une prairie, respectivement.
 "Oil palm" et "Not oil palm" correspondent aux scénarios décrivant une production d'huile de palme et une production différente de l'huile de palme, respectivement.
 "Biodiesel" et "Bioethanol" correspondent aux scénarios décrivant une production de biodiésel et de bioéthanol, respectivement.

Les barres horizontales présentent les intervalles de confiance à 95%. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre de scénarios et le nombre d'articles utilisés dans chaque groupe. Les droites verticales rouges indiquent un niveau de réduction de 50%.



C. Valeur maximale de E_f ($E_{f_{max}}$)

Figure 3-4. Valeurs estimées des tailles d'effet moyennes pour différents groupes de scénarios.
 Résultats obtenus avec des valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$) (A), et avec des valeurs de référence de E_f , valeur minimale ($E_{f_{min}}$) (B), valeur maximale ($E_{f_{max}}$) (C)

Les estimations des valeurs moyennes pour ce type d'occupation initiale du sol ne sont pas très précises, ce que traduit la grande amplitude de l'intervalle de confiance des estimations (Figure 3-4 A, B, C, lignes "Forest"). Les scénarios avec une occupation initiale "forêt" conduisent à des émissions moyennes de GES supérieures de 50 à 150% (selon la valeur de référence) par rapport à celles des carburants fossiles (Figure 3-4). A l'inverse, pour les occupations initiales ne comportant pas de forêt, une réduction de 50% des émissions est atteinte dans plus de la moitié des scénarios (Figure 3-3), et les émissions moyennes sont réduites de 20 à 60% (Figure 3-4).

Globalement, les émissions moyennes des scénarios avec occupation initiale "forêt" sont de 2,1 à 2,4 fois plus élevées (selon la référence E_f) que pour les occupations initiales ne comportant pas de forêt.

Occupation initiale "prairie"

Dans plus de 60% des cas, les bioénergies issues des scénarios incluant une occupation initiale "prairie" présentent un bilan d'émissions de GES inférieur à celui du carburant fossile de référence (Figure 3-2 A, B et C).

Les valeurs moyennes (Figure 3-4 A, B et C, lignes "Grassland") montrent que, quelle que soit la référence fossile utilisée, les émissions sont inférieures à celles générées par le carburant fossile ; la différence est significative avec $E_{f_{min}}$ et $E_{f_{max}}$ (atteignant respectivement autour de 50 et 60%) mais non significative avec $E_{f_{art}}$. Les émissions moyennes des scénarios ne comportant pas de prairie en occupation initiale ne sont pas significativement plus élevées que celles des carburants fossiles de référence.

Les biocarburants issus de culture de palmier à huile induisent-ils des émissions de GES plus importantes que d'autres types de culture ?

Les valeurs moyennes des émissions calculées pour les bioénergies issues de palmier à huile sont incertaines et ne sont jamais significativement différentes des valeurs associées aux carburants fossiles (Figure 3-4 A, B, C, lignes "Oil palm"). Quand on compare directement les scénarios basés sur la culture du palmier à huile aux scénarios basés sur toutes les autres cultures, la différence n'est pas significative quelle que soit la méthode statistique de comparaison retenue. La variabilité de la performance du palmier à huile en termes de bilan de GES semble dépendre plus de l'occupation initiale des sols (forêt primaire ou non) que de la culture du palmier à huile elle-même.

Observe-t-on un effet de l'année de publication des articles ?

Aucun effet significatif de cette variable n'est observé. L'hypothèse selon laquelle les méthodes peuvent s'être affinées et avoir gagné en précision, entraînant une évolution globale des résultats dans le temps, n'est donc pas vérifiée avec notre jeu de données.

3.4. Discussion et comparaison des résultats avec ceux d'autres études

Les analyses soulignent l'effet important des changements d'usage des sols dans les calculs d'émissions de gaz à effet de serre, en lien avec la très grande diversité des situations étudiées dans la littérature. Les résultats révèlent notamment des différences de niveaux d'émission entre des usages initiaux forestier et non forestier, mais aussi des émissions en moyenne plus faibles pour des usages initiaux de type prairie. Il est logique de trouver des émissions élevées après un usage initial de type forêt car la déforestation génère un déstockage de carbone important. *A contrario*, la faiblesse des émissions après prairie peut sembler contre-intuitive, les prairies des zones tempérées étant connues pour contenir des stocks de carbone élevés. Cela peut néanmoins s'expliquer de deux façons, soit que la culture de la bioénergie après prairie n'ait pas entraîné de déstockage important (mise en culture de graminées sans destruction de la prairie précédente, par exemple), soit que la prairie précédente ait été de type "pâturage dégradé" qui a déjà des teneurs en carbone très faibles et que la mise en culture des bioénergies peut même enrichir en carbone. Les résultats sont cohérents avec plusieurs publications (Lange, 2011 ; Wicke *et al.*, 2008). Cependant, les quantités de biomasses produites par les forêts et les prairies peuvent être très différentes selon les types de forêt et de prairie considérés (Lange, 2011 ; Styles and Jones, 2008 ; Wicke *et al.*, 2008). Cette hétérogénéité est une des sources d'incertitude de nos estimations.

Nos résultats montrent aussi que les scénarios de type biocarburant 2G et bioélectricité conduisent à des réductions d'émissions par rapport aux fossiles plus importantes que les autres produits finaux. Par ailleurs, les émissions estimées pour les bioénergies issues de palmier à huile sont incertaines, et ne sont pas significativement différentes de celles de l'équivalent énergie fossile ou de celles des autres cultures bioénergétiques. La variabilité de la performance du palmier à huile en terme de bilan de GES dépend probablement plus de l'occupation des sols initiale (forêt primaire ou non) que de la culture du palmier à huile elle-même, qui présente généralement un rendement énergétique élevé susceptible d'amortir rapidement l'effet des CAS.

