

Contribution des Produits Résiduels Organiques à la séquestration du carbone dans les sols



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**CONTRIBUTION DES PRODUITS RESIDUAIRES ORGANIQUES
A LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS**

RAPPORT FINAL

novembre 2022

S. BERGER, L. SICARD – SOLAGRO
S. HOUOT, F. LEVAVASSEUR – INRAE



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Contribution des Produits Résiduaire Organiques à la séquestration du carbone dans les sols, 2022, 73 p, n°20-0518/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Rémy BAYARD - INSA DE LYON / RECORD, Nada BOUTIGHANE - MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION, Céline BRUYERE – VEOLIA, Jean-Paul CAZALETTS - TOTAL ENERGIES, Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Charlotte DOUILLET – PAPREC, Thomas EGLIN - ADEME, Gilles FRIBOULET – EDF, Felipe GUILAYN - SUEZ-CIRSEE, Jean-Philippe JAEG - ECOLE NATIONALE VETERINAIRE TOULOUSE / RECORD, Vincent JEAN-BAPTISTE – GRDF, Marie JOUAULT - SEDE ENVIRONNEMENT, Marion PASQUIER - TOTAL ENERGIES, Frédéric PERIE - TOTAL ENERGIES, Sébastien RICARD – PAPREC, Charlotte RICHARD – ENGIE, Cécilia SAMBUSITI - TOTAL ENERGIES, Pierre SOUQUET - TOTAL ENERGIES

© RECORD, 2022

RESUME

Le carbone est le principal constituant de la matière organique des sols. Intégré dans le sol, il joue un rôle majeur dans le maintien et l'amélioration de la fertilité et de la qualité des sols, ainsi que dans la fourniture de nombreux services écosystémiques, notamment l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

De nombreux travaux de recherche sur ces différents sujets ont été conduits ces dernières années notamment en France. Ce travail fournit une synthèse sur les connaissances du stockage du carbone dans les sols agricoles, une analyse des impacts agronomique, environnemental, et économique, de l'épandage de PRO sur 4 territoires définis et enfin délivre 9 messages clés à l'attention des acteurs (agriculteurs, collectivité, administrations) qu'ils soient producteurs, utilisateurs, prescripteurs.

MOTS CLES

Produits résiduaire organiques, carbone, organique, sol, stockage, séquestration, gaz à effet de serre

SUMMARY

Carbon is the main component of soil organic matter. Integrated in the soil, it plays a major role in maintaining and improving soil fertility and quality, as well as in the provision of many ecosystem services, including climate change mitigation and adaptation.

A lot of studies about carbon sequestration has been carried out in recent years, particularly in France. This work provides a synthesis of knowledge on carbon storage in agricultural soils, an analysis of the impacts of the use of organic fertilizers from an agronomic, environmental and economic point of view, in four defined territories, and delivers nine key messages for stakeholders (farmers, local authorities, administrations), whether they are producers, users or prescribers.

KEY WORDS

Organic fertilizers, carbon, organic, soil, storage, sequestration, GHG

SOMMAIRE

1	Introduction	10
2	Etat des connaissances sur la contribution des PRO à la séquestration du carbone dans les sols et sur les impacts associés	11
2.1	Gisements des PRO, état des lieux et perspectives.....	11
2.1.1	Définition et nomenclature	11
2.1.2	Point sur les biochars	12
2.1.3	Quantification des PRO : Etat des lieux	13
2.1.4	Quantification des PRO : Perspective 2030	19
2.2	Contribution des PRO au stockage de C dans les sols et impacts sanitaires – synthèse bibliographique	24
2.2.1	Processus de stockage de C dans les sols.....	24
2.2.2	Efficacité des PRO à stocker du C dans les sols	27
2.2.3	Synthèse sur la valeur amendante des PRO et perspectives.....	32
3	Analyse du potentiel de stockage de carbone sur 4 territoires différenciés.....	35
3.1	Description des territoires	35
3.1.1	Plaine de Versailles	35
3.1.2	PRO : gisement disponibles, contraintes	38
3.1.3	Coglais Marche de Bretagne	41
3.1.4	Grand Figeac.....	45
3.1.5	Pays de l’Or et Pays de Lunel.....	50
3.2	Description de la méthode d’analyse	54
3.2.1	Potentiel de stockage de C à l’échelle du territoire avec les formalismes d’AMG 54	
3.2.2	Simulation des autres effets du recyclage des PRO	55
3.3	Résultats détaillés pour la plaine de Versailles	56
3.3.1	Entrées de carbone et stockage de carbone.....	56
3.3.2	Effets collatéraux à dose agronomique	58
3.3.3	Bilan GES à stockage de C identique	63
3.4	Comparaison du stockage de C par les PRO entre territoires.....	64
4	Proposition de recommandations aux acteurs	66
4.1	Identification des freins	66
4.2	Synthèse des contraintes.....	67
4.3	Messages clés.....	67
5	Lexique	71
6	Bibliographie	72

Tableaux

Tableau 1 : Nomenclature des PRO utilisée dans l'étude (RECORD 2022).....	12
Tableau 2 : Quantification des PRO en millions de tonnes par an (Compilation RECORD 2022).....	14
Tableau 3 : Evolution du gisement de PRO à l'horizon 2030 (Compilation RECORD 2022).....	21
Tableau 4 : Estimation de la production de PRO à l'horizon 2030 (Compilation RECORD 2022).....	23
Tableau 5 : Synthèse des valeurs moyennes (écart type entre parenthèse) d'augmentation des stocks de C résultant de l'apport de PRO au sol exprimées en pourcentage d'augmentation par rapport à des traitements sans apports et synthèse des facteurs de conversion du C des PRO en C du sol, . Durée des essais allant de 3 à 155 ans, médiane : 12 ans. (Compilation RECORD 2022) (issues d'articles de synthèse, de méta analyse ou de la synthèse de références bibliographiques ; n est le nombre d'essais considérés).....	29
Tableau 6 : Stockage additionnel lié aux apports de PRO dans des scenarios sur une période de 20 ans d'apport représentatifs des pratiques agriculteurs et calculé à l'aide des facteurs de conversion présentés dans le tableau 5 (Compilation RECORD 2022).....	30
Tableau 7 : Valeur amendante organique des principaux PRO (Compilation RECORD 2022).....	33
Tableau 8 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols de la plaine de Versailles (Compilation RECORD 2022) (d'après Dhaouadi (2014), Noirot-Cosson (2016) et Zaouche <i>et al.</i> (2017)).....	36
Tableau 9 : Rendement moyen des cultures en plaine de Versailles (compilation RECORD 2022) (données internes ECOSYS et arrêté régional nitrates IDF).....	37
Tableau 10 : PRO actuellement produit ou prospectif sur la plaine de Versailles, leur teneur en carbone et indice de stabilité de la matière organique (compilation RECORD 2022).....	38
Tableau 11 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture de la plaine de Versailles (compilation RECORD 2022) (données internes ECOSYS).....	39
Tableau 12 : Contraintes à l'épandage en plaine de Versailles (0 : absence, + faibles, ++ moyennes à fortes, ? inconnues) (RECORD 2022).....	40
Tableau 13 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols du Coglais (Houot <i>et al.</i> , 2021).....	42
Tableau 14 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Coglais (Houot <i>et al.</i> , 2021).....	43
Tableau 15 : PRO du Coglais (compilation RECORD 2022) (outil Bacus Solagro, Levavasseur <i>et al.</i> (2020)).....	43
Tableau 16 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Coglais (RECORD 2022).....	43
Tableau 17 : Contraintes à l'épandage du Coglais (0 : absence, + faibles, ++ moyennes à fortes, ? inconnues) (RECORD 2022).....	44
Tableau 18 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols retenus pour la modélisation sur le secteur du Grand Figeac (Compilation RECORD 2022) (données d'analyses de sols de 2 parcelles du Grand Figeac, données internes Solagro).....	46
Tableau 19 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Grand Figeac (Houot <i>et al.</i> , 2021).....	47
Tableau 20 : PRO du Grand Figeac (Compilation RECORD 2022) (Outil Bacus Solagro, entretiens d'acteurs réalisés en 2021).....	49
Tableau 21 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Grand Figeac (RECORD 2022).....	49
Tableau 22 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) du sol retenu pour la modélisation sur le secteur d'Or et Lunel (RECORD 2022).....	51
Tableau 23 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Pays de l'Or et de Lunel (Houot <i>et al.</i> , 2021).....	52
Tableau 24 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Pays de l'Or et Pays de Lunel (RECORD 2022).....	53
Tableau 25 : Emissions considérées ou non dans le bilan GES de l'outil PROLEG (RECORD 2022).....	56

Tableau 26 : Surface nécessaire pour l'épandage des PRO de la plaine de Versailles (RECORD 2022)	58
Tableau 27 : Dose de PRO ajustée pour stocker 1 t C/ha additionnelle en 30 ans par rapport au scénario MIN (RECORD 2022).....	63
Tableau 28 : Pratiques agricoles stockantes (source : Guide Gestim +, Arvalis, 2020).....	68

Figures

Figure 1 : Classement des PRO selon le système d'information du SOERE-PRO (RECORD 2022).....	11
Figure 2 : Détail du gisement actuel des PRO, en millions de tonnes par an (Compilation RECORD 2022).....	15
Figure 3 : Répartition du gisement actuel des PRO, en million de tonnes par an, suivant l'origine (industriel, urbain, agricole) et le type (brut, compost, digestat) (Compilation RECORD 2022).....	15
Figure 4 : Répartition de la production d'effluents d'élevage récupérables en France (Houot <i>et al.</i> , 2014).....	16
Figure 5 : Répartition de la production de déchets et d'effluents industriels destinés à la valorisation agronomique (Houot <i>et al.</i> , 2014).....	17
Figure 6 : Destination des boues urbaines des stations d'épuration urbaine en France (RECORD 2022)(BDD Portail Assainissement 2019).....	18
Figure 7 : Nombre de stations d'épuration urbaines de plus de 30 KEH, avec et sans méthanisation (RECORD 2022)(BDD Portail Assainissement 2019) (données internes Solagro).....	18
Figure 8 : Evolution du cheptel en France entre 1980 et 2010 (Icare & Consult, 2020).....	19
Figure 9 : Quantités et types de PRO en 2020 et à moyen terme (horizon 2030) (Compilation RECORD 2022).....	22
Figure 10 : Carte des stocks de C organique des sols français (en tC/ha) sur les 30 premiers centimètres (données GIS Sol ; Pellerin <i>et al.</i> , 2020).....	25
Figure 11 : Processus qui contrôlent le stockage de C dans les sols (dans Pellerin <i>et al.</i> , 2020).....	25
Figure 12 : Représentation schématique de l'évolution des stocks de C dans des sols soumis à des pratiques différentes et calcul du stockage additionnel (RECORD 2022).....	26
Figure 13 : Relation entre valeur amendante et valeur fertilisante des PRO (issue de Houot <i>et al.</i> , 2014).....	27
Figure 14 : Occupation du sol de la plaine de Versailles (Corine Land Cover 2012).....	36
Figure 15 : Assolement moyen de la plaine de Versailles (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019).....	37
Figure 16 : Occupation du sol sur le territoire du Coglais (Corine Land Cover 2018).....	41
Figure 17 : Assolement moyen du Coglais (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019).....	42
Figure 18 : Occupation du sol sur le territoire du Grand Figeac (Corine Land Cover 2012).....	45
Figure 19 : Carte des sols du territoire (géoportail.fr).....	46
Figure 20 : Assolement moyen du Grand Figeac (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019).....	47
Figure 21 : Localisation des stations d'épuration sur le territoire du Grand Figeac (Portail Assainissement).....	48
Figure 22 : Occupation du sol sur le territoire du Pays de l'Or et du Pays de Lunel (Corine Land Cover 2018).....	50
Figure 23 : carte des sols du territoire (géoportail.fr).....	51
Figure 24 : Assolement moyen des Pays de l'Or et de Lunel (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019).....	52
Figure 25 : Localisation des stations d'épuration sur le territoire du Pays de Lunel et d'Or. (Portail Assainissement).....	53
Figure 26 : Schéma de principe du modèle AMG (RECORD 2022).....	54
Figure 27 : Principe de l'outil PROLEG (RECORD 2022).....	56
Figure 28 : Entrées de carbone total et humifié par les PRO sur la plaine de Versailles en comparaison aux résidus de culture d'un assolement moyen du territoire (aériens et souterrains, si restitués à 100%). Les quantités de PRO sont les quantités actuellement produites sauf pour les digestats où la quantité indiquée correspond à la quantité maximale théorique (aucune production à l'heure actuelle). (RECORD 2022).....	57

Figure 29 : Stockage de carbone par les PRO sur la plaine de Versailles en 30 ans, en comparaison aux résidus de culture (aériens et souterrains, si restitués à 100%). Seul le digestat représente un stockage théorique additionnel, les autres PRO étant déjà épandus presque intégralement et les résidus de culture restitués dans leur grande majorité. (RECORD 2022)	58
Figure 30 : Entrées de carbone, stockage de carbone et propriétés des sols simulés après 30 ans pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022).....	59
Figure 31 : Fourniture azotée du sol et besoin complémentaire en N minéral des cultures simulés pour la situation initiale et 30 ans après, et besoin simulé en P et K des cultures, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)...	60
Figure 32 : Pertes azotées simulées pour la situation initiale et après 30 ans pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022).....	61
Figure 33 : Bilan gaz à effet de serre pour la situation initiale et après 30 ans, en comptabilisant ou non les émissions liées à la filière amont des PRO, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022).....	62
Figure 34 : Flux moyen d'apport annuel en métaux relativement à la réglementation (arrêté 8 janvier 1998) et teneur du sol en métaux au bout de 30 ans relativement à la réglementation, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)...	62
Figure 35 : Dépenses en fertilisants et marge semi-nette pour la situation initiale et après 30 ans, et temps de travail pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022).....	63
Figure 36 : Bilan gaz à effet de serre pour la situation initiale et après 30 ans, en comptabilisant ou non les émissions liées à la filière amont des PRO, pour les cas types de la plaine de Versailles, avec des doses ajustées pour obtenir un stockage de carbone similaire entre scénario PRO. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022).....	64
Figure 37 : Stockage annuel moyen de carbone sur 30 ans par les PRO dans les 4 territoires, pour la situation actuelle et une situation de gestion alternative par territoire (méthanisation de biodéchets en plaine de Versailles, situation inchangée dans le Coglais, méthanisation de fumier, de biodéchets et de déchets d'IAA dans le Grand Figeac, méthanisation de biodéchets et de déchets d'IAA et import de compost de déchets verts et de boues dans les Pays de Lunel et de l'Or) (RECORD 2022).....	65

1 INTRODUCTION

Le carbone est le principal constituant de la matière organique des sols. Intégré dans le sol, il joue un rôle majeur dans le maintien et l'amélioration de la fertilité et de la qualité des sols, ainsi que dans la fourniture de nombreux services écosystémiques, notamment l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

En effet, le GIEC en 2018 mentionne qu'il est nécessaire de viser la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2050. En 2015, la France lors de la COP 21, lance l'initiative 4 pour 1000, suggérant qu'une augmentation des stocks de C dans les sols de 4 pour mille par an permettrait de compenser les émissions anthropiques de CO₂, contribuant ainsi à la neutralité carbone. Par ailleurs, la matière organique dans les sols contribue à leur fertilité et augmenter les stocks de C dans les sols contribue à l'atténuation du changement climatique et à la sécurité alimentaire (Lal, 2011).

Dans les sols, les stocks de carbone organique dépendent de l'usage des sols, du type de sol et du climat. Les stocks les plus importants sont observés dans les zones d'altitude et sous forêt ou prairies permanentes.

Parallèlement, environ 150 millions de tonnes¹ de matières résiduelles organiques, pouvant être épandues en agriculture à l'état brut ou traitée, sont produits chaque année en France. L'apport de ces Produits Résiduels Organiques (PRO) peut jouer un rôle non seulement sur la séquestration du carbone dans les sols mais également sur l'amendement de sols dégradés et leur fertilisation grâce à la présence d'azote et de phosphore dans ces matières.

De nombreux travaux de recherche sur ces différents sujets ont été conduits ces dernières années notamment en France.

Afin que l'état actuel des connaissances soit mieux connu, que les résultats de ces travaux soient plus largement diffusés, l'association RECORD a souhaité la réalisation de ce travail, dont l'objectif principal de l'étude est de produire des recommandations aux acteurs (agriculteurs, collectivité, administrations) qu'ils soient producteurs, utilisateurs, prescripteurs.

Ce document détaille les résultats de ce travail de synthèse sur les connaissances du stockage du carbone dans les sols agricoles lié à l'épandage des PRO et d'analyse des impacts de leur utilisation sur les sols d'un point de vue agronomique, environnemental, et économique, sur 4 territoires définis.

Ce document est présenté en 3 parties :

- Partie 1 : Etat des connaissances sur la contribution des PRO à la séquestration carbone
- Partie 2 : Analyse du potentiel de stockage du carbone par des PRO sur 4 territoires contrastés
- Partie 3 : Recommandations aux acteurs

¹ Environ 300 millions de tonnes en y ajoutant les résidus de cultures directement retournés au sol

2 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA CONTRIBUTION DES PRO A LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS ET SUR LES IMPACTS ASSOCIES

2.1 Gisements des PRO, état des lieux et perspectives

2.1.1 Définition et nomenclature

Cette première partie a pour vocation l'identification et la quantification de PRO qui seront concernés dans la suite de l'étude.

Sont considérées comme des PRO (Produit Résiduaire Organique) toute matière résiduaire organiques pouvant être épandue en agriculture à l'état brut ou traitée. Les résidus de culture ne sont pas considérés comme des PRO lorsqu'ils sont directement retournés au sol à la récolte. Cependant, dans le cas où ils seraient exportés pour être épandus sur une autre parcelle et/ou traités avant d'être retournés au sol (compostage, méthanisation, pyrolyse...), ils sont considérés comme des PRO.

Le terme PRO désigne les matières considérées par le terme de MAFOR (matière fertilisante d'origine résiduaire) exceptées les matières minérales. Le terme PRO regroupe ainsi les effluents d'élevage et les matières organiques, traitées ou non, provenant de l'agriculture (ex. bois de taille), des activités urbaines (ex. boues de STEP, ordures ménagères), des industries agro-alimentaires (ex. vinasses, plumes, boues de laiteries) et autres industries (ex. boues papetières).

Il n'existe pas de nomenclature établie et partagée pour les PRO, INRAE propose toutefois une classification utilisée pour le référencement des essais réalisés dans le cadre du programme SOERE-PRO (Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la recherche en Environnement) qui recense plus de 100 types de PRO.

Le système d'information du SOERE-PRO propose 3 niveaux hiérarchiques : origine → grand type → type

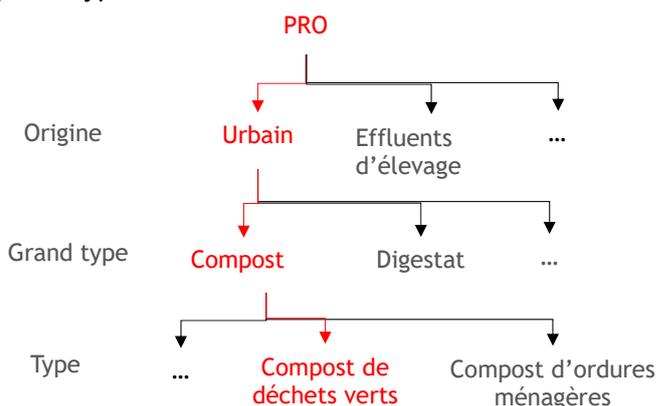


Figure 1 : Classement des PRO selon le système d'information du SOERE-PRO (RECORD 2022)

Pour cette étude, nous proposons la nomenclature suivante.

Tableau 1 : Nomenclature des PRO utilisée dans l'étude (RECORD 2022)

Origine	Grand type	Type	Etat	Sigle
Agricole	Brut	Fumier	Solide	DEJ-s
Agricole	Brut	Lisier	Liquide	DEJ-l
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	IAA
Urbain	Brut	Boues Déshydratées	Solide	STEP
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	INDUS
Urbain	Brut	Déchets organiques (broyat DV, biodéchets)	Solide	BIOD
Urbain	Brut	Cendres, biochar, Refiom	Solide	CEND
Agricole	Compost	Compost de fumier	Solide	C-FUM
Urbain	Compost	Compost de boues urbaines	Solide	C-STEP
Urbain	Compost	Compost de biodéchets	Solide	C-BIOD
Urbain	Compost	Compost de déchets verts	Solide	C-DV
Urbain	Digestat	Digestat solide de biodéchets	Solide	Ds-BIOD
Urbain	Digestat	Boues digérées déshydratées	Solide	Ds-STEP
Agricole	Digestat	Digestat solide agricole/territorial	Solide	Ds-AGRI*
Agricole	Digestat	Digestat brut agricole/territorial	Liquide	Db-AGRI*
Agricole	Digestat	Digestat liquide agricole/territorial	Liquide	DI-AGRI*

*L'origine de ces digestats n'est pas uniquement agricole, ce type d'unités peut intégrer des déchets du territoire d'origine urbaine ou industrielle.

2.1.2 Point sur les biochars

Les biochars sont issus de la pyrolyse de matières à chaînes carbonées.

On notera tout d'abord la production de biochar par pyrolyse de biomasse organique (bois, résidus de culture...). Ce traitement assure également la production d'énergie (gaz) et d'huiles. En 2013, on dénombre quelques centaines de tonnes commercialisées en Europe (Thévenin N. *et al.*, 2021).

Cette production de biochar reste faible aujourd'hui malgré un potentiel agronomique démontré par des programmes de R&D :

- amendement / rétention d'eau / amélioration des propriétés du sol, notamment pour les sols peu fertiles,
- réduction des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) (Schmidt *et al.*, 2021)
- source de nutriments P et K.

En effet, les biochars permettent d'augmenter la stabilité du C dans les sols, celle-ci augmentant avec la température de pyrolyse (Al-Wabel *et al.*, 2018).

On notera qu'environ 50% du C est perdu pendant le process et une faible partie du C des intrants reste biodégradable dans le biochar à court terme.

Deux programmes sur les biochars et impliquant des partenaires français ont été identifiés. Les résultats sont attendus à partir de 2023 :

- projet Qualichar (ADEME Graine 2020-2023) : il vise à développer une base de données de références des qualités agroenvironnementales des biochars et le potentiel des huiles de pyrolyses provenant de pyrolyse lente et de pyrolyse rapide avec RITTMO et le LRGP,
- projet FERTIMANURE (Horizon 2020, 2020-2024) : Innovative nutrient recovery from secondary sources – Production of high added value FERTIlisers from animal avec RITTMO et la Chambre d'agriculture de Bretagne.

Il existe également la production de char issu de (bio)plastiques. Plusieurs études traitant de cette question ont été identifiées avec des usages différenciés :

- (co-)pyrolyse de plastiques et de biomasse pour divers usages : production de briquettes, de molécules d'intérêt, etc. (Jamradloedluka & Lertsatitthanakornb, 2014, Mohanty *et al.*, 2018, Zhang *et al.*, 2018),
- des usages pour la remédiation des sols pollués par les métaux (Mujtaba Munir *et al.*, 2021), pour l'amélioration des sols urbains (Kumar *et al.*, 2021),
- usage de biochar issu d'une co-pyrolyse de déchets organiques et de plastique (bâche agricole) envisagé en agriculture (Rathnayake *et al.*, 2021) (< 10 % plastique).

2.1.3 Quantification des PRO : Etat des lieux

Dans cet exercice, deux études de référence ont été utilisées :

- Expertise scientifique collective MAFOR (Houot *et al.*, 2014)
- Etude prospective fixant des objectifs stratégiques d'augmentation de la part des fertilisants issus de ressources renouvelables, Icare & Consult pour le compte du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, septembre 2020 (Icare & Consult, 2020)

On compte environ **150 Mt/an de PRO**, correspondant à environ 50 Mt MS/an, valorisés sur les sols agricoles. Il s'agit essentiellement de PRO d'origine agricole (fumier, lisier), de l'ordre de 120 Mt brut/an.

Les données de quantification sont celles des PRO, c'est-à-dire les quantités qui sont retournées au sol. Il ne s'agit donc pas du gisement des intrants (biodéchets collectés, déchets verts) qui est nécessairement plus élevé, les étapes de traitement impliquant un abattement de la matière (compostage, méthanisation, pyrolyse).

Tableau 2 : Quantification des PRO en millions de tonnes par an (Compilation RECORD 2022)

Origine	Grand type	Type	Etat	Sigle	Mt MB	Mt MS	Source
Agricole	Brut	Fumier	Solide	DEJ-s	77	31	Houot <i>et al.</i> , 2014
Agricole	Brut	Lisier	Liquide	DEJ-l	32	6*	Houot <i>et al.</i> , 2014
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	IAA	12*	1,2	Houot <i>et al.</i> , 2014
Urbain	Brut	Boues Déshydratées	Solide	STEP	2*	0,4	Houot <i>et al.</i> , 2014
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	INDUS	2*	0,4	Houot <i>et al.</i> , 2014
Urbain	Brut	Déchets organiques (broyat DV, biodéchets)	Solide	BIOD	0*	0,2	Houot <i>et al.</i> , 2014
Urbain	Brut	Cendres, biochar, Refiom	Solide	CEND	1*	1	Icare&consult 2020 (issu CGAAER 2015)
Agricole	Compost	Compost de fumier	Solide	C-FUM	12,6	6*	Houot <i>et al.</i> , 2014
Urbain	Compost	Compost de boues urbaines	Solide	C-STEP	1,3	1*	Icare&consult 2020
Urbain	Compost	Compost de biodéchets	Solide	C-BIOD	1,3	1*	Icare&consult 2020
Urbain	Compost	Compost de déchets verts	Solide	C-DV	4,7	2*	Icare&consult 2020
Urbain	Digestat	Digestat solide de biodéchets	Solide	Ds-BIOD	1,0	0,1*	Icare&consult 2020
Urbain	Digestat	Boues digérées déshydratées	Solide	Ds-STEP			
Agricole	Digestat	Digestat solide agricole/territorial	Solide	Ds-AGRI	0,275	0,1*	Houot <i>et al.</i> , 2014+ répartition solide/liq/brut
Agricole	Digestat	Digestat brut agricole/territorial	Liquide	Db-AGRI	0,55	0,1*	Houot <i>et al.</i> , 2014 + répartition solide/liq/brut
Agricole	Digestat	Digestat liquide agricole/territorial	Liquide	DI-AGRI	0,275	0,02*	Houot <i>et al.</i> , 2014+ répartition solide/liq/brut

*données extrapolées à partir de la source bibliographique, sur la base d'hypothèses de %MS

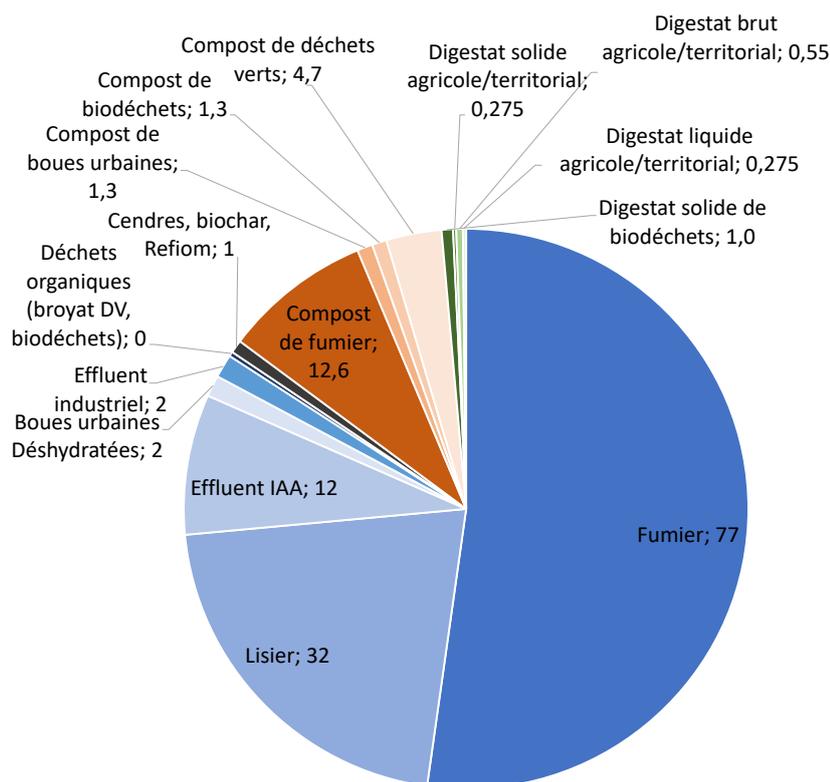


Figure 2 : Détail du gisement actuel des PRO, en millions de tonnes par an (Compilation RECORD 2022)

Les PRO d'origine agricole sont principalement épandus en brut (100 Mt/an), s'ajoutent environ 13 Mt/an qui sont compostés et de l'ordre de 1 Mt/an qui sont digérés. Les PRO issus des entreprises, de l'ordre de 14 Mt/an, sont essentiellement issus des industries agroalimentaires. Les PRO d'origine urbaine (12 Mt brut/an) sont principalement compostés, environ 7 Mt/an, principalement en compost de déchets verts.

