



ITTECOP – PROJET EXPLORATOIRE

INFRA SOL C – LES DEPENDANCES VERTES, PUIITS CARBONE A PRESERVER ET VALORISER

15 décembre 2022

Informations relatives au document

INFORMATIONS GENERALES

Auteur(s)	Lorenzo ROSSI – Soil-is Mohamed-Lamine KADIRI - Soil-is Margot DEFOORT LEVKOV - Soil-is Sofyan MARTIN - Soil-is
Validation	Dorothee LABARRAQUE - Egis
Version	V1

Table des matières

1	PRESENTATION DU PROJET EXPLORATOIRE	4
2	INTRODUCTION : LA SEQUESTRATION DU CARBONE PAR LE SOL ET LES PLANTES ...	5
2.1	Termes et définitions : stocker ou séquestrer du carbone ?	5
2.2	Sols, biomasse : quels réservoirs considérer ?	6
3	SEQUESTRE DU CARBONE DANS LES EMPRISES VERTES DES ILT : ETAT DE L'ART ...	7
3.1	Les dépendances vertes des ILT en France	8
3.1.1	Identifier et définir les dépendances vertes d'ILT	8
3.1.2	Caractériser les écosystèmes traversés	10
3.2	Quantifier les stocks actuel et potentiel des ILT : état de l'art méthodologique	18
3.2.1	Types de données utilisées	18
3.2.2	Type de traitement pour modéliser le potentiel	19
3.2.3	Identifier les solutions pour augmenter le stock de carbone	27
3.3	Retours d'expériences	30
3.3.1	Initiatives scientifiques et techniques passées ou en cours	30
3.3.2	Entretiens et enquêtes	31
4	CAS PRATIQUE : A 28	36
4.1	Cadre de l'expérimentation	36
4.2	Méthodologie	37
4.3	Résultats	40
4.3.1	Occupation du sol	40
4.3.2	Bilan carbone	41
4.3.3	Synthèse des scénarios modélisés	45
5	OUVERTURE : APPLICATION A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DU RESEAU DES ILT	45
5.1	Exemples de mesures pouvant être mobilisées par les gestionnaires d'ILT	45
5.2	Extrapolation simplifiée de l'analyse réalisée sur l'A28 à l'échelle du territoire français	47
5.2.1	Modélisation des scénarios présentés à l'échelle du territoire métropolitain	47
5.2.2	Comparaison par rapport à la Stratégie Nationale Bas Carbone	49
5.3	Limites, attendus et ouverture	51
5.3.1	Limites et attendus	51
6	CONCLUSION	53
7	NOTES ET ANNEXES	55

1 PRESENTATION DU PROJET EXPLORATOIRE

Les projets exploratoires se fixent pour objectif d'aboutir à des analyses de nature prospective ou liées à des sujets novateurs ou très peu explorés. Pour répondre à cet enjeu et dans le cadre du projet exploratoire INFRA-SOL C, nous proposons de **caractériser des scénarios prospectifs pour les infrastructures linéaires de transports de demain**, à savoir dans quelles conditions une gestion améliorée des sols des dépendances vertes permettrait de séquestrer davantage de carbone tout en favorisant un développement territorial, en accord avec la stratégie nationale bas carbone.

Afin de limiter les effets du changement climatique, plusieurs objectifs du 21^{ème} siècle résident dans la **neutralité carbone**. Plusieurs politiques ont été adoptées dans cette idée avec, non seulement la volonté de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'augmenter le développement de projets environnementaux permettant de stocker durablement du carbone dans les sols.

Selon le rapport d'évaluation de l'Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes (ASFA), les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du secteur autoroutier représentent 31 millions de tonnes en 2022. Les **Infrastructures Linéaires de Transport (ILT) sont ainsi responsables d'un volume important d'émissions de GES** mais **représentent aussi un potentiel de séquestration dans les dépendances vertes**. Une estimation de la surface de ces dépendances a fait l'objet d'une proposition dans cette étude soit de l'ordre de 70 700 ha soit 707 km².

Le projet exploratoire INFRA-SOL C vise à **étudier ce que pourraient représenter les zones à haut potentiel de séquestration du carbone dans les ILT** (regroupant les routes, autoroutes, le réseau ferroviaire et les réseaux ferrés de transport urbain), **proposer un cadre méthodologique** pour évaluer le potentiel de séquestration carbone dans les dépendances vertes et identifier **les freins, difficultés et besoins de recherche**.