A notre connaissance, cette méta-analyse est la seule qui porte spécifiquement sur la différence relative d'émissions entre biomasse énergétique et carburant fossile. D'autres méta-analyses ont été réalisées sur les émissions induites spécifiquement par les changements d'affectation des sols, notamment celles de De Cara *et al.* (2012) et de Valin *et al.* (2015). Les résultats de ces méta-analyses ne peuvent pas être utilisés directement pour estimer des différences d'émissions relatives. Pour pouvoir le faire, il est nécessaire de prendre un forfait fixe pour les émissions liées au cycle de vie des biocarburants, c'est-à-dire pour toutes celles liées à la production, transformation et consommation des biocarburants, en plus des émissions spécifiquement dues aux CAS, comme dans De Cara *et al.* (2012).

La présente étude diffère de celle de De Cara *et al.* sur d'autres points. La recherche bibliographique de De Cara couvre la période allant de 1996 au printemps 2011, et cible les travaux intégrant les changements d'affectation des sols directs et indirects liés au développement des biocarburants (majoritairement de 1^{re} génération). Le facteur CAS (direct et indirect) est présenté en gCO₂e.MJ⁻¹ et les données ont été harmonisées pour être ramenées à une valeur annualisée sur 20 ans, conformément à la directive européenne. Ce facteur est compris entre -326,5 et 2 293 gCO₂e.MJ⁻¹ avec une moyenne de 71,3 et une médiane de 48,5. La méta-analyse réalisée par De Cara *et al.* montre par ailleurs que :

- la présence de biocarburants de 2^{de} génération diminue le facteur CAS de manière importante ;
- la prise en compte de terres marginales ou bien de prairies diminue également le facteur CAS ;

- la transformation de tourbières ou bien la prise en compte de zones en Amérique du Sud (forêt tropicale) augmentent significativement le facteur CAS.

Pour pouvoir comparer directement aux émissions du carburant fossile de référence, De Cara *et al.* ont dû estimer les émissions liées à la production du biocarburant de manière forfaitaire. Dans leurs résultats, les valeurs médianes pour les émissions globales (intégrant production, transformation et CAS) s'échelonnent entre 34,9 gCO_{2e}.MJ⁻¹ pour les biocarburants ligno-cellulosiques et plus de 80 gCO_{2e}.MJ⁻¹ pour des cultures comme le soja, le colza, le tournesol ou le maïs. La prise en compte du CAS conduit dans plus de 80% des situations à une non-satisfaction du seuil de 50% d'abattement d'émissions par rapport aux carburants fossiles (la valeur retenue pour le carburant fossile de référence étant de 83,8 gCO_{2e}.MJ⁻¹). Ici, les pourcentages de non-satisfaction sont plus faibles, compris entre 40 et 60% selon la référence fossile utilisée. Cette différence est due à plusieurs raisons. Comme déjà mentionné ci-dessus, les modalités de calculs utilisées dans les deux études sont très différentes. La période de temps couverte est par ailleurs plus large ici que dans l'étude de De Cara *et al.* La présente étude inclut également des productions énergétiques autres que des carburants (chaleur, électricité, biogaz...). La présence plus importante d'articles prenant en compte des biocarburants de seconde génération (ou ligno-cellulosiques), moins représentés dans le corpus de De Cara *et al.*, peut également contribuer à baisser les valeurs des émissions.

3.5. Conclusion

Dans notre étude, la valeur médiane des diminutions d'émission est comprise entre -34% et -65% par rapport au carburant fossile, selon les modalités de choix des références fossiles. Certains changements d'usage des sols ont un effet important sur les calculs d'émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les émissions induites par la production de biomasse à vocation énergétique sont généralement plus élevées lorsque l'usage initial est une forêt, et plus faibles sinon. Les émissions varient également en fonction des types de biomasse et de bioénergie produits. Les émissions générées par les biocarburants 2G et par la bioélectricité sont généralement plus faibles que celles dues aux énergies fossiles, alors que les émissions induites par la production et consommation de biocarburant 1G, et notamment de biodiésel, ne sont pas significativement différentes de celles des carburants fossiles, sauf dans un cas pour les 1G où elles sont significativement inférieures. Par ailleurs, aucun effet significatif de l'année de publication des études n'a été détecté.

Notre analyse révèle également que les estimations et les intervalles de confiance associés sont sensibles aux valeurs d'émission utilisées pour caractériser les carburants fossiles.

Les scénarios qui ont le plus de chance de respecter l'objectif de réduction d'émission de 50% par rapport aux carburants fossiles sont les biocarburants 2G, les scénarios correspondant à un usage initial non forestier, et la bioélectricité. Cependant, même dans ces scénarios, la capacité des filières bioénergie à respecter cet objectif reste soumise à des conditions importantes en termes notamment d'implantation des cultures énergétiques (usage initial et type de sol affecté). D'un point de vue méthodologique, il subsiste enfin une incertitude non négligeable sur l'estimation de l'effet des CAS.

Conclusion générale

Visant à analyser la façon dont les changements d'affectation des sols interviennent dans les évaluations environnementales, la démarche proposée dans cette étude s'appuie tout d'abord sur un corpus scientifique très large et procède par focalisations successives sur des sous-ensembles de plus en plus restreints, permettant à chaque étape d'obtenir des informations de plus en plus précises et de mener des analyses de plus en plus poussées.

Le point de départ de l'étude est une chaîne causale qui a suscité de nombreux travaux depuis une dizaine d'années : celle-ci relie la réorientation vers la production de bioénergies aux CAS qu'elle induit et aux impacts en termes de bilan de GES qui en résultent. L'objectif de l'étude était de repartir de cette chaîne causale mais en l'élargissant : d'une part, au-delà de la production de bioénergies, à tous types de réorientations dans l'espace pouvant entraîner des CAS et, d'autre part, en bout de la chaîne, à tous types d'impacts environnementaux, et pas seulement les émissions de GES ; et, en amont des réorientations, en identifiant d'éventuels déterminants, biophysiques ou socio-économiques, ayant suscité les réorientations.