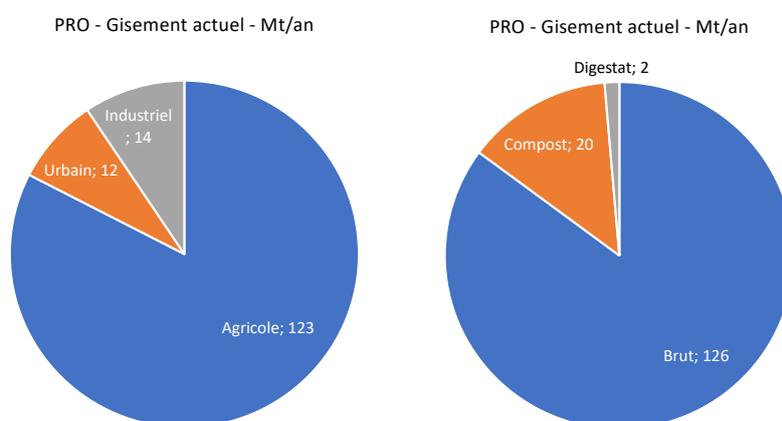


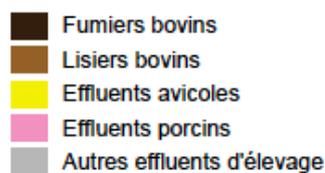
Figure 3 : Répartition du gisement actuel des PRO, en million de tonnes par an, suivant l'origine (industriel, urbain, agricole) et le type (brut, compost, digestat) (Compilation RECORD 2022)

Concernant les productions de déchets organiques par les ménages, selon l'ADEME (2018), 18 Mt/an de biodéchets, dont 12 Mt/an de déchets alimentaires et 6 Mt/an de déchets verts, sont produits chaque année par les ménages :

- 5,1 Mt (soit 30 %) gérées à domicile (paillage, compostage, alimentation animale, etc.), essentiellement des déchets verts
- 3,8 Mt de déchets verts collectés en déchèterie
- 1,16 Mt de biodéchets collectés en porte-à-porte (dont 97 % du tonnage en déchets verts seuls)
- 8 Mt de biodéchets résiduels dans les ordures ménagères résiduelles (OMR) (près de 40 % des OMR fines comprises, essentiellement des déchets alimentaires)

La répartition géographique des PRO est très marquée. En effet, les régions de l'ouest de la France présente de forte concentrations de déjections animales récupérables et de déchets organiques des industries.

Figure 1-1. Répartition géographique de la production d'effluents d'élevage récupérables en France en 2000-2001



Sources : données Biomasse Normandie 2002

La taille des camemberts est proportionnelle à la quantité de déjections récupérables. Par exemple, environ 4,9 Mt de matière sèche ont été produites en Bretagne, et environ 53 500 tonnes en Corse.

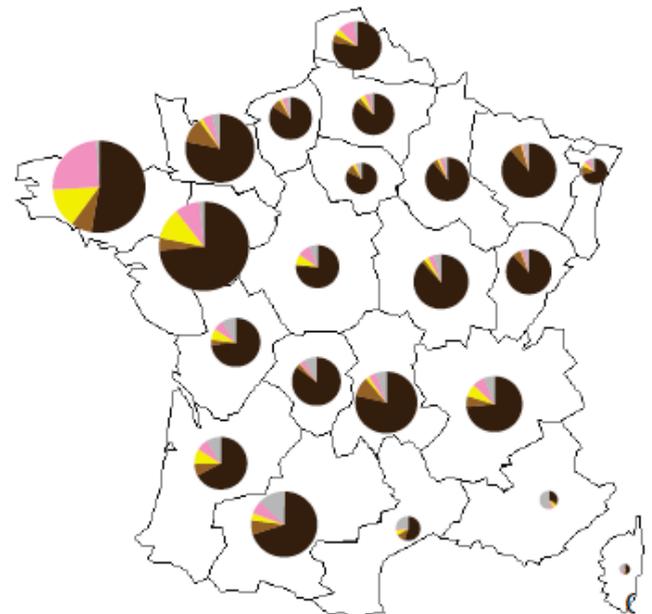


Figure 4 : Répartition de la production d'effluents d'élevage récupérables en France (Houot *et al.*, 2014)

Figure 1-2. Répartition géographique des quantités de déchets et d'effluents industriels destinées à la valorisation agricole en 2008

■ Epandage direct
 ■ Compostage ou méthanisation

Source : INSEE-Agrete-SSP 2008

La taille des camemberts est proportionnelle à la quantité de déchets et effluents.
 Par exemple, environ 385 000 t de matière sèche en Bretagne, et environ 1 500 tonnes en Languedoc-Roussillon.

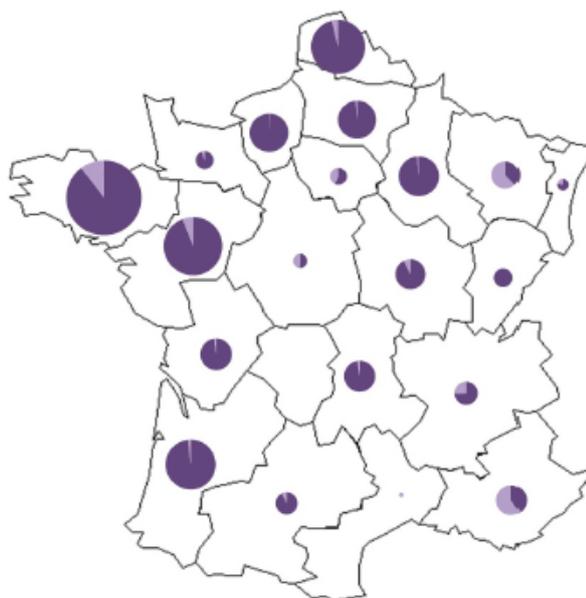


Figure 5 : Répartition de la production de déchets et d'effluents industriels destinés à la valorisation agricole (Houot *et al.*, 2014)

Selon la base de données SINOE®², fin 2020, les unités de transformation par compostage (hors compostage individuel et compostage de proximité) et méthanisation (hors micro-méthanisation) recensés sont :

- plus de 1000 unités de méthanisation alimentées par de la biomasse agricole (déjections animales, cultures intermédiaires à vocation énergétiques...) et déchets des industries agro-alimentaires),
- une centaine de stations d'épuration urbaines équipées de méthaniseurs avec une valorisation du digestat par compostage, incinération ou épandage direct,
- 11 unités de traitement mécano-biologique avec une étape de méthanisation suivi d'une étape de compostage du digestat et 4 sont en projet,
- 29 unités de traitement mécano-biologique avec une étape de compostage,
- une centaines d'usines de transformation végétale ou animale équipées d'unité de méthanisation pour le traitement des effluents avant valorisation,
- 660 plateformes de compostage traitant seul ou en mélange des déchets verts, des boues urbaines et des biodéchets.

Concernant spécifiquement les boues urbaines, le retour au sol représente environ 1 Mt MS/an avec environ 600 kt MS/an envoyées en compostage (et épandues) et environ 500 kt MS/an épandues directement. Près de 215 kt MS/an de boues urbaines sont envoyées en incinération et moins de 10 kt MS/an sont mises en décharge. La méthanisation n'est pas un exutoire pour les boues, c'est une étape de traitement. Les boues digérées peuvent être épandues, compostées puis épandues, incinérées ou mises en décharge.

² <https://www.sinoe.org/> - Base de données consolidée et sécurisée, SINOE®

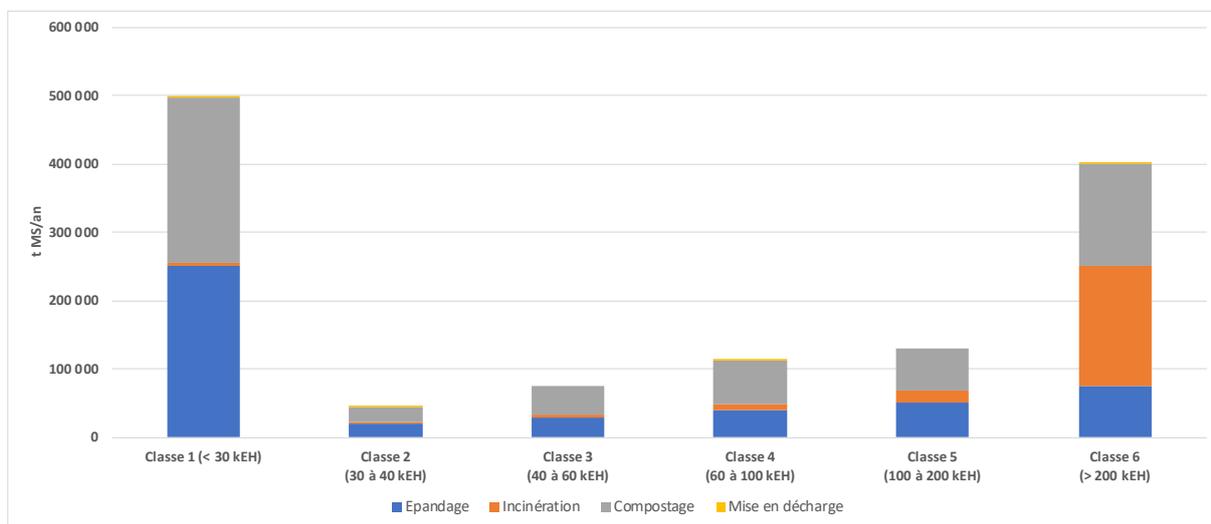


Figure 6 : Destination des boues urbaines des stations d'épuration urbaine en France (RECORD 2022)(BDD Portail Assainissement 2019)

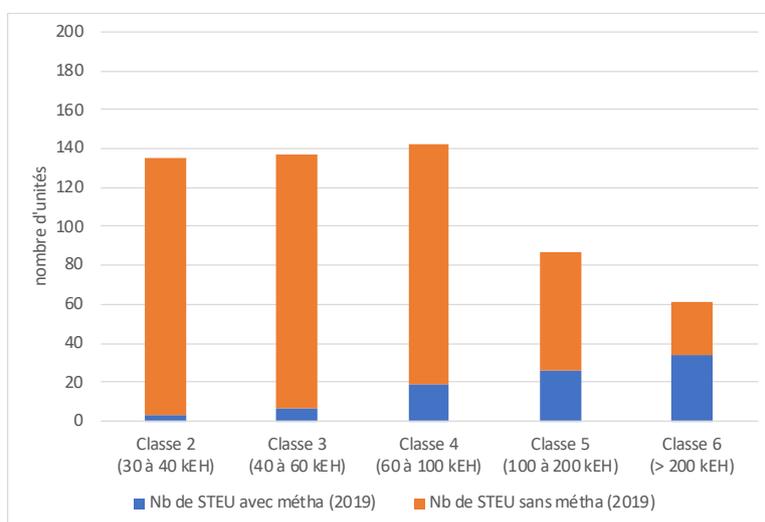


Figure 7 : Nombre de stations d'épuration urbaines de plus de 30 kEH, avec et sans méthanisation (RECORD 2022)(BDD Portail Assainissement 2019) (données internes Solagro)

Sur les 21 440 stations d'épuration de moins de 30 kEH, 5 stations sont équipées de méthaniseurs.

2.1.4 Quantification des PRO : Perspective 2030

Pour cet exercice, les données de l'état des lieux ont été confrontées aux enjeux réglementaires, sociologiques, techniques, des différents gisements (agricole, déchets) et notamment au regard du scénario prospectif agricole Afterres 2050 (Couturier et al., 2016).

2.1.4.1 Hypothèses

Les constats principaux concernant le retour au sol des gisements agricoles et urbains à l'horizon 2030 sont les suivants :

- Diminution tendancielle du cheptel
- Développement des projets de méthanisation, avec une ration incluant de la biomasse végétale (cultures intermédiaires à vocation énergétique, résidus de cultures)
- Augmentation de la valorisation des biodéchets (Loi AGE³) avec une obligation de tri à la source et de retour au sol
- Développement des solutions de gazéification pour la biomasse (déchets notamment)
- Augmentation des contraintes réglementaires : sur le retour au sol notamment les contaminants (Socle Commun⁴) et les possibilités de mélange des intrants

Déjections animales

La diminution tendancielle du cheptel est observée depuis plus de 30 ans, avec -27% du nombre d'animaux entre 1980 et 2010. A cette diminution s'ajoute l'hypothèse (source Afterres 2050) qu'une large majorité de déjections animales sont valorisées par méthanisation à moyen terme. Ainsi le gisement de PRO actuellement principalement épandu en brut deviendrait des digestats, en mélange avec d'autres intrants, biomasse végétale notamment.

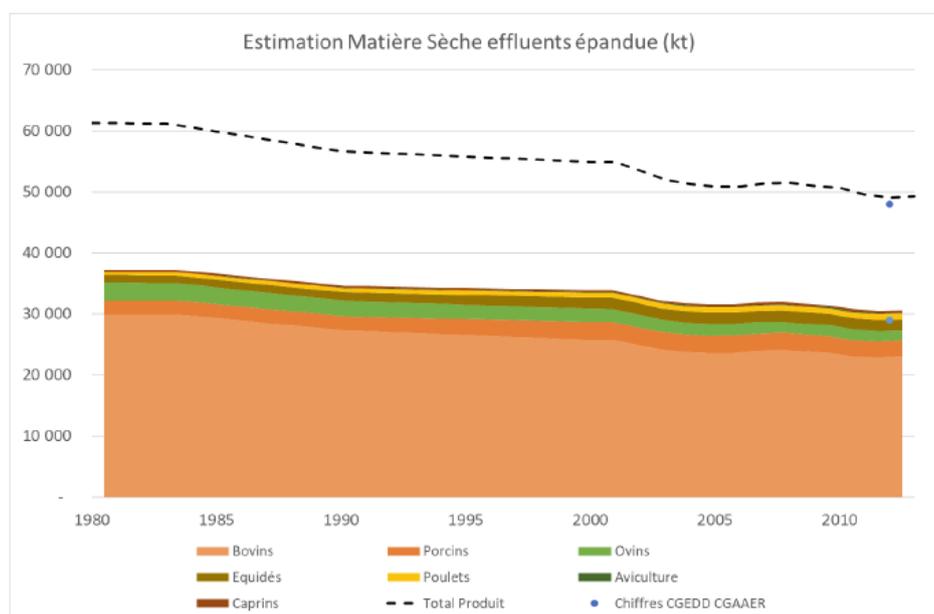


Figure 20 : Evolution des effluents d'élevage produits - Source : Agreste (nombre d'animaux), ANPEA (données effluents)

Figure 8 : Evolution du cheptel en France entre 1980 et 2010 (Icare & Consult, 2020)

³ LOI AGE³ : Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire

⁴ Le Décret Socle Commun Matières Fertilisantes et supports de culture, toujours en cours d'écriture à date, définira le cadre à respecter (innocuité et seuils, efficacité et utilisation, traçabilité) pour l'épandage des PRO

Evolution de la réglementation

L'évolution de la réglementation concerne :

- Les seuils des contaminants lors du retour au sol (Socle Commun)
- La possibilité de mélange des biodéchets, des déchets verts, des boues urbaines (Décret 2021-1179, article R. 543-312)
- L'obligation du tri à la source des biodéchets (Loi AGEC)

Pour les contaminants, la future réglementation du Socle Commun impose des seuils sur les éléments-traces métalliques, notamment sur le Cadmium (Cd) qui pourraient engendrer des freins à la valorisation des boues urbaines notamment.

Pour le mélange des déchets verts avec les boues urbaines, l'article R. 543-312 du Décret 2021-1179 indique les proportions à respecter : proportion de 100% (1 t de déchets vert pour 1 t de boues urbaines) au 1er janvier 2022 et proportion de 80% dès 2024, avec une clause de revoyure sur la base des travaux à remettre de l'ADEME.

Par ailleurs, depuis le décret n°2016-288 du 10 mars 2016, il est interdit de mélanger des biodéchets triés par leur producteur ou détenteur avec d'autres déchets n'ayant pas fait l'objet d'un même tri. Ainsi, les boues urbaines ne peuvent être mélangées à des biodéchets.

Ces contraintes peuvent aboutir à des contraintes fortes pour la valorisation des boues urbaines par retour au sol.

Concernant l'obligation de tri à la source des biodéchets dès 2024, la valorisation des biodéchets des ménages et des entreprises par retour au sol devrait être augmentée.

Cette valorisation passera par :

- le compostage individuel et le compostage de proximité
- la collecte en porte-à-porte ou en point d'apport volontaire et le traitement des biodéchets sur des unités de compostage ou de méthanisation

Dans le premier cas, la valorisation du compost est difficilement quantifiable à date puisque le compost est utilisé dans les jardins individuels ou collectifs.

De ce fait, la modélisation avec du compost de biodéchets individuel ou de proximité n'est pas envisagée dans l'étude.

La production et la valorisation de compost ou de digestat issus d'unités agricoles ou des collectivités devrait également s'intensifier dans les années à venir.

Le parti pris du scénario Afterres2050 vise une valorisation des biodéchets par méthanisation de l'ordre de 5 Mt/an.

Tableau 3 : Evolution du gisement de PRO à l'horizon 2030 (Compilation RECORD 2022)

Origine	Grand type	Type	Etat	Sigle	Mt MB actuel	Prospective (hypothèses)	
Agricole	Brut	Fumier	Solide	DEJ-s	77	-	Réduction cheptel + méthanisation
Agricole	Brut	Lisier	Liquide	DEJ-l	32	-	
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	IAA	12	= / -	Vers méthanisation territoriale
Urbain	Brut	Boues Déshydratées	Solide	STEP	2	-	Vers Incinération/gazéification, compostage/méthanisation
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	INDUS	2	=	Peu de développement de la méthanisation
Urbain	Brut	Déchets organiques (broyat DV, biodéchets)	Solide	BIOD	0	-	Vers la méthanisation et le compostage
Urbain	Brut	Cendres, biochar, Refiom	Solide	CEND	1	+	Augmentation des projets de gazéification
Agricole	Compost	Compost de fumier	Solide	C-FUM	12,6	=	
Urbain	Compost	Compost de boues urbaines	Solide	C-STEP	1,3	= / -	Évolution réglementaire mélange DV/boues, Socle Commun
Urbain	Compost	Compost de biodéchets	Solide	C-BIOD	1,3	++	Obligation réglementaire Tri (Loi AGECE)
Urbain	Compost	Compost de déchets verts	Solide	C-DV	4,7	= / +	Gisement stable voir en augmentation, interdiction de mélange avec les boues
Urbain	Digestat	Digestat solide de biodéchets	Solide	Ds-BIOD	1,0	+	5 Mt/an - Obligation réglementaire Tri, intérêt du compostage après métha
Urbain	Digestat	Boues digérées déshydratées	Solide	Ds-STEP		+	5 Mt Afterres 2050, limite évolution réglementaire, développement filière
Agricole	Digestat	Digestat solide agricole/territorial	Solide	Ds-AGRI	0,275	++	175 Mt (Afterres 2050) – dont 80 Mt de déjections animales et 70 Mt issus des résidus de cultures et production de biomasse
Agricole	Digestat	Digestat brut agricole/territorial	Liquide	Db-AGRI	0,55	++	
Agricole	Digestat	Digestat liquide agricole/territorial	Liquide	DI-AGRI	0,275	++	

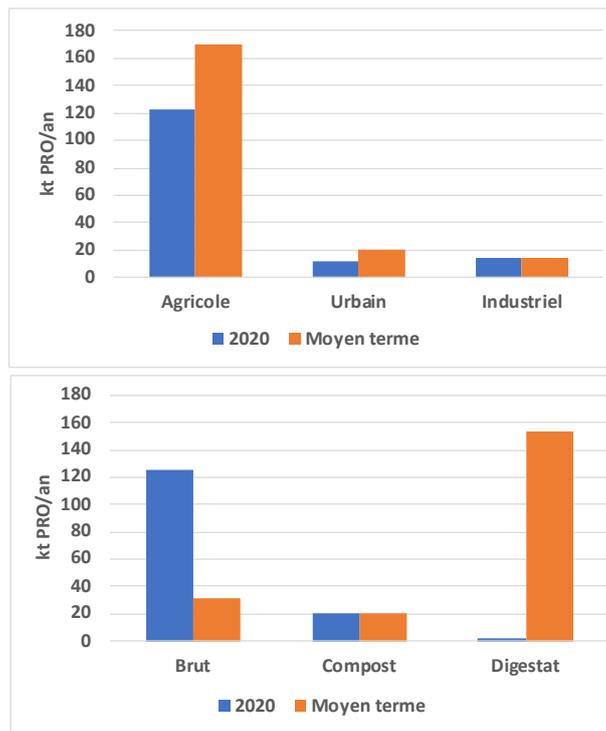
2.1.4.2 Résultats

A partir des données recensées, à moyen terme (horizon 2030), les quantités de PRO augmenteraient pour atteindre environ 200 Mt/an, soit environ 60 Mt/an de MS. Cette augmentation est essentiellement liée à la mobilisation de biomasse végétale en méthanisation.

Ainsi, au total le type de PRO reste essentiellement agricole, mais la valorisation des biodéchets participe à l'augmentation des gisements d'origine urbaine.

Les PRO bruts sont en nette diminution au profit du digestat.

La production de compost reste stable.



**Figure 9 : Quantités et types de PRO en 2020 et à moyen terme (horizon 2030)
(Compilation RECORD 2022)**

Tableau 4 : Estimation de la production de PRO à l'horizon 2030 (Compilation RECORD 2022)

Origine	Grand type	Type	Etat	Sigle	Estimation Mt MB horizon 2030
Agricole	Brut	Fumier	Solide	DEJ-s	11
Agricole	Brut	Lisier	Liquide	DEJ-l	3
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	IAA	12
Urbain	Brut	Boues Déshydratées	Solide	STEP	2
Industriel	Brut	Effluent	Liquide	INDUS	2
Urbain	Brut	Déchets organiques (broyat DV, biodéchets)	Solide	BIOD	0
Urbain	Brut	Cendres, biochar, Refiom	Solide	CEND	1
Agricole	Compost	Compost de fumier	Solide	C-FUM	13
Urbain	Compost	Compost de boues urbaines	Solide	C-STEP	1
Urbain	Compost	Compost de biodéchets	Solide	C-BIOD	1
Urbain	Compost	Compost de déchets verts	Solide	C-DV	5
Urbain	Digestat	Digestat solide de biodéchets	Solide	Ds-BIOD	5
Urbain	Digestat	Boues digérées déshydratées	Solide	Ds-STEP	5
Agricole	Digestat	Digestat solide agricole/territorial	Solide	Ds-AGRI	143
Agricole	Digestat	Digestat brut agricole/territorial	Liquide	Db-AGRI	
Agricole	Digestat	Digestat liquide agricole/territorial	Liquide	DI-AGRI	

2.2 Contribution des PRO au stockage de C dans les sols et impacts sanitaires – synthèse bibliographique

Cette partie est issue des synthèses effectuées récemment lors de l'étude « 4 pour 1000 » d'INRAE (Stocker du C dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?; Pellerin *et al.*, 2020)

2.2.1 Processus de stockage de C dans les sols

La matière organique a un rôle fondamental dans les sols. Elle contribue aux 3 composantes de leur fertilité : (i) fertilité biologique puisque la plupart des organismes vivants présents dans les sols à l'exception des plantes ont besoin de matière organique comme source d'énergie et de nutriments ; (ii) fertilité physique : elle contribue à l'agrégation des sols et donc à la stabilité de leur structure permettant d'assurer la circulation de l'eau et des gaz dans le profil; elle contribue aussi à la rétention de l'eau dans les sols; (iii) fertilité chimique : la matière organique est un réservoir de nutriments et sa minéralisation libère l'azote dont les plantes ont besoin ; elle participe aussi au complexe d'échange cationique qui permet de retenir des cations (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺....) nécessaires aussi à la nutrition des plantes.

Plus récemment, on attribue à la matière organique un rôle environnemental. Une augmentation des stocks de C dans les sols contribuerait à l'atténuation du changement climatique en absorbant une partie des excès de CO₂ émis dans l'atmosphère en lien avec l'activité anthropique. Ainsi, l'initiative « 4 pour 1000 » a été lancée en 2015 à l'occasion de la COP 21. Une augmentation des stocks de C de 4 ‰ par an permettrait de compenser théoriquement les émissions anthropiques de CO₂.

2.2.1.1 Hétérogénéité des stocks de C dans les sols

Dans les sols, le C est sous forme organique ou minérale. Les formes minérales sont liées à la roche mère des sols (sols carbonatés sur calcaire...) ou à des apports d'amendements basiques dans les sols pour rectifier des pH acides. On s'intéresse ici au C organique des sols. Sa présence dans les sols est issue des organismes vivants constitués de matières organiques et sont les intrants organiques initiaux (plantes, faune, microflore). Ces intrants vont être transformés sous l'action de la faune et de la microflore des sols pour être progressivement incorporés à la matière organique des sols.

Le C organique est un constituant majoritaire de la matière organique dans les sols. L'analyse élémentaire permet de quantifier sa teneur. On peut aussi quantifier la matière organique par perte au feu (pesée avant et après passage à 550°C). La plupart des laboratoires d'analyse utilise le coefficient de 1,72 pour passer du C organique à la matière organique (MO=1,72 x C).

Dans un profil de sol, la teneur en C organique décroît avec la profondeur. On considère souvent le premier horizon de sol puisque c'est l'horizon labouré sur lequel les pratiques culturales auront le plus d'influence. Cette couche supérieure du sol contient environ 60% du C organique total du profil de sol.

Pour passer des teneurs aux stocks de C, il faut considérer une masse de terre mesurée dans un volume pour une surface donnée. Si on s'intéresse à la couche supérieure du profil (30 cm), le stock de C dans cette épaisseur sera calculé par hectare ou m² en prenant en compte la densité du sol (masse de terre= densité x surface x 0,30).

La figure 10 présente les stocks de C organique en France calculés sur 30 cm. Ils sont de 3,58GtC. Ces stocks sont distribués de manière hétérogène : les plus importants sont observés dans les zones d'altitude (Jura, Massif Central, Vosges...) ou de prairie (Bretagne) ; les plus faibles sont en zone de grandes cultures (bassin parisien, plaine de la Garonne) ou en région méditerranéenne.

Plusieurs paramètres conditionnent ces stocks de C :

- Le climat : température et pluviométrie. Les stocks seront plus importants en climat froid et humide

- L'occupation du sol : sous forêt et prairie, les stocks seront plus importants que sous grandes cultures
- Les caractéristiques physico-chimiques des sols : les stocks seront plus faibles en sols limoneux.

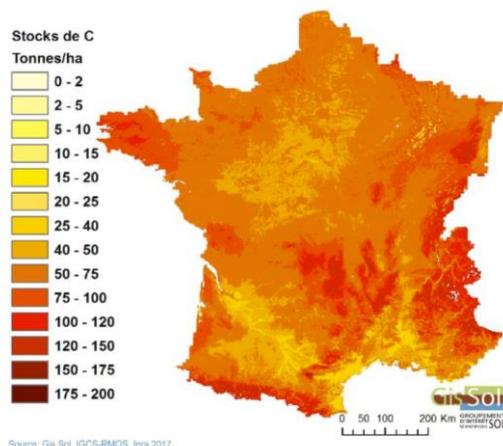


Figure 10 : Carte des stocks de C organique des sols français (en tC/ha) sur les 30 premiers centimètres (données GIS Sol ; Pellerin et al., 2020)

2.2.1.2 Transformation des intrants organiques dans un sol

Les matières organiques dans les sols ne sont pas inertes. Elles se transforment dans le sol sous l'action de différents processus (Figure 11).

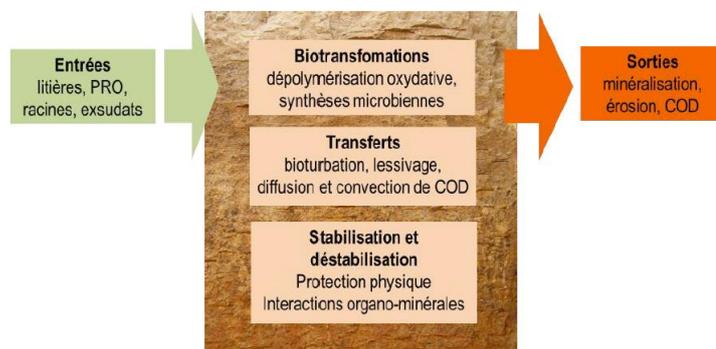


Figure 11 : Processus qui contrôlent le stockage de C dans les sols (dans Pellerin et al., 2020)

Le stock de C organique dans un sol va résulter du bilan entre les entrées et les sorties. Les entrées sont constituées des apports par les plantes (litière forestière, résidus de culture, racines, PRO...). Les sorties correspondent essentiellement à la minéralisation de la matière organique (secondairement aux pertes par érosion ou lixiviation). Cette minéralisation est très importante puisque c'est elle qui fournit des éléments nutritifs tels que l'azote minéral aux plantes.

Après apport au sol, les matières organiques sont transformées d'abord sous l'action de la faune et de la microflore des sols, leur apportant source d'énergie et de C organique pour leur métabolisme. Ces transformations constituent une étape majeure de la formation de la matière organique des sols. Des processus de stabilisation via des interactions avec les matrices minérales du sol ou par protection physique au sein des agrégats de sol contribuent au maintien du C organique dans les sols et à la diminution de sa vitesse d'évolution.

La matière organique est distribuée dans différents compartiments dans les sols dont la dynamique d'évolution est plus ou moins rapide : la matière organique « fraîche » (résidus de culture par exemple) se dégrade rapidement, la matière organique transformée dans le sol est également généralement représentée dans les modèles utilisés pour prédire sa dynamique sous plusieurs compartiments de dynamique plus ou moins rapide.

Dans le modèle AMG utilisé dans la suite de cette étude (voir figure 12), la matière organique transformée est représentée par 2 compartiments : un compartiment de matière organique active dont l'évolution sera visible à l'échelle des pratiques culturales (quelques dizaines d'années) et un compartiment de matière organique stable qui ne change pas à l'échelle de temps considéré.

2.2.1.3 Equilibre du stockage

Le stock de C n'augmente pas indéfiniment dans un sol. Si les pratiques ou les intrants restent constants, il atteint un équilibre dont le niveau dépend des flux d'entrée (apports de PRO, enfouissement des résidus de culture....) et de sortie (flux de minéralisation qui dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol et du climat).

La figure 12 représente l'évolution des stocks de C dans un sol soumis à 2 pratiques différentes :

- La pratique A initiale qui n'avait pas encore atteint son équilibre au moment de la mise en œuvre de la pratique B alternative. Cette pratique A déstocke du C organique
- La pratique B stocke du C organique jusqu'à atteindre un équilibre. L'augmentation du stock peut s'exprimer par rapport au stock initial. Il peut s'exprimer aussi par rapport à la pratique initiale. On parle alors de stockage additionnel par rapport à cette pratique A.

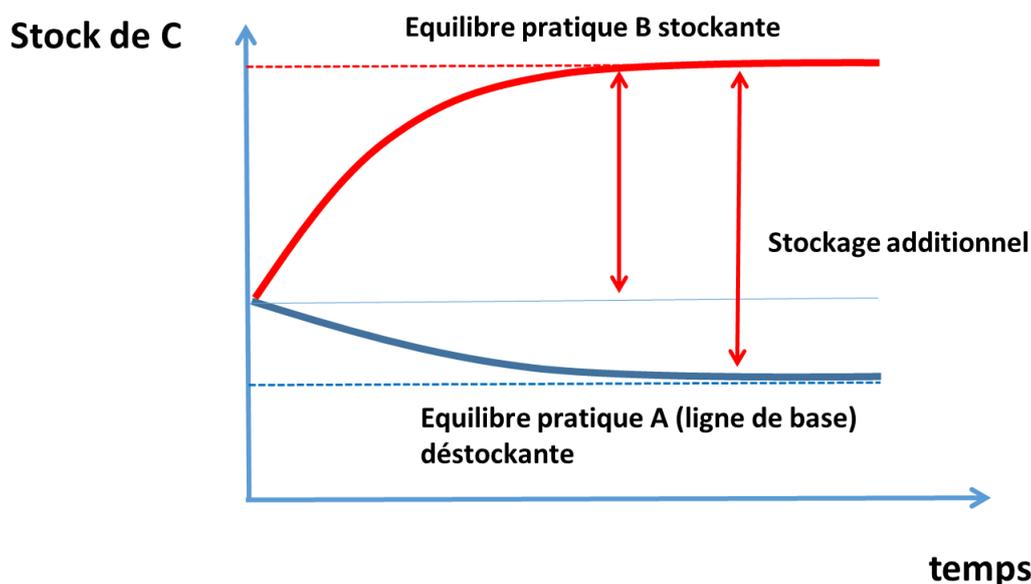


Figure 12 : Représentation schématique de l'évolution des stocks de C dans des sols soumis à des pratiques différentes et calcul du stockage additionnel (RECORD 2022)

2.2.1.4 Saturation des sols

Certains auteurs affirment que le stock de C organique d'un sol ne peut pas augmenter infiniment même si les apports organiques ne cessent d'augmenter. Les sols seraient caractérisés par un maximum potentiel de stockage associé à la fraction fine des sols. On parle alors de saturation des sols (Hassink, 1997). Cependant cette notion est controversée.

2.2.1.5 Priming effect

Le priming effect correspond à la stimulation de la minéralisation du C organique d'un sol en cas d'apport exogène. L'émission de CO₂ mesurée après apport exogène pourrait donc correspondre à la somme du CO₂ émis par la dégradation de la matière apportée et du CO₂ émis par le surplus de minéralisation du C organique du sol.

2.2.2 Efficacité des PRO à stocker du C dans les sols

Les PRO sont considérés comme des matières fertilisantes au sein desquelles on distingue deux grandes classes : celles qui sont plutôt sources d'éléments nutritifs pour les plantes à court terme (valeur fertilisante des matières) et celles qui vont contribuer à augmenter progressivement les teneurs et stocks de matière organique dans les sols (valeur amendante des matières). Ces deux classes d'effets agronomiques sont liées entre elles (Figure 13). En général, l'intérêt fertilisant azoté des matières diminue quand l'intérêt amendant augmente. Cette variabilité est liée aux caractéristiques de la matière organique des produits, celles-ci étant liées à l'origine de ces matières organiques et aux procédés de traitement ou de transformation qu'elles ont subis avant leur apport au sol. On s'intéresse ici à la **valeur amendante des PRO**, définie comme étant leur capacité à entretenir voire à augmenter les teneurs et stocks de matière organique dans les sols.

Parmi les stratégies proposées pour augmenter les stocks de C des sols, Smith et Powlson (2000) avaient déjà estimé précédemment que le retour au sol des 820 millions de tonnes de fumier produits annuellement en Europe représentait une séquestration de 6,8 millions de t de C/an, soit l'équivalent de 0,8% des émissions de C-CO₂ en Europe en 1990. Cependant, seul le stockage de C associé à de **nouvelles sources de C exogènes qui ne sont pas déjà épandues sur les sols** doit être considéré lors de l'évaluation des potentialités de stockage additionnel résultant de l'apport de PRO (Powlson *et al.*, 2011).

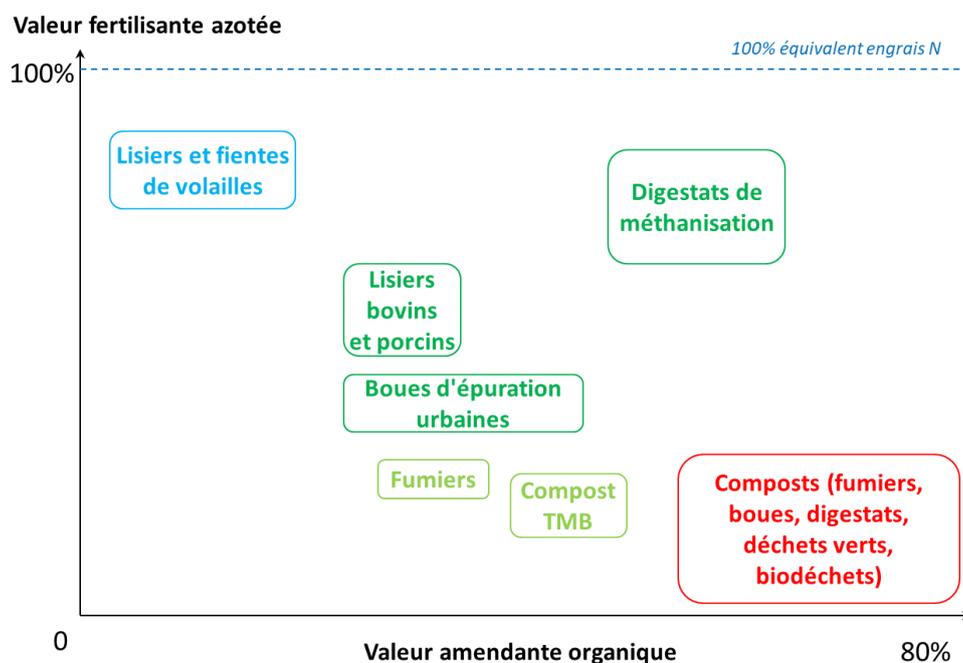


Figure 13 : Relation entre valeur amendante et valeur fertilisante des PRO (issue de Houot *et al.*, 2014).

Cette efficacité à augmenter la matière organique des sols va dépendre de nombreux facteurs : la fréquence et les doses d'application des PRO, les caractéristiques de la matière organique des PRO apportés et les conditions pédoclimatiques (les caractéristiques physico-chimiques des sols, la température et la pluviométrie vont influencer les vitesses des biotransformations dans les sols après apport).

La présentation des résultats quantifiés dans des **essais au champ** de moyenne et longue durée (3 à 155 ans), sera complétée par celle des **indicateurs** et méthodes permettant d'estimer cette valeur amendante des PRO. D'autres effets sont à considérer dans l'évaluation de la pratique de valorisation des PRO (substitution des engrais, émissions gazeuses, flux de contaminants potentiels...).

2.2.2.1 Méthodes et indicateurs pour évaluer la valeur amendante des PRO

Essais au champ

Les essais au champ de moyenne/longue durée constituent des outils de choix pour évaluer les effets de pratiques culturales (Jenkinson, 1991 ; Janzen, 1995). Ils sont donc l'approche la plus adéquate pour évaluer la valeur amendante des PRO. Ces essais permettent de quantifier les effets d'apports réguliers d'un même type de PRO.

La plupart des essais recensés sont de moyenne durée (<30 ans) et montrent des réponses quasiment linéaires des teneurs en C des sols au nombre d'apports de PRO, et donc aux quantités de C apporté *via* ces apports. Ces cinétiques « linéaires » seront utilisées pour calculer les valeurs amendantes des PRO correspondant aux facteurs de conversion d'apports organiques de PRO en matières organiques du sol.

Ce facteur de conversion (Fact_conv_PRO) est égal au rapport entre d'une part le stockage additionnel permis par l'apport de PRO relativement à une situation sans apport, et d'autre part l'apport de carbone des PRO cumulé sur la période prise en compte par le calcul :

$$\text{Fact_conv_PRO (gC sol/g C PRO)} = [\text{Stock C avec PRO} - \text{Stock C dans un traitement témoin}] / \text{C PRO}$$

Avec :

- Fact_conv_PRO est exprimé en g de C de sol résultant de l'apport de PRO par g de C apporté au sol via les PRO (gC sol/g C PRO)
- Stock C avec PRO : stock de C mesuré dans l'horizon d'enfouissement des PRO (tC/ha)
- Stock C témoin : stock de C mesuré dans le même horizon dans un traitement témoin sans apport de PRO (tC/ha)
- C PRO : quantité totale de C apportée par le PRO depuis la mise en place de l'essai (tC/ha)

Le facteur de conversion est également souvent exprimé en pourcentage du C apporté par les PRO. On parle alors de taux de stockage. Ce calcul suppose qu'on affecte uniquement au PRO les augmentations de C dans les sols et donc qu'il n'y a pas de différences de production végétale ni de restitution des résidus de récolte entre les traitements témoin et PRO. C'est pourquoi, quand cela est possible, les traitements témoins correspondent à des traitements recevant une fertilisation minérale. Si les rendements sont différents, il est nécessaire de prendre en compte les différences de flux de résidus de récolte (Peltre *et al.*, 2012).

Indicateurs au laboratoire de l'évaluation de la valeur amendante des PRO

Incubations en conditions contrôlées

La méthode la plus largement utilisée consiste à mesurer en microcosmes de laboratoire la dynamique de minéralisation du C des PRO après apport à un sol. Cette approche expérimentale fait l'objet d'un mode opératoire normalisé (FD U 44-163) en France qui permet de pouvoir comparer les résultats obtenus par différents opérateurs.

Les résultats des incubations sont souvent utilisés pour modéliser les cinétiques de minéralisation du C ou d'évolution du C résiduel en ajustant des modèles mathématiques qui permettent ensuite d'extrapoler les résultats à des durées plus longues. Ces extrapolations peuvent se rapprocher des conditions de plein champ en prenant en compte les conditions climatiques réelles. C'est le cas par exemple du calcul de la proportion h de C résiduel après 1 an dans les conditions climatiques représentatives d'un endroit donné, définie comme étant le coefficient d'humification du PRO (Janssen, 1984), qui peut être assimilé à leur valeur amendante ou au facteur de conversion du C du PRO en C du sol mentionné précédemment. Cependant dans la majorité des cas, cette extrapolation aux conditions climatiques réelles n'est pas faite et les résultats d'estimation de C résiduel sont donnés dans les conditions du laboratoire (Parnaudeau *et al.*, 2004; Tambone *et al.*, 2009).

Indice de stabilité de la matière organique des PRO

Les approches expérimentales de la valeur amendante sur la base des résultats d'incubations sont lourdes à mettre en œuvre et coûteuses en temps d'expérimentation. C'est pourquoi des relations sont recherchées entre les caractéristiques biochimiques de la MO des PRO, son degré de stabilité et cette valeur amendante des PRO. Lashermes *et al.* (2009) ont établi une relation entre les valeurs amendantes extrapolées à partir de données d'incubation et les caractéristiques biochimiques des PRO, permettant de calculer l'indice de stabilité de la MO (ISMO) des PRO. Ce résultat a fait l'objet d'une normalisation du mode opératoire de mesure (FD U 44-162). L'indice ISMO peut être considéré comme un *proxi* du facteur de conversion du C des PRO en C organique du sol et donc de leur valeur amendante.

$$\text{ISMO (\% C organique)} = 44.5 + 0.5 \text{ SOL} - 0.2 \text{ CEL} + 0.7 \text{ LIC} - 2.3 \text{ MinC3}$$

avec SOL, CEL et LIC les fractions biochimiques (respectivement fraction soluble, équivalente à la cellulose et à la lignine exprimées en % MO) mesurées à l'aide de la méthode de fractionnement Van Soest telle que décrite dans le mode opératoire de la norme ; et MinC3, la proportion de C organique minéralisée pendant 3 jours d'incubation en mélange dans un sol.

Plus récemment, Jimenez *et al.* (2017) ont développé un nouveau protocole de fractionnement biochimique incluant l'extraction d'un compartiment de MO humifiée et qui permet de prédire la biodégradabilité résiduelle d'une large gamme de PRO dont des boues et digestats.

2.2.2.2 Effets des apports de PRO sur le stockage de C dans le sol

La méta-analyse de Maillard et Angers (2014) fait ressortir une tendance à observer des valeurs de stockage additionnel résultant d'apports d'effluents d'élevage plus élevées sous climat tempéré que sous climat tropical. Nous avons donc focalisé notre synthèse bibliographique sur une sélection d'essais réalisés dans des conditions de climat tempéré. Les essais mobilisés sont majoritairement conduits en **grandes cultures** (céréales, maïs fourrage, soja). Ce sont pour la plupart des **essais classiques en blocs complets**.

La très grande majorité des résultats sur le facteur de conversion des PRO en C du sol concerne les fumiers (n=60), et les produits compostés (n=47). Les résultats concernant les boues d'épuration (n=10) et les lisiers (n=8) sont beaucoup moins nombreux. On recense également quelques données sur des essais avec tourbe, sciure, digestats, grignons d'olive (résidus de pressage des olives), litières de volaille.

Cette synthèse présente les estimations de stockage résultant de l'apport de PRO au sol, calculées lorsque cela est possible par rapport à un traitement de référence soumis à une fertilisation minérale N et le facteur de conversion du C des PRO (tableau 5).

Les données présentées dans le tableau 5 mettent en évidence une très grande variabilité des valeurs de stockage résultant de l'apport de PRO au sol et du facteur de conversion du C des PRO qui reste difficile à interpréter, notamment du fait de l'absence quasi généralisée d'informations précises sur la composition biochimique des produits.

A partir de scénarios d'apports représentatifs des pratiques agriculteurs pendant 20 ans et en utilisant les facteurs de conversion du C des PRO en C du sol, des valeurs moyennes de stockage additionnel sont calculés dans le tableau 6. En combinant doses, fréquences d'apports et teneurs moyennes en C des PRO, les composts ont les valeurs moyennes de stockage additionnel les plus élevées (0.48 tC/ha an), suivis des fumiers (0,31 tC/ha an) et lisiers (0,09 tC/ha an), le stockage additionnel étant de 0.02 tC/ha an pour les boues d'épuration.

Tableau 5 : Synthèse des valeurs moyennes (écart type entre parenthèse) d'augmentation des stocks de C résultant de l'apport de PRO au sol exprimées en pourcentage d'augmentation par rapport à des traitements sans apports et synthèse des facteurs de conversion du C des PRO en C du sol, . Durée des essais allant de 3 à 155 ans, médiane : 12 ans. (Compilation RECORD

2022) (issues d'articles de synthèse, de méta analyse ou de la synthèse de références bibliographiques ; n est le nombre d'essais considérés)

Type PRO	Source	n	Augmentation stock de C (en % du C du sol témoin)	n	Facteur de conversion (tC/tC apporté)
Fumier bovin	Méta analyse Zavattaro et al (2017)	60	32		n.c.
Fumier bovin	Synthèse essais français, Morvan et al (2013)	14	26.7 (± 15)	9	0.36 (± 0.12)
Fumiers divers	Synthèse de références	41	53 (±33)	51	0.24 (± 0.12)
Fumiers compostés	Synthèse de références	12	38 (±16)	9	0.38 (±0.21)
Composts biodéchets	Synthèse de références	16	30 (± 17)	15	0.39 (± 0.16)
Composts de boues	Synthèse de références	6	47 (± 22)	11	0.42 (± 0.19)
Autres composts	Synthèse de références	11	43 (± 25)	11	0.41 (± 0.24)
Boues	Synthèse de références	11	65 (± 33)	11	0.30 (± 0.14)
Boues et boues digérées	Synthèse de Powlson et al (2012)		n.c.	20	0.51 (± 0.07)
Lisier bovin	Méta analyse Zavattaro et al (2017)	23	17.5		n.c.
Lisiers divers	Synthèse de références	5	7 (± 4)	8	0.18 (± 0.08)

Tableau 6 : Stockage additionnel lié aux apports de PRO dans des scenarios sur une période de 20 ans d'apport représentatifs des pratiques agriculteurs et calculé à l'aide des facteurs de conversion présentés dans le tableau 5 (Compilation RECORD 2022)

	Dose (t MB/ha)	Fréquence de retour (an)	Teneur en C (%MB)	Flux d'apport de C au sol en 20 ans (t/ha)	Facteur de conversion (tC sol/t C apporté)	stockage de C additionnel total (tC/ha)	stockage de C annuel (tC/ha an)
Fumier	40	3	10.1	26.9	0.36	9.7	0.48
Fumier composté	40	3	8.8	23.5	0.38	8.9	0.45
Lisier de porcs	40	2	2.7	10.8	0.18	1.9	0.10
lisier de bovins	40	2	4.5	18	0.18	3.2	0.16
Compost	30	3	17.6	35.2	0.41	14.4	0.72
Boue	10	3	3.3	2.2	0.30	0.7	0.03

Effluents d'élevage

Les références sur le stockage de C résultant d'apports de fumier de bovins sont nettement majoritaires, suivies par les références sur les lisiers de bovins ; les références sur les autres effluents d'élevage (lisiers et fumiers de porc, fientes et fumiers de volailles) sont par contre très peu nombreuses.

Le facteur de conversion du C des PRO est de manière générale plus élevé avec les fumiers qu'avec les lisiers, avec des valeurs moyennes de 0,24 gC/gC apporté (soit 24% du C apporté) pour des fumiers divers, 36% du C apporté pour les fumiers de bovins, vs 18% du C apporté en moyenne pour les lisiers (tableau 5). Les facteurs de conversion du C donnés par Diacono et Montemurro (2010) dans leur synthèse bibliographique varient de 8 à 25% du carbone apporté pour des fumiers, contre des valeurs inférieures à 4% pour des lisiers.

Composts

Le compostage des effluents d'élevage augmente le facteur de conversion du C, avec une moyenne de 38% du C apporté. Cependant, comme les teneurs en C des fumiers compostés sont plus faibles que celles des fumiers non compostés, le stockage additionnel calculé au tableau 5 est identique pour les fumiers compostés ou non pour les scénarios agronomiques considérés.

Pour les composts issus de déchets verts, de biodéchets, de boues d'épuration, les valeurs moyennes du facteur de conversion du C des composts varient de 40 à 42% du C apporté, selon la nature des produits compostés (tableau 5), et sont dans la même gamme que pour les composts issus d'effluents d'élevage. Ces proportions correspondent aux valeurs les plus élevées des produits organiques, du fait du processus de stabilisation de la MO au cours du compostage. On observe cependant que la gamme de variation du taux de stockage est peu

différente de celle des autres PRO, et que les valeurs moyennes sont peu impactées par la nature initiale des intrants.

Boues d'épuration urbaine

La moyenne du facteur de conversion du C des boues d'épuration calculée dans le cadre de cette synthèse est de 30% (tableau 5).

On observe comme pour les autres PRO une forte variabilité de l'effet des apports de boues sur le stockage de C résultant de l'apport de PRO, avec des valeurs de facteur de conversion du C des PRO comprises entre 11 et 55%, gamme comparable à celle donnée par Brown *et al.* (2011) (1 à 43%). Ces résultats contrastés s'expliqueraient en partie par la composition chimique des boues. Dans une étude visant à caractériser au cours d'incubations de quelques mois de mélanges sol-boues en conditions contrôlées de laboratoire, le comportement de minéralisation de différents types de boues d'épuration urbaines ou industrielles, ayant subi des post-traitements de déshydratation, de digestion anaérobie ou de compostage, la biodégradabilité des boues varie de 18 à 66% du C organique et est inversement corrélée à la teneur en lignine (Parnaudeau *et al.*, 2004).

Digestats de méthanisation

Dans une synthèse bibliographique, Nkoa (2014) rapporte que la valeur amendante des digestats est mal connue, et il existe très peu de résultats d'essais au champ de moyenne/longue durée, à l'exception de quelques références sur les boues digérées (Powlson *et al.*, 2012). La transformation en biogaz de la fraction biodégradable des effluents d'élevage ou l'utilisation de biomasses végétales (résidus de cultures, cultures intermédiaires) conduit à s'interroger sur la diminution potentielle des apports de matière organique au sol. Moller (2015) dans une revue bibliographique, ne rapporte pas d'effet négatif de l'introduction de la méthanisation sur les teneurs en carbone des sols. Wentzel *et al.* (2015) n'observent pas de différences de teneurs en carbone organique dans des parcelles recevant des effluents d'élevage digérés ou non.

L'effet des apports de digestats sur les stocks de C du sol est donc généralement estimé à partir de mesures respirométriques, qui renseignent sur le degré de stabilité des MO après digestion anaérobie. Les quelques valeurs d'ISMO disponibles pour des digestats confirment l'intérêt de cet indicateur pour prédire la valeur amendante des digestats (Levavasseur *et al.*, 2022). Il a été utilisé pour confirmer l'absence d'effet négatif de l'introduction de la méthanisation sur les teneurs en carbone organique des sols (Bodilis *et al.*, 2015).

La MO du digestat est plus stable que celle des matières entrantes en raison de la transformation des fractions labiles en biogaz. Cette stabilisation de la MO s'accompagne d'un enrichissement relatif en lignine et en longues chaînes aliphatiques, et d'une diminution des fractions lipidiques et des polysaccharides (Marcato *et al.*, 2009 ; Tambone *et al.*, 2009). Cette évolution des caractéristiques biochimiques au cours de la digestion anaérobie est similaire à ce qui est observé au cours du début de compostage (Marcato *et al.*, 2009). Dans une étude comparant différents composts de déchets verts et biodéchets et des digestats d'effluents d'élevage et résidus de culture ou biodéchets, Tambone *et al.* (2010) conclut à des valeurs amendantes similaires pour les composts et digestats. Le post-traitement par compostage après digestion anaérobie augmente encore la stabilité des digestats et ralentit leur minéralisation dans les sols.

Biochars

Les biochars sont des produits organiques issus de la pyrolyse de biomasse. Il existe différents types de biochars en fonction du procédé dont ils sont issus (torréfaction, pyrolyse lente ou rapide, gazéification, carbonisation hydrothermale...). La stabilité du C des biochars varie selon le procédé d'obtention et la biomasse d'origine. Une partie du C des biochars peut rester labile et stimuler l'activité de la biomasse microbienne (méta-analyse de Biederman et Harpole, 2013). La synthèse de Spokas (2010) met en évidence une variabilité des durées de demi-vie des biochars (moins de 100 ans à plus de 1 000 ans), le rapport moléculaire O/C

étant un bon indicateur de cette stabilité. L'importance du procédé d'obtention du biochar est confirmée par l'étude de Bruun *et al.* (2012) : la pyrolyse rapide laisse des fractions de la biomasse traitée non pyrolysée, ce qui explique la biodégradabilité plus importante mesurée pour le biochar issu de pyrolyse rapide (5,5% du C du biochar minéralisé dans le sol après apport) par rapport à un biochar issu de pyrolyse lente (seulement 2,9% du C minéralisé). Mesuré comme précédemment au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire, le C résiduel des biochars issus de carbonisation hydrothermale est beaucoup moins stable avec 13 à 16% du carbone minéralisé (Bamminger *et al.*, 2014). Dans tous les cas, les valeurs amendantes seraient donc élevées : 80 à 85% pour les biochars issus de carbonisation hydrothermale, 95% pour les biochars issus de pyrolyse rapide et 97% pour ceux issus de pyrolyse lente. La méta-analyse de Wang *et al.* (2016) confirme ces valeurs amendantes élevées et montre que l'apport de biochar peut avoir des effets contrastés sur la minéralisation de la matière organique du sol : stimulation à court terme mais ralentissement de la dégradation à plus long terme par des processus de protection physique (Maestrini *et al.*, 2015, Hernandez-Soriano *et al.*, 2016). Un essai au champ de 5 ans avec des doses importantes d'apport de biochars (30 à 90 t /ha) montre au contraire une stimulation de la décomposition des résidus de récolte (Dong *et al.*, 2018). Le suivi des charbons dans des sols maintenus en jachères nues de plusieurs dizaines d'années montre que les biochars pourraient avoir une dynamique de décomposition plus rapide que ce que montre la plupart des études faites à plus court terme (Lutfalla *et al.*, 2017).

Autres PRO

Les travaux sur les PRO d'origine agro-industrielle sont relativement peu nombreux. Parnaudeau *et al.* (2006) mesurent une forte biodégradabilité des effluents agro-industriels liquides qui conduirait à des facteurs de conversion en C du sol inférieurs à 20% du C apporté. Cependant certains PRO industriels peuvent présenter des taux de stockage plus élevés comme les boues de désencrage avec 40% du C de boues stocké dans le sol 2 ans après l'apport (Chantigny *et al.*, 1999).

Les potentiels de stockage de C des résidus issus de la production de biocarburants ont été approchés via des mesures respirométriques de 30 à 60 jours. Ils varient entre 20 et 70% (Galvez *et al.*, 2012 ; Cayuela *et al.*, 2010a ; Schouten *et al.* 2012).

Enfin, beaucoup de sous-produits animaux sont utilisés comme engrais organiques, dont on peut considérer que leur contribution au stockage de C est faible. Cayuela *et al.* (2010b) montrent en effet que la biodégradabilité de ces produits est généralement importante : 56% du C pour la farine de plume hydrolysée, 41% pour le sang séché, 21% pour la poudre de corne, 58% pour la poudre d'os. Les taux de stockage varieraient entre 40 à 70% du C apporté. Cependant, les doses d'apport étant faibles car calculées sur la base des teneurs en azote élevées de ces produits, les flux de C total apporté sont faibles et donc le stockage additionnel est faible.

2.2.3 Synthèse sur la valeur amendante des PRO et perspectives

2.2.3.1 Valeur amendante moyenne des principaux PRO

Le Tableau 7 synthétise la valeur amendante organique des principaux PRO en France, en se basant sur leur teneur en C et leur ISMO. La plupart des données de matière brute et teneur en C proviennent de Houot *et al.* (2014). Les données d'ISMO proviennent de Levavasseur *et al.* (2020). Quelques valeurs sont des données internes (marquées avec un astérisque).

On remarque des différences importantes entre PRO. Les PRO liquides apportent moins de C humifié par tonne de matière brute (boue liquide, digestat de CIVE...) par rapport aux PRO les plus solides (fumier caprin...), séchés (lisier de porc séché) ou compostés (compost de déchets verts...). La matière sèche des PRO explique ainsi 63% de la variabilité de la valeur amendante des PRO ($R^2=0,63$).

Au-delà des apports de C humifié par tonne de matière sèche, il est important de noter que ces PRO sont généralement apportés à des doses variables à chaque application, notamment

pour des raisons de besoins en nutriments : de quelques tonnes par hectare pour des fientes séchées à plus de 30 t ha⁻¹ pour des fumiers. L'apport de C humifié est donc aussi largement dépendant des doses d'apports.

Tableau 7 : Valeur amendante organique des principaux PRO (Compilation RECORD 2022)

Groupe	PRO	Matière sèche	Teneur en C (% MB)	ISMO	Apport de C humifié par tonne de matière brute (kg C/ t MB)
		% MB		%C	
Boues	Boue de papèterie déshydratée	73	7	0.54	38
	Boue urbaine déshydratée	17	5	0.46	23
	Boue urbaine déshydratée et chaulée	25	5.5	0.46	25
	Boue urbaine liquide	6	0.9	0.46	4
Composts	Compost d'ordures ménagères résiduelles	66	11.1	0.53	59
	Compost de déchets verts	57	12	0.82	98
	Compost de déchets verts et biodéchets	62	14.7	0.77	113
	Compost de déchets verts et boue urbaine	49	12.4	0.79	98
	Compost de fumier bovin	33	10.5	0.71	75
	Compost de fumier porcin	40	14.6	0.63	92
Digestats	Digestat de biodéchets *	4	1.8	0.65	12
	Digestat de CIVE majoritairement (brut)*	6	2.1	0.48	10
	Digestat de CIVE majoritairement (phase liquide)*	4	1.6	0.53	8
	Digestat de CIVE majoritairement (phase solide)*	27	11.3	0.56	63
	Digestat agricole (moyen)	10	3.5	0.66	23
Effluents d'élevage	Fientes de volaille séchées	71	23.8	0.41	98
	Fumier bovin	21	8.3	0.64	53
	Fumier caprin	45	18	0.64	115
	Fumier de volaille	56	22.3	0.47	105
	Fumier équin	41	17.6	0.49	86
	Fumier ovin	30	12	0.64	77
	Fumier porcin	33	14.6	0.61	89
	Lisier bovin	8	3	0.45	14
	Lisier porcin	5	1.7	0.55	9
	Lisier porcin (phase solide)	41	12.6	0.63	79
Autres	Vinasse de sucrerie (betterave) concentrée	55	17.5	0.3	53

2.2.3.2 Autres effets à prendre en compte dans l'évaluation du bilan C complet et du bilan environnemental du retour au sol des PRO

D'autres flux de C sont à prendre en compte pour faire un bilan GES plus complet du retour au sol des PRO : les émissions de gaz à effet de serre après épandage (N_2O), la substitution des engrais minéraux azotés par ces épandages de PRO qui peuvent avoir des coefficients équivalents engrais variant de 0 (cas des biochars par exemple) à 80% (cas des digestats par exemple). Cette substitution des engrais permet d'éviter les émissions liées à la production des engrais azotés, fortement consommatrice d'énergie fossile et donc émettrice de GES (Smith et al., 2007). Ce bilan GES peut être fait à l'échelle de la parcelle ou prendre en compte la filière de traitement amont.

Plus généralement, il est important de prendre en compte les autres effets potentiels liés aux apports de PRO et de faire un bilan environnemental complet de la pratique. Nous citons par exemple : la substitution des engrais P et K, l'amélioration de la structure du sol et une meilleure infiltration, l'augmentation de l'activité biologique... mais également les apports de contaminants minéraux, organiques, des germes pathogènes éventuels.... Tous ces effets sont largement détaillés dans le rapport de l'ESCo Mafor (Houot et al., 2014).

2.2.3.3 Quelles possibilités d'accroissement des stocks de carbone organique du sol par l'apport au sol de nouvelles sources de carbone exogène ?

La quasi-totalité des effluents d'élevage produits en France retournent au sol et il n'y a donc pas de possibilité d'accroître les stocks de C organique des sols par une mobilisation supplémentaire de ce gisement. On observe cependant qu'une part croissante de ces effluents subit des transformations avant épandage, allant d'une simple séparation de phase à une digestion anaérobie, dont les conséquences sur la composition des produits et le stockage de C après retour au sol doivent être étudiés. D'autres produits organiques comme les boues d'épuration ne reviennent que partiellement au sol, le reste étant incinéré. Sous réserve que l'épandage puisse être fait sans risque de contamination des sols, il y a là un gisement supplémentaire de carbone qui pourrait être mobilisé pour accroître le stockage de C dans les sols. L'analyse bibliographique a par ailleurs confirmé l'intérêt, en termes de stockage additionnel de C, d'autres produits organiques comme les composts et les digestats. La mobilisation de nouvelles ressources comme les biodéchets et les déchets verts et leur transformation par compostage ou méthanisation permettraient d'augmenter les volumes produits et donc le retour au sol.

L'acceptabilité sociale des scénarios envisagés doit être soigneusement considérée. Enfin l'analyse tout juste esquissée dans le paragraphe précédent montre que la mobilisation de nouvelles ressources organiques pour accroître le retour au sol et le stockage de C a plusieurs conséquences susceptibles d'impacter le bilan gaz à effet de serre global des scénarios envisagés (émissions liées à la collecte et au transport des matières, effets de substitution par éventuelle production d'énergie, modification des apports d'engrais minéraux et des émissions associées, etc.). En termes d'atténuation du changement climatique le chiffrage du stockage additionnel de carbone lié à la mobilisation de ces nouvelles ressources organiques doit donc être complété par des informations sur les autres postes du bilan gaz à effet de serre global.

3 ANALYSE DU POTENTIEL DE STOCKAGE DE CARBONE SUR 4 TERRITOIRES DIFFERENTIES

L'objectif de cette analyse est de pouvoir évaluer la contribution des PRO, notamment d'origine urbaine et industrielle, à la séquestration du carbone dans différents contextes pédoclimatiques, systèmes agricoles, gisement de PRO disponibles.

Pour cela, quatre territoires différenciés sont étudiés :

- Un territoire de grandes cultures en contexte périurbain : Plaine de Versailles dans le département des Yvelines (région Ile-de-France)
- Un territoire d'élevage intensif de l'ouest de la France : Coglais marches de Bretagne dans le département de l'Ille-et-Vilaine (région Bretagne)
- Un territoire de polyculture élevage aux sols karstiques : Grand Figeac dans le département du Lot (région Occitanie)
- Un territoire viticole et contexte périurbain avec une forte contrainte d'épandage : Pays de l'Or et Pays de Lunel dans le département de l'Hérault (région Occitanie)

Chaque territoire fait l'objet d'une description de son contexte (climat, type de sol, système agricole, gisements de PRO) et d'une quantification du stockage de carbone, en situation connue actuellement et en situation alternative/prospective. Le modèle de référence pour les travaux sur le carbone, le modèle AMG, a été utilisé pour ces quantifications.

Le territoire Plaine de Versailles fait l'objet d'une analyse complémentaire d'autres impacts environnementaux (bilan GES, flux nutriments, flux ETM) et techniques (réserve utile, battance, main d'œuvre, économie), en plus du stockage de carbone. Ces analyses ont été conduites à partir de l'outil PROLEG de l'INRAE (Levavasseur et al., 2019).

3.1 Description des territoires

3.1.1 Plaine de Versailles

3.1.1.1 Contexte

La plaine de Versailles est un territoire périurbain à une quinzaine de kilomètres à l'ouest de Paris et en bordure nord-ouest de la ville de Versailles. Le territoire compte 140 000 habitants. Son périmètre est défini ici par celui des 28 communes adhérentes à l'association patrimoniale de la plaine de Versailles en 2018 et représente 24 000 ha. Son occupation du sol est agricole à 57 % tandis que les zones urbanisées en représentent 21% et encadrent également tout le territoire au nord (vallée de Seine), à l'est (métropole parisienne, Versailles) et au sud (Saint-Quentin-en-Yvelines).

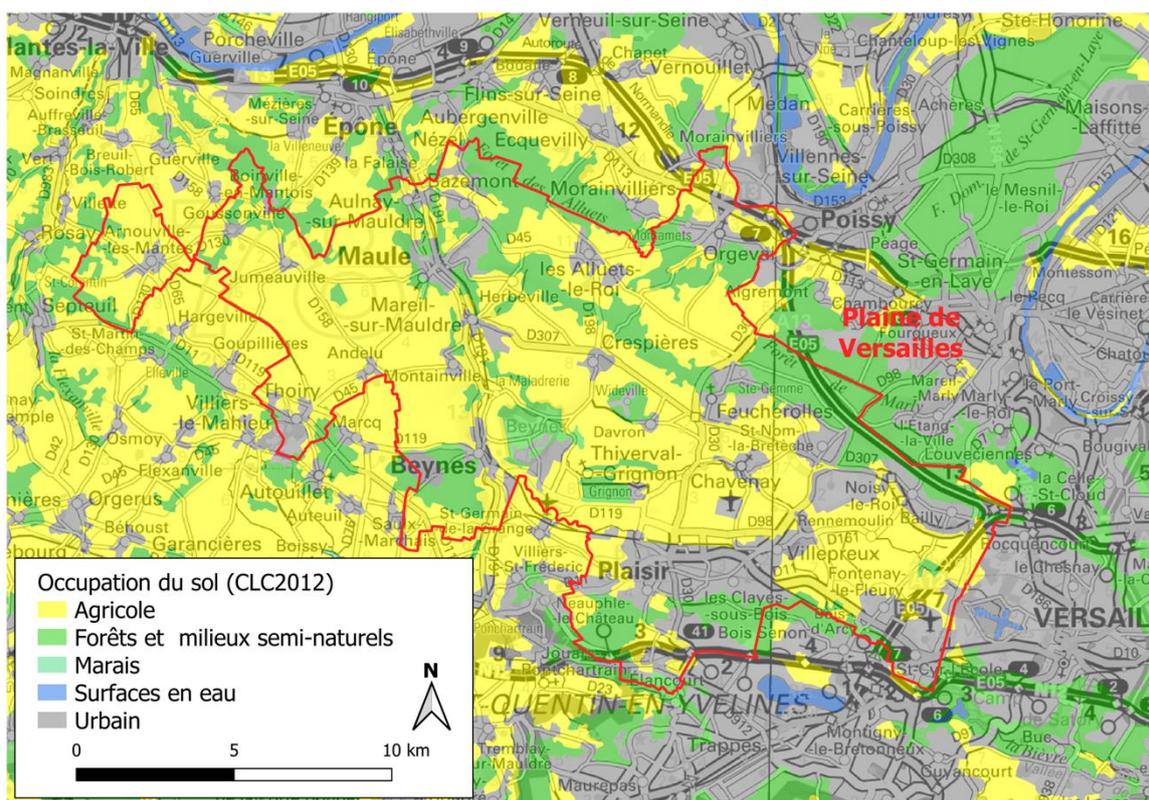


Figure 14 : Occupation du sol de la plaine de Versailles (Corine Land Cover 2012)

Le climat est tempéré océanique, avec une température moyenne annuelle de 11,5°C (moyenne 2000-2020, station de Trappes), des précipitations réparties de façon à peu près homogène dans l'année et pour un cumul annuel moyen de 686 mm. Le bilan hydrique simplifié (précipitations – évapotranspiration) est légèrement négatif (-95 mm).

La carte des sols simplifiée du territoire (Michelin *et al.*, 2012) fait apparaître deux grands types de sol cultivés :

- les luvisols (47% de la SAU), sols limoneux décarbonatés profonds situés sur les plateaux inférieurs et supérieurs, développés sur loess éolien,
- les rendosols et calcosols (36% de la SAU), majoritairement argilo-calcaires, de profondeur variable et pouvant contenir une proportion significative d'éléments grossiers sur tout le profil.

Les autres sols se rencontrent dans les pentes et thalwegs et ont des propriétés variées. Ils ne seront pas considérés dans cette étude. Les sols sont globalement assez pauvres en carbone (Zaouche *et al.*, 2017), avec une moyenne de 15 g C kg⁻¹ de sol, les luvisols étant les plus appauvris (Tableau 8). Les stocks correspondant peuvent être considérés assez faibles et représentatifs des stocks de carbone en zones de grandes cultures céréalières (Pellerin *et al.*, 2020).

Tableau 8 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols de la plaine de Versailles (Compilation RECORD 2022) (d'après Dhaouadi (2014), Noiroit-Cosson (2016) et Zaouche *et al.* (2017))

Sols	Rendosols et calcosols	Luvisols ¹
Argile (%)	23	15
Limons (%)	18	79
Sables (%)	14	6
Calcaire (%)	45	0
pH	8,3	6,9
Teneur en C (g/kg)	17,7	12,9
C/N	11	9,5

Densité apparente	1,4	1,35
Eléments grossiers (%)	0	27
Stock C (t C/ha)	43	46

¹ moyenne plateaux inférieurs et supérieurs

L'assolement de la plaine de Versailles est dominé par quelques grandes cultures : blé tendre d'hiver, colza d'hiver, orge d'hiver et de printemps et maïs grain, représentant 82% en moyenne des surfaces agricoles (Figure 15). Assez peu de spécificités par type de sol apparaissent à la résolution de la carte des sols, hormis pour quelques cultures minoritaires concentrées sur les sols limoneux des plateaux (betterave sucrière, pomme de terre, lin fibre). Les successions de culture typiques alternent une à plusieurs années de blé suivies éventuellement d'une seconde paille (orge d'hiver ou de printemps) et une culture de colza ou de maïs grain. Les intercultures longues (avant maïs grain ou orge de printemps par exemple) sont majoritairement couvertes (obligation réglementaire en zones vulnérables nitrates), par de la moutarde et/ou divers mélanges.

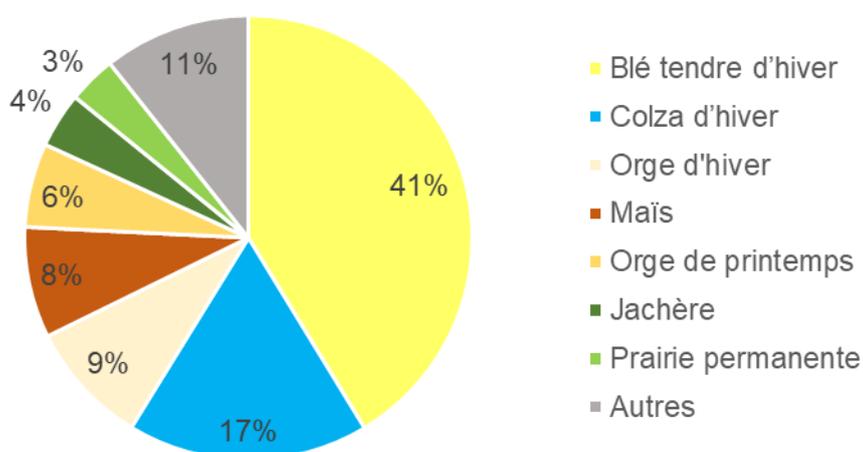


Figure 15 : Assolement moyen de la plaine de Versailles (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019)

Une centaine d'exploitations agricole ont leur siège dans les communes de la plaine (recensement général agricole 2010). Les modes de production sont majoritairement conventionnels avec cependant un développement récent de l'agriculture biologique (7% de la SAU en 2019). Le travail du sol reste largement majoritaire (plus de 95% de la SAU d'après des données internes INRAE) mais peut être simplifié (non-labour permanent ou occasionnel). Le labour étant généralement pratiqué à une profondeur de 25 cm environ. Les niveaux de rendement sont assez élevés, notamment dans les sols limoneux profonds (Tableau 9). Il résulte de ces objectifs de rendement élevé des besoins en nutriments (N, P, K...) importants. Les résidus de culture sont principalement restitués en lien avec le peu d'activité d'élevage dans le secteur et le souci des agriculteurs de restituer de la matière organique au sol (données internes INRAE), comme c'est plus globalement le cas en Ile-de-France (94% des pailles enfouies d'après le recensement agricole 2017).

Tableau 9 : Rendement moyen des cultures en plaine de Versailles (compilation RECORD 2022) (données internes ECOSYS et arrêté régional nitrates IDF)

Culture	Rendement (qx/ha aux normes)		
	Limon profond	Argilo-calcaire	Moyenne IDF
Colza	35-50	20-40	38
Blé	80-105	70-95	82
Maïs grain	100-110	70-90	99
Orge d'hiver	75-95	65-85	75
Orge de printemps	70-85	60-70	69

3.1.2 PRO : gisements disponibles, contraintes

Les gisements de PRO sur la plaine de Versailles sont assez bien connus (Moinard *et al.*, 2021). On ne s'intéresse ici qu'aux PRO produits sur la plaine (y compris exportés), pas aux PRO importés de territoires plus ou moins lointain (fientes, compost de lisier de porc, etc.) qui représentent par ailleurs des quantités limitées. Les PRO issus des activités urbaines et de loisirs dominant (Tableau 10) : compost de déchets verts (22 kt MB/an), boues de STEP (19 kt MB/an) et fumier de cheval (7 kt MB/an). Une partie du compost de déchets verts est amendé avec des protéines animales pour l'enrichir en éléments nutritifs (produit commercial Fertily). Ces deux produits restent cependant très proches du point de vue leur teneur et qualité de carbone et sont considérés ensemble dans cette étude. Les PRO d'élevage ne sont pas négligeables du fait de la présence d'un important élevage bovin laitier (et ovin viande). A l'heure actuelle, les biodéchets des particuliers ne sont pas collectés de façon sélective et sont incinérés. Le potentiel théorique et maximal de production de digestat de biodéchets est cependant important avec 68 kt MB an⁻¹. Même si l'évolution réglementaire vers l'obligation du tri à la source des biodéchets permettra la mobilisation de ces déchets actuellement incinérés, il apparaît peu réaliste que ce potentiel soit atteint à court terme. Ces digestats de biodéchets ne seront pas considérés dans la simulation du stockage de carbone permis par les PRO épandus actuellement en plaine de Versailles mais le seront dans l'évaluation d'un scénario alternatif.

Les PRO diffèrent à la fois par leur teneur en carbone (de 3 % MB pour le lisier bovin très dilué à 15% MB pour le fumier de cheval) et par la stabilité de celui-ci, estimé par l'indicateur de stabilité de la matière organique, ISMO (Lashermes *et al.*, 2009).

Tableau 10 : PRO actuellement produit ou prospectif sur la plaine de Versailles, leur teneur en carbone et indice de stabilité de la matière organique (compilation RECORD 2022)

PRO actuellement produit ou prospectif	Quantité moyenne annuelle produite (kt MB an ⁻¹) ¹	Teneur moyenne en C ² (% MB)	ISMO moyen ² (% C)
Compost de déchets verts	22,4	14,3	83
Boue de STEP	19,1	6,9	57
Fumier de cheval	7,4	14,5	54
Fumier bovin	3,9	13,0	63
Lisier bovin	6,1	3,0 ³	45 ⁴
Digestat de biodéchets ⁵	68	9,0	65 ⁴

¹ Moinard *et al.* (2021), ² Données moyennes internes INRAE ECOSYS pour les PRO de la plaine de Versailles, ³ Houot *et al.* (2014), ⁴ Levavasseur *et al.* (2020), ⁵ quantité potentielle maximale d'après Moinard *et al.* (2021)

Actuellement, le compost de déchets verts est majoritairement utilisé localement par les agriculteurs (Moinard *et al.*, 2021) pour entretenir ou relever la quantité de matière organique de leur sol. Il est épandu avant les semis d'automne ou sur CIPAN (Tableau 11). Les épandages de fumier de cheval suivent à peu près la même logique. Ils sont en partie épandus localement, l'autre partie ayant une destination incertaine (méthanisation lointaine...). A l'inverse, la plupart des boues de STEP sont exportées du territoire, soit pour être épandues plus loin, soit co-compostées avec des déchets verts (sans retour du compost sur le territoire). Cette situation semble due à la difficulté d'épandre des boues d'épuration à proximité des zones urbaines. Les boues épandues sur le territoire sont épandues en été avant les semis de colza ou de blé (suivi d'un enfouissement rapide), avec un objectif de chaulage pour les boues chaulées, ainsi que d'apport d'azote et de phosphore. Les effluents d'élevage bovin (fumier et lisier) sont valorisés localement sur les terres associées à la ferme de polyculture-

élevage qui les produit. Pour le lisier, les apports d'azote sont un des principaux objectifs, tandis qu'ils sont plus variés pour le fumier (apport de matière organique, de N, P...).

Tableau 11 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture de la plaine de Versailles (compilation RECORD 2022) (données internes ECOSYS)

PRO	Période d'apport	Objectif des agriculteurs	Dose et fréquence type ⁵
Compost de déchets verts	Été avant semis de cultures d'automne (colza, céréales) ou avant/sur CIPAN avant maïs	MO, P, K	20-30 t/ha tous les 3 à 5 ans
Boue de STEP	Été avant semis de cultures d'automne (colza, blé)	Chaulage, P, N	10-15 t/ha tous les 3-4 ans
Fumier de cheval	Été avant semis de cultures d'automne (colza, céréales) ou avant/sur CIPAN avant maïs	MO, P, K, recyclage ¹	15-30 t/ha tous les 4 ans
Fumier bovin	Avant CIPAN avant maïs	MO, N, P, K, recyclage ¹	30 t/ha tous les 4 ans
Lisier bovin	Été avant semis (colza, blé), sortie hiver (blé)	N, P, K, recyclage ¹	30-40 m ³ /ha tous les 2 ans
Digestat de biodéchets ²	Sortie hiver sur céréales	N, P, K	10-30 m ³ /ha tous les 3-4 ans

¹ recyclage = exutoire d'un « déchet » pour les agriculteurs également producteurs de PRO, ² hypothétique (pas encore de digestat)

Au-delà des contraintes évoquées précédemment concernant les odeurs liées aux épandages de boue, la présence de zones urbaines peut aussi contraindre les épandages réglementairement pour certains PRO en termes de distance aux habitations à respecter (arrêté boue de 1998, réglementation sanitaire départemental ou ICPE pour les effluents d'élevage...). La plupart des PRO ne sont cependant pas concernés (boues hygiénisées, compost de déchets verts). L'habitat est par ailleurs assez concentré, ce qui limite les contraintes. La présence de zones urbaines pourrait aussi être une contrainte à la circulation des camions transportant les PRO, même si ce point n'a pas été évalué spécifiquement en plaine de Versailles. Hormis la présence de zones urbaines, assez peu de contraintes sont présentes (Tableau 12).

⁵ Tous les PRO sont épandus. La fréquence indique seulement qu'ils ne sont pas épandus tous les ans sur la même parcelle

Tableau 12 : Contraintes à l'épandage en plaine de Versailles (0 : absence, + faibles, ++ moyennes à fortes, ? inconnues) (RECORD 2022)

Type de contraintes	Détails	Force de la contrainte
Zone péri-urbaine	Odeurs	++
	Interdiction réglementaire pour certains PRO à proximité des habitations, mais habitat assez concentré	+
	Circulation	?
Sols	Risque de lixiviation limité hormis pour les sols calcaires les plus superficiels	+
	Sols a priori non contaminés au préalable : teneurs en métaux (ou autres) a priori inférieures aux prescriptions réglementaires	0
Protection de l'eau	Interdiction à proximité des cours d'eau, mais réseau hydrographique peu développé	+
	Plusieurs aires d'alimentation de captage, mais périmètres de protection interdisant les épandages restreints	+
	Peu de zones humides limitant l'épandage (fond de vallée)	+
Autres zones protégées	Absence de zones protégées prescrivant l'épandage de boues en zone agricole	0
Assolement	Très peu de légumineuses interdisant les épandages de certains PRO	0 à +
Label de qualité	7% de la SAU en agriculture biologique, interdisant l'épandage de boues urbaines	+
	Très peu de productions légumières à cahier des charges pouvant limiter les épandages (boues notamment)	0 à +
Zone vulnérables nitrates	Calendrier d'épandage et dose maximale à respecter pour les effluents d'élevage (170 kg N ha ⁻¹)	+

3.1.2.1 Synthèse des points clés

La plaine de Versailles est un territoire agricole périurbain, orienté principalement vers les grandes cultures. Les sols y sont assez pauvres en matière organique et les besoins des cultures en nutriments y sont élevés (systèmes assez intensifs). Les gisements de PRO sont principalement issus des activités urbaines ou de loisirs. Les principales contraintes à l'épandage sont la proximité de zones urbanisées (odeurs, etc.).

3.1.3 Coglais Marche de Bretagne

3.1.3.1 Contexte

Le territoire du Coglais désigne la communauté de communes « Coglais marche de Bretagne » qui regroupe 11 communes sur une surface totale de 170 km² dans le département d'Ille et Vilaine. Cette communauté de communes est maintenant intégrée dans l'intercommunalité Couesnon Marches de Bretagne. L'occupation du sol est très largement agricole (92%).

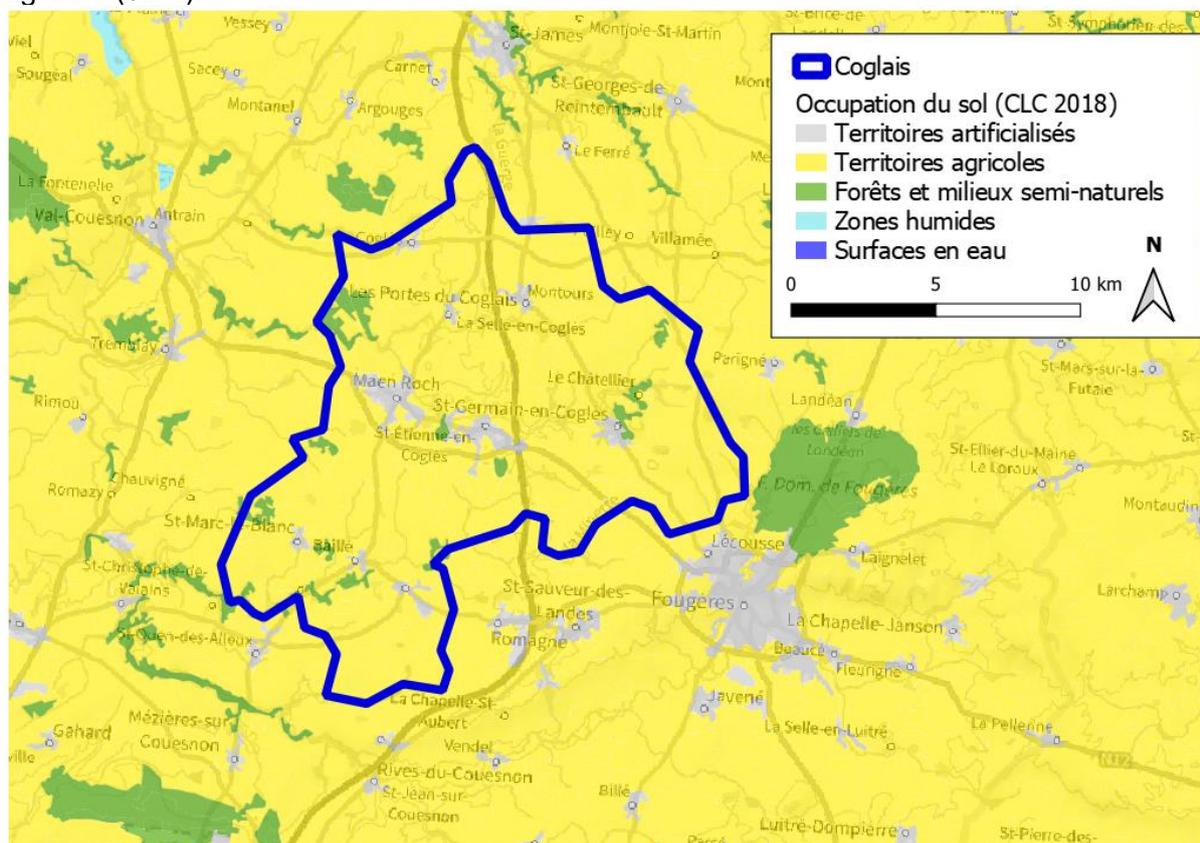


Figure 16 : Occupation du sol sur le territoire du Coglais (Corine Land Cover 2018)

Le climat est océanique doux caractérisé par une faible amplitude thermique annuelle et une moyenne de 11,9 °C (moyenne 2000-2020, station de Rennes), une pluviométrie cumulée de 734 mm en moyenne annuelle. Le bilan hydrique simplifié (précipitations – évapotranspiration) est légèrement positif (26 mm). Le territoire d'étude étant plus proche de la côte et un peu plus en altitude que la station de Rennes prise en référence, le climat peut y être légèrement différent.

Deux substrats géologiques prédominent : le socle granitique appartenant au massif armoricain ainsi qu'un substrat schisteux (schiste briovérien) pour une partie nord-ouest du Coglais. A l'est le relief est accidenté avec de fortes pentes supérieures à 5% et plus, également ponctuellement dans l'ensemble du territoire. Trois principaux types de sol sont représentés (Girault *et al.*, 2019) :

- un néoluvisol peu lessivé profond développé sur limons profonds, qui occupe 45% du territoire,
- un brunisol moyennement profond développé sur granite, qui occupe 22% du territoire,
- des sols hydromorphes de bord de cours d'eau occupés par des prairies permanentes (11% du territoire, non considérés ici).

Ces sols sont riches en carbone (> 15 g/kg), en lien avec les quantités importantes de PRO épandues et l'insertion de prairies temporaires dans les successions.

Tableau 13 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols du Coglais (Houot et al., 2021)

Sols	Brunisol	Néoluvisol
Argile (%)	13	14
Limons (%)	36	63
Sables (%)	51	22
Calcaire (%)	0	0
pH	5,6	5,8
Teneur en C (g/kg)	19,2	16,9
C/N	10 ^a	10 ^a
Densité apparente	1,35 ^b	1,35 ^b
Eléments grossiers (%)	5	0
Stock C (t C/ha)	62	57

^a données manquantes, moyenne usuelle retenue. ^b données manquantes, estimation avec une fonction de pédotransfert (Cousin et al., 2018)

L'activité agricole du Coglais est largement dominé par l'élevage. Plus de la moitié des exploitations agricoles (60%) est spécialisée en bovin lait comme seul atelier animal, 40% sont mixtes avec un atelier bovin viande, volailles ou porcs supplémentaire. Les exploitations ont une SAU moyenne de 36 ha (pour une moyenne départementale de 46 ha). L'assolement (Figure 2.2) reflète la vocation d'élevage (% SAU totale) : 43% de surface en prairies (temporaires et permanentes), 28% de maïs ensilage, 15% de céréales d'hiver (blé et orge). La surface en prairie est nettement supérieure à la moyenne départementale qui est de 28% alors que la surface en céréales est plus faible (27% sur le département). Le territoire étant classé zones vulnérables nitrates, les intercultures longues sont réglementairement couvertes, soit par des CIPAN (moutarde notamment) ou par des cultures dérobées (ray grass italien) pour la production de fourrage. Les successions de culture types sont maïs-blé, la monoculture de maïs, et des combinaisons avec de ces dernières avec plusieurs années de prairies temporaires. Hormis les sols hydromorphes, les types de sol n'impactent pas le choix des cultures, ni des itinéraires techniques. Le morcellement du parcellaire est un déterminant de ces choix plus important.

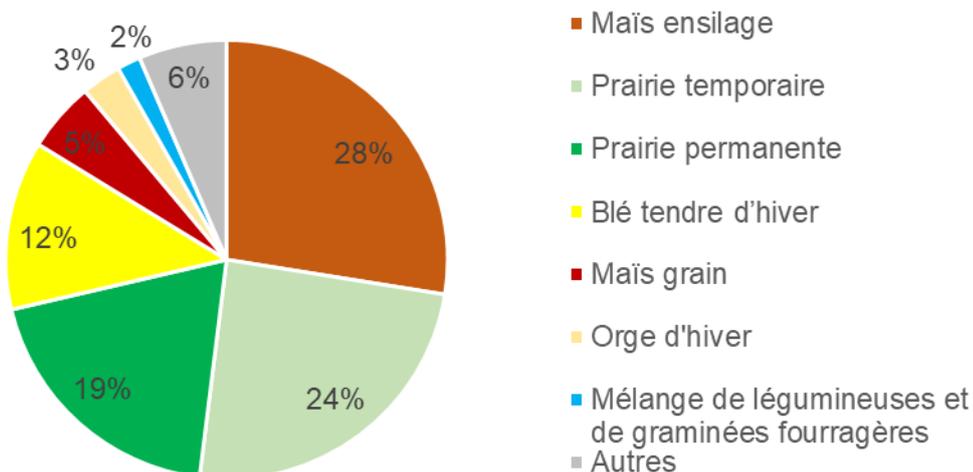


Figure 17 : Assolement moyen du Coglais (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019)

Les modes de production sont majoritairement conventionnels, avec un part de la SAU en agriculture biologique de 5 à 10% en 2017 (source : DRAAF Bretagne). Le travail du sol reste largement majoritaire mais peut souvent être simplifié (non-labour pour l'implantation des prairies et du blé). Les niveaux de rendement sont assez élevés, notamment dans les sols limoneux profonds (Tableau 9). Les pailles de céréales sont exportées pour la litière des animaux.

Tableau 14 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Coglais (Houot et al., 2021)

Culture	Rendement moyen
Blé	81 qx/ha (15% h)
Maïs ensilage	16 t MS/ha
Prairie temporaire	6 t MS/ha

3.1.3.2 PRO : gisement disponibles, contraintes

Les gisements organiques sont majoritairement d'origine agricole avec essentiellement du fumier de bovins et du lisier de porc ou de bovins épandus à l'état brut, ou issus d'industrie agroalimentaire liée à l'élevage comme les abattoirs. Les boues de station d'épuration ne représentent qu'une faible part du gisement et font l'objet de plan d'épandage. Un projet de méthanisation existe sur le territoire depuis de nombreuses années et devrait voir le jour prochainement. L'unité de méthanisation en projet traitera 32 kt MB/an de déchets, principalement des fumiers et lisiers et des boues d'IAA. Un scénario alternatif de ressource en PRO considérant ce méthaniseur sera évalué en termes de stockage de C.

**Tableau 15 : PRO du Coglais (compilation RECORD 2022)
(outil Bacus Solagro, Levavasseur et al. 2020)**

PRO actuellement produit ou prospectif	Quantité moyenne annuelle produite (kt MB an ⁻¹)	Teneur moyenne en C (% MB)	ISMO moyen ³ (% C)
Fumier bovin	96,7	10,1	64
Lisier bovin	28,9	3,8	45
Lisier porcin	28,9	3,8	55
Boues IAA	23,5	5,6	54
Boues STEP	4,7	6,0	46
Compost de DV	0,9	25,8	82

³ Levavasseur et al. (2020)

Le fumier bovin est majoritairement épandu avant les semis de maïs (et enfoui par un travail superficiel) à une de 30 t an⁻¹ (Tableau 16). Il se substitue généralement complètement à la fertilisation minérale du maïs. Le lisier et les boues sont principalement apportées en sortie d'hiver sur prairies ou dérobées, avant les semis de maïs ou sur maïs, et dans une moindre mesure en sortie d'hiver sur blé.

Tableau 16 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Coglais (RECORD 2022)

PRO	Période d'apport	Dose type
Fumier bovin	Avant les semis de maïs	30 t/ha
Lisier bovin	1 ^{er} apport en sortie d'hiver sur prairies, sortie d'hiver sur dérobées ou sur maïs	30-40 m ³ /ha
Lisier porcin		30-40 m ³ /ha
Boues d'abattoir	1 ^{er} apport en sortie d'hiver sur céréales ou prairies, apport sur maïs	Non défini
Boues de laiterie		

Diverses contraintes à l'épandage sont présentes sur le territoire (Tableau 17), que ce soit en termes de parcellaire, de protection de la ressource en eau, de réglementation, etc. De ces contraintes à l'épandage, il résulte une proportion de la SAU apte à l'épandage variant entre 53 % et 98 % de la SAU totale (sur 11 exploitations enquêtées du territoire).

Tableau 17 : Contraintes à l'épandage du Coglais (0 : absence, + faibles, ++ moyennes à fortes, ? inconnues) (RECORD 2022)

Type de contraintes	Détails	Force de la contrainte
Petites parcelles et parcellaire morcelé	Contrainte logistique à l'épandage	?
Sols	Risque de lixiviation limité hormis pour les sols les plus superficiels	+
	Sols a priori non contaminés au préalable : teneurs en métaux (ou autres) a priori inférieures aux prescriptions réglementaires	0
Protection de l'eau	Interdiction à proximité des cours d'eau : réseau hydrographique dense	++
	Zone d'alimentation en eau potable de la ville de Rennes. 16 périmètres de protection concernant principalement des prairies	+
	Nombreuses zones humides (7%)	++
Autres zones protégées	Absence de zones protégées prescrivant l'épandage de boues en zone agricole	0
Assolement	Très peu de légumineuses interdisant les épandages de certains PRO	0 à +
Label de qualité	5 à 10% de la SAU en AB, interdisant l'épandage de boues	+
	Très peu de productions légumières à cahier des charges pouvant limiter les épandages (boues notamment)	0 à +
Zones vulnérables nitrates	Calendrier d'épandage et dose maximale à respecter pour les effluents d'élevage (170 kg N ha ⁻¹)	+
	Certaines portions du territoire sont classées en Zone d'action complémentaire et Zones d'action renforcée avec des contraintes supplémentaires comme l'interdiction de fertiliser des parcelles suite à un retournement de prairie de plus de 3 ans ou la limitation de la fertilisation azotée organique et minérale à 210 kgN/ha	+
	Obligation pour certains élevages d'exporter ou de traiter les effluents d'élevage.	+
Pâturage	Délai de retour du troupeau à respecter après un épandage	

3.1.3.3 Synthèse des points clés

La communauté de communes du Coglais est un territoire rural marqué par l'activité d'élevage, principalement bovin laitier. Cette importance de l'élevage se traduit dans l'assolement dominé par les prairies et le maïs ensilage et dans l'important gisement de PRO constitué principalement d'effluents d'élevage (fumier et lisier) et d'industrie agro-alimentaires (laiterie, abattoir). Les sols y sont assez riches en matière organique. Les contraintes principales à la valorisation des PRO sont les excédents et les risques de pollution de la ressource en eau qui est un enjeu fort sur ce territoire.

3.1.4 Grand Figeac

3.1.4.1 Contexte

Le territoire du Grand Figeac désigne la communauté de communes du Grand Figeac qui regroupe 92 communes sur une surface totale de 1282 km² et 45 066 habitants. Elle est majoritairement située dans le département du Lot, ainsi que dans le département de l'Aveyron.

Situé à proximité du Parc Naturel Régional des Causses du Quercy, le territoire du Grand-Figeac est principalement rural : l'Agriculture prédomine sur ce territoire avec 50% des surfaces du territoire, marqué par des surfaces importantes en prairies et peu de terres labourables. La forêt occupe également près de la moitié du territoire (41%). Enfin le territoire n'est que très peu urbanisé avec seulement 1% des surfaces artificialisées.

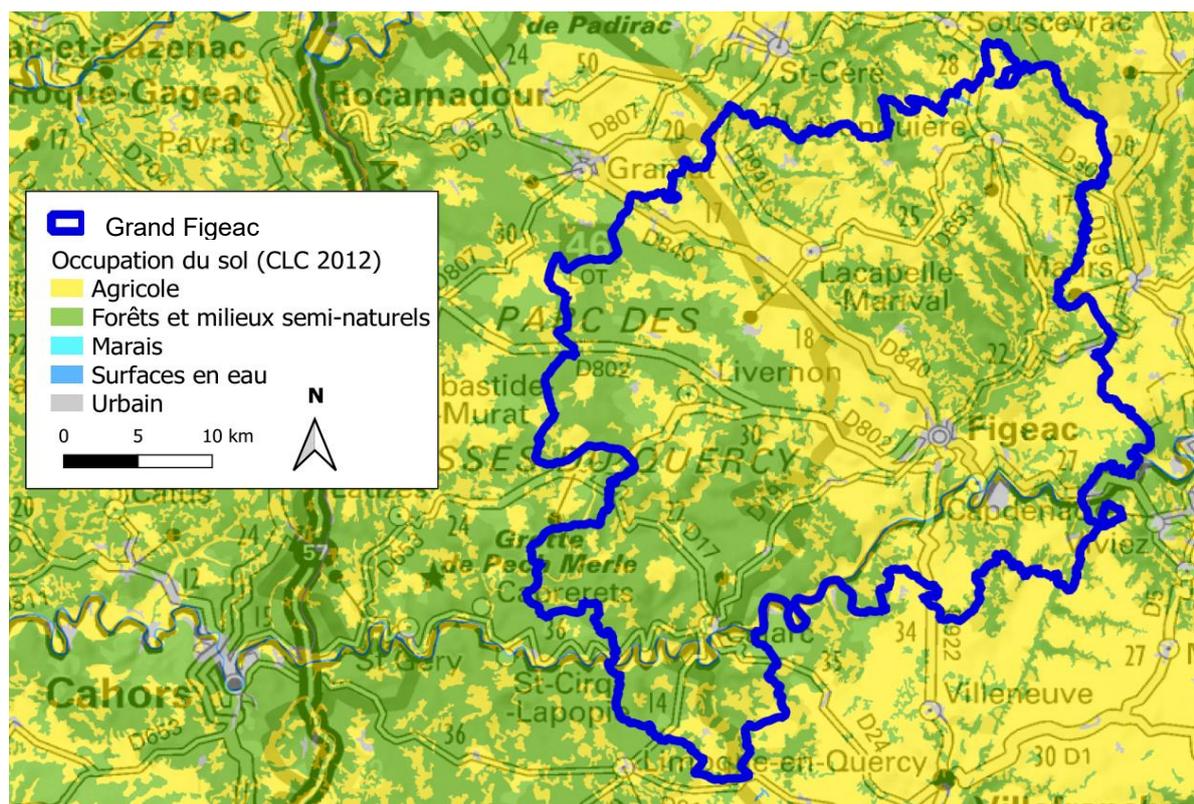


Figure 18 : Occupation du sol sur le territoire du Grand Figeac (Corine Land Cover 2012)

Le climat est océanique altéré, avec une moyenne de 12,3°C et une pluviométrie cumulée de 1009 mm en moyenne annuelle (climate-data.org). Le bilan hydrique simplifié (précipitations – évapotranspiration) est légèrement positif.

Le territoire est situé à l'interface entre plusieurs régions naturelles :

- Les Causses : plateaux calcaires avec aquifère karstique à l'Ouest ;
- La Limargue : collines bocagères au Nord-Ouest ;
- Le Ségala : paysage montagnard avec du Massif Central au Nord.

Deux grands types de sols sont présents sur le territoire :

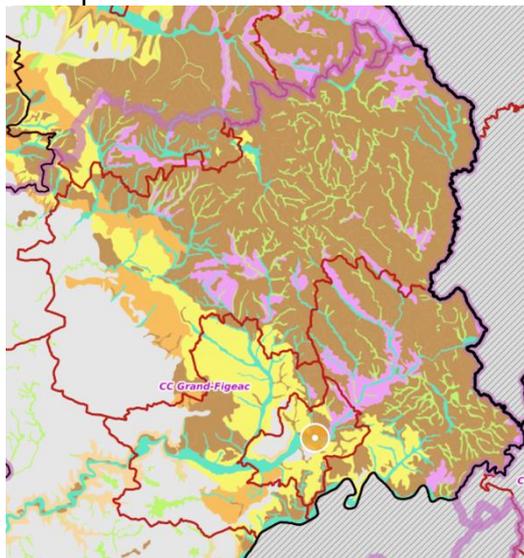


Figure 19 : Carte des sols du territoire (géoportail.fr)

Les sols acides sableux à sablo-limoneux (marron) dans les pentes moyennes et bas de pentes principalement agricole et caillouteux en forte pente (rose) principalement forestier sur schistes et micaschistes du Ségala :

- Sols pauvres et acides favorables à la culture du seigle,
- Sols peu filtrants
- Risques d'érosion et de lixiviation

Les sols calcaires (jaune) sur les pentes faibles et les sols calciques (marron clair) sur les secteurs plats :

- En contrebas des plateaux calcaires (Causses du Quercy)
- Sol filtrant
- Sensible à l'érosion

Tableau 18 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) des sols retenus pour la modélisation sur le secteur du Grand Figeac (Compilation RECORD 2022) (données d'analyses de sols de 2 parcelles du Grand Figeac, données internes Solagro)

Sols	Limon argileux	Limon argileux
Argile (%)	28,3	18,8
Limons (%)	19	18,2
Sables (%)	44,7	63
Calcaire (%)	0	0
pH	5,8	6,1
Teneur en C (g/kg)	2,4	2,2
C/N	10,5	10,2
Densité apparente	1,3	1,3
Eléments grossiers (%)	10	20
Stock C (t C/ha)	71	57

Les ressources en eaux souterraines du département du Lot dépendent principalement de l'aquifère principal du Jurassique moyen et supérieur. Il couvre près de 80 % de la surface du département, dont environ 25 % sont visibles à l'affleurement et 75 % sous recouvrement.

Les réserves en eau sont importantes, mais le fonctionnement karstique rend le captage et l'exploitation complexe. 68% des prélèvements sont destinés à l'adduction d'eau potable, puis à l'agriculture (29%), et l'industrie (3%). Les eaux souterraines sont carbonatées et calciques pour les aquifères du Jurassique plus sulfatés dans l'aquifère semi-captif du Lias. Un impact anthropique est observé sur plusieurs sources, notamment au niveau des teneurs en nitrates.

L'agriculture du territoire est marquée par des exploitations d'élevage et de polyculture élevage avec des fermes principalement orientées vers l'élevage bovin lait et bovin viande. L'agriculture conventionnelle est prédominante sur le territoire, à titre d'exemple, seulement 3,7% de la SAU du Lot est en Agriculture Biologique (AB). Globalement les orientations techniques de fermes (élevage) les filières et les modes de productions associés (conventionnel) ne sont pas limitants pour l'usage des PRO.

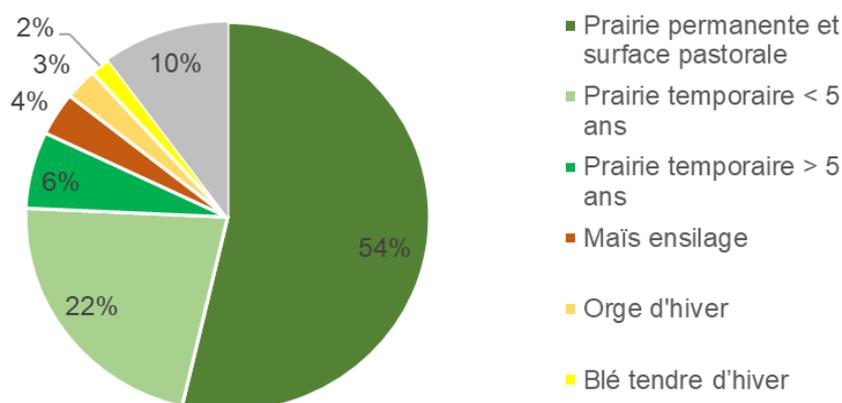


Figure 20 : Assolement moyen du Grand Figeac (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019)

L'assolement est largement dominé par les prairies avec 84% de la SAU dont 28% de prairies naturelles, 25% de prairies temporaires et 31% de surfaces toujours en herbes hors exploitation (collectif et hors champs). Les céréales n'occupent que 10% de la SAU.

Les systèmes de cultures dépendent fortement du type de sol :

Sur les limons argileux : prairies permanentes ou prairies temporaires en rotation avec des fourrages (ray grass) et des céréales (blé, orge, maïs)

Sur les limons : monoculture de maïs ou céréales (maïs, blé, orge, triticales) en rotation avec un fourrage

Tableau 19 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Grand Figeac (Houot *et al.*, 2021)

Culture	Rendement moyen
Blé	60 qx/ha (15% h)
Orge d'hiver	65 qx/ha (15% h)
Maïs ensilage	10 t MS/ha
Prairie temporaire	5 t MS/ha
Prairie permanente	4, t MS/ha

PRO : gisements disponibles, contraintes

Les déjections animales

Sur le territoire du Grand Figeac, le potentiel pour les fumiers, lisiers et fientes est estimé à 550 000 tMB/an :

- 500 000 t MB/an de fumier
- 45 000 t MB de lisier
- 4000 t MB de fientes

La coopérative agricole Fermes de Figeac est un opérateur important avec 600 adhérents, essentiellement éleveurs de bovins lait et vaches allaitantes sur le territoire du Pays de Figeac. La coopérative développe la méthanisation en accompagnement 4 collectifs d'agriculteurs :

- Haut Ségala Bioénergie (11 exploitations)
- Sud Ségala Bioénergie (7 exploitations)
- Limargue Bioénergie (11 exploitations)
- Viazac Bioénergie (4 exploitations)

Les 4 projets permettront de traiter environ 60 000 tonnes de matières agricoles et locales essentiellement à base d'effluents d'élevage (fumiers / lisiers) et 10% de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE).

Les déchets

La gestion des déchets sur le territoire du Grand-Figeac est réalisée le Syndicat SYDED du Lot.

Le potentiel global est estimé 22 400 t/an (Estimation Solagro). Ce potentiel s'appuie sur le taux de collecte observé par les collectivités, les données des interprofessions. Le potentiel est décomposé ainsi :

- Biodéchets (ménages, GMS, restauration collective) : 4700 t/an
- Déchets IAA : 8000 t/an
- Déchets verts : 9000 t/an

Les boues urbaines

C'est le Syndicat SYDED du Lot qui porte l'épandage des boues sur le territoire. Les boues sont compostées pour les 2 plus grosses stations d'épuration : Figeac et Capdenac (20 kEH). Pour les autres l'épandage se fait directement sans compostage. Le potentiel total du territoire est d'environ 300 t MS/an, soit environ 1200 t/an de boues d'après le portail assainissement 2019.

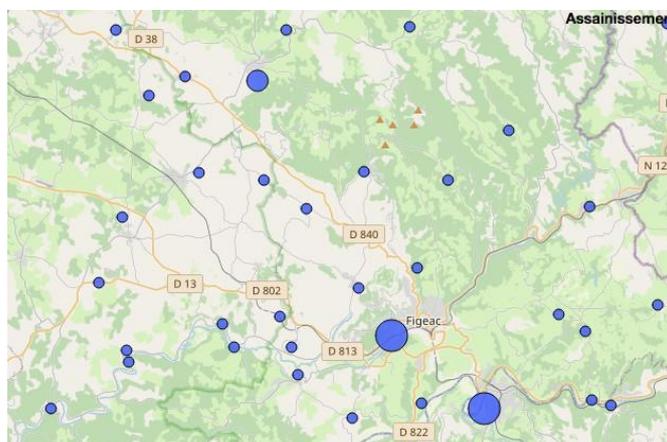


Figure 21 : Localisation des stations d'épuration sur le territoire du Grand Figeac (Portail Assainissement)

Synthèse des PRO utilisés sur le territoire

Les gisements organiques sont majoritairement d'origine agricole avec essentiellement du fumier de bovins épandus à l'état brut. Les boues d'épuration et les déchets verts sont compostés mais leur gisement reste faible vis-à-vis des déjections animales. Des projets de méthanisation sont en cours de mise en œuvre sur le territoire, un scénario alternatif de ressource en PRO considérant ces méthaniseurs sera évalué en termes de stockage de C.

**Tableau 20 : PRO du Grand Figeac (Compilation RECORD 2022)
(Outil Bacus Solagro, entretiens d'acteurs réalisés en 2021)**

PRO actuellement produit ou prospectif	Quantité moyenne annuelle épandue (kt MB/an)
Fumier bovin compact	550
Lisier bovin	45
Fientes / fumier volaille	4
Compost Déchets Verts + boues	1,5
Compost Déchets verts	3,8

Il n'y a pas vraiment de filières limitants l'usage des PRO.

Le fumier bovin est majoritairement épandu avant les semis de maïs (et enfoui par un travail superficiel) à une dose de 30 t an⁻¹ (Tableau 21). De la même manière que pour le lisier, l'apport de fumier ne se substitue pas aux engrais minéraux qui viennent compléter la fertilisation (entre 25 et 40 unités pour les apports d'ammonitrate).

Tableau 21 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Grand Figeac (RECORD 2022)

PRO	Période d'apport	Dose type
Fumier bovin	Avant les semis de maïs	20 à 30 t/ha
Lisier bovin	1 ^{er} apport en sortie d'hiver sur prairies, ou sur céréales	40 m ³ /ha
Digestat liquide	Épandage au plus proche des besoins, après la coupe de ray gras ou avant maïs, après chaque coupe d'herbe).	22 t/ha
Digestat solide	Épandage en sortie d'hiver comme un lisier)	9,9 t/ha
Compost de boues urbaines	Avant le semis du premier maïs	14 t/MS/ha
Compost de déchets verts	Sur la première interculture de raygrass	35 t/ha

Synthèse des points clés, proposition de scénario

Le territoire du Grand-Figeac est marqué par la présence de l'élevage avec une prédominance des surfaces en prairies permanentes et peu de cultures. Le contexte pédologique et hydrologique, notamment le système karstique en font un territoire vulnérable d'un point de vue de la qualité de l'eau. L'élevage et le maintien des prairies sur les zones à risques (sols peu filtrant, parcelles en pente) permet de garantir un bon niveau de protection de la ressource.

3.1.5 Pays de l'Or et Pays de Lunel

Contexte

Le Pays de l'Or et de Lunel sont 2 communautés de communes situées dans le département de l'Hérault (34). Les deux territoires sont situés du côté Est de Montpellier, composées de 22 communes, représentant 311 km² et de 91 160 habitants :

- Pays de Lunel 14 communes, 46 618 habitants
- Pays de l'Or 8 communes, 44 542 habitants

L'occupation du sol (terrestre) est majoritairement agricole (60%) (Figure 22).

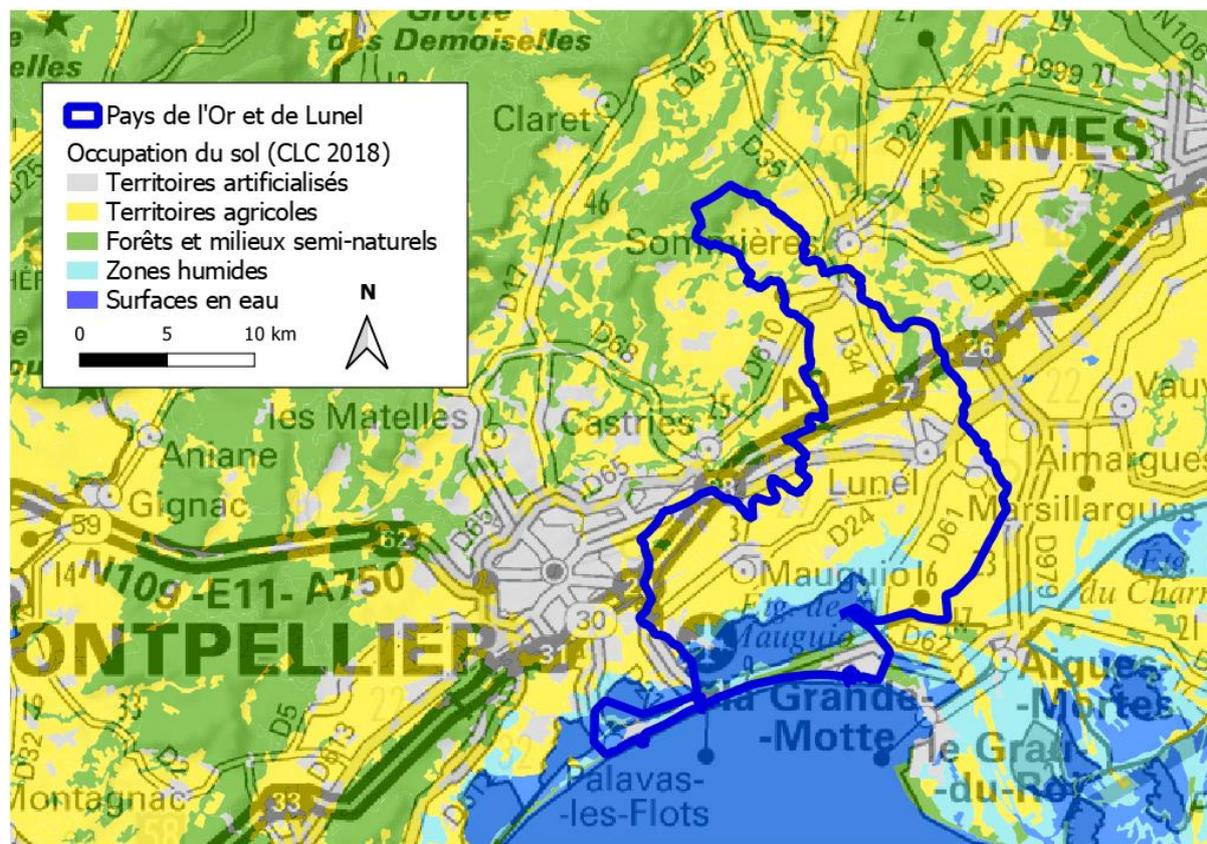


Figure 22 : Occupation du sol sur le territoire du Pays de l'Or et du Pays de Lunel (Corine Land Cover 2018)

Le climat du territoire est tempéré chaud typique de la région méditerranéenne avec une température annuelle moyenne de 15 °C et 735 mm de précipitation annuelles en moyenne. Le bilan hydrique est largement déficitaire.

On observe 3 grands types de sols sur le territoire qui est pars ailleurs très plat dans un contexte de plaine alluviale :

- Les alluvions de la plaine alluviale (bleu vert), Villfranchienne (rouge), anciens marécages asséchés (vert clair). On y trouve des vergers, vignes et grandes cultures. Ce sont des sols fertiles, riches en limons
- Les glacis colluviaux et buttes-temoins (vert). Ce sont des sols dépourvus de nappe d'eau souterraine.
- Les replats et plateaux peu vallonnés sur calcaires tendres à lits marneux et calcaires en plaquettes (jaune). On y trouve des garrigues, parcours et vignobles. Ce sont des sols filtrant, sensibles à l'érosion.

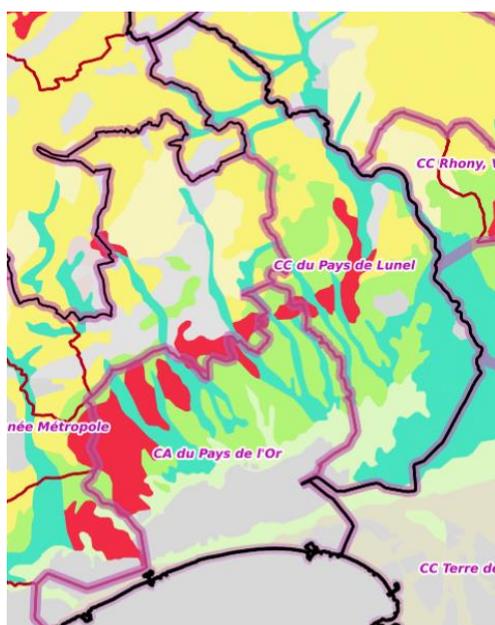


Figure 23 : carte des sols du territoire (géoportail.fr)

Le sol retenu pour la modélisation est un limon argilo-sableux profond de bord d'étang (Tableau 22).

Tableau 22 : Caractéristiques moyennes de l'horizon de surface (0-25 cm) du sol retenu pour la modélisation sur le secteur d'Or et Lunel (RECORD 2022)

Argile (%)	28,6
Limens (%)	30,4
Sables (%)	41,0
Calcaire (%)	0
pH	7,5
Teneur en C (g/kg)	0,4
C/N	7,3
Densité apparente	1,3
Eléments grossiers (%)	0
Stock C (t C/ha)	13

Situé à proximité de la métropole de Montpellier, les deux territoires sont typiques de territoires péri-urbains. Les espaces urbanisés représentent une part importante avec 14% des surfaces, avec des communes de tailles différentes répartie de manière homogène sur le territoire.

A titre d'exemple, le Pays de l'Or est considéré comme le « jardin de Montpellier » : plus de 50% de ses terres sont dédiées à l'agriculture, ce qui représente 3 000 emplois directs sur le territoire.

L'agriculture du territoire est très diversifiée avec principalement de la viticulture, et des grandes cultures (céréales et oléo protéagineux). Globalement, même si on a 26% de prairies, l'élevage est peu présent sur le territoire, ce sont plutôt des espaces valorisés de manières extensive par les manades camarguaises. On note également la présence de filières nourricières tels que le maraîchage et l'arboriculture.

A l'échelle du département de l'Hérault, 15,5% de la SAU est cultivée en Agriculture Biologique. Cela s'explique notamment par la présence des vignes et vergers

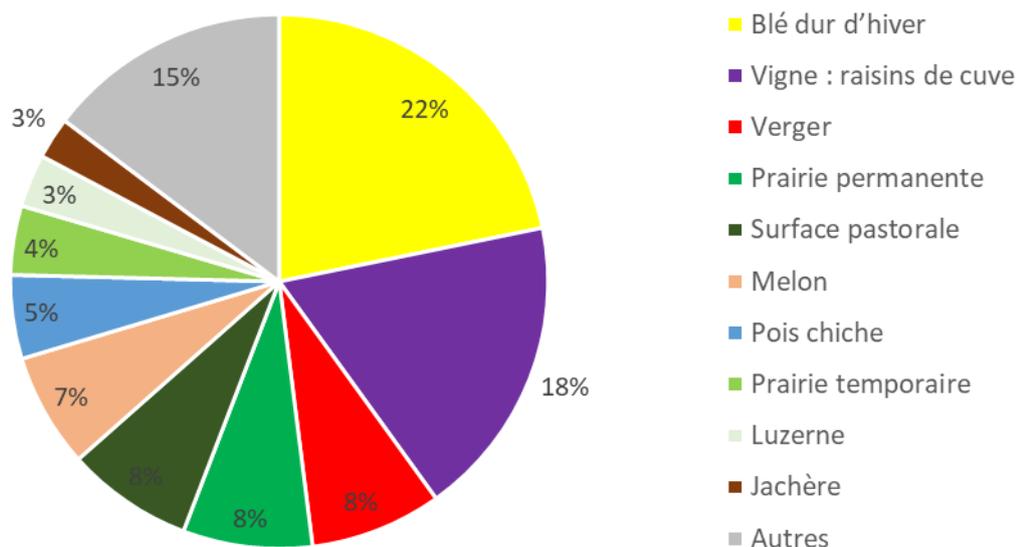


Figure 24 : Assolement moyen des Pays de l'Or et de Lunel (moyenne registre parcellaire graphique 2015 – 2019)

Tableau 23 : Rendement moyen des cultures sur le territoire du Pays de l'Or et de Lunel (Houot et al., 2021)

Culture	Rendement moyen
Blé dur d'hiver	40 qx/ha (15% h)
Pois chiche	15 qx/ha (15% h)
Orge d'hiver	50 qx/ha (15% h)

PRO : gisement disponibles, contraintes

Les PRO présents sur le territoire et a priori déjà valorisés sont les suivants (potentiel Solagro) :

- Effluents d'élevage :
 - Fumier bovin : 5 000 t MB/an (10% C)
 - Fumier équin : 2 700 t MB/an (19% C)
 - Fientes de volaille : 650 t MB/an (24% C)
- Déchets urbains (potentiel Solagro) :
 - Boues de STEP non compostées : 3280 t MB/an (6 % C)
 - Compost de déchets verts et de boues : 4000 t MB/an (12% C)
 - Compost de déchets verts : 500 t MB/an (26% C)

Au niveau de l'Hérault on note 15,5 % de la SAU en AB et une complexité à valoriser les PRO d'origine urbaine ou industrielle en maraîchage. Les PRO urbains ou industriels sont principalement valorisés en grandes culture (sur le blé dur) et un peu en viticulture (plutôt les composts de déchets verts).

Le fumier bovin est majoritairement épandu sur les prairies ou avant les semis des céréales d'hivers ou cultures de printemps. Les boues ou compost de boues sont principalement valorisés sur le blé dur avant le semi ou en viticulture en sortie d'hiver.

Les boues urbaines sont pour la moitié compostées et pour l'autre moitié épandues.



Figure 25 : Localisation des stations d'épuration sur le territoire du Pays de Lunel et d'Or. (Portail Assainissement)

Tableau 24 : Insertion des PRO dans les systèmes de culture du Pays de l'Or et Pays de Lunel (RECORD 2022)

PRO	Période d'apport	Dose type
Fumier bovin	1 apport en sortie d'hiver sur prairies, sortie d'hiver sur céréales	30 t/ha
Fumier équin		30-40 m ³ /ha
Fientes de volailles		Entre 4 et 11 t/ha selon % de MS
Boues de STEP	1 apport avant le semis de blé dur à la mi-septembre	2 tMS/ha
Compost de boues de STEP		14 t/MS/ha

Sur le territoire du pays de l'Or et de Lunel, les boues et compost de boues sont épandus sur 150 à 200 ha selon les années.

Afin de mesurer l'impact de la proximité de ce territoire de zones plus denses et productrices de biomasse (boues urbaines, déchets vert, déchets des IAA), et au vu de l'importance relative des grandes cultures sur le territoire, un scénario alternatif sera étudié. Ainsi, on considérera en scénario alternatif un possible import de composts de déchets verts et de boues des territoires urbains voisins (métropole de Montpellier par exemple), pour un total de 17 600 t MB/an, correspondant au potentiel maximal estimé d'importation dans de bonnes conditions agronomiques (délai de retour et dose, hors surface en AB). On considérera également l'importation de digestat de biodéchets et de boues d'IAA en relation avec un projet de méthaniseur au nord du territoire (hypothèse de 10 000 t MB/an, 1% C).

Synthèse des points clés

Le territoire du Pays de Lunel et d'Or est marqué par sa localisation sur le littoral de la méditerranée en bordure du delta du Rhône et de la Camargue gardoise.

Ce territoire très proche de la métropole de Montpellier est fortement peuplé, avec également une saisonnalité forte via la présence des stations balnéaires. La forte diversité des productions agricoles notamment du maraîchage, et la forte présence d'exploitations labélisées bio peut complexifier l'épandage des boues urbaines.

Le réseau hydraulique des plateaux calcaires s'écoule dans la plaine agricole avant de se jeter dans les étangs et marais côtiers. L'aquifère du territoire est sensible aux pollutions agricoles et urbaines.

3.2 Description de la méthode d'analyse

3.2.1 Potentiel de stockage de C à l'échelle du territoire avec les formalismes d'AMG

Afin d'estimer le potentiel de stockage de carbone des PRO, les formalismes du modèle AMG ont été mobilisés (Andriulo *et al.*, 1999). AMG a été utilisé pour plusieurs raisons :

- Ses performances pour la prédiction des stocks de carbone du sol ont été étudiées récemment dans une grande diversité de contextes pédoclimatiques et de systèmes de culture (Clivot *et al.*, 2019) et notamment pour des systèmes utilisant des PRO (Levavasseur *et al.*, 2020). La qualité de prédiction est jugée satisfaisante, du même ordre que l'erreur de mesure des stocks de carbone (Clivot *et al.*, 2019).
- AMG est maintenant proposé comme modèle de référence pour la simulation des stocks de carbone dans le Label Bas Carbone.
- L'unité ECOSYS maîtrise ce modèle et participe à son développement et au consortium AMG..

AMG est un modèle de simulation des stocks de carbone organique du sol au pas de temps annuel. Il comprend 3 compartiments de carbone organique (Figure 26) :

- le carbone frais apporté par les résidus aériens et racinaires des cultures et par les PRO,
- le carbone organique humifié divisé en deux compartiments :
 - un compartiment de carbone actif (Ca) ;
 - un compartiment de carbone stable (Cs) qui est considéré totalement inerte à l'échelle du siècle.

Le compartiment actif est le seul à être alimenté par les apports de carbone frais et affecté par la minéralisation annuelle. L'efficacité de conversion des apports de carbone frais en carbone humifié, noté h est appelé coefficient d'humification. Il dépend uniquement de la nature des apports de carbone frais. Pour les PRO, Levavasseur *et al.* (2020) ont proposé d'utiliser l'ISMO comme valeur de h directement dans AMG. L'ISMO est l'indicateur de stabilité de la matière organique (Lashermes *et al.*, 2009), déterminé au laboratoire. Il se calcule à partir des fractions biochimiques du PRO et la proportion de carbone du PRO minéralisée en 3 jours. La minéralisation du carbone actif suit une cinétique du premier ordre selon la constante de décomposition k . k dépend des caractéristiques du sol (pH, teneur en argile et en carbonate de calcium, C/N), et des conditions climatiques (température moyenne de l'air et bilan hydrique) selon les équations décrites dans Clivot *et al.* (2019). La microbiologie du sol n'intervient pas directement dans sa détermination. Afin de renseigner les entrées de C des cultures, Clivot *et al.* (2019) ont proposé l'utilisation de fonction allométriques (Bolinder *et al.*, 2007) permettant de calculer les quantités de résidus de culture aériens et souterrains (racines et exudats) simplement à partir du rendement des cultures.

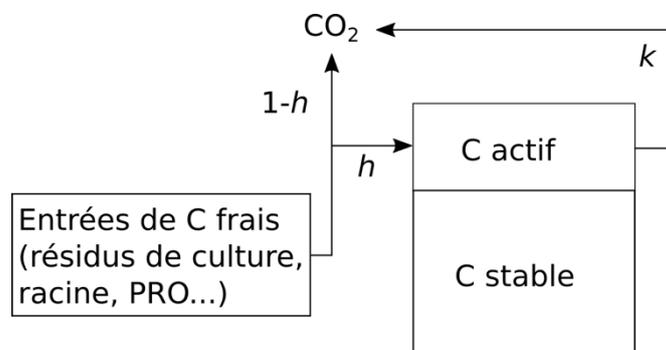


Figure 26 : Schéma de principe du modèle AMG (RECORD 2022)

Dans cette étude, nous proposons de ne pas utiliser directement AMG pour simuler l'évolution des stocks de carbone à l'échelle du territoire, mais seulement certains formalismes. En effet, à l'échelle territoriale, la question est de déterminer le stockage additionnel permis par le

recyclage des PRO et non pas les stocks absolus. En mobilisant directement les quantités de chaque PRO, leur coefficient d'humification et l'équation de minéralisation du carbone actif du sol, il est possible de déterminer la quantité de carbone résiduel du PRO au bout d'une période donnée (pour l'ensemble du territoire ou par hectare) (Equation 1). Cette simplification permet de réaliser plus simplement des simulations à l'échelle territoriale sans devoir décrire de façon exhaustive tous les sols et systèmes de culture du territoire.

$$\Delta Stock = \sum_{t=1}^{tn} Q_{PRO} C_{PRO} ISMO_{PRO} \exp(-k t) \quad (1)$$

Avec $\Delta Stock$, le stockage additionnel au bout d'un temps tn suite à l'épandage d'un PRO, Q_{PRO} la quantité de PRO annuelle, C_{PRO} la teneur en carbone du PRO, $ISMO$ la valeur d'ISMO du PRO, k , la constante de minéralisation du carbone actif du sol.

Afin d'évaluer l'importance de ce stockage, il est comparé à celui permis par les résidus de culture sur la plaine de Versailles, en retenant les hypothèses de rendement moyen, les coefficients allométriques proposés par Clivot *et al.* (2019) et la même équation de minéralisation. Ce stockage via les résidus de culture est le potentiel maximal correspondant à leur retour au sol complet, alors qu'une partie est exportée dans la réalité. Pour les autres territoires, du fait de la présence importante de prairies ou de cultures pérennes, cette comparaison n'est pas possible (cultures non paramétrées dans AMG).

3.2.2 Simulation des autres effets du recyclage des PRO

Afin de caractériser les autres effets du recyclage des PRO à l'échelle du système de culture, l'outil PROLEG a été mobilisé (Levavasseur *et al.*, 2019) (Figure 27). Il a été choisi pour plusieurs raisons :

- Il considère une diversité de PRO et leurs caractéristiques,
- Il combine l'intérêt des outils multicritères pour évaluer des systèmes avec un ensemble d'indicateurs et la sensibilité de modèles de recherche pour évaluer finement les effets de changement de systèmes.
- Il considère directement les effets à long terme d'une augmentation de la matière organique des sols sur d'autres processus : dynamiques de l'azote, fertilité du sol...

A notre connaissance, c'est le seul outil présentant les trois caractéristiques citées ci-dessus. L'unité ECOSYS maîtrise par ailleurs cet outil et est responsable de son développement.

PROLEG intègre le modèle AMG (Clivot *et al.*, 2019; Levavasseur *et al.*, 2020) pour évaluer le stockage de carbone et STICS (Brisson *et al.*, 2008; Levavasseur *et al.*, 2021) pour évaluer les fournitures d'azote à la plante et les pertes d'azote du système (NO_3^- , N_2O , NH_3). L'application d'engrais minéral azoté peut alors être adaptée de façon dynamique et automatique en appliquant un bilan prévisionnel avec les fournitures d'azote prédites par l'outil. En addition d'indicateurs relatifs au stockage de carbone, aux besoins en engrais ou aux pertes d'azote, l'outil intègre également différentes équations bilan et bases de données qui permettent de calculer des bilans gaz à effet de serre à la parcelle, des bilans de la contamination du sol en métaux, des indicateurs de fertilité du sol (battance, biomasse microbienne, etc.) ainsi que quelques résultats économiques.

Concernant le bilan GES (Tableau 25), il considère le stockage de carbone et les émissions de N_2O au champ directes et indirectes (suite à la lixiviation et à la volatilisation) simulées par l'outil, ainsi que les émissions associées au machinisme, à la fabrication des engrais minéraux et à la production et stockage des PRO à partir de facteurs d'émission. Pour ces derniers postes, les valeurs proposées par le programme Agribalyse 3 (tableau du référentiel Label bas carbone Grandes Cultures) sont utilisées. Dans ce référentiel, pour les PRO d'élevage, seules les émissions liés au chargement et au transport sont considérées. Les émissions liés à l'élevage lui-même et au traitement et au stockage des PRO sont considérées allouées à

l'élevage. Pour les autres PRO (composts urbains par exemple), les émissions liées au transport, au traitement et au stockage sont considérées. Le bilan GES peut être calculé au moment de la situation initiale et/ou au bout d'un certain nombre d'années, permettant de considérer la variabilité temporelle du stockage de carbone (équilibre à terme) et des consommations d'engrais (réduction à long terme).

Tableau 25 : Emissions considérées ou non dans le bilan GES de l'outil PROLEG (RECORD 2022)

Emissions considérées	Emissions non considérées
Stockage de C	Traitement et stockage des PRO issus d'une activité agricole
Fabrication des engrais NPK	Emissions de CH4 au champ
Consommation de fioul du machinisme	Emissions liées à la fabrication des engins agricoles, des semences, des pesticides
Emissions de N2O au champ (directes et indirectes)	
Transport, traitement et stockage des PRO non issus d'une activité agricole	

Dans la présente étude, l'outil PROLEG a été utilisé pour comparer quelques cas types pour le territoire de la plaine de Versailles, représentant des scénarios avec ou sans PRO.

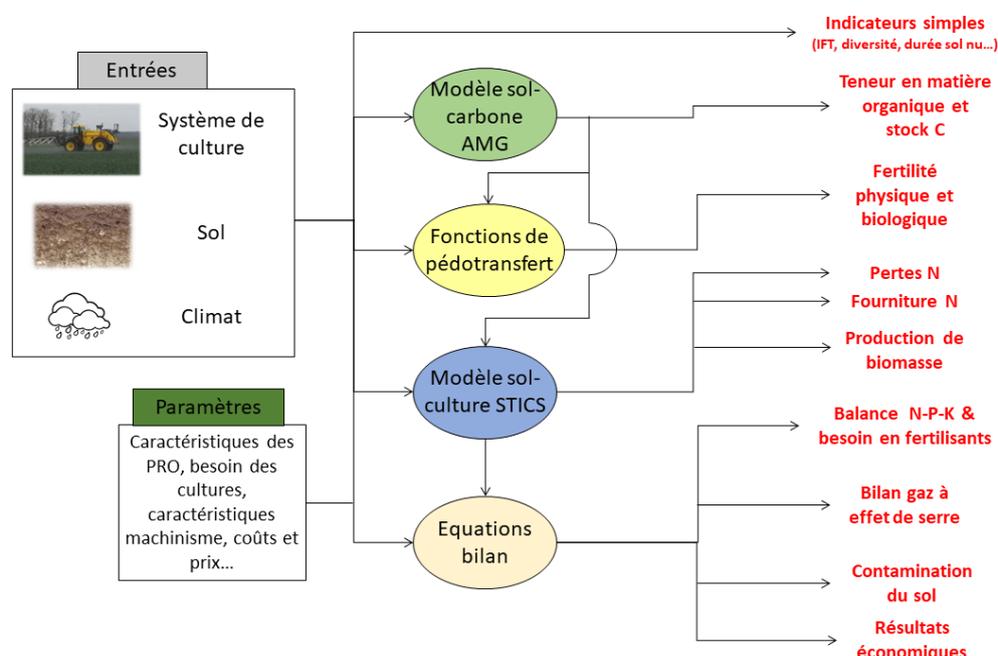


Figure 27 : Principe de l'outil PROLEG (RECORD 2022)

3.3 Résultats détaillés pour la plaine de Versailles

3.3.1 Entrées de carbone et stockage de carbone

Les entrées de carbone total par les PRO produits actuellement en plaine de Versailles représentent environ 6 kt C an⁻¹ ou 0,5 t C ha⁻¹ an⁻¹ en considérant leur répartition homogène sur le territoire (Figure 28). Ces apports restent mesurés par rapport aux apports des résidus de culture (aérien et souterrain) correspondant à l'assolement moyen du territoire, estimés à 57 kt C an⁻¹. Le potentiel des résidus de culture est une estimation haute, ceux-ci étant considérés entièrement restitués sur la plaine de Versailles, alors qu'une petite partie peut être exportée (cf. paragraphe 3.1.1). Le compost de déchets verts représente à lui seul 50% des apports de carbone des PRO.

En s'intéressant aux entrées de carbone humifié, la contribution des PRO (4 kt C an⁻¹) relativement à celle des résidus de culture (15 kt C an⁻¹) devient plus significative du fait de

coefficients d'humification des PRO bien supérieurs à ceux des résidus de culture (Levavasseur *et al.*, 2020) (plus forte stabilité de leur matière organique).

La production maximale théorique de digestat de biodéchets permettrait d'accroître de façon significative les entrées de carbone (total et humifié). Pour rappel, cette hypothèse est cependant peu réaliste (cf. paragraphe 3.1.1).

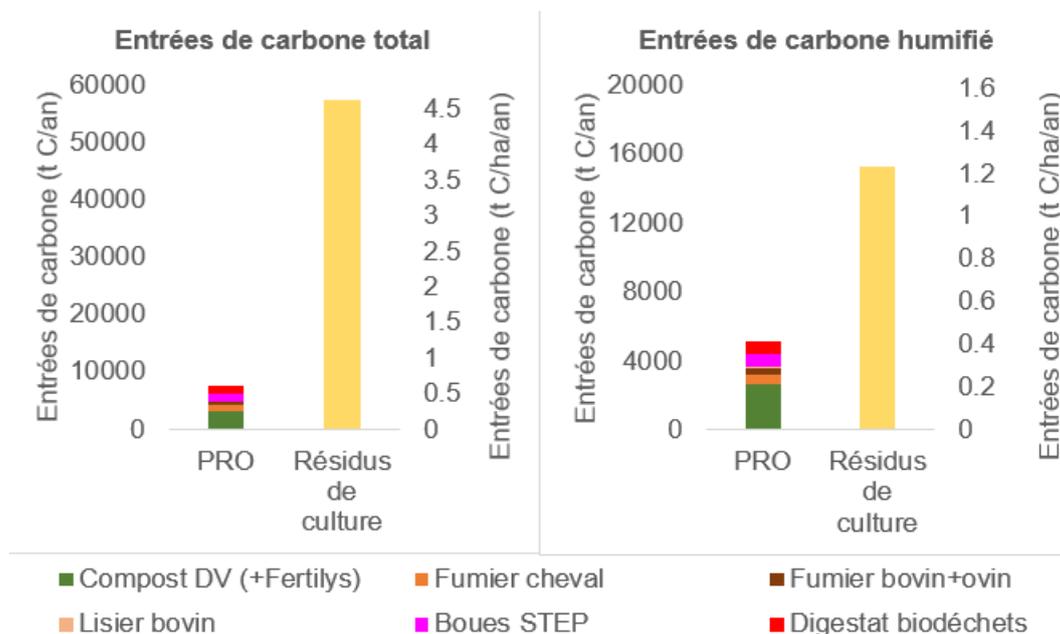


Figure 28 : Entrées de carbone total et humifié par les PRO sur la plaine de Versailles en comparaison aux résidus de culture d'un assolement moyen du territoire (aériens et souterrains, si restitués à 100%). Les quantités de PRO sont les quantités actuellement produites sauf pour les digestats où la quantité indiquée correspond à la quantité maximale théorique (aucune production à l'heure actuelle). (RECORD 2022)

Directement en lien avec les résultats d'entrées de carbone humifié qui précèdent, le stockage de carbone à 30 ans permis par les PRO actuels de la plaine de Versailles est inférieur à celui permis par les résidus de culture, mais significatif : 51 kt C en 30 ans ou 0,14 t C an⁻¹ pour les PRO contre 178 kt C en 30 ans ou 0,48 t C an⁻¹ pour les résidus de culture (Figure 29). En comparaison aux stocks actuels de carbone de la plaine de Versailles, les apports de PRO représenteraient un stockage annuel de 3‰, légèrement inférieur aux objectifs de l'initiative 4 pour 1000. Cependant, ces PRO étant déjà épandus, le stockage est déjà effectif (sur la plaine ou en dehors pour les PRO exportés) et leur recyclage ne représente donc pas un stockage additionnel sauf pour la faible proportion de PRO non valorisés en agriculture (faible proportion de boues incinérées par exemple). Il en est de même pour les résidus de culture qui sont très majoritairement déjà enfouis.

Seule la valorisation des biodéchets pourrait représenter un stockage additionnel, ces biodéchets étant majoritairement incinérés pour le moment. Selon l'hypothèse maximale théorique, le recyclage de digestat de biodéchets représenterait un stockage additionnel de 15 kt C en 30 ans ou 0,03 t C an⁻¹, soit environ 0,6‰.

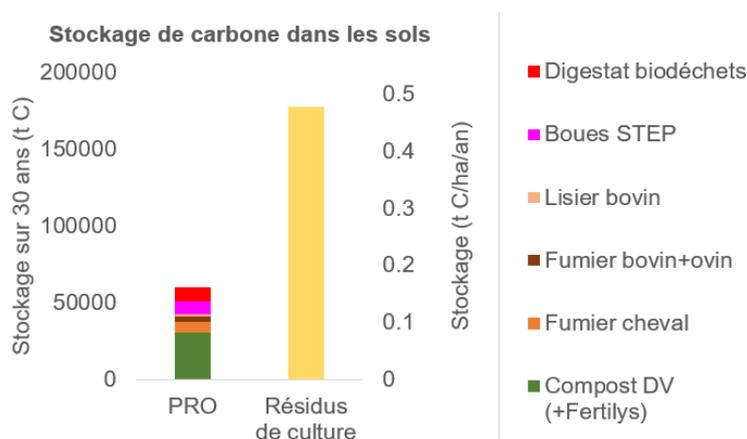


Figure 29 : Stockage de carbone par les PRO sur la plaine de Versailles en 30 ans, en comparaison aux résidus de culture (aériens et souterrains, si restitués à 100%). Seul le digestat représente un stockage théorique additionnel, les autres PRO étant déjà épandus presque intégralement et les résidus de culture restitués dans leur grande majorité. (RECORD 2022)

Aux doses et fréquences types auxquelles sont apportés les PRO, les 12 400 ha de SAU de la plaine de Versailles sont tout juste suffisants pour valoriser les PRO actuellement produits (Tableau 26). Du fait qu'une partie significative des PRO est actuellement exportée du territoire (boues et Fertilyls notamment) (Moinard *et al.*, 2021), cette surface est largement suffisante. De plus, des parcelles sont épandues avec plusieurs PRO (fumier et lisier bovin, compost de déchets verts et boues, etc.), ce qui réduit les surfaces nécessaires. Dans le cas où l'épandage de certains PRO (boues notamment) serait relocalisé en plaine de Versailles et que la méthanisation de biodéchets se développerait, la surface disponible pour l'épandage pourrait devenir insuffisante, sauf à épandre plus fréquemment et/ou davantage de PRO différents sur les mêmes parcelles.

Tableau 26 : Surface nécessaire pour l'épandage des PRO de la plaine de Versailles (RECORD 2022)

PRO	Gisement (t MB/an)	Dose (t MB/ha)	Fréquence (an ⁻¹)	Surface nécessaire (ha)
Compost DV (+Fertilyls)	22 414	25	0,25	3 586
Fumier cheval	7 426	20	0,25	1 485
Fumier bovin+ovin	3 914	30	0,25	522
Lisier bovin	6 050	40	0,5	303
Boues STEP	19 081	12	0,25	6 360
Tous PRO actuels	58 885	-	-	12 256
Digestat biodéchets	67 926	20	0,25	13 585

3.3.2 Effets collatéraux à dose agronomique

Afin d'estimer les effets collatéraux du stockage de carbone par les PRO, des cas types ont été simulés avec l'outil PROLEG en plaine de Versailles. Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Sol limoneux profond décarbonaté avec une teneur initiale en matière organique de 2,2% (12,8 g C/kg)
- Succession de culture : colza-blé-couvert de moutarde suivi de maïs grain – blé – orge d'hiver
- Travail du sol : labour (maïs grain, blé de maïs) et travail simplifié
- Objectifs de rendements élevés (cf. paragraphe Description du territoire)
- 7 scénarios de fertilisation :
 - o MIN : fertilisation minérale uniquement (solution azotée et ammonitrate),
 - o C : compost de déchets verts (25 t/ha) sur moutarde et fertilisation minérale,

- FC : fumier de cheval (20 t/ha) sur moutarde et fertilisation minérale,
- B : boue de STEP (12 t/ha) avant colza et fertilisation minérale,
- FB : fumier bovin (30 t/ha) avant moutarde et fertilisation minérale,
- L : lisier bovin (40 m³/ha) en sortie d'hiver sur blé de colza et fertilisation minérale,
- D : digestat de biodéchets (40 m³/ha) en sortie d'hiver sur blé de colza et fertilisation minérale.

Dans tous les cas, la fertilisation minérale est adaptée automatiquement aux besoins des cultures par l'outil.

En lien direct avec les entrées de carbone des PRO variables entre cas type, le stockage à 30 ans est le plus important dans le scénario C (7,2 t C/ha), suivi des scénarios FB (6,0 t C/ha) et FC (3,9 t C/ha). Le stockage avec les scénarios B (1,1 t C/ha), L (1,3 t C/ha) et D (0,7 t C/ha) est bien plus faible. Malgré ce stockage, les indicateurs de fertilité du sol sont peu modifiés. Le ratio carbone : argile atteint cependant le seuil correspondant à une structure de sol jugée moyenne (1/10) avec les scénarios C et FB. La battance reste très élevée dans tous les cas (sol très limoneux). La réserve utile, déjà élevée à la base (254 mm), est augmentée d'au maximum 3 mm avec le scénario C tandis que la densité apparente du sol diminue légèrement (de 0,02) ce qui peut indiquer une potentielle meilleure porosité du sol.

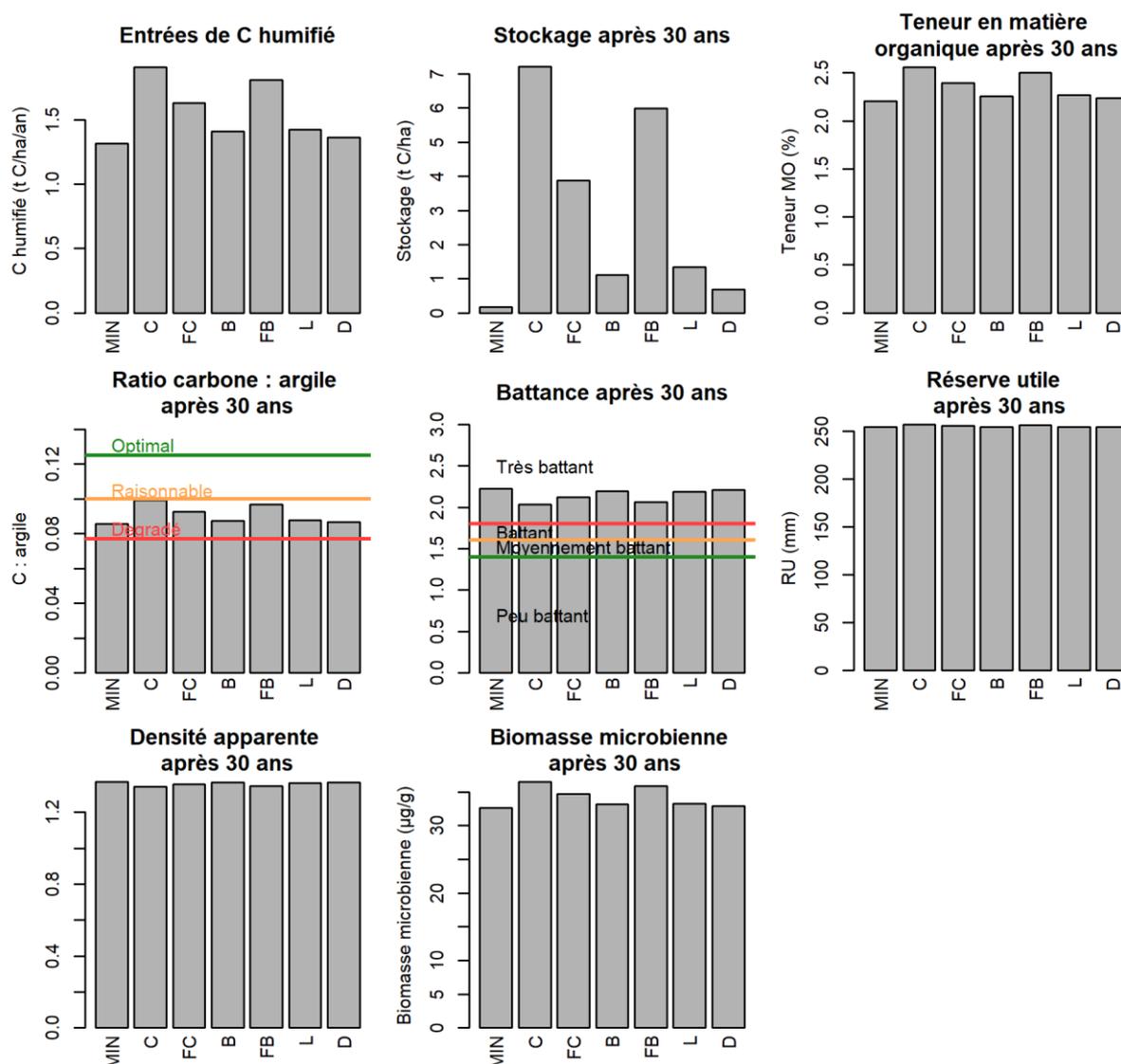


Figure 30 : Entrées de carbone, stockage de carbone et propriétés des sols simulés après 30 ans pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de

STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

Seul le digestat dans le scénario D contenant une quantité significative de N minéral directement disponible apporte un important surplus de fourniture azotée dès les premières années d'épandage (situation initiale), ce qui permet de réduire les besoins en N minéral (163 et 144 kg N/ha/an pour les scénarios MIN et D, respectivement) (Figure 31). Après 30 ans, les PRO qui ont augmenté significativement la matière organique du sol (compost et fumiers) permettent un surplus de fourniture azotée liée à la minéralisation de la matière organique du sol et ainsi qu'une réduction des besoins en N minéral (112 kg N ha⁻¹ an⁻¹ pour le scénario C par exemple). Les besoins en P et K sont réduits dans tous les cas avec épandage de PRO, directement en lien avec le P et K apportés par les PRO, importants en P pour la boue du scénario B, en K pour le fumier bovin du scénario FB. On atteint même un excédent en K pour le scénario FB, a priori peu préjudiciable pour l'environnement, si ce n'est d'un point de vue des économies des ressources en K.

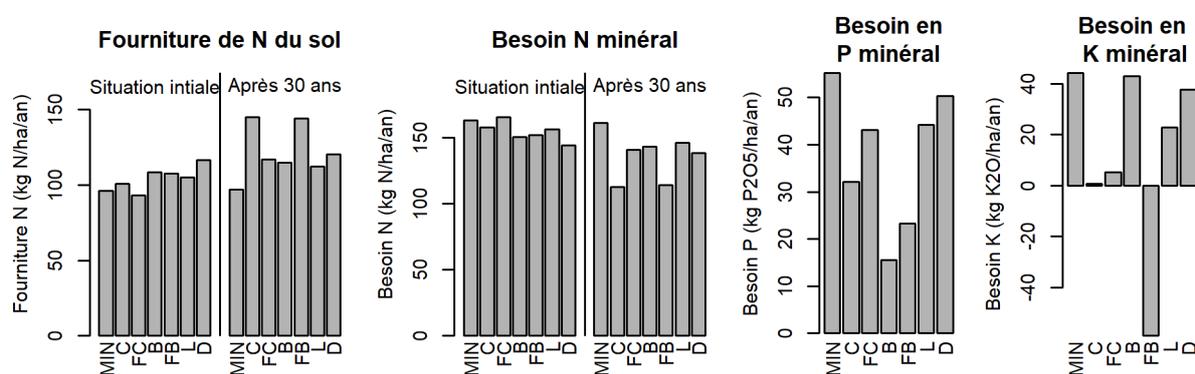


Figure 31 : Fourniture azotée du sol et besoin complémentaire en N minéral des cultures simulés pour la situation initiale et 30 ans après, et besoin simulé en P et K des cultures, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

A court terme, l'épandage de PRO a peu d'effet sur la lixiviation de nitrates sous réserve que la fertilisation minérale complémentaire azotée soit ajustée (comme fait par l'outil de simulation) (Figure 32). Cependant, à long terme, du fait de l'augmentation de la minéralisation d'azote organique suivant celle de la matière organique du sol et de la présence de couverts végétaux absorbant peu d'azote à l'automne (céréales), la lixiviation simulée augmente dans les cas types avec compost ou fumier (par exemple respectivement 4 et 8 kg N-NO₃/ha/an pour les scénarios MIN et C). Celle-ci reste faible du fait de la profondeur des sols simulés et de la faible lame drainante (même résultats pour la concentration des eaux drainées en nitrates). Seul le digestat du scénario D qui contient des quantités significatives d'azote ammoniacal amène à une très légère augmentation à court terme (19 kg N-NH₃/ha/an contre 17 kg N-NH₃/ha/an dans le scénario minéral). A long terme, la diminution de l'usage d'engrais minéraux (eux aussi sensibles à la volatilisation) permet une diminution de la volatilisation dans les scénarios C et FB (par exemple 11 kg N/ha/an avec compost après 30 ans). Enfin, les émissions de N₂O augmentent légèrement à long terme dans les scénarios C et FB (+0,4 kg N-N₂O/ha/an pour FB par rapport au scénario MIN), du fait de l'augmentation des flux d'azote dans les sols.

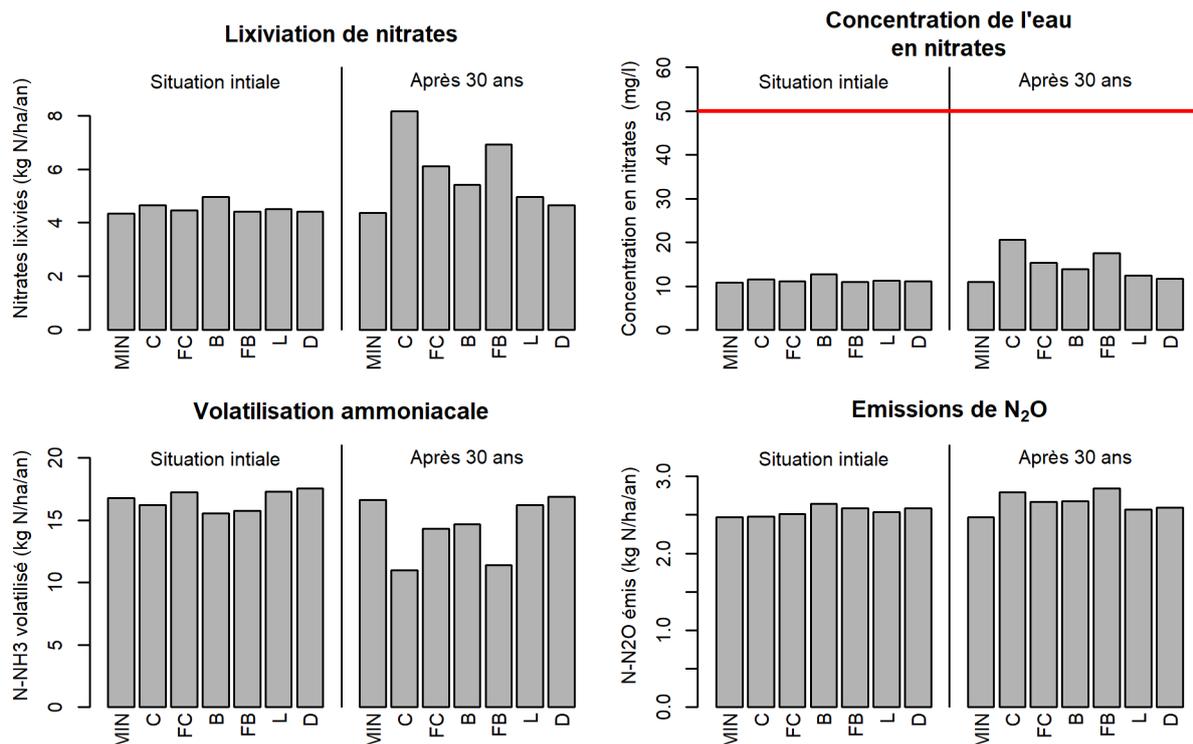


Figure 32 : Pertes azotées simulées pour la situation initiale et après 30 ans pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

Sans comptabiliser les émissions liées à la filière amont des PRO (production et stockage), le bilan GES à court terme est très favorable pour les scénarios avec compost ou fumier (respectivement 247, 1178 et 562 kg CO₂eq/ha/an pour les scénarios C, FC et FB) par rapport au scénario minéral (2148 kg CO₂eq/ha/an), principalement du fait du stockage de carbone (Figure 33). Celui des autres scénarios PRO est également favorable, du fait à la fois du stockage de carbone et des réductions d'engrais. Après 30 ans, les différences entre scénarios s'amenuisent du fait que les stocks de carbone ont atteint un équilibre. Les réductions d'engrais permettent de maintenir un avantage pour les scénarios PRO (1789 et 2083 kg CO₂eq/ha/an pour les scénarios C et MIN respectivement).

En comptabilisant les émissions liées à la filière amont des PRO, les résultats sont fortement changés pour les PRO d'origine urbaine (sauf digestat). Les fortes émissions liées à leur fabrication (notamment émissions lors du compostage pour le compost, déshydratation pour les boues) amènent à un bilan GES nettement défavorable pour ces scénarios PRO (par exemple 3508 kg CO₂eq/ha/an pour le scénario C). A l'inverse, les émissions associées aux fumiers sont faibles (seul le stockage et le transport sont comptabilisés), le bilan GES reste favorable même à long terme pour les fumiers (2001 kg CO₂eq/ha/an pour le scénario FC par exemple), les émissions amont n'annulant pas les émissions évitées grâce aux économies d'engrais. Les émissions un peu plus élevées liées au stockage de lisier ou de digestat amènent un bilan GES défavorable sur le long terme.

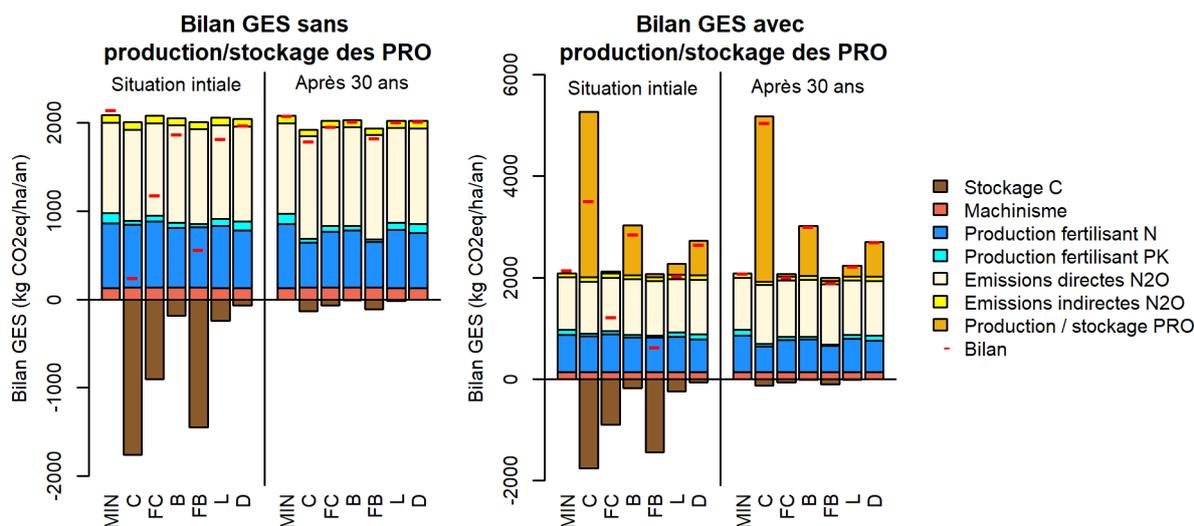


Figure 33 : Bilan gaz à effet de serre pour la situation initiale et après 30 ans, en comptabilisant ou non les émissions liées à la filière amont des PRO, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

Les apports de métaux par les PRO restent limités, tant du point de vue du respect des flux maximaux d'apport réglementaires (selon l'arrêté du 8 janvier 1998) que des teneurs estimées du sol en métaux après 30 ans d'apport (Figure 34). La contamination par les métaux augmente cependant dans tous les scénarios PRO, hormis pour le cadmium (et le chrome dans une moindre mesure) du fait d'une réduction des engrais minéraux phosphatés eux-mêmes contaminés par ces métaux.

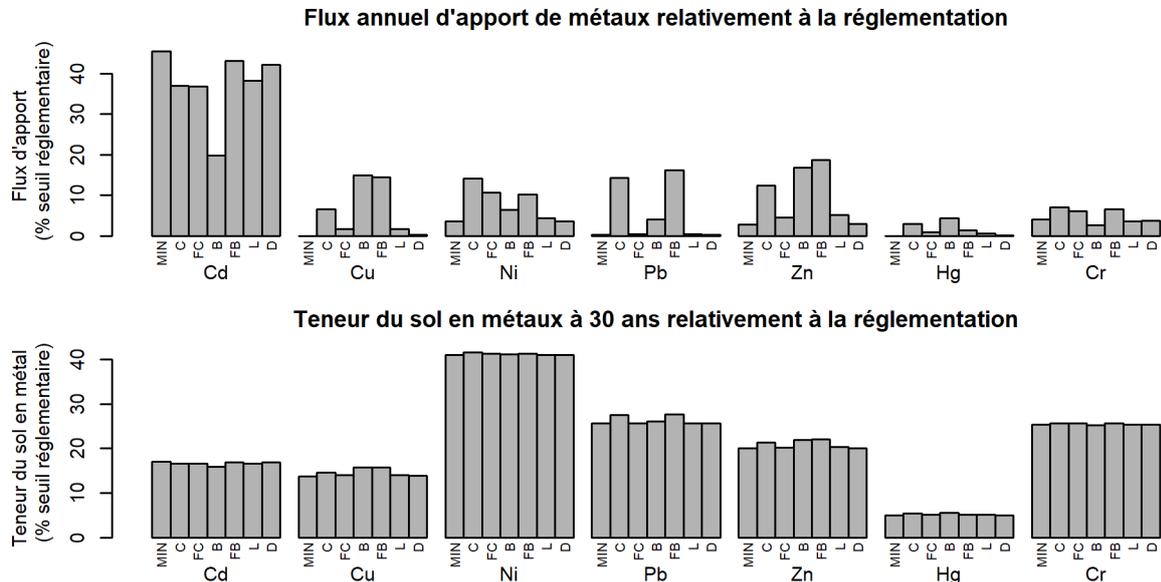


Figure 34 : Flux moyen d'apport annuel en métaux relativement à la réglementation (arrêté 8 janvier 1998) et teneur du sol en métaux au bout de 30 ans relativement à la réglementation, pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

D'un point de vue économique, l'apport de PRO permet une réduction importante des dépenses en fertilisants, la plupart des PRO ayant un coût nul (statut de déchet pour les boues et digestats de biodéchets, production considérée en interne pour les effluents d'élevage). Cette baisse représente jusqu'à 106 €/ha/an avec le fumier bovin après 30 ans. Malgré

l'augmentation des charges de mécanisation (épandage de PRO plus coûteux que celui d'engrais minéraux), la marge semi-nette⁶ augmente avec apports de PRO, notamment à long terme (jusqu'à +92 €/ha/an avec fumier bovin après 30 ans). Enfin, les scénarios avec épandage de PRO amènent une augmentation du temps de travail.

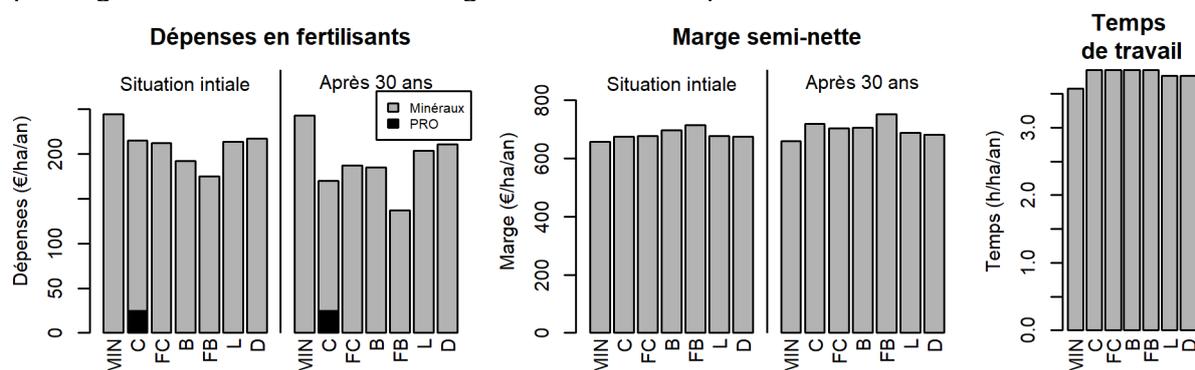


Figure 35 : Dépenses en fertilisants et marge semi-nette pour la situation initiale et après 30 ans, et temps de travail pour les cas types de la plaine de Versailles. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

3.3.3 Bilan GES à stockage de C identique

Les doses de PRO de chacun des scénarios précédents ont été adaptées pour obtenir un stockage de carbone identique entre scénarios PRO, égal à 1 t C/ha en 30 ans par rapport au scénario MIN. Cela permet ainsi de comparer le bilan GES des scénarios pour un stockage de C identique. Les doses de PRO obtenues n'ont pas forcément de pertinence agronomique, **l'exercice reste théorique**.

Tableau 27 : Dose de PRO ajustée pour stocker 1 t C/ha supplémentaire en 30 ans par rapport au scénario MIN (RECORD 2022)

PRO	Dose de PRO ajustée (t MB/ha) sur la rotation de 5 ans
Compost de déchets verts	3,6
Fumier de cheval	5,5
Boue de STEP	13
Fumier bovin	5,2
Lisier bovin	34,5
Digestat de biodéchets	36 (en deux apports)

Sans considérer les émissions amont (étapes de production), le bilan GES est similaire entre les différents traitements PRO à court terme (situation initiale), de 1842 à 1881 kg CO₂eq/ha/an, et est amélioré par rapport au scénario MIN (2148 kg CO₂eq/ha/an). Des émissions évitées supplémentaires existent pour le digestat ou la boue du fait des économies d'engrais, mais sont compensées par une augmentation des émissions de N₂O. Après 30 ans, les stocks sont à l'équilibre et les bilans GES sont similaires pour tous les scénarios.

En considérant les émissions amont liées à la production et au stockage des PRO, les différences entre traitements sont dominées par ces émissions amont. Les bilans GES sont dégradés pour les boues, composts et digestats par rapport au scénario MIN.

⁶ La marge semi-nette permet d'avoir accès à la rentabilité économique de la culture ou du système de culture considéré, sans considérer la rémunération de l'agriculteur. Elle correspond à la différence entre le produit brut (vente des récoltes) et les charges opérationnelles (intrants) et de mécanisation.

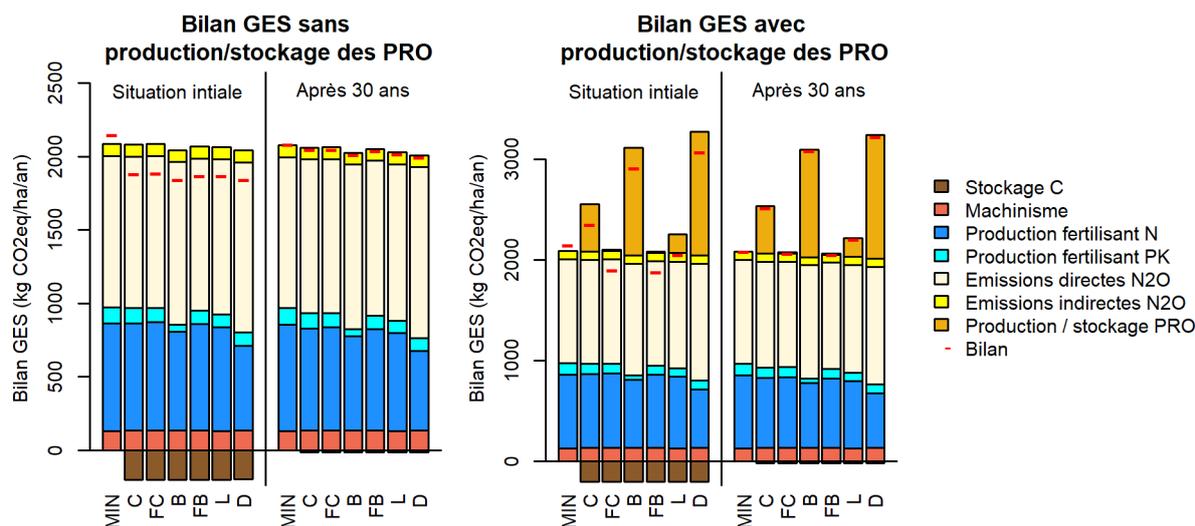


Figure 36 : Bilan gaz à effet de serre pour la situation initiale et après 30 ans, en comptabilisant ou non les émissions liées à la filière amont des PRO, pour les cas types de la plaine de Versailles, avec des doses ajustées pour obtenir un stockage de carbone similaire entre scénario PRO. MIN : fertilisation minérale, C : compost de déchets verts + fertilisation minérale, FC : fumier de cheval + fertilisation minérale, B : boue de STEP + fertilisation minérale, FB : fumier bovin + fertilisation minérale, L : lisier bovin + fertilisation minérale, D : digestat de biodéchets + fertilisation minérale. (RECORD 2022)

3.4 Comparaison du stockage de C par les PRO entre territoires

Le stockage moyen annuel à l'échelle du territoire permis par les PRO est maximal dans le Coglais, (0,30 t C/ha/an), suivi du Grand Figeac (0,23 t C/ha/an), de la plaine de Versailles (0,14 t C/ha/an) puis des Pays de Lunel et de l'Or (0,03 t C/ha/an). Logiquement, dans le Coglais et le Grand Figeac, le stockage est principalement associé aux PRO liés aux activités d'élevage, alors qu'il est principalement associé aux activités urbaines en plaine de Versailles et dans le Pays de l'Or. Il est intéressant de noter que le stockage peut être du même ordre de grandeur entre un territoire périurbain (plaine de Versailles) et un territoire d'élevage (Grand Figeac), avec des origines de PRO très différentes. La différence entre deux territoires périurbains est aussi importante en termes de stockage : il est bien supérieur en plaine de Versailles que dans les pays de l'Or et de Lunel du fait de la proximité d'une agglomération de taille plus importante (Paris) et de l'existence de plusieurs stations de traitements de déchets en plaine de Versailles (import de déchets sur le territoire).

Il est important de rappeler que le stockage représenté ici n'est qu'une image simplifiée de la réalité. Une partie des PRO peut être exportée du territoire, comme les boues sur la plaine de Versailles (Moinard *et al.*, 2021). Le stockage est alors effectif dans un autre territoire.

Tous les PRO indiqués dans la situation actuelle (Figure 37) sont déjà épandus à l'heure actuelle. Le potentiel de stockage additionnel est donc nul. Il est cependant important de maintenir le retour au sol de ces PRO pour maintenir ce stockage. Celui-ci peut en effet représenter une proportion significative du stockage permis par les résidus de culture : jusqu'à 29 % en plaine de Versailles. Sur les autres territoires, la comparaison est plus délicate du fait d'une moindre connaissance des systèmes de culture (gestion des résidus de culture ou des prairies par exemple) et d'une moins bonne représentation des restitutions de carbone liés aux surfaces fourragères dans le modèle AMG utilisé dans l'étude.

En s'intéressant au scénario alternatif et plus particulièrement au potentiel en digestat de biodéchets, celui-ci est important notamment en plaine de Versailles (0,025 t C/ha/an pour le digestat de biodéchets). Ce potentiel repose notamment sur les imports de biodéchets d'un territoire bien plus vaste (correspondant aux biodéchets actuellement incinérés dans l'incinérateur du territoire). Sur les autres territoires, plus ruraux, le potentiel théorique est bien plus faible (non estimé sur le Coglais). De plus, la gestion de ces biodéchets dans ces territoires ruraux sera a priori principalement décentralisée (compostage individuel et collectif).

La production de digestat y est donc encore plus théorique, ainsi que le stockage associé en terres agricoles (le stockage pouvant cependant être réalisé dans les jardins où le compost serait épandu).

Concernant le potentiel de développement de la méthanisation des effluents d'élevage sur le Grand Figeac ou sur le Coglais, celui-ci ne semble pas modifier fortement l'ordre de grandeur du stockage de C : 0,22 t C ha/an après méthanisation contre 0,23 t C ha/an avant méthanisation. Ce faible changement s'explique notamment par le fait que seule une partie des fumiers a été considérée méthanisée, en lien avec les projets actuels sur le territoire. Le potentiel de stockage de C diminue cependant légèrement. Cette baisse est cohérente avec des travaux récents qui montrent que la méthanisation, à quantité d'effluents constants, conduit plutôt à un léger déstockage (Moinard, 2021).

Enfin, sur le territoire des Pays de Lunel et de l'Or, une importation de composts de déchets verts et boues pourrait augmenter significativement le stockage de C. Il est à noter que dans ce cas, cela correspondrait simplement à un transfert, ces composts étant épandus ailleurs à l'heure actuelle.

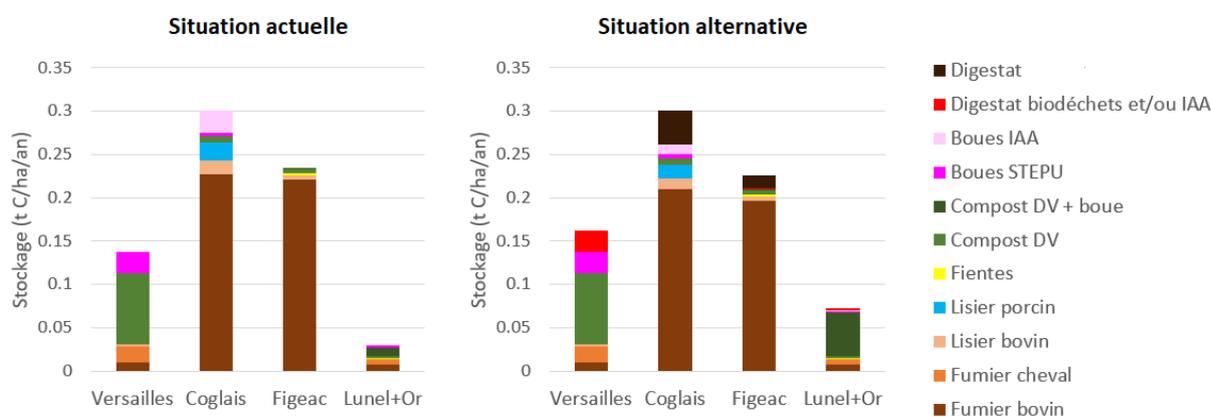


Figure 37 : Stockage annuel moyen de carbone sur 30 ans par les PRO dans les 4 territoires, pour la situation actuelle et une situation de gestion alternative par territoire (méthanisation de biodéchets en plaine de Versailles, situation inchangée dans le Coglais, méthanisation de fumier, de biodéchets et de déchets d'IAA dans le Grand Figeac, méthanisation de biodéchets et de déchets d'IAA et import de compost de déchets verts et de boues dans les Pays de Lunel et de l'Or) (RECORD 2022)

4 PROPOSITION DE RECOMMANDATIONS AUX ACTEURS

A partir des travaux des phases précédentes, complétés par une série d'entretiens d'acteurs, cette dernière phase fournit des messages clés qui puissent être valorisés auprès des parties prenantes (agriculteurs, collectivités, institutionnels).

4.1 Identification des freins

Afin de compléter l'analyse bibliographique et de modélisation, une série d'entretiens a été réalisé auprès des acteurs.

Les personnes interviewées (liste en annexe) ont mis en avant des freins à la valorisation du carbone des PRO ou plus généralement des PRO, qu'ils soient techniques, organisationnels ou sociaux, réglementaires. Ceux-ci sont synthétisés ci-après.

Pour les agriculteurs, les freins sont d'ordre techniques et sociaux.

Freins techniques

- Recherche des éléments fertilisants N principalement, valeur amendante (MO) en second plan
- Besoin de connaître les pratiques de fertilisation avec les différents PRO : question du fractionnement vs engrais de synthèse
- Besoin de données de compréhension pour la MO et mettre en avant son potentiel pour la fertilité des sols
- Question de l'équipement pour l'épandage (compost notamment)

Freins sociaux

- Craintes vis-à-vis des résidus médicamenteux
- Pressions des riverains sur les odeurs

Pour les collectivités, les freins sont d'ordre organisationnels et réglementaires.

Freins organisationnels

- Difficulté dans la recherche des solutions pour leurs boues urbaines
- Liens fort (cas des biodéchets notamment) entre collectivités et agriculteurs = confiance dans le produit (labellisation) + garantie d'un produit de qualité = intrants de qualité

Freins réglementaires

- Contraintes réglementaires sur les boues liquides notamment
- Contrainte liée à la phase Covid : besoin d'hygiénisation => concurrence avec d'autres PRO (digestat notamment)

Pour les institutions et les acteurs professionnels, les freins sont d'ordre organisationnels, techniques et réglementaires.

Freins organisationnels

- Faire coïncider l'offre et la demande : un nécessaire travail d'animation et de coordination
- Des nouveaux besoins liés à la filière AB => Les déchets verts sont dirigés vers le compost de DV et /ou en mélange avec les biodéchets
- Application de la réglementation (cas des déchets verts brûlés)

Freins techniques

- L'apport de P est limitant sur certains territoires

Freins réglementaires

- Durcissement des seuils (Socle commun)
- Le passage par la normalisation du compost (NFU 44-051 et 44-095) annule le suivi (pas de plan d'épandage)
- Détournement de biomasse ligneuse issue de déchets verts (Texte en cours : Sortie du statut de déchet)

4.2 Synthèse des contraintes

Les principales contraintes identifiées à la valorisation des PRO relèvent de la réglementation et des contraintes de voisinage ainsi que des pollutions par les contaminants.

Sur ces derniers, les PRO urbains sont concernés par les éléments-traces métalliques, les microplastiques et les pesticides, et les PRO issus de l'élevage sont concernés par les pathogènes.

		Fumier/Lisier	Effluent IAA et industriels	Boues urbaines Déshydratées	Déchets organiques (broyat DV)	Cendres, biochar	Compost de fumier	Compost boues urbaines / DV	Compost de biodéchets / DV	Compost de déchets verts	Digestat de biodéchets / territorial	Boues urbaines digérées déshydratées	Digestat agricole
Réglementaire et sociale	Plan d'épandage (suivi, contrôle)												
	Normé NFU (pas de suivi, ni contrôle)												
	Cahier des charges (CDC Agri)												
	Contraintes voisinage (odeurs, risques etc)												
Contaminants	Pathogènes												
	Pharmaceutique												
	Pesticides												
	HAP												
	Large spectre												
	ETM	Cu, Zn		Cu, Zn, Cd nanoparticule	Large spectre	Large spectre	Cu, Zn	Cu, Zn, Cd nanoparticule	Large spectre, nanoparticule	Large spectre	Large spectre, nanoparticule	Cu, Zn, Cd nanoparticule	Cu, Zn
	Microplastiques												

- +
Intensité de la contrainte

4.3 Messages clés

9 messages clés ont été produits, accompagnés de recommandations sur leur mise en œuvre.

Message n°1 : Le stock de C n'augmente pas indéfiniment dans un sol : à pratiques et/ou intrants constants, le stock de C atteint un équilibre.

Les matières organiques dans les sols ne sont pas inertes. Elles se transforment dans le sol sous l'action de différents processus (biotransformations, transferts, stabilisation, déstabilisation).

Le carbone frais est apporté au sol par les résidus aériens et racinaires des cultures et par les PRO, il alimente le compartiment du carbone organique humifié actif (Ca). Ce dernier se minéralise **sur l'année** (sortie sous forme de CO₂). Une partie du carbone du sol est du carbone organique humifié stable (Cs) qui est considéré totalement inerte à **l'échelle du siècle**.

Le stock de C n'augmente pas indéfiniment dans un sol. Si les pratiques ou les intrants restent constants, il atteint un équilibre dont le niveau dépend des flux d'entrée (apports de PRO, enfouissement des résidus de culture....) et de sortie (flux de minéralisation qui dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol et du climat).

On parle de stockage additionnel par rapport à une pratique existante. Ainsi, par exemple, dans le cas d'apports, notamment déjections animales, réalisés généralement depuis de nombreuses années, cet apport n'est pas considéré comme du stockage additionnel.

En outre, dès l'arrêt des pratiques stockantes, on observera un déstockage du carbone. Ainsi, il est préconisé de maintenir les pratiques stockantes sur le long terme.

Enfin, à noter que certains auteurs évoquent un phénomène de saturation des sols, caractérisé par un potentiel max de stockage, associé à la fraction fine des sols. Toutefois cette notion est controversée.

Message n°2 : L'apport de PRO sur les parcelles permet d'augmenter le stock de carbone et la quantité annuelle de carbone stocké est fonction de leurs caractéristiques. La gestion des PRO doit être réalisée en regard des besoins (carbone du sol, fertilisation à court terme)

La quantité de stockage annuel est fonction de leurs caractéristiques.

En plus des caractéristiques de la matière organique des PRO apportés, l'efficacité à augmenter la matière organique des sols va dépendre de nombreux facteurs : la fréquence et les doses d'application des PRO, les conditions pédoclimatiques (les caractéristiques physico-chimiques des sols, la température et la pluviométrie vont influencer les vitesses des biotransformations dans les sols après apport).

Les fumiers et les composts bénéficient du meilleur facteur de stockage de carbone (0,45 – 0,72 t C/ha/an) pour des pratiques d'apports observées.

Concernant les biochars, produits organiques issus de la pyrolyse de biomasse, leurs caractéristiques dépendent du type de procédé de production (torréfaction, pyrolyse lente ou rapide, gazéification, carbonisation hydrothermale...) mais leur valeur amendante est élevée, notamment en C stable.

En outre, de nombreuses pratiques agricoles stockantes existent et peuvent être mises en place sur les territoires, quelque ce soit le type d'agriculture (source : Guide Gestim +, Arvalis, 2020) : grandes cultures (couverts végétaux, bandes enherbées, haies), élevage (prairies, agroforesterie), vergers/vignes (enherbement).

Tableau 28 : Pratiques agricoles stockantes (source : Guide Gestim +, Arvalis, 2020)

	t C/ha/an
Enherbement permanent vergers	0,5 +/- 0,3
Intégration de prairie temporaire dans les rotations	0,47 +/- 0,16
Couvert végétal intermédiaire	0,31 +/- 0,31
Accroissement de la durée des prairies	0,28 +/- 0,78
Enherbement permanent vignes	0,3 +/- 0,2
Augmentation du pâturage (conversion de prairie de fauche)	0,27 +/- 0,08
Agroforesterie	0,25 (0,23 à 0,73)
Augmentation de la fertilisation azotée des prairies	0,18 +/- 0,06
Haies, bandes enherbées sur cultures annuelles	0,02

Message n°3 : Les déjections animales permettent un stockage important de carbone (maintien de stocks élevés). La méthanisation de ces déjections impacte faiblement (à la baisse) le potentiel de stockage du carbone

Le stockage du carbone par les déjections animales non traitées varie de 0,2 t C/ha/an pour des lisiers à 0,35 t C/ha/an pour des fumiers. Le stockage est plus important avec des déjections animales compostées (0,45 t C/ha/an). Concernant les digestats, à quantité d'effluents constants, la méthanisation conduit plutôt à un léger déstockage du carbone. Toutefois les projets de méthanisation agricole sont généralement accompagnés de mise en œuvre de nouvelles pratiques agricoles (mise en œuvre de CIVE par exemple) ou l'apport de carbone exogène (biodéchets) qui améliore le stockage du carbone.

La méthanisation est à envisager en considérant des effets bénéfiques sur la fertilisation et sur le levier vers l'agroécologie qu'elle peut assurer.

A court terme, l'épandage du digestat permet de valoriser plus d'azote en substitution aux engrais minéraux (en suivant les préconisations pour limiter la volatilisation au stockage et à l'épandage).

Le projet de méthanisation peut être le moteur d'intégration de pratiques stockantes de carbone sur l'exploitation agricole (couverts végétaux notamment).

Message n°4 : Les PRO peuvent apporter des solutions de stockage de carbone additionnels dans les zones péri-urbaines.

Le stockage additionnel est valable pour les PRO actuellement non valorisés, c'est-à-dire principalement les biodéchets. Ceux-ci peuvent être valorisés sous forme de digestat ou de compost.

Les composts de boues urbaines et/ou de déchets verts permettent un stockage intéressant de carbone notamment pour les zones péri-urbaines. Leur apport de fertilisant azoté n'est pas direct. L'effet de la minéralisation de l'azote est visible à long terme.

La vigilance est requise pour ne pas déstabiliser un territoire d'accueil actuel au détriment d'un autre. Les unités de traitement doivent être pensées au regard des besoins des sols des territoires.

Autour des pôles urbains, étant donné l'importance des gisements de biodéchets et de boues urbaines localisés, l'impact n'est pas négligeable vis-à-vis d'autres pratiques agricoles stockantes.

Message n°5 : Les PRO apportent également des nutriments et permettent des économies d'engrais minéraux de synthèse.

Les digestats et les lisiers apportent plus d'azote disponible à court terme pour les plantes. L'année en cours, l'épandage de ces PRO permet des économies de N minéral de synthèse. Elles peuvent être limitées par la volatilisation du N (au stockage et à l'épandage)

Les composts et fumiers apportent de l'azote libérable à long terme dans le sol. A long terme, des économies de N minéral de synthèse sont réalisables, suite à l'augmentation de la MO du sol qui augmente la minéralisation du N chaque année.

Les boues urbaines apportent du phosphore assimilable par les plantes.

Le fumier bovin apportent du potassium assimilable par les plantes.

Message n° 6 : Les apports de métaux par les PRO restent limités après 30 ans d'apport.

D'autres contaminants peuvent néanmoins se retrouver dans les PRO (pathogènes, résidus pharmaceutiques, HAP, microplastiques).

Une vigilance est requise sur les parcelles recevant les PRO car, par rapport à un apport d'engrais de synthèse, l'épandage des PRO apporte une contamination plus élevée (flux) en Ni, Cu, Hg, Pb, Zn, Cr, mais moins élevée en cadmium (Cd) contenu en quantité dans les engrais phosphatés de synthèse.

Pour les paramètres contaminants ETM, HAP et pathogènes, le suivi et le contrôle sont réalisés dans le cas de plans d'épandage : sur les des apports (seuils réglementaires sur les flux à respecter) et sur les sols (seuils réglementaires sur l'accumulation dans les sols à respecter).

Les résidus pharmaceutiques, pesticides, microplastiques ne font pas l'objet à date d'obligation de suivi.

Message n°7 : La gestion des PRO (stockage, épandage) et des pratiques culturales (couverts) impactent fortement les effets sur le bilan azote.

Les pratiques vertueuses doivent être mises en œuvre pour limiter les pertes de N avec les PRO :

- Fertilisation équilibrée pour limiter la lixiviation à court terme
- Mise en œuvre de couverts végétaux à l'automne pour limiter les pertes par lixiviation à long terme, du fait de la minéralisation du N liée à l'augmentation de la matière organique
- Couverture du stockage des PRO (notamment lisier et digestat brut/liquide) pour limiter les pertes par volatilisation
- Bonnes pratiques d'épandage (équipements + enfouissement rapide + conditions climatiques favorables) pour limiter les pertes par volatilisation

Message n°8 : Les paramètres physico-chimiques des sols ne sont pas impactés négativement par l'apport de PRO.

Suivant la typologie de sol, le choix des PRO peut permettre l'amélioration des paramètres (battance, densité apparente, biomasse microbienne, réserve utile, structure, pH).

Les doses et les calendriers d'apport doivent être respectés pour éviter toute pollution.

Message n°9 : Seul, le stockage du carbone par les PRO, ne permet pas de compenser totalement les émissions de GES liées aux étapes de traitement amont et aux émissions aux champs.

La prise en compte d'externalités positives (production d'énergie renouvelable, baisse de la consommation d'engrais de synthèse) est nécessaire pour améliorer le bilan GES des PRO, des incertitudes quant aux émissions des différentes étapes amont de traitement existent, des travaux sur ces questions sont à mener.

Les fortes émissions liées à la fabrication des PRO, notamment les émissions lors du compostage pour le compost (fortes incertitudes, données à consolider), la déshydratation pour les boues urbaines, amènent à un bilan GES nettement défavorable (émissions > stockage).

La considération de la production d'énergie renouvelable et des économies d'engrais minéraux de synthèse permettraient de rééquilibrer le bilan, notamment dans le cas du digestat. Les questions se posent en termes d'allocation des émissions aux PRO, les déchets initiaux devant dans tous les cas faire l'objet d'un traitement.

5 LEXIQUE

AB : agriculture biologique

AMG : Andriulo, Mary, Guérif, les 3 auteurs du modèle AMG

CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrates

DRAAF : direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt

EH : équivalent habitant, la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO5) de 60 grammes d'oxygène par jour, unité généralement utilisée pour mesurer la charge polluante des eaux usées

GES : gaz à effet de serre

GMS : grande et moyenne surface

IAA : industrie agroalimentaire

IDF : Île-de-France

ISMO : indicateur de stabilité de la matière organique

MAFOR : matière fertilisante d'origine résiduaire

MB : matière brute

MS : matière sèche

OMR : ordures ménagères résiduelles

PRO : produit résiduaire organique

SAU : surface agricole utile

STEP : station d'épuration

STICS : Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard

SYDED : Syndicat Déchets Eau Energie du Lot

6 BIBLIOGRAPHIE

- ADEME (2018). Comment réussir la mise en œuvre du tri à la source des biodéchets, ADEME, 2018
- Andriulo, A. E., Mary, B., & Guerif, J. (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19(5), 365-377.
- ARVALIS (2020). GES'TIM+ : la référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air, ADEME - Agence de la transition écologique.
- BDD Portail Assainissement - <https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/data>
- Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & VandenBygaart, A. J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1), 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013>
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2008). Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the STICS Crop Model (Editions Quae).
- Clivot, H., Mouny, J.-C., Duparque, A., Dinh, J.-L., Denoroy, P., Houot, S., Vertès, F., Trochard, R., Bouthier, A., Sagot, S., & Mary, B. (2019). Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software*, 118, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.004>
- Cousin, I., Ly, A., Duparc, P. B., Champolivier, L., & Bernicot, M.-H. (2018). Evaluating pedotransfer functions for the estimation of soil bulk density on cultivated fields. <https://hal.inrae.fr/hal-02737264>
- Couturier C. *et al.* (2016). Le scénario Afterres2050, version 2016, 95 pages.
- Dhaouadi, A. K. (2014). Insertion des Produits Résiduaire Organiques dans les systèmes de culture: Cas des systèmes céréaliers de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets. Thèse de doctorat d'AgroParisTech.
- Girault, R., Affes, R., Akkal, N., Bareha, Y., Corson, S., Houot, S., Launay, C., Levavasseur, F., Menasseri, S., & Trémier, A. (2019). Rapport final projet MéthaPolSol.
- Houot, S., Pons, M. N., & Pradel, M. (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport final de l'expertise scientifique collective.
- Icare & Consult, 2020. Etude prospective fixant des objectifs stratégiques d'augmentation de la part des fertilisants issus de ressources renouvelables. Etude Icare & Consult pour le compte du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2014). Characterization and utilization of char derived from fast pyrolysis of plastic wastes. *Procedia Engineering*, 69, 1437-1442.
- Kumar, A., Singh, E., Singh, L., Kumar, S., & Kumar, R. (2021). Carbon material as a sustainable alternative towards boosting properties of urban soil and foster plant growth. *Science of The Total Environment*, 751, 141659.
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M. L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., & Houot, S. (2009). Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60(2), 297–310. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x>

- Levavasseur, F., Dion, C., Girardin, C., Goubard, Y., Lardos, M., Maillet, G., Martinez, M., Moinard, V., Reau, R., Schneider, A., Spaak, D., & Houot, S. (2022). PSDR4 PROLEG - Les produits résiduels organiques et les légumineuses pour des systèmes de cultures innovants plus sobres en engrais de synthèse et multiservices. *Innovations Agronomiques*, 86, 191–204. <https://doi.org/10.17180/ciag-2022-vol86-art17>
- Levavasseur, F., Mary, B., Christensen, B. T., Duparque, A., Ferchaud, F., Kätterer, T., Lagrange, H., Montenach, D., Resseguier, C., & Houot, S. (2020). The simple AMG model accurately simulates organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117, 215–229. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10065-x>
- Levavasseur, F., Mary, B., & Houot, S. (2021). C and N dynamics with repeated organic amendments can be simulated with the STICS model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10106-5>
- Michelin, J., Vaudour, E. (2012). Carte simplifiée des sols de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets
- Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Pin, J. M., & Misra, M. (2018). Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. *Science*, 362(6414), 536-542.
- Moinard, V., Levavasseur, F., & Houot, S. (2021). Current and potential recycling of exogenous organic matter as fertilizers and amendments in a French peri-urban territory. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105523.
- Munir, M. A. M., Yousaf, B., Ali, M. U., Dan, C., Abbas, Q., Arif, M., & Yang, X. (2021). In situ synthesis of micro-plastics embedded sewage-sludge co-pyrolyzed biochar: Implications for the remediation of Cr and Pb availability and enzymatic activities from the contaminated soil. *Journal of Cleaner Production*, 302, 127005.
- Noirot-Cosson, P. (2016). Optimisation de l'insertion des Produits Résiduels Organiques dans les systèmes de cultures d'un territoire francilien: Évolution des stocks de carbone organique et substitution des engrais minéraux. Thèse de doctorat d'AgroParisTech.
- Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., BASILE-DOELSCH, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Daroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., ... Rechauchère, O. (2020). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? (p. 528). INRA. <https://doi.org/10.15454/nhxt-gn38>
- Rathnayake, D., Ehidihamen, P. O., Egene, C. E., Stevens, C. V., Meers, E., Mašek, O., & Ronsse, F. (2021). Investigation of biomass and agricultural plastic co-pyrolysis: Effect on biochar yield and properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105029.
- Schmidt, H.-P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez Monedero, M. A., & Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1708–1730. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12889>
- Thévenin N. et al. (2021) La synergie est possible, Journée Sol et Energie du 25 juin 2021, AILE – RITTMO
- Soenen B., Henaff M., Lagrange H., Lanckriet E., Schneider A., Duval R., Streibig JL. (2021). Méthode Label Bas-Carbone Grandes Cultures (version 1.0). 133p
- Zaouche, M., Bel, L., & Vaudour, E. (2017). Geostatistical mapping of topsoil organic carbon and uncertainty assessment in Western Paris croplands (France). *Geoderma Regional*, 10, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.07.002>
- Zhang, H., Likun, P. K. W., & Xiao, R. (2018). Improving the hydrocarbon production via co-pyrolysis of bagasse with bio-plastic and dual-catalysts layout. *Science of the Total Environment*, 618, 151-156.