



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

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



Depuis le début des années 2000, la production et l'usage de bioénergies issues de matières premières agricoles se sont développés dans diverses parties du monde et, notamment, aux Etats-Unis, dans l'Union Européenne, au Brésil, en Chine et dans l'Asie du sud-est. Des politiques publiques ont été mises en place visant un double objectif : réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, dont le prix commençait à se renchérir ; lutter contre le changement climatique, grâce à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) a priori permise par l'utilisation de sources d'énergies renouvelables. Cette nouvelle orientation donnée à la production agricole a entraîné, directement ou indirectement, d'importants changements d'affectation des sols (CAS) à travers le monde. A la fin des années 2000, plusieurs études scientifiques ont montré que la prise en compte des effets de ces changements d'affectation des sols pouvait modifier assez fortement le bilan d'émissions de GES des bioénergies, remettant potentiellement en question leur intérêt environnemental.

L'intégration des CAS dans les évaluations environnementales s'étend aujourd'hui au-delà du cas des bioénergies. En effet, dans un contexte de besoins en terres croissants pour répondre à des objectifs alimentaires, énergétiques, de bâti et d'infrastructures, les évaluations environnementales de tous types de réorientations dans un territoire, y compris les changements de pratiques agricoles, 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.

Dans le but d'élargir la réflexion à d'autres types de réorientations de la production et d'autres types d'impacts environnementaux que les effets sur les émissions de GES du développement de la bioénergie, l'ADEME et le ministère en charge de l'agriculture ont demandé à l'INRA de réaliser une analyse systématique de la littérature internationale. Cette étude vise à faire un état des lieux des connaissances sur ce vaste sujet en vue de mieux cerner la gamme des réorientations et impacts étudiés et d'identifier les questions de recherche émergentes. Elle se focalise sur les travaux publiés dans des revues scientifiques décrivant la façon dont une réorientation de systèmes de production agricoles et forestiers ou d'utilisation du territoire agit sur certaines composantes de l'environnement via les changements des usages des sols qu'elle engendre, c'est-à-dire l'ensemble de la chaîne causale suivante : "réorientations agricoles, forestières ou d'échelle territoriale → changement d'affectation des sols → impact environnemental".

Une démarche d'expertise originale combinant trois approches complémentaires

L'étude se décompose en trois étapes analysant une série de corpus et de sous-corpus bibliographiques de plus en plus restreints (Figure 2) :

- Une **analyse textuelle** sur un corpus très large (5 730 références parues entre 1976 et 2015), en vue d'identifier tous les types de réorientations productives ou d'aménagement étudiés dans la littérature sous l'angle des changements d'affectation des sols qu'elles engendrent, et tous les types d'impacts environnementaux qui leur sont liés. Une analyse textuelle plus approfondie a été menée sur un sous-corpus centré sur les réorientations vers des usages non alimentaires de la

biomasse et comportant 1 785 articles ;

- Une **revue systématique** sur le sous-corpus précédent, après un tri des articles pertinents (241 références) recensant l'ensemble des types d'impacts étudiés (sur le climat, le sol, l'eau, l'air et la santé humaine, la biodiversité, la consommation de ressources non renouvelables) ;

- Une **méta-analyse** menée sur un sous-ensemble de ce corpus "biomasse non alimentaire" (50 références) permettant de quantifier les valeurs d'émissions de gaz à effet de serre liées à la production de bioénergies et tenant compte des changements d'usage des terres.

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

On distingue en général deux types de changement d'affectation des sols : les CAS directs et les CAS indirects. Le CAS direct (CASd) décrit les situations où le développement d'une culture modifie l'usage du sol, qui pouvait préalablement être occupé par exemple par une forêt ou une prairie permanente (Figure 1). On change donc localement de catégorie d'affectation, ce qui entraîne de nouveaux impacts environnementaux. Le CAS 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), ou encore une disparition de terres agricoles qui entraîne un report de la production alimentaire vers d'autres terres, induisant indirectement un CAS dans des zones qui n'étaient pas cultivées (Figure 1).

Le bilan environnemental de la réorientation d'un système agricole ou forestier 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.

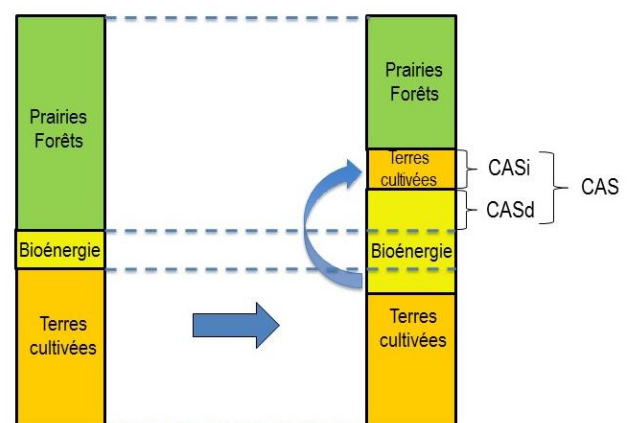


Figure 1. Représentation simplifiée d'un exemple de réorientation impliquant à la fois CASd et CASi

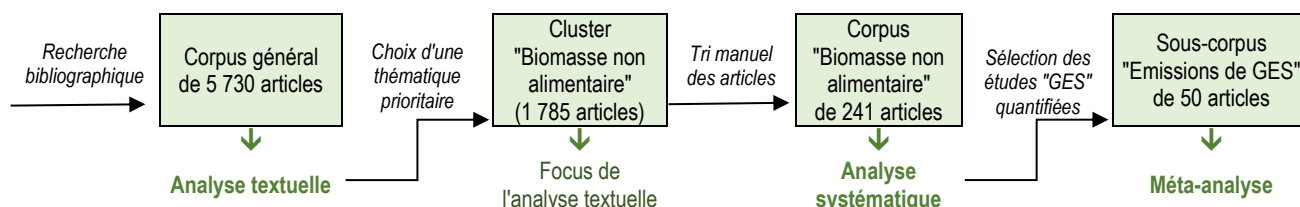


Figure 2. Etapes de la démarche de l'étude : réduction progressive du corpus étudié et analyses effectuées (en vert)

Réorientations impliquant des CAS : une grande diversité de situations et d'impacts étudiés

Une analyse textuelle sur un large corpus de 5 730 articles a permis d'identifier, tels que décrits dans la littérature scientifique, différents types de réorientations qui conduisent à des CAS et les impacts environnementaux qui en découlent. Les résultats de l'analyse textuelle se présentent sous forme de cartes dessinant les liens entre les mots ou groupes de mots qui sont le plus fréquemment cités ensemble dans les articles. Ces cartes sont interprétées au regard de la chaîne causale élargie de la façon suivante : "déterminants biophysiques et socio-économiques → réorientations agricoles, forestières ou d'échelle territoriale → changement d'affectation des sols (direct et/ou indirect) → impact environnemental".

L'analyse a permis d'identifier huit groupes de mots-clés constitués en "clusters" et correspondant à différents types de travaux scientifiques (Figure 3) :

- un premier ensemble de deux clusters traitant respectivement de la séquestration de carbone dans les sols (n°6) et du changement climatique (n°3). Le changement climatique peut être considéré à la fois comme déterminant biophysique (il 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 cluster (n°5) associant étroitement une réorientation

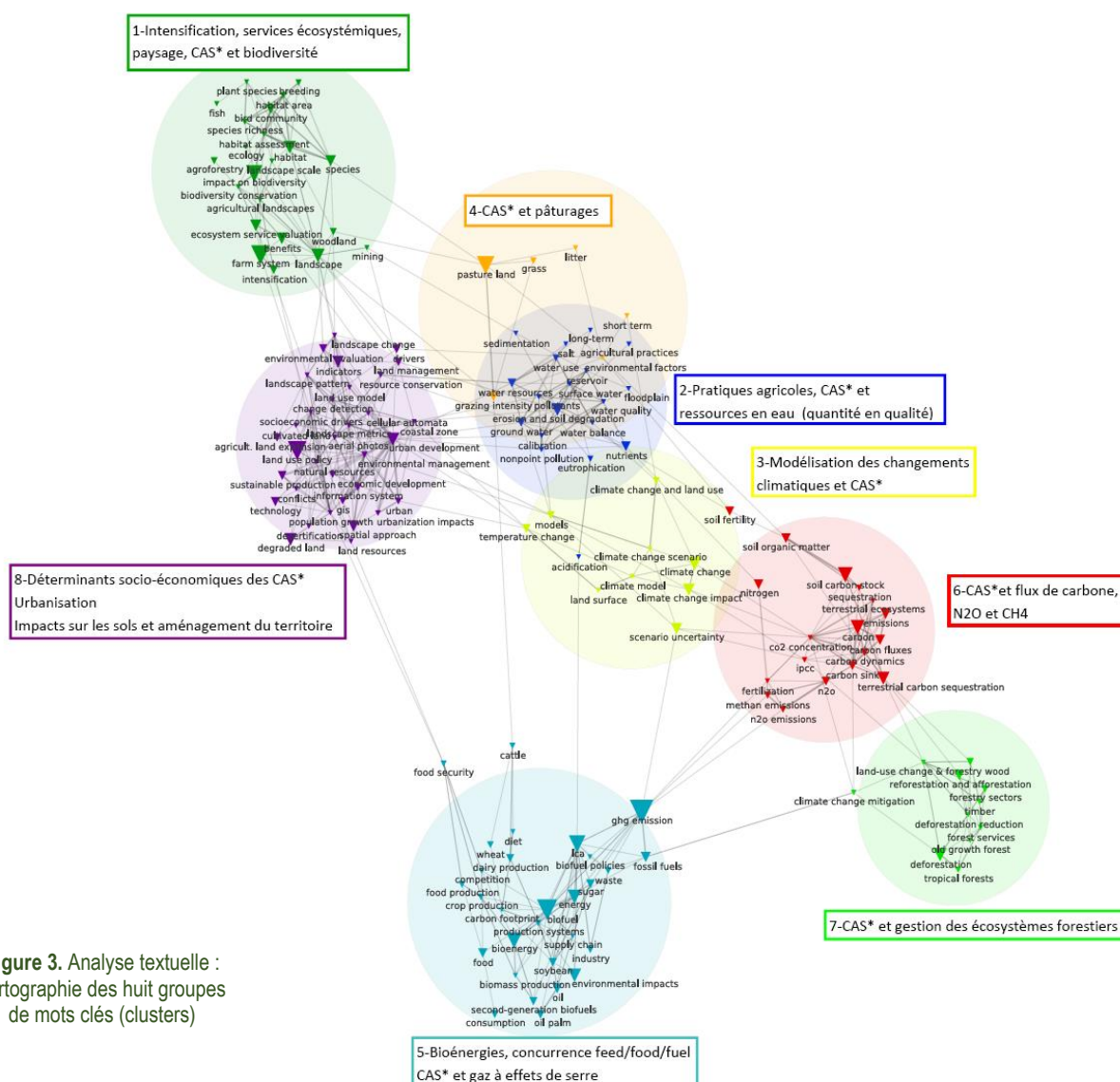


Figure 3. Analyse textuelle : cartographie des huit groupes de mots clés (clusters)

(production de bioénergie) et un impact environnemental (émissions de gaz à effet de serre) ;

- trois autres clusters plutôt centrés sur des réorientations, traitant du développement urbain (n°8), de la conduite des prairies (n°4) et de la gestion forestière (n°7) ;
- deux clusters où dominent les dimensions "impacts", traitant respectivement des impacts sur la biodiversité (n°1) et sur la ressource en eau (n°2), fortement en lien avec les pratiques agricoles.

L'analyse textuelle permet de formuler des hypothèses sur la façon dont ces différentes thématiques sont en relation les unes avec les autres pour dessiner des problématiques d'étude.

- Le développement des bioénergies et les CAS qui y sont associés sont étudiés majoritairement sous l'angle de leurs impacts en termes d'émissions de GES, l'analyse de cycle de vie (ACV) étant la méthode d'étude la plus fréquente. Cette 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, de 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 peuvent par ailleurs être abordées en lien avec la thématique de l'élevage. Cet ensemble traduit la possible présence de recherches sur la compétition pour l'usage des terres entre besoins alimentaires, résidentiels, énergétiques, industriels, etc. Cette problématique se renforce dans la période récente (depuis 2008), mais ne semble pas mobiliser l'enjeu actuel de l'évolution des régimes alimentaires humains, qui devraient modifier les besoins en terres cultivées.

- L'urbanisation est un second type de réorientation fortement traité dans le corpus scientifique, en lien avec les politiques d'aménagement du territoire. Celles-ci, en élaborant des réglementations concernant l'usage des sols, ont en effet une influence déterminante sur les phénomènes d'urbanisation, qui semblent être traités préférentiellement sous l'angle de leurs

impacts sur l'eau (via les modifications du fonctionnement hydrologique des surfaces artificialisées) et la biodiversité.

- Les impacts sur la biodiversité semblent avoir été également étudiés en lien avec l'intensification de pratiques agricoles et d'élevage, mais sans lien direct fort avec la réorientation vers les bioénergies.

- Les terres dégradées apparaissent comme un élément de contexte lié à l'urbanisation et à la production de biocarburants de deuxième génération (2G). Ce second aspect peut être interprété comme un signe de l'existence 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 concurrencer la production alimentaire.

Un approfondissement de l'analyse textuelle sur la production de "biomasse non alimentaire" apporte des précisions sans remettre fortement en cause l'analyse précédente. Ce thème a été analysé à partir d'un sous-corpus de 1 735 articles.

- Le lien entre bioénergies et émissions de GES n'est plus aussi univoque qu'avec le corpus complet : il s'enrichit de relations avec les thématiques de la forêt et des surfaces en herbe. La focalisation sur cette partie du corpus montre ainsi que le bilan des GES des cultures bioénergétiques ne se limite pas à leur strict cycle cultural mais s'inscrit dans un système plus large incluant les CAS entre forêt, prairie et culture d'espèces bioénergétiques. On retrouve ainsi, sous une forme plus affinée, la problématique de compétition pour l'usage des terres.

- La déforestation en zone tropicale apparaît en lien avec la production de soja et d'huile de palme. Les relations biocarburants 2G / terres dégradées / politiques foncières / sécurité alimentaire déjà décrites à partir du corpus complet sont confirmées.

L'analyse textuelle permet ainsi de construire un jeu d'hypothèses sur le contenu du corpus et du sous-corpus "biomasse non alimentaire", qui peut alors être testé grâce à une lecture directe des articles.

La prédominance de la chaîne causale "bioénergies → CAS directs → impact sur le climat"

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 environnementaux". Le dépouillement des informations de ce sous-corpus enrichit la connaissance de cette chaîne causale.

Les espèces cultivées dédiées à la production des biocarburants 1G, dont le maïs, la canne à sucre, le soja et le palmier à huile prédominent dans les études. Les cultures énergétiques pérennes (CEP), herbacées ou ligneuses, destinées notamment à la production des biocarburants 2G, sont malgré tout très présentes, dans une proportion bien supérieure à leur implantation dans l'espace agricole ; c'est en particulier le cas pour le miscanthus et le switchgrass (plantes herbacées).

Concernant les **usages finaux** (Figure 4), 61 % des articles traitent des biocarburants 1G et 2G, tandis que 29 % traitent d'autres utilisations énergétiques (électricité, chaleur ou biogaz) et 10 % d'usages non énergétiques (biomatériaux ou produits chimiques).

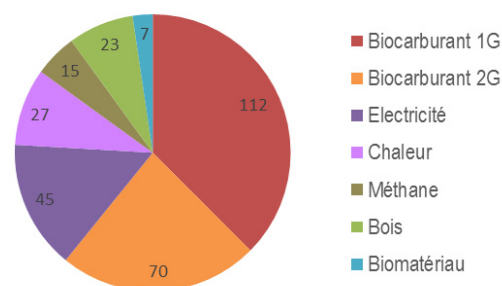


Figure 4. Usages finaux de la biomasse étudiés dans le corpus (en nombre d'articles)

Bien que le développement de la méthanisation fasse l'objet de politiques spécifiques, 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 (agricoles ou agroalimentaires), ce qui, par essence, n'induit pas de CAS.

Les **CAS** indirects sont nettement moins étudiés dans le corpus que les CAS directs : 194 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 et de la difficulté d'intégrer les CASi dans les analyses. Les CASd les plus représentés (Figure 5) concernent la transformation de forêts et de surfaces en herbe en cultures énergétiques pérennes ou annuelles, ce qui est conforme au

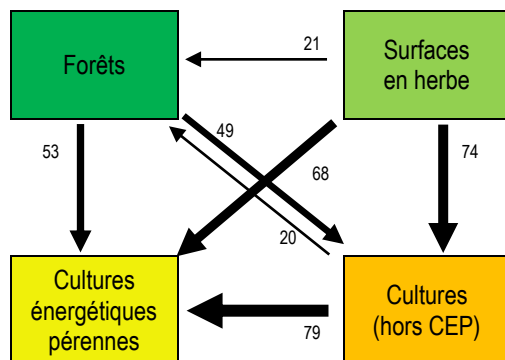


Figure 5. Occurrences des 7 principaux types de CAS directs identifiés dans le corpus analysé.

N.B. : Seuls les CAS présents dans plus de 3 % des articles sont figurés. Ces 7 types couvrent 74 % de tous les CASd identifiés.

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 ainsi les dynamiques observées à l'échelle mondiale.

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 bien que cette filière reste encore du domaine de la recherche-développement.

Dans la **gamme des impacts étudiés** (Tableau 1), les impacts sur le climat (vus quasi exclusivement au travers des émissions de GES) sont présents dans plus de la moitié des articles. Parmi les 163 articles traitant de cet impact, près de la moitié concluent

développement des bioénergies. De façon moins attendue, on observe une forte proportion de CAS transformant des terres arables en CEP, autre manifestation de l'intérêt pour les biocarburants 2G. Les deux principaux types de CASi étudiés (Figure 6) sont la transformation de forêt et surfaces en herbe en cultures hors CEP, ce qui est cohérent avec l'idée que les CASi concernent essentiellement le report, sous l'effet du développement des bioénergies, de cultures alimentaires sur des terres qui n'étaient jusqu'alors pas cultivées.

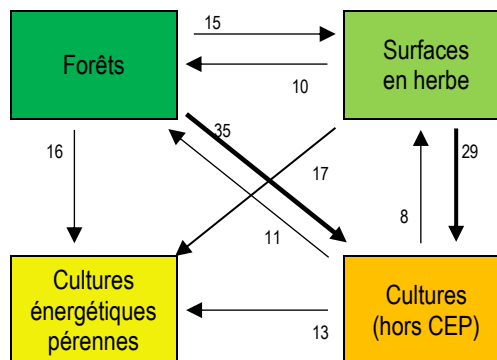


Figure 6. Occurrences des 9 principaux types de CAS indirects identifiés dans le corpus analysé.

N.B. : Seuls les CAS présents dans au moins 3 articles sont figurés. Ces 9 types représentent 83 % de tous les CASi identifiés.

à une réduction des émissions de GES comparées à celles dues 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 considérés. On note une différence dans l'estimation des impacts selon la méthode choisie : les émissions de GES sont plus faibles quand elles sont estimées avec l'ACV qu'avec les modèles économiques. Les études qui quantifient à la fois les consommations d'énergies non renouvelables et les émissions de GES montrent que les deux variables n'évoluent pas toujours dans le même sens.

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, travail du sol, fertilisation...). Les impacts sur l'érosion et l'acidification sont traités dans près d'un quart des articles. Les autres impacts sur le sol sont globalement peu renseignés.

	Biocarburant 1G	Biocarburant 2G	Electricité	Chaleur	Méthane	Bois	Pr. chimiques	Ensemble
Climat	90	47	42	22	9	14	8	163
Ress. non renouv.	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
Ensemble	112	70	45	27	15	23	8	241

Tableau 1. Répartition des articles selon les différents impacts environnementaux et types d'utilisation de la biomasse (nombre d'articles)
NB : Les décomptes "Ensemble" peuvent être inférieurs aux sommes par ligne ou par colonne, un même article pouvant traiter de plusieurs impacts ou usages finaux des biomasses.

Concernant la consommation d'eau, les études concluent dans un peu plus de la moitié des articles (12 sur 21) 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.

Les impacts sur la biodiversité apparaissent peu étudiés, ce qui confirme le faible lien identifié dans l'analyse textuelle entre bioénergies et impacts sur la biodiversité, ainsi que probablement la difficulté réelle à traiter l'ensemble de la chaîne de causalité sur ce sujet. Les quelques travaux disponibles convergent néanmoins vers un impact négatif des cultures énergétiques sur

la biodiversité. Les études portant sur l'impact sur la qualité de l'air et la santé humaine sont trop peu nombreuses pour permettre d'en tirer des conclusions.

Les ACV se confirment comme étant la **méthode d'étude** formalisée la plus employée (25 % des cas), notamment pour l'évaluation des impacts. Elles n'arrivent qu'après les méthodes non formalisées, c'est-à-dire de simples calculs qui représentent 45 % du total. Cette relative absence de méthode n'avait pas été repérée par l'analyse lexicale, mobilisant un vocabulaire trop peu spécifique. La majorité des études ne se fonde pas sur des données de terrain originales, mais recourent à des valeurs issues de la bibliographie ou à des coefficients par défaut, qui ne rendent pas forcément compte de la diversité des contextes pédoclimatiques et agricoles.

Le bilan carbone des bioénergies dépend fortement des situations étudiées et des méthodes utilisées

La revue systématique menée sur les articles du sous-corpus "biomasse non alimentaire" ne permet pas de conclure sans ambiguïté sur les différences d'émissions de GES entre les filières fossiles et bioénergie. Parmi les 163 articles de ce sous-corpus abordant les impacts sur le climat, 50 comportent des données quantitatives les rendant éligibles à une méta-analyse. Celle-ci a abordé la question principale suivante : les émissions de GES liées à la production et à l'utilisation des bioénergies (et incluant les CAS) sont-elles supérieures ou inférieures à celles des énergies fossiles ? La prise en compte de la diversité des situations décrites dans les articles a permis de définir des groupes de scénarios et de répondre à des questions complémentaires : le niveau de ces émissions dépend-il de certains paramètres (type de CAS, de culture bioénergétique, procès de transformation, année de publication de l'étude...) ? Des groupes de scénarios ont alors été définis pour répondre à ces questions.

Pour évaluer les performances des bioénergies comparativement aux énergies fossiles, on s'appuie sur une variable (R), dite "taille d'effet" et correspondant à la différence relative entre les émissions de gaz à effet de serre résultant de la production et de l'utilisation de bioénergie (E_b) et celles résultant du recours à des carburants fossiles, E_f . Ainsi $R = \frac{E_b - E_f}{E_f}$. Quand R est positif, les émissions dues aux bioénergies sont supérieures à celles dues aux fossiles. L'analyse statistique permet d'estimer les tailles d'effet, leurs intervalles de confiance et d'étudier l'origine de leurs différences en contrôlant la variabilité inhérente à la diversité des articles. Les intervalles de confiance décrivent l'incertitude des estimations, et dépendent du nombre de données disponibles et de la variabilité des tailles d'effet entre scénarios.

Trois séries de valeurs de E_f ont été utilisées : les valeurs de $E_{f,art}$ extraites des 29 articles où celles-ci sont disponibles (notées $E_{f,art}$) et deux séries de valeurs de références, $E_{f,min}$, $E_{f,max}$, calculées pour chaque type d'énergie fossile, et qui sont proches des valeurs utilisées dans l'Union Européenne et aux Etats-Unis (respectivement) pour comparer les performances des biocarburants à celles de leurs équivalents fossiles. Ces deux valeurs de référence ont été appliquées aux 50 articles sélectionnés et ont

permis de tester la sensibilité de R à la référence retenue pour les émissions des énergies fossiles.

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

Les estimations des émissions sont présentées sur les Figures 7 A, B, C, lignes "Al". Avec $E_{f,max}$ et $E_{f,min}$, la réduction par rapport aux énergies fossiles est respectivement de 42 % et 31 % et est statistiquement significative. Avec $E_{f,art}$, on obtient à l'inverse une augmentation moyenne de 9 % des émissions, valeur qui n'est cependant pas significativement différente de zéro.

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

Dans le groupe des 29 articles qui chiffrent le niveau des émissions des carburants fossiles ($E_{f,art}$), les émissions moyennes dues au bioéthanol et au biodiesel sont légèrement supérieures à celles des carburants fossiles sans que ces différences soient significatives (Figure 7 A, lignes "Bioethanol" et "Biodiesel"). En revanche, en mobilisant l'ensemble des 50 articles et les valeurs de référence $E_{f,min}$ et $E_{f,max}$, les émissions du bioéthanol sont significativement inférieures à celles des carburants fossiles, celles du biodiesel sont elles aussi inférieures sans que cette différence ne soit significative. Les émissions dues à la bioélectricité, qui n'ont pu être comparées qu'à $E_{f,min}$ et $E_{f,max}$, sont significativement inférieures à ces deux références (Figure 7 B et C, ligne "Bioelectricity").

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

Les estimations des émissions des biocarburants 2G sont inférieures à celles des biocarburants 1G, quels que soient la référence retenue pour E_f ($E_{f,art}$, $E_{f,min}$ ou $E_{f,max}$) et l'échantillon d'articles correspondant, 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 $E_{f,max}$ (Figure 7 C), tandis que, pour les 2G, cette diminution est significative pour $E_{f,min}$ et $E_{f,max}$. (Figure 7 B et C).

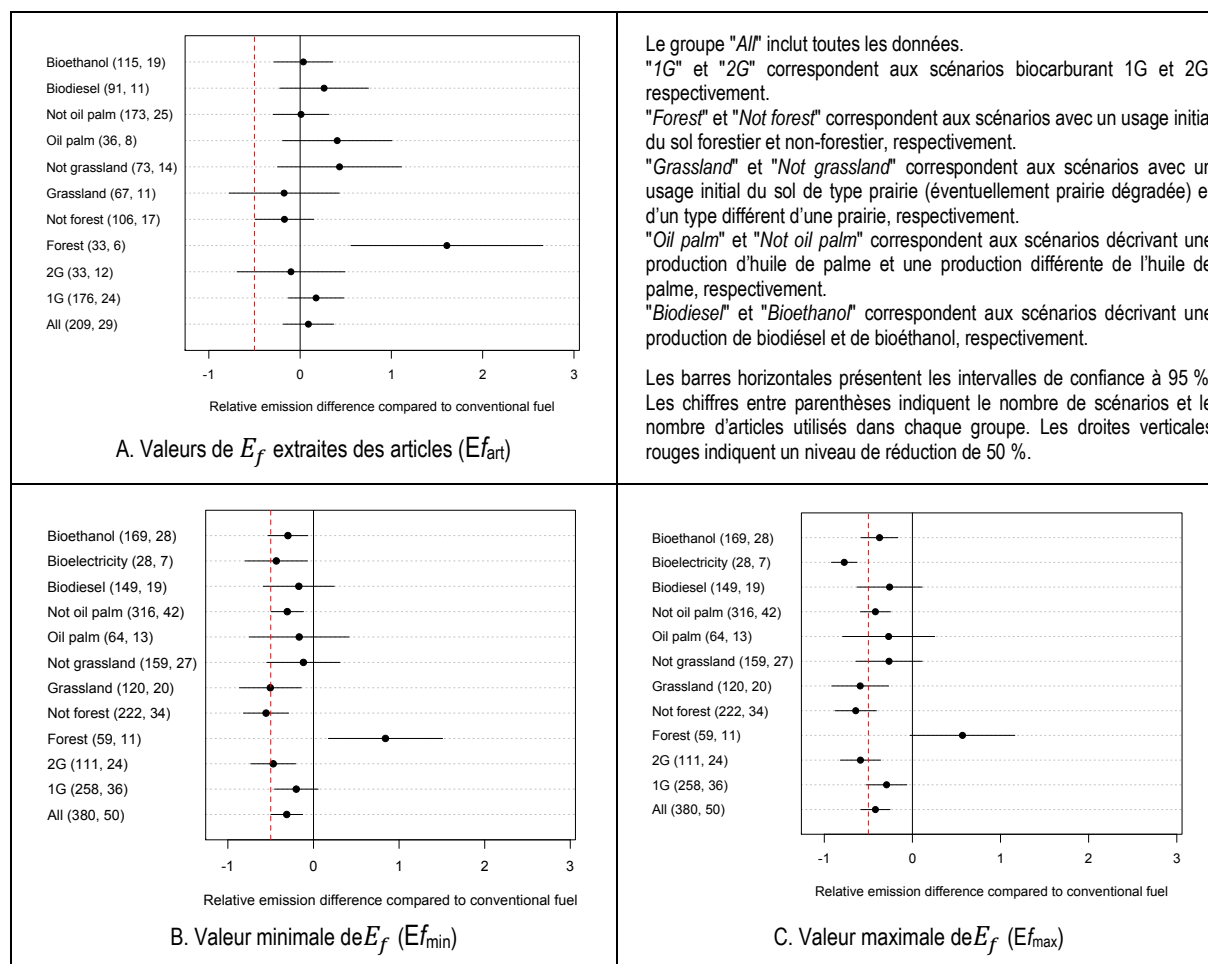


Figure 7. Valeurs estimées des tailles d'effet moyennes pour différents groupes de scénarios. Résultats obtenus avec des valeurs de E_f extraites des articles ($E_{f_{art}}$) (A), et avec des valeurs de référence de E_f , valeur minimale ($E_{f_{min}}$) (B), valeur maximale ($E_{f_{max}}$) (C)

Les 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"

Les estimations des émissions pour ce type d'occupation initiale du sol ne sont pas très précises, ce que traduit la forte amplitude de l'intervalle de confiance des estimations (Figure 7 A, B, C, lignes "Forest"). Cette variabilité est probablement à relier à la forte diversité des types de couverts forestiers concernés. Les scénarios avec une occupation initiale "forêt" conduisent à des émissions moyennes de GES supérieures de 50 à 150 % (selon la valeur de référence et l'échantillon) par rapport à celles des carburants fossiles. Globalement, les émissions moyennes des scénarios avec une 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"

Les estimations calculées (Figure 7 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 près de -50 et -60 %) mais elle est non significativement différente de zéro pour $E_{f_{art}}$.

Le faible niveau des émissions de GES liées aux bioénergies produites après la mise en culture d'une prairie peut sembler contre-intuitif. Il peut néanmoins s'expliquer soit en considérant que la culture énergétique après prairie n'a pas entraîné de

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 biodiesel 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 %.

déstockage important de carbone (par exemple, par valorisation bioénergétique de l'herbe sans retournement de la prairie), 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 culture de palmier à huile induisent-elles des émissions de GES plus importantes que celles issues d'autres types de cultures ?

Les estimations des émissions calculées pour les bioénergies issues de palmier à huile sont très variables et ne sont jamais significativement différentes des valeurs associées aux carburants fossiles (Figure 7 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, on n'obtient jamais de différence 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 des sols initiale (forêt primaire ou non) que de la culture du palmier 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 ce jeu de données.

Conclusions

Le champ des études d'impact environnemental tenant compte des changements d'affectation des sols apparaît 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 la question 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. De façon inattendue, ce n'est pas le cas quand l'occupation initiale est une prairie, ce qui suggère de mieux caractériser cette catégorie d'usage. 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 la variabilité importante des résultats 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 qui tiennent compte des CAS. Cela est dû : à la grande diversité des filières étudiées (en termes de cultures-matières premières, région de production, procédé de conversion et produit final) ; à la variabilité des méthodes employées pour estimer les CAS ; enfin, au fait que, pour certains impacts, les méthodes employées sont loin d'être stabilisées.

L'étude a été conduite sous la responsabilité de l'INRA, dans le cadre des activités du Groupement d'intérêt scientifique "Changement d'affectation des sols". Elle s'inscrit dans les activités de la DEPE de l'INRA et en respecte les principes de compétence, pluralité, impartialité, transparence, tels que formalisés dans la Charte INRA de l'Expertise Scientifique Institutionnelle. Elle a mobilisé 11 experts principaux et 13 experts contributeurs.

Pour en savoir plus :

Antonio Bispo, Benoit 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 Perche, 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.

Le rapport complet de l'étude, la synthèse et le présent résumé sont disponibles sur le site de l'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