Si l'on compile les trois scénarios modélisés à l'échelle du territoire métropolitain (scénario 2, 3 et 4), on obtient un potentiel de séquestration carbone par les dépendances vertes des ILT autoroutiers de l'ordre de **12M tCO₂eq séquestrées sur 20 ans** soit plus de 600 000 tCO₂eq par an. Ce premier résultat est significatif car si on le compare aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), ce potentiel représenterait respectivement :

- 15% des objectifs nationaux de puits carbone (80 M T CO₂eq),
- 8 % des émissions dues au secteur des transport (139 Mt CO₂ eq),
- et près de 30% des objectifs de réduction du secteur transports.

Ces résultats doivent cependant être confirmés par une analyse plus précise et robuste prenant en compte l'ensemble des paramètres techniques et opérationnels des dépendances vertes.

Préambule

Ce rapport exploratoire se concentre sur la zone d'étude de la France métropolitaine. Certaines études mentionnées et données listées ne ciblent pas spécifiquement le territoire métropolitain national, cependant il a paru intéressant aux auteurs de ce rapport de les mentionner pour élargir les perspectives. Les méthodes, données d'entrées, résultats sont toujours spécifiques pour la France métropolitain, sauf mention inverse spécifiquement précisée.

2 INTRODUCTION : LA SEQUESTRATION DU CARBONE PAR LE SOL ET LES PLANTES

2.1 Termes et définitions : stocker ou séquestrer du carbone ?

La réduction du CO₂ atmosphérique est devenue un sujet urgent au cours des dernières décennies, les effets du changement climatique et du réchauffement de la planète sont de plus en plus perceptibles et visibles.

Pour agir concrètement dans la lutte contre le changement climatique, plusieurs leviers d'actions sont disponibles. Différents référentiels existent et sont mobilisables pour suivre un cadre concret et scientifique dans la mise en œuvre de solutions (séquence « Eviter, Réduire, Compenser », référentiel « Net Zero Initiative »). **Pour atteindre la neutralité carbone à l'échelle planétaire, il faut agir sur deux piliers : d'une part en diminuant drastiquement les émissions et d'autre part en augmentant les puits de carbone.**

■ Le stock de carbone

Les espaces naturels jouent alors un rôle décisif car ils sont à même de capter le carbone de l'atmosphère et de le stocker dans les sols et la biomasse. De façon générale, le carbone est stocké dans différents réservoirs : dans l'atmosphère sous forme de CO₂, dans l'eau, dans le sol, dans les minéraux et dans la biomasse. Ces écosystèmes ont la capacité de stocker ou de libérer du carbone, ils sont donc ce que l'on appelle des **stocks de carbone**. Ce terme désigne la quantité de carbone présente dans un ou plusieurs réservoirs de carbone présents dans l'écosystème considéré, et ce à un moment précis. **Il s'agit d'une mesure de l'état du stock de carbone à un instant t (statique).**

Le changement climatique étant le principal problème lié à l'augmentation du stock de carbone atmosphérique, ces stocks sont souvent quantifiés en **(tonnes) équivalent CO₂** (bien que le carbone ne soit pas sous la forme de CO₂ dans la biomasse ou le sol, on utilise malgré tout la terminologie « stock de carbone » par raccourci), les autres gaz qui altèrent le climat sont également exprimés en équivalent CO₂ qui correspond à la masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre, selon la Commission d'enrichissement de la langue française (2019).

■ La séquestration du carbone

Le carbone est continuellement échangé entre différents réservoirs, et l'un des principaux moyens de séquestrer du carbone de l'atmosphère est la photosynthèse. La **photosynthèse** utilise le CO₂ atmosphérique, l'eau et l'énergie du soleil pour créer des composés organiques (principalement des hydrates de carbone) et les stocker pour une durée indéterminée, jusqu'à ce qu'ils soient consommés et réintroduits dans l'atmosphère par le métabolisme. Le carbone de la biomasse est également transféré au sol par le biais de la nécromasse ou d'un apport direct (exsudats de racines, par exemple). Le carbone présent dans le sol peut être stabilisé pendant différentes périodes de temps, allant d'années à des millénaires. Ce processus de capter du carbone de l'atmosphère et de stabilisation dans la biomasse ou le sol est appelé « **séquestration du carbone** », et il est exprimé en équivalent CO₂ par unité de temps. C'est un **processus dynamique** qui soutient le service de régulation du climat. Le **point de saturation de la séquestration** signifie le niveau maximal de capacité de stockage globale : si la communauté scientifique s'accorde à dire qu'un niveau de saturation existe, les conditions temporelles et de gestion nécessaires à son atteinte restent discutés.