Focalisation à l'échelle du corpus complet de 5 730 articles : une gamme très étendue de types de productions et d'impacts

Les trois premiers temps de l'analyse textuelle (générale, puis un focus sur élevage et alimentation, et enfin une lecture diachronique), permettent de repérer des grandes tendances en termes de réorientations, CAS et impacts pris en compte, et de formuler des hypothèses sur leurs relations.

Les principales thématiques identifiées sont classées selon le compartiment de la chaîne causale auquel elles appartiennent : Politique d'aménagement du territoire, politiques foncières, changement climatique, terres dégradées (en tant qu'éléments de **contexte**) ; bioénergies, urbanisation, prairies, forêt (en tant qu'objet ou résultat d'une **réorientation**) ; GES, eau, biodiversité et sol (en tant qu'objets d'**impacts environnementaux**).

L'analyse textuelle permet de comprendre, de façon plus ou moins hypothétique, comment ces thématiques sont en relation les unes avec les autres pour dessiner des problématiques d'étude.

Des problématiques se dessinent assez clairement

Le développement des bioénergies et les CAS qui y sont associés sont étudiés majoritairement sous l'angle des impacts en termes d'émissions de GES induits, avec l'ACV comme méthode d'étude préférentielle. La thématique émerge fortement à partir de 2008. Les politiques publiques visant le développement des bioénergies apparaissent comme un élément de contexte important.

La production de bioénergies (et, plus spécialement, des biocarburants de première génération, 1G) est fortement reliée à la thématique de la sécurité alimentaire, elle-même en lien avec la thématique de l'urbanisation ; les bioénergies sont également en lien avec la thématique de l'élevage. Cet ensemble indique une problématique de compétition pour l'usage des terres entre usages alimentaires, résidentiels, énergétiques, etc., qui peut être traitée soit comme un des effets du développement des bioénergies dont il est nécessaire de tenir compte pour leur évaluation environnementale, soit comme un véritable sujet d'étude.

Les politiques d'aménagement du territoire, en réglementant les CAS, ont une influence notamment sur l'urbanisation, thématique que les études abordent notamment sous l'angle de ses impacts sur l'eau et la biodiversité.

Les impacts sur la biodiversité semblent avoir été étudiés sous l'effet de l'urbanisation d'une part et de l'intensification de pratiques agricole et d'élevage d'autre part, mais sans lien direct fort avec la réorientation vers les bioénergies.

D'autres problématiques peuvent être esquissées, de façon plus spéculative

Le changement climatique, parce qu'il modifie la disponibilité de la ressource en eau à l'échelle régionale, induit des CAS, qui eux-mêmes rétroagissent hypothétiquement sur la disponibilité de la ressource en eau.

Les terres dégradées apparaissent comme un élément de contexte lié à l'urbanisation et à la production de biocarburants 2G, ce deuxième point pouvant être interprété comme la traduction du développement d'études sur le potentiel de valorisation de ces terres grâce à des espèces peu exigeantes d'un point de vue agronomique, dans l'objectif de produire des bioénergies sans trop concurrencer la production alimentaire.

La dégradation des sols semble être abordée sous l'effet de l'intensité du pâturage et de l'intensification de la production agricole, sans que ces relations ne soient très lisibles.

Des sujets qui n'apparaissent pas alors qu'ils font déjà partie du débat sociétal

L'impact de la modification des régimes alimentaires sur la demande et les besoins en terres cultivées nécessaires pour satisfaire cette demande reste très minoritaire. Cela ne signifie pas que la thématique soit absente, mais qu'elle n'est pas encore traitée de façon conséquente.

Focalisation à l'échelle du sous-corpus de 1 785 articles issus du cluster centré sur la production de biomasse non alimentaire

L'étude de ce sous-corpus apporte des précisions par rapport à l'analyse du corpus complet, sans remettre en cause l'analyse.

Le lien entre bioénergie et GES n'est plus aussi direct qu'avec le corpus complet : il s'enrichit de relations avec les thématiques de la forêt et de la prairie. La focalisation sur cette partie du corpus montre ainsi que la thématique bioénergie ne se résume pas à un calcul de sa performance immédiate en termes de GES, mais qu'elle s'inscrit dans un système plus large incluant les CAS entre forêt, prairie et cultures d'espèces bioénergétiques. On retrouve ainsi sous une forme plus affinée, la problématique de compétition pour l'usage des terres.

Un autre aspect de l'enrichissement des problématiques centrées sur les bioénergies est l'impact sur la biodiversité, qui n'apparaissait pas fortement dans le corpus complet et que cette focalisation permet de mettre en évidence. Il importera de vérifier, dans des travaux futurs, la place réelle de cette thématique.

La déforestation en zone tropicale apparaît en lien avec la production de soja et d'huile de palme. Ce n'est pas une surprise, mais là encore c'est la focalisation sur le corpus restreint aux bioénergies qui permet de rendre cette thématique visible.

Les relations biocarburants 2G / terres dégradées / *land use policy* / sécurité alimentaire déjà décrites à partir du corpus complet sont confirmées.

L'ensemble de ces descriptions de relations entre réorientations, CAS et impacts sur le cas des bioénergies, plus ou moins hypothétiques, sont cependant utiles au moment de mener une revue systématique des impacts de la biomasse non alimentaire. Cette revue systématique doit en effet permettre de confirmer ou infirmer, et de compléter les tendances identifiées par l'analyse textuelle.

Focalisation à l'échelle du sous-corpus de 241 articles traitant des relations "réorientations vers la production de biomasse non alimentaire – CAS – impacts environnementaux"

Le sous-corpus de l'étape précédente, après deux phases de tri, a été très fortement réduit (élimination de plus de 8 articles sur 10), permettant de ne conserver que les 241 articles abordant réellement la chaîne "réorientation vers la production de biomasse non alimentaire – CAS – impacts". Le dépouillement de toutes les informations de ce sous-corpus est riche d'enseignements.

Dans la gamme des espèces cultivées prédominent celles dédiées à des biocarburants 1G, dont le maïs, la canne à sucre, le soja et le palmier à huile, mais on retrouve une forte proportion d'espèces spécifiques des biocarburants 2G, bien supérieure à leur implantation dans l'espace agricole, notamment le miscanthus et le switchgrass.

Concernant les CAS, 94 articles ne traitent que de CAS directs, 11 articles que de CAS indirects et 25 traitent conjointement des deux types de CAS. Les CASd sont donc nettement prédominants, ce qui est à la fois l'effet de leur antériorité dans les travaux sur les CAS et de la difficulté d'intégrer les CASi dans les analyses. Les CASd les plus représentés concernent la transformation de forêt et de prairie en cultures énergétiques pérennes et cultures annuelles, ce qui est logique pour une problématique d'étude des bioénergies ; en revanche, on observe une forte proportion de CAS transformant des cultures annuelles en culture énergétique pérenne, autre manifestation de l'intérêt pour les biocarburants 2G (qui sont très majoritairement issus de cultures pérennes). Les deux principaux types de CASi étudiés sont la transformation de forêt et prairies en cultures annuelles, ce qui est cohérent avec l'idée que les CASi concernent essentiellement le report de cultures alimentaires sur des terres qui n'étaient pas jusqu'ici cultivées, sous l'effet du développement des bioénergies.

Quand ils sont étudiés simultanément, les CASd et CASi ne se répartissent pas de façon homogène dans les différentes zones géographiques : schématiquement, les CASd en Europe "induisent" beaucoup de CASi en dehors de l'Europe, et notamment en Amérique du Sud et en Asie : les études reflètent assez fidèlement les dynamiques observées à l'échelle mondiale.

La dynamique temporelle des études décrivant les CAS liés aux bioénergies confirme la montée en puissance des 2G : la prise en compte des CAS dans les études sur le bilan environnemental des bioénergies a réellement émergé en 2008, et, jusqu'en 2011, les travaux s'équilibraient entre des CAS vers des cultures annuelles et vers des cultures pérennes. A partir de 2012, la part des CAS vers des cultures pérennes est devenue nettement prédominante dans les études, reflet de l'intérêt pour les biocarburants 2G.

Dans la gamme des impacts étudiés, les impacts sur le climat (vus quasi exclusivement au travers des émissions de GES) sont étudiés dans près de la moitié des articles. Parmi les articles traitant de cet impact (au nombre de 166), près de la moitié concluent à une réduction des émissions de GES par rapport au recours aux énergies fossiles, un tiers à une augmentation, un très petit nombre à des émissions équivalentes, et un quart à des résultats variables selon les scénarios décrits. Cette première quantification, trop sommaire, ne permet pas de conclure et plaide pour une analyse statistique plus robuste.

La consommation des ressources non renouvelables est quantifiée dans 11% des références du corpus, mais ces articles sont en fait plutôt focalisés sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources fossiles étant un résultat collatéral.

Les études du corpus montrent globalement que les plantes pérennes tendent à mieux préserver, voire à augmenter, les teneurs en carbone organique du sol, comparées aux cultures annuelles. Toutefois, les résultats quantifiés sont très variables ; ils dépendent du contexte pédoclimatique (type de sol, précipitations...) et agronomique (espèce cultivée, rotation culturale, pratiques de travail du sol et de fertilisation...). Les autres impacts sur le sol sont globalement peu renseignés.

Concernant le critère consommation d'eau, les études concluent dans un peu plus de la moitié des cas à une augmentation des prélèvements. Environ la moitié des articles traitant d'eutrophisation conclut à une augmentation du phénomène. Il est cependant délicat, pour les deux critères, de tirer des conclusions tranchées, car beaucoup de situations (entre 20 et 30%) sont classées comme "variables" et correspondent à des scénarios contrastés décrits au sein d'un même article.

L'effet des CAS induits par la production de bioénergie sur la biodiversité a été considéré dans un nombre réduit d'études. Celles-ci concluent généralement à un impact négatif (diminution de la biodiversité) quelles que soient les méthodologies ou les métriques de la biodiversité employées.

Les impacts sur la pollution atmosphérique et la santé humaine sont trop rarement rapportés dans le corpus pour qu'une conclusion puisse être formulée.

Les ACV sont confirmées comme étant la méthode d'étude formalisée la plus employée (25% des cas), notamment pour l'évaluation des impacts, mais elle n'arrive qu'après les méthodes non formalisées, c'est-à-dire de simples calculs qui représentent 45% du total et qui n'avaient pas été repérées par l'analyse lexicale, mobilisant un vocabulaire trop peu spécifique. Au sein des méthodes formalisées, on note une différence dans l'estimation des impacts selon la méthode choisie : l'ACV a tendance à minorer les émissions de GES estimées comparées aux estimations obtenues *via* des modèles économiques.

Lacunes de connaissances

Le croisement de la gamme des impacts étudiés (8 catégories) avec la gamme des types de bioénergies produites (7 catégories) met clairement en évidence les domaines privilégiés par les recherches : parmi les 56 couples (bioénergie x impact) possibles, 6 représentent près de la moitié des cas étudiés. On identifie ainsi, par contraste, les domaines peu explorés, et notamment le faible nombre de recherches sur l'impact des bioénergies sur la biodiversité. La consommation des ressources non renouvelables pourrait être étudiée plus largement car les informations nécessaires existent et sont utilisées en particulier pour l'évaluation des émissions de GES. Cependant, l'effet du focus sur les GES induit une faible présentation de ce qui concerne l'efficacité énergétique.

Focalisation à l'échelle des 50 articles éligibles à une méta-analyse comparant les impacts des bioénergies en termes d'émissions de GES, à ceux des énergies fossiles

Parmi les 166 articles du sous-corpus biomasse non alimentaire abordant les impacts sur le climat, 50 comportaient des données quantitatives les rendant éligibles à une méta-analyse pour comparer l'écart relatif entre les émissions dues aux bioénergies et celles dues à l'énergie fossile correspondante.

Les résultats de cette méta-analyse dépendent fortement des choix de situations étudiées par les auteurs des articles et de la valeur des émissions retenue pour les énergies fossiles (E_f). Dans cette conclusion, on se réfère principalement à la valeur $E_{f_{min}}$ de 84 gCO₂/MJ qui est assez proche de la référence utilisée dans l'Union Européenne pour comparer les performances des biocarburants avec leurs équivalents en énergie fossile.

Les résultats confirment les hypothèses et lèvent certaines des interrogations restées en suspens au cours des étapes précédentes.

Dans plus de 60% des scénarios étudiés, les bioénergies dans leur ensemble conduisent à des émissions de GES inférieures à leur équivalent d'énergie fossile. Rapportée aux émissions des énergies fossiles (sur la base de la valeur $E_{f_{min}}$), cette baisse est en moyenne de 22% et est statistiquement significative. Elle n'atteint cependant pas l'objectif d'une réduction de 50% des émissions tel que le propose la réglementation européenne. Le chiffre de 22% est calculé tous scénarios confondus et présente une grande variabilité entre scénarios.

Rapportées à la valeur $E_{f_{min}}$, les émissions dues au bioéthanol sont significativement inférieures en valeur moyenne à celles dues aux carburants fossiles, tout comme celles du biodiesel, mais sans atteindre le seuil de significativité. Les émissions des 2G sont significativement plus faibles que celles des 1G. Sur la base de la valeur $E_{f_{min}}$, les émissions des 2G sont en valeur moyenne significativement inférieures à celles des carburants fossiles ; les émissions des 1G sont elles aussi inférieures à celles des carburants fossiles, mais cette différence n'est pas significative. Une réduction de 50% des émissions est atteinte par la majorité des scénarios 2G étudiés dans les articles, mais seulement par une minorité de scénarios 1G.

Les niveaux d'émissions de GES dépendent aussi du type de CAS (occupation initiale forêt ou prairie) que la production de biomasse a induit. Les scénarios avec une occupation initiale "forêt" sont les moins performants : leurs émissions moyennes de GES sont supérieures en moyenne de 50 à 150% (selon la valeur de référence) à celles des carburants fossiles. A l'inverse, les scénarios présentant une occupation initiale "prairie" permettent une réduction moyenne des émissions de 50% par rapport à celles des énergies fossiles (sur la base de $E_{f_{min}}$). Cette faiblesse des émissions de GES liées à des bioénergies produites après la mise en culture d'une prairie peut sembler contre-intuitive. Elle peut néanmoins s'expliquer de deux façons, (i) soit en considérant que la culture de la bioénergie après prairie n'a pas entraîné de déstockage important (par exemple par valorisation bioénergétique de l'herbe sans retournement de la prairie), (ii) soit en faisant l'hypothèse que la prairie retournée était de type "pâturage dégradé" qui a des teneurs en carbone très faibles : on retrouve ici une cohérence avec les hypothèses élaborées à partir de l'analyse lexicale.

Les bioénergies issues de palmier à huile présentent des valeurs moyennes d'émissions très variables, non significativement différentes de celles du carburant fossile de référence. La variabilité de la performance du palmier à huile en terme de bilan de GES semble dépendre plus de l'occupation initiale des sols (forêt primaire ou non) que de la culture de l'espèce palmier à huile elle-même.

Principaux enseignements et lacunes de connaissances

Le champ des études d'impact environnemental tenant compte des changements d'affectation des sols apparait fortement structuré autour de deux évolutions majeures : la production de biomasse pour la bioénergie et le développement urbain. Ces deux réorientations principales dépendent d'éléments de contexte biophysique, notamment les questions des terres dégradées et du changement climatique, et de contexte socio-économique, notamment les politiques publiques. L'enjeu de compétition entre divers usages des terres (alimentaires, résidentiels, énergétiques) émerge assez nettement de l'analyse textuelle.

L'analyse approfondie de la littérature scientifique sur la thématique biomasse énergétique montre la prédominance des réorientations vers les biocarburants 1G et 2G, des CAS mobilisant fortement des sols forestiers et de prairies, et des impacts sur le climat. Les impacts sur l'eau et les sols sont traités à un niveau moindre. Pour les autres types d'impacts, la littérature scientifique est beaucoup plus parcellaire. Par ailleurs, sans méta-analyse, les tendances sont plus difficiles

à interpréter du fait de la multiplicité des paramètres intervenant tout au long de la chaîne "Réorientations → CAS → Impacts".

Les résultats de la méta-analyse comparant les impacts des bioénergies en termes d'émissions de GES à ceux des énergies fossiles sont très dépendants de la référence choisie pour les émissions dues aux énergies fossiles. Ils sont aussi très dépendants du type de CAS impliqué. Ainsi, dans le cas d'une occupation initiale "forêt", les émissions de GES dues aux bioénergies sont en moyenne plus élevées que celles dues aux énergies fossiles, quelle que soit la référence choisie pour ces dernières. Les biocarburants 2G présentent en moyenne de meilleures performances que les biocarburants 1G.

A chacun de ses trois niveaux d'analyse, l'étude a révélé des lacunes de connaissances :

- Concernant les réorientations impliquant des CAS, très peu de travaux sont consacrés au rôle que peut jouer l'évolution des régimes alimentaires (diminution ou augmentation de la consommation de produits animaux, par exemple) sur les CAS. Cette lacune peut être attribuée au caractère récent de cette problématique dans le champ scientifique.
- L'étude systématique de la thématique de la biomasse non alimentaire montre que la prise en compte des effets des CAS indirects reste encore minoritaire, près de 10 ans après les premiers travaux les ayant abordés. Par ailleurs, les impacts des CAS sur la biodiversité sont assez peu étudiés, ou du moins pas spécifiquement en lien avec la problématique du développement des bioénergies. Cette constatation plaide pour un effort d'assemblage de travaux traitant de segments de la chaîne causale de cette étude sans la considérer dans sa totalité.
- La méta-analyse des résultats obtenus sur les émissions de GES des bioénergies, tout en confirmant des résultats déjà pointés par des études antérieures, souligne leur variabilité importante au sein de groupes de scénarios relativement homogènes (même culture, même type de CAS, même type de bioénergie...). Cette variabilité est particulièrement nette pour des CAS où l'occupation initiale est une forêt d'une part, et pour les situations où les bioénergies sont produites à partir d'huile de palme d'autre part. Ce double constat souligne l'importance, pour les travaux futurs, d'une description très fine des situations étudiées.

De façon générale, l'étude a permis de mettre en évidence qu'il existe beaucoup d'incertitudes sur les impacts environnementaux des bioénergies tenant compte des CAS. Trois sources d'incertitudes peuvent être impliquées : (i) la grande diversité des filières étudiées, en termes de cultures-matières premières, région de production, procédé de conversion et produit final. Cela signifie qu'une évaluation au cas par cas est nécessaire. La méta-analyse fournit quelques grands repères sur cette source d'incertitudes ; (ii) la diversité des méthodes employées pour estimer les CAS, méthodes qui de plus comportent chacune une part d'incertitude inhérente aux hypothèses/modélisations sur lesquelles elles reposent ; (iii) enfin pour certains impacts, les méthodes employées sont loin d'être stabilisées. Cela milite pour un rapprochement des communautés scientifiques très mobilisées sur les CAS avec des communautés spécialisées sur ces impacts.

Références bibliographiques citées

- Ben Aoun, W.; Gabrielle, B.; Gagnepain, B., 2013. The importance of land use change in the environmental balance of biofuels. *OCL*, 20 (5): D505. <http://dx.doi.org/10.1051/ocl/2013027>
- Berdes, G.; Ahlgren, S.; Borjesson, P.; Cowie, A.L., 2013. Bioenergy and land use change-state of the art. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Energy and Environment*, 2 (3): 282-303. <http://dx.doi.org/10.1002/wene.41>
- Broth, A.; Hoekman, S.K.; Unnasch, S., 2013. A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & POLICY*, 29: 147-157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.02.002>
- Brunelle, T.; Dumas, P.; Souty, F., 2014. The Impact of Globalization on Food and Agriculture: The Case of the Diet Convergence. *Journal of Environment & Development*, 23 (1): 41-65. <http://dx.doi.org/10.1177/1070496513516467>
- Chum, H.; Faaij, A.; Moreira, J.; Berdes, G.; Dhamija, P.; Dong, H.; Ribeiro, S.; Gabrielle, B.; Goss Eng, A.; Lucht, W.; Mapako, M.; Masera Cerutti, O.; McIntyre, T.; Minowa, T.; Pingoud, K., 2011. Bioenergy. In: Edenhofer, O.; Pichs-Madruga, R.; Sokona, Y.; Seyboth, K.; Matschoss, P.; Kadner, S.; Zwickel, T.; Eickemeier, P.; Hansen, G.; Schlömer, S.; Stechow, C.v., eds. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press, 209-332. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139151153.006>
- Commission Européenne, 2009. Directive n° 2009/28/CE du 23/04/09 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE. http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/801/version_pdf
- Davis, S.C.; Parton, W.J.; Del Grosso, S.J.; Keough, C.; Marx, E.; Adler, P.R.; DeLucia, E.H., 2012. Impact of second-generation biofuel agriculture on greenhouse-gas emissions in the corn-growing regions of the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10 (2): 69-74. <http://dx.doi.org/10.1890/110003>
- De Cara, S.; Goussebaïlle, A.; Grateau, R.; Levert, F.; Quemener, J.; Vermont, B.; Bureau, J.-C.; Gabrielle, B.; Gohin, A.; Bispo, A., 2012. *Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants*. Angers: Ademe, (contrat n°10-60-C0039), 96 p. http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=7AC5DFA02A2CE66DFDE000D7FA33AA56_tomcatlocal1333626720098.pdf
- Delivand, M.K.; Gnansounou, E., 2013. Life cycle environmental impacts of a prospective palm-based biorefinery in Para State-Brazil. *Bioresource Technology*, 150: 438-446. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.100>
- Djomo, S.N.; Ceulemans, R., 2012. A comparative analysis of the carbon intensity of biofuels caused by land use changes. *Global Change Biology Bioenergy*, 4 (4): 392-407. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01176.x>
- Fargione, J.E.; Cooper, T.R.; Flaspohler, D.J.; Hill, J.; Lehman, C.; McCoy, T.; McLeod, S.; Nelson, E.J.; Oberhauser, K.S.; Tilman, D., 2009. Bioenergy and Wildlife: Threats and Opportunities for Grassland Conservation. *BioScience*, 59 (9): 767-777. <http://dx.doi.org/10.1525/bio.2009.59.9.8>
- Fritsche, U.R.; Sims, R.E.H.; Monti, A., 2010. Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production - an overview. *Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr*, 4 (6): 692-704. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.258>
- Gabrielle, B.; Bamiere, L.; Caldes, N.; De Cara, S.; Decocq, G.; Ferchaud, F.; Loyce, C.; Pelzer, E.; Perez, Y.; Wohlfahrt, J.; Richard, G., 2014a. Paving the way for sustainable bioenergy in Europe: Technological options and research avenues for large-scale biomass feedstock supply. *Renewable & sustainable energy reviews*, 33: 11-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.050>
- Gabrielle, B.; Gagnaire, N.; Massad, R.S.; Dufosse, K.; Bessou, C., 2014b. Environmental assessment of biofuel pathways in Ile de France based on ecosystem modeling. *Bioresource Technology*, 152: 511-518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.104>
- Gelfand, I.; Sahajpal, R.; Zhang, X.S.; Izaurrealde, R.C.; Gross, K.L.; Robertson, G.P., 2013. Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature*, 493 (7433): 514-517. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11811>
- Harris, Z.M.; Spake, R.; Taylor, G., 2015. Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. *Biomass & Bioenergy*, 82: 27-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.008>
- Havlik, P.; Schneider, U.A.; Schmid, E.; Bottcher, H.; Fritz, S.; Skalsky, R.; Aoki, K.; De Cara, S.; Kindermann, G.; Kraxner, F.; Leduc, S.; McCallum, I.; Mosnier, A.; Sauer, T.; Obersteiner, M., 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 39 (10): 5690-5702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.030>
- Hellweg, S.; Canals, L.M.I., 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, 344 (6188): 1109-1113. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1248361>
- Lange, M., 2011. The GHG balance of biofuels taking into account land use change. *Energy Policy*, 39 (5): 2373-2385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.057>
- Lapola, D.M.; Schaldach, R.; Alcamo, J.; Bondeau, A.; Koch, J.; Koelking, C.; Priess, J.A., 2010. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107 (8): 3388-3393. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0907318107>
- Liu, J.G.; Mooney, H.; Hull, V.; Davis, S.J.; Gaskell, J.; Hertel, T.; Lubchenco, J.; Seto, K.C.; Gleick, P.; Kremen, C.; Li, S.X., 2015. Systems integration for global sustainability. *Science*, 347 (6225). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1258832>

- McKinnon, M.C.; Cheng, S.H.; Garside, R.; Masuda, Y.J.; Miller, D.C., 2015. Map the evidence. *Nature*, 528 (7581): 185-187. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11811>
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Multiscale Assessments: Findings of the Sub-Global Assessments Working Group*. Island Press, 416 p. <https://books.google.fr/books?id=wz-0AAAAIAAJ>
- Mendenhall, C.D.; Karp, D.S.; Meyer, C.F.J.; Hadly, E.A.; Daily, G.C., 2014. Predicting biodiversity change and averting collapse in agricultural landscapes. *Nature*, 509 (7499): 213-217. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13139>
- Miake-Lye, I.M.; Hempel, S.; Shanman, R.; Shekelle, P.G., 2016. What is an evidence map? A systematic review of published evidence maps and their definitions, methods, and products. *Systematic Reviews*, 5 (1): 28. <http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0204-x>
- Newbold, T.; Hudson, L.N.; Hill, S.L.L.; Contu, S.; Lysenko, I.; Senior, R.A.; Borger, L.; Bennett, D.J.; Choimes, A.; Collen, B.; Day, J.; De Palma, A.; Diaz, S.; Echeverria-Londono, S.; Edgar, M.J.; Feldman, A.; Garon, M.; Harrison, M.L.K.; Alhusseini, T.; Ingram, D.J.; Itescu, Y.; Kattge, J.; Kemp, V.; Kirkpatrick, L.; Kleyer, M.; Correia, D.L.P.; Martin, C.D.; Meiri, S.; Novosolov, M.; Pan, Y.; Phillips, H.R.P.; Purves, D.W.; Robinson, A.; Simpson, J.; Tuck, S.L.; Weiher, E.; White, H.J.; Ewers, R.M.; Mace, G.M.; Scharlemann, J.P.W.; Purvis, A., 2015. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520 (7545): 45-50. <http://dx.doi.org/10.1038/nature14324>
- Nguyen, T.T.H.; Doreau, M.; Eugene, M.; Corson, M.S.; Garcia-Launay, F.; Chesneau, G.; van der Werf, H.M.G., 2013. Effect of farming practices for greenhouse gas mitigation and subsequent alternative land use on environmental impacts of beef cattle production systems. *Animal*, 7 (5): 860-869. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112002200>
- Plevin, R.J.; O'Hare, M.; Jones, A.D.; Torn, M.S.; Gibbs, H.K., 2010. Greenhouse Gas Emissions from Biofuels' Indirect Land Use Change Are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated. *Environmental Science & Technology*, 44 (21): 8015-8021. <http://dx.doi.org/10.1021/es101946t>
- Pullin, A.S., 2012. Realising the potential of environmental data: a call for systematic review and evidence synthesis in environmental management. *Environmental Evidence*, 1 (1): 2. <http://dx.doi.org/10.1186/2047-2382-1-2>
- Reboud, X.; Fournier, D.; Leiser, H.; Taty, M.-V.; Barbier, M.; Cointet, J.-P., 2012. Analyse lexicale du corpus bibliométrique "agroécologie" au sens restreint. In: Inra, ed. *Rapport INRA du chantier Agro-écologie*. 85-87.
- Sandoval, M.; Tarot, C., 2014. *Etude bibliométrique sur les transitions nutritionnelles. Les transitions nutritionnelles dans la littérature scientifique internationale. Méthodologie (démarche d'exploration) et résultats d'analyses. Rapport de l'étude bibliométrique sur l'axe 6 du MP GloFoodS*.
- Scheffran, J.; BenDor, T., 2009. Bioenergy and land use: a spatial-agent dynamic model of energy crop production in Illinois. *International Journal of Environment and Pollution*, 39 (1-2): 4-27. <http://dx.doi.org/10.1504/IJEP.2009.02714>
- Searchinger, T.; Heimlich, R.; Houghton, R.A.; Dong, F.X.; Elobeid, A.; Fabiosa, J.; Tokgoz, S.; Hayes, D.; Yu, T.H., 2008. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319 (5867): 1238-1240. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1151861>
- Silalertruksa, T.; Gheewala, S.H., 2011. Long-Term Bioethanol System and Its Implications on GHG Emissions: A Case Study of Thailand. *Environmental Science & Technology*, 45 (11): 4920-4928. <http://dx.doi.org/10.1021/es1040915>
- Styles, D.; Jones, M.B., 2008. Miscanthus and willow heat production - An effective land-use strategy for greenhouse gas emission avoidance in Ireland? *Energy Policy*, 36 (1): 97-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.08.030>
- Tancoigne, E.; Barbier, M.; Cointet, J.-P.; Richard, G., 2014. *Les services écosystémiques dans la littérature scientifique : démarche d'exploration et résultats d'analyse*, 69 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01157253>
- Toth, G., 2012. Impact of land-take on the land resource base for crop production in the European Union. *Science of the Total Environment*, 435: 202-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.103>
- UNEP, 2014. *Assessing global land use and soil management for sustainable resource policies*: UNEP, A Report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. Bringezu S., Schütz H., Pengue W., O'Brien M., Garcia F., Sims R., Howarth R., Kauppi L., Swilling M., and Herrick J., (DTI/1658/PA), 131 p. [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_\(PDF\).pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_(PDF).pdf)
- Valin, H.; Peters, D.; van den Berg, M.; Frank, S.; Havlik, P.; Forsell, N.; Hamelinck, C.; Pirker, J.; Mosnier, A.; Balkovič, J., 2015. *The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts*: IIASA, 214 p. http://pure.iiasa.ac.at/12310/1/Final%20Report_GLOBIOM_publication.pdf
- van Dam, J.; Faaij, A.P.C.; Hilbert, J.; Petrucci, H.; Turkenburg, W.C., 2009. Large-scale bioenergy production from soybeans and switchgrass in Argentina Part B. Environmental and socio-economic impacts on a regional level. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13 (8): 1679-1709. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.012>
- van Vliet, J.; Magliocca, N.R.; Buchner, B.; Cook, E.; Benayas, J.M.R.; Ellis, E.C.; Heinemann, A.; Keys, E.; Lee, T.M.; Liu, J.G.; Mertz, O.; Meyfroidt, P.; Moritz, M.; Poelplau, C.; Robinson, B.E.; Seppelt, R.; Seto, K.C.; Verburg, P.H., 2016. Meta-studies in land use science: Current coverage and prospects. *Ambio*, 45 (1): 15-28. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-015-0699-8>
- Wang, M.; Han, J.; Dunn, J.B.; Cai, H.; Elgowainy, A., 2012. Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. *Environmental Research Letters*, 7 (4). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>
- Wicke, B.; Dornburg, V.; Junginger, M.; Faaij, A., 2008. Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass & Bioenergy*, 32 (12): 1322-1337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.04.001>

Liste des abréviations

1G : Biocarburant de première génération
2G : Biocarburant de seconde génération
ACV : Analyse de cycle de vie
CAS : Changement d'affectation des sols
CASd : Changement d'affectation des sols direct
CASi : Changement d'affectation des sols indirect
CEP : Culture énergétique pérenne
CH₄ : Méthane
CO₂ : Dioxyde de carbone
COS : Carbone organique des sols
DEPE : Délégation à l'expertise scientifique, à la prospective et aux études
GES : Gaz à effet de serre
GIS : Groupement d'intérêt scientifique
IT : Identifiant thématique
LUC : *Land use change* (CAS en français)
N₂O : Protoxyde d'azote (oxyde nitreux)
R : Notation de la "taille d'effet" en méta-analyse
TCR : Taillis à courte rotation
UE : Union européenne

Les experts et l'équipe projet

• Le collectif d'experts

Pilotes scientifiques :

Antonio Bispo, Ademe, Direction Productions et Energies Durables - Service Agriculture et Forêt. *Ademe, 20 avenue du Grésillé, BP 90406, 49004 Angers cedex 01*

Benoît Gabrielle, AgroParisTech, département SIAFEE et UMR1402 ECOSYS, Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes INRA-AgroParisTech. *INRA-AgroParisTech, Route de la Ferme, 78850 Thiverval-Grignon*

David Makowski, INRA, UMR 0211 Agronomie INRA-AgroParisTech. *INRA Grignon, 78850 Thiverval-Grignon*

Experts scientifiques principaux :

Laure Bamière, INRA, UMR 0210 ECO-PUB Economie Publique INRA-AgroParisTech. *INRA Grignon, 78850 Thiverval-Grignon*

Aude Barbottin, UMR 1048 SADAPT Sciences pour l'Action et le Développement : Activités, Produits, Territoires INRA-AgroParisTech. *INRA Grignon, 78850 Thiverval-Grignon*

Valentin Bellassen, INRA, UMR 1041 CESAER Centre d'Economie et de Sociologie Rurales Appliquées à l'Agriculture et aux Espaces Ruraux INRA-AgroSup Dijon. *AgroSup Dijon, 26 boulevard Dr Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex*

Cécile Bessou, CIRAD, Unité de recherche PERSYST Performance des Systèmes de Culture des Plantes Pérennes. *TA B-34/02, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5*

Patrice Dumas, CIRAD, UMR CIRED Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement. *TA C-56/15, 73 rue Jean-François Breton, 34398 Montpellier cedex 5*

Sabrina Gaba, INRA, UMR 1347 Agroécologie INRA - AgroSup Dijon - Université de Bourgogne-CNRS. *INRA Sully, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon*

Julie Wohlfahrt, INRA, UR 0055 ASTER Mirecourt Agro-Systèmes Territoires Ressources Mirecourt INRA. *INRA Domaine du Joly, 662 avenue Louis Buffet, 88500 Mirecourt*

Experts scientifiques contributeurs ponctuels :

Martial Bernoux (IRD-FAO), **François Chiron** (AgroParisTech), **Laure Cormier** (Institut d'Urbanisme de Paris Université Paris Est), **Stéphane De Cara** (INRA), **Guillaume Decocq** (Université de Picardie), **Cécile Detang-Dessendre** (INRA), **Jean-François Dhôte** (INRA), **Nathalie Frascaria-Lacoste** (AgroParisTech), **Sophie Legras** (INRA), **Philippe Lescoat** (AgroParisTech), **Romain Melot** (INRA), **Claude Napoleone** (INRA), **Bertrand Schmitt** (INRA)

• L'équipe projet DEPE-INRA

Monia El Akkari, chargée d'étude

Sophie Le Perchec, documentaliste

Mélanie Sandoval, traitement de données documentaires

Isabelle Savini, appui rédactionnel

Anaïs Tibi, suivi méthodologique

Kim Girard, suivi logistique et administratif

Olivier Réchauchère, chef de projet



INRA
SCIENCE & IMPACT

Délégation à l'Expertise scientifique,
à la Prospective et aux Etudes

147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33 1 42 75 94 90
Fax : + 33 1 42 75 91 72
www.inra.fr