Si l'équilibre entre l'absorption de CO₂ et sa libération par la respiration est positif (il y a donc plus de carbone stocké dans la biomasse/le sol que de carbone libéré dans l'atmosphère), on peut parler de **puits de carbone net** (stocker davantage de carbone), tandis que s'il est négatif (plus de carbone libéré que stocké), on parle de **source de carbone nette**. Les sols peuvent également déstocker du carbone, à la suite d'une dégradation de terres et/ou d'un changement d'usage du sol.

2.2 Sols, biomasse : quels réservoirs considérer ?

- La mesure/l'estimation des **stocks de carbone** se fait en considérant de nombreux compartiments. Les principaux sont :
 - La biomasse aérienne qui comprend les parties aériennes des arbres (tronc, branches, feuillage), des buissons et des herbacées. Elle peut se décliner en « *above-ground biomass* » (AGB) vivante et AGB morte, ce qui désigne essentiellement les arbres morts et les gros débris de bois
 - La biomasse souterraine qui comprend les racines (fines et épaisses) des arbres mais aussi celles des buissons et herbacées.
 - Le carbone organique du sol (soil organic carbon, SOC), parfois décliné en différents sous-compartiments en fonction de la vitesse de décomposition de la matière organique (MO) considérée.
 - La litière/la matière organique morte qui comprend la matière organique morte à la surface du sol – tant des feuilles sénescentes que des débris de bois, etc.

Les stocks de carbone sont plus ou moins importants selon l'occupation des sols, du plus élevé au plus faible : zones humides, prairies et forêts, cultures agricoles, zones artificialisées, autres terres.

- La **séquestration de carbone** est le processus dynamique sous-jacent qui permet d'analyser l'évolution des stocks de carbone. Cependant, sa mesure est rarement effectuée et sa modélisation est plus répandue.

3 SEQUESTERER DU CARBONE DANS LES EMPRISES VERTES DES ILT : ETAT DE L'ART

Les infrastructures ont un impact important sur le bilan carbone du sol. La construction et l'imperméabilisation des sols entraînent des pertes de carbone stocké dans le sol¹, ainsi que d'autres impacts négatifs sur plusieurs services écosystémiques (paysage naturel, bruit, culturel, pollution, biodiversité)².

Outre le sol, l'impact direct se traduit par une perte de carbone stocké dans la biomasse. Les effets de la perte de végétation ne se limitent pas aux zones environnantes, mais peuvent être ressentis sur de grandes distances du site de construction de l'infrastructure.

Les réseaux d'infrastructures linéaires de transports possèdent cependant des espaces qui ont le potentiel d'être aménagés afin de fournir des services écosystémiques (protection de la biodiversité, régulation des inondations...) dont le stockage de carbone.

À l'échelle mondiale le risque direct total du développement des infrastructures sur le stockage du carbone a été estimé à 802 990 043 tonnes de carbone provenant de la biomasse végétale et des sols, jusqu'à 1 m de profondeur³. Ces résultats montrent que d'importantes réserves de carbone pourraient être menacées par le développement des infrastructures. Les forêts représentent un important puits de carbone atmosphérique, séquestrant $7,6 \pm 49$ Gt CO₂eq par an⁴. Les pertes de ces écosystèmes essentiels peuvent donc avoir un impact profond sur les puits de carbone des zones fragiles et des écosystèmes.

Encadré : Infrastructures de transport en milieu tropical : un impact important sur les stocks de carbone et la biodiversité

Des études ont montré que l'introduction de haies forestières peut avoir un impact à 1,5 km de la lisière dans les forêts tropicales en raison de plusieurs facteurs tels que l'exposition accrue au vent et l'exsiccation⁵. Ils ont estimé que la biomasse aérienne dans les 500 premiers mètres de la lisière de la forêt est en moyenne 25 % inférieure à celle de l'intérieur de la forêt et que les réductions de 10 % s'étendent jusqu'à 1,5 km de la lisière de la forêt. Le développement des infrastructures augmente également l'accès aux écosystèmes éloignés, ce qui favorise leur exploitation et la dégradation qui en découle⁶. Cela souligne l'importance de gérer non seulement les infrastructures et les zones limitrophes, mais de se concentrer sur une gestion plus holistique de l'écosystème environnant. La déforestation pour le développement des infrastructures peut également affecter le climat local, avec des dommages aux écosystèmes environnants du fait que la zone devient plus sèche et aride, avec des impacts négatifs sur le puits de carbone.

¹ Tardieu, L., Roussel, S., Thompson, J.D., Labarraque, D., Salles, J.M. (2015). Combining direct and indirect ecosystem service loss into environmental impact assessment for infrastructure construction. *Journal of environmental management* 152, 145-157

² Ibisch, P. L., Hoffmann, M. T., Kreft, S., Pe'Er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., Dellasala, D. A., Vale, M. M., Hobson, P. R., & Selva, N. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354, 1423– 1427. ; Carter et al., 2020. Carter N, Killion A, Easter T, Brandt J, Ford A. 2020. Road development in Asia: assessing the range-wide risks to tigers. *Science Advances* DOI 10.1126/sciadv.aaz9619

³ *Global Infrastructure Mapping and Modelling – Plans, Trains and Automobiles*, 2022.

⁴ Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240.

⁵ Chaplin-Kramer, R., Ramler, I., Sharp, R., Haddad, N. M., Gerber, J. S., West, P. C., ... & King, H. (2015). Degradation in carbon stocks near tropical forest edges. *Nature communications*, 6(1), 1-6.

⁶ Freitas, S. R., Hawbaker, T. J., & Metzger, J. P. (2010). Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest ecology and management*, 259(3), 410-417.

3.1 Les dépendances vertes des ILT en France

Les Infrastructures Linéaires de Transports sont un ensemble d'infrastructures dont la fonction principale est d'accueillir un trafic de véhicules, cela comprend les routes (autoroutes, nationales, départementales et communales), le réseau ferroviaire exploité par la SNCF et les réseaux ferrés de transport urbain.

Le tableau ci-dessous reprend les différentes typologies d'ILT et chiffre les linéaires de chacune.

Type d'infrastructure	Caractéristiques de l'infrastructure		Étendue kilométrique
Routes 1 073 500 km	Transport de longue distance	Autoroutes concédées	9000 km
		Autoroutes non concédées	26 000 km
		Autres routes nationales	9600 km
	Transport de courte distance	Routes départementales	379 000 km
		Routes communales	673 300 km
Réseau ferroviaire exploité par la SNCF 29 300 km	Lignes de TGV		2 000 km
	Autres lignes ferroviaires à deux voies et plus		14 900 km
	Lignes ferroviaires à une voie		12 400 km
Réseaux ferrés de transport urbain 1100 km	Métro et RER		500 km
	Tramways		700 de km

TABLEAU 1 | TYPOLOGIES D'ILT ET ETENDUE (SOURCE : MEMENTO DES TRANSPORTS, SOES, 2014).

NB : des chiffres plus récents sont disponibles dans le rapport DataLab du CGDD Chiffres clés du transport Édition 2020⁷.

La France est le plus grand pays d'Europe en termes de superficie en incluant les DROM-COM et le second en termes de population. Elle dispose de réseaux de transports plus denses et étendus que les pays voisins. La densité du réseau routier français, qui rapporte la longueur du réseau routier et de la population, est de 16 km pour 1 000 habitants. Le réseau ferroviaire français, lui, représente 30.3 milliers de km en 2013. Cela équivaut à une densité de 480m pour 1 000 habitants, ou encore 55 m pour 1 km².

3.1.1 Identifier et définir les dépendances vertes d'ILT

Les zones situées à proximité des routes (figure 2) et des voies ferrées (figure 3) présentent des occupations du sol et des caractéristiques différentes en fonction de la zone géographique, de l'écologie de la zone, de l'histoire de la production et de l'utilisation du sol. Les emprises vertes, ou dépendances vertes représentent l'ensemble des terrains végétalisés accessoires à une infrastructure tels que les accotements, les fossés, les talus, les terres pleins, les aires de repos et les points d'arrêts⁸.

⁷ <https://www.ortl-grandest.fr/wp-content/uploads/2020/05/datalab-66-chiffres-cles-transport-edition-2020-mars2020.pdf>

⁸ Direction Interdépartementale des Routes, 2012

On peut cependant identifier une constante dans les dépendances vertes des ILT :

- **Des zones de proximité immédiate aux abords de l'infrastructure** : cette zone se situe de moins de 1 mètre jusqu'à 3 mètres de l'infrastructure en tant que telle, et est gérée par le concessionnaire. Ces zones sont généralement végétalisées avec des espèces herbacées afin d'éviter la chute de branches et d'éventuels arbres dans la zone de la piste/voie. Les sols de la zone sont généralement des sols fortement anthropisés (anthrosols/technosols) qui ont une faible teneur en carbone et une faible structure. Ce sont des zones à forte contraintes de sécurité.
- **Des zones d'entretien** : cette zone se situe de 3 mètres à 16 mètres de l'infrastructure et est gérée par le concessionnaire. Ces zones comprennent généralement une zone de transition à proximité du talus, et dans les zones plus éloignées, l'utilisation des sols peut varier en fonction des régions et écosystèmes.

Les accotements routiers accueillent une biodiversité importante et sont bien positionnés pour fournir un large éventail de services écosystémiques⁹.

- **Des zones éloignées et en dehors de la concession/ domaine routier géré** : cette zone peut sortir du périmètre de la concession et n'est donc pas forcément gérée par le concessionnaire ou gestionnaire de l'infrastructure, néanmoins sa proximité immédiate avec l'infrastructure est intéressante à étudier (de 16 mètres à 500 mètres de l'infrastructure). Il s'agit de la zone bordant le périmètre de l'infrastructure, gérée par des personnes privées ou des organismes publics. L'intérêt de cette zone réside dans la possibilité de mener des projets participatifs avec les gestionnaires d'infrastructures, de créer un lien direct avec les habitants de la zone et de financer les services écosystémiques. Pour cette étude, la zone considérée s'étend jusqu'à 500m de l'infrastructure, bien que la distance varie en fonction du projet et de la situation. Parfois, une partie de cette zone peut faire partie de la concession (par exemple, aires de repos), mais cela reste ponctuel.

En général, les gestionnaires d'infrastructures concentrent leurs efforts de gestion de la végétation sur les **zones de proximité immédiate** et les **zones d'entretien**. Cependant, les gestionnaires peuvent parfois posséder des terres dans des **zones éloignées de l'infrastructure**. Ces zones rentrent pourtant peu en considération dans les stratégies de gestion.

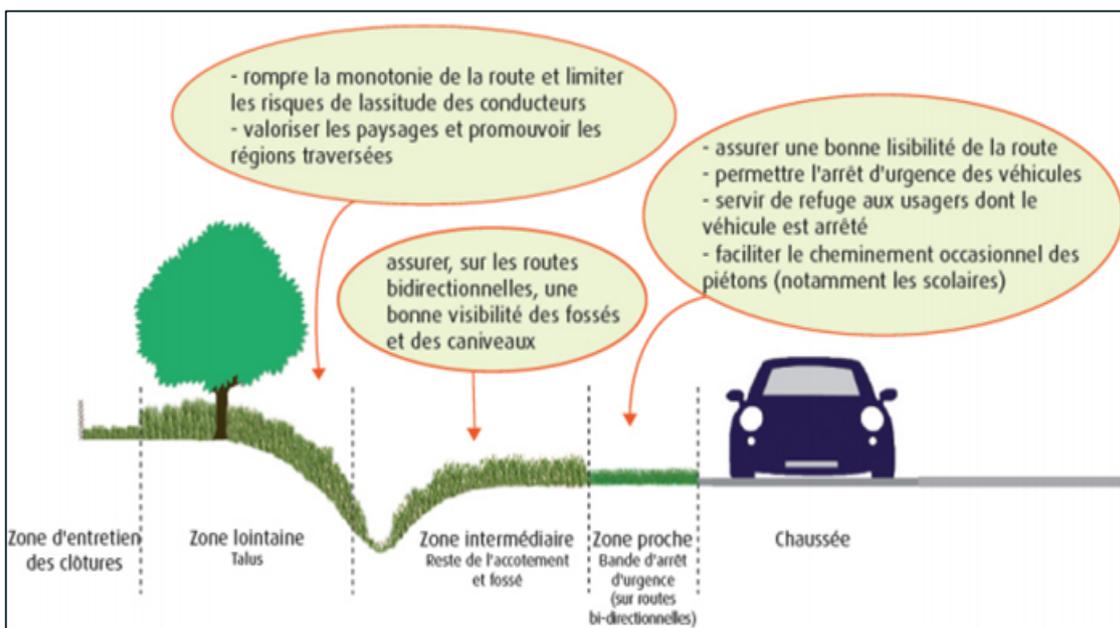


FIGURE 1 | TYPOLOGIES ET CARACTERISATION DES DEPENDANCES VERTES D'UN ILT AUTOROUTIERE (SOURCE : DIRECTION INTERDEPARTEMENTALE DES ROUTES CENTRE OUEST, 2012)

⁹ O'Sullivan, O. S., Holt, A. R., Warren, P. H., & Evans, K. L. (2017). Optimising UK urban road verge contributions to biodiversity and ecosystem services with cost-effective management. *Journal of environmental management*, 191, 162-171.

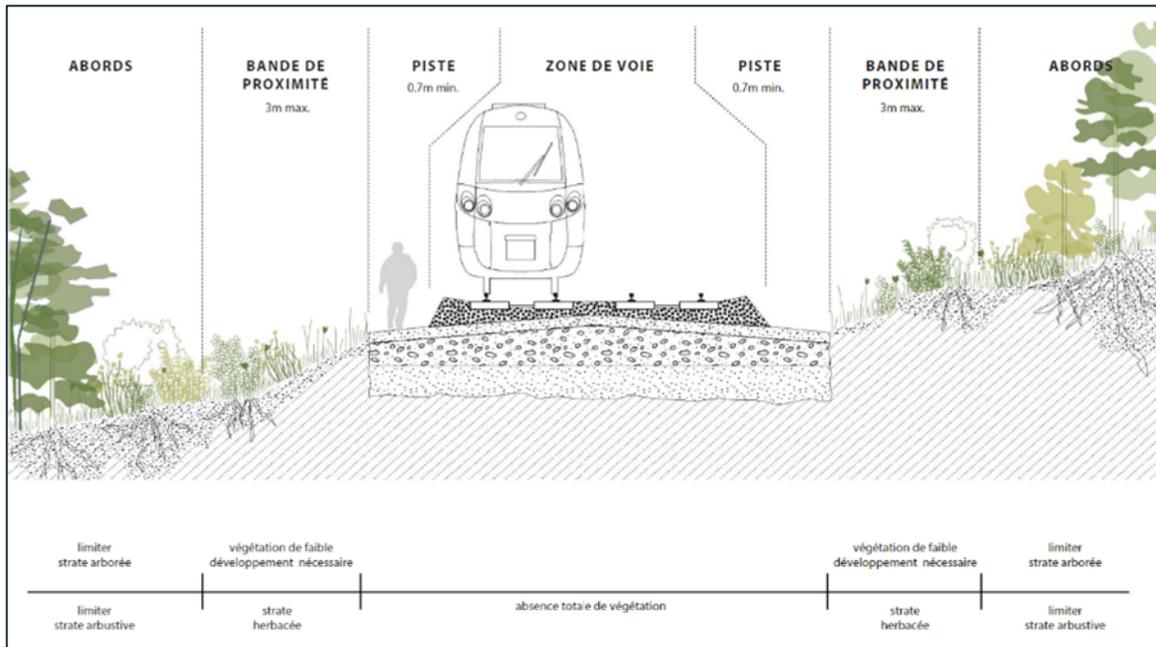


FIGURE 2 | TYPOLOGIE ET CARACTERISATION DES DEPENDANCES VERTES D'UNE ILT FERREE (SOURCE : AREP)

3.1.2 Caractériser les écosystèmes traversés

Dans le cadre de la France, l'hypothèse structurante concernant les dépendances vertes des ILT est de déterminer la largeur des **zones de proximité immédiate** et **zones d'entretien** : nous avons retenu une **largeur cumulée de part et d'autre de 16 mètres pour les zones de proximité immédiates et zones d'entretien ; et 500 mètres pour les zones éloignées et en dehors de l'infrastructure**. Il s'agit de représenter une partie où les gestionnaires d'ILT peuvent avoir un impact direct (jusqu'à 16 mètres) et une autre où ils peuvent alors travailler avec les parties prenantes présentes (jusqu'à 500 mètres).

Caractériser l'occupation des sols et les écosystèmes traversés est une étape essentielle pour pouvoir ensuite réaliser une extrapolation du potentiel de séquestration des dépendances vertes des ILT. Nous cherchons dans cette partie à **calculer les surfaces d'occupation du sol de l'environnement proche du réseau autoroutier en utilisant les données issues des référentiels existants**, pour aboutir à une répartition des écosystèmes traversés par le réseau qui soit similaire à celle présentée par AREP pour le réseau ferré (voir résultats).

Nous avons cherché ici à **calculer les surfaces d'occupation du sol de l'environnement proche du réseau autoroutier en utilisant les données issues des référentiels existants** (ce travail n'a pas porté sur les réseaux routiers nationaux, ou autres réseaux urbains du fait d'une absence d'uniformité des données).

La section ci-dessous illustre la méthodologie proposée pour le réseau autoroutier français.

3.1.2.1 Méthode pour caractériser l'environnement proche du réseau autoroutier en se basant sur un référentiel existant

■ Données utiles :

- **La carte d'occupation des sols** : le principe est d'analyser la carte d'occupation du sol réalisée par le CNES « Theïa » pour l'année 2020, elle comporte 23 classes, qui ont été groupées pour les besoins de l'étude en 10 classes telles que présentées ci-dessous.

Bâti	Pelouses & Landes
Routes	Surfaces minérales
Surfaces agricoles	Sable/plages et dunes
Prairies	Neiges
Forêts	Eau

TABLEAU 2 | CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS POUR LE RESEAU AUTOROUTIER POUR 2022



Nous avons retenu cette source de donnée car il s'agit de la carte d'occupation des sols à l'échelle nationale la plus précise (10 mètres de résolution) et la plus actualisée.

FIGURE 3 | CARTE D'OCCUPATION DES SOLS DE LA FRANCE METROPOLITAINE POUR L'ANNEE 2020 (SOURCE : CNES)

- **Le réseau autoroutier français** : le linéaire est extrait de Route_500, fourni par l'IGN.

FIGURE 4 | CARTE DU RESEAU AUTOROUTIER FRANÇAIS (SOURCE : ROUTE_500, IGN)



■ Méthodologie :

NB : l'ensemble des cartes et figures présentées dans cette partie sont des productions propres.

- Première étape : nous réalisons l'**extraction de l'environnement proche** : nous retenons une zone tampon de 500m de part et d'autre de l'infrastructure (correspondant à la totalité de l'espace représenté par la zone de proximité immédiate ; la zone d'entretien ; la zone éloignée et en dehors de la concession).

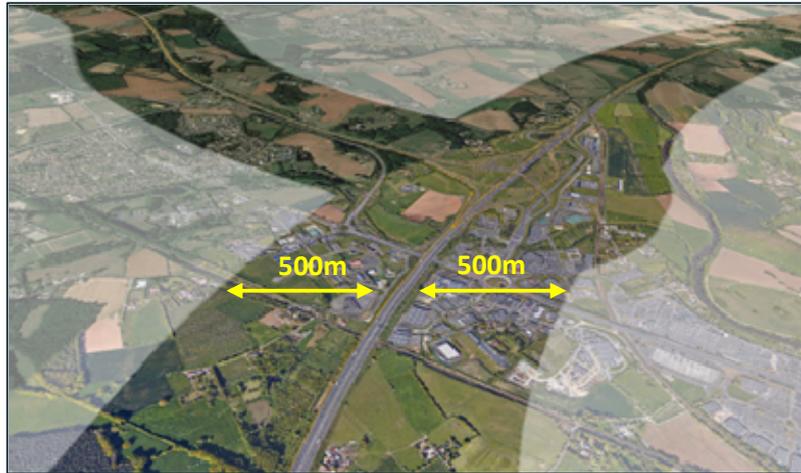


FIGURE 5 | ILLUSTRATION DES ESPACES CONSIDERES POUR L'ETUDE

- Deuxième étape : nous réalisons l'extraction de l'occupation du sol de la zone considérée.

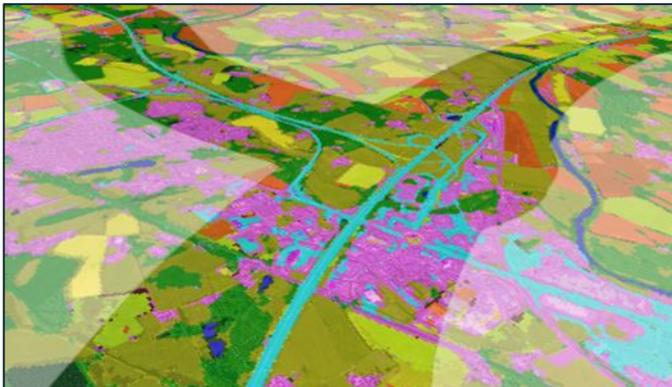


FIGURE 6 | ILLUSTRATION DE L'EXTRACTION PAR CLASSES DE L'OCS SUR UNE ZONE.

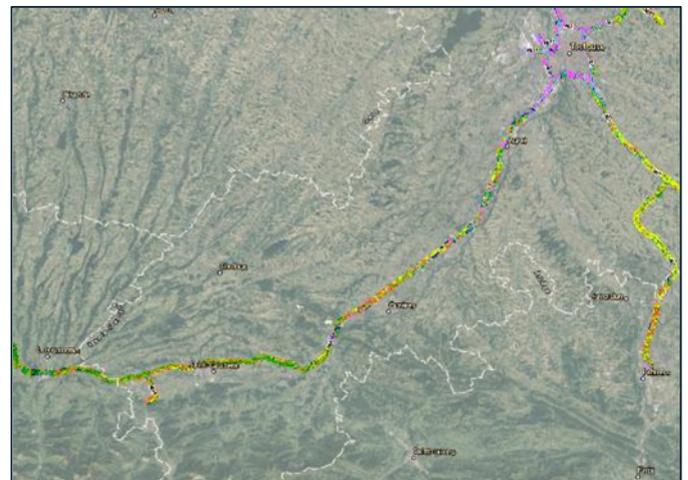


FIGURE 7 | RENDU DE L'EXTRAPOLATION DE L'ANALYSE PAR POLYgone A L'Echelle REGIONALE

- Troisième étape : nous réalisons la **conversion des données en vecteurs** : afin de faciliter les calculs géométriques, nous transformons les données raster en surfaces vectorielles.



FIGURE 8 | ILLUSTRATION DE LA VECTORISATION DES CLASSES D'OCS

- Quatrième étape partie a : nous réalisons le **calcul des surfaces à l'intérieur du périmètre des 500m**.

OCS	Surface ha	%
Bâti	159 140	13,8
Routes	40 127	3,5
Surfaces agricoles	392 356	33,9
Prairies	216 716	18,8
Forêts	294 947	25,5
Pelouses & Landes	34 967	3,0
Surfaces minérales	1 508	0,1
Sable/plages et dunes	3 027	0,3
Neiges	8	0,0
Eau	129 06	1,1
Total	1 155 702	100

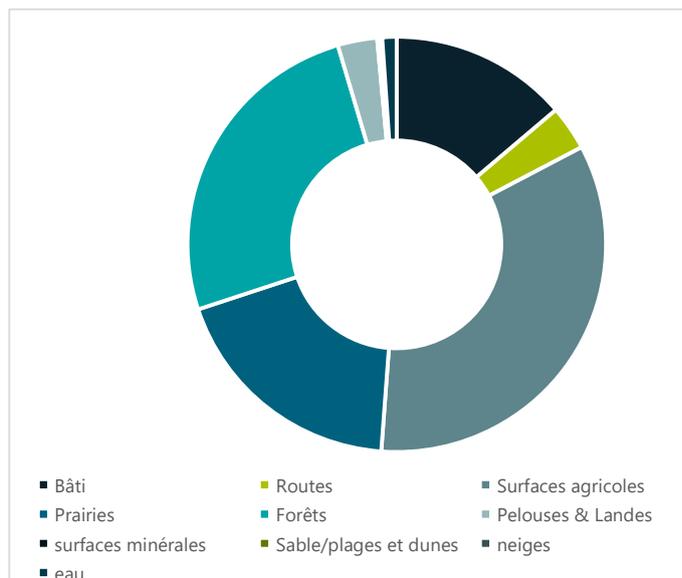


TABLEAU 3 | CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS A L'EHELLE FRANÇAISE POUR LE RESEAU AUTOROUTIER FRANCE (BANDE DE 500 M)

FIGURE 9 | REPARTITION DE L'OCS SUR LES AUTOROUTES EN FRANCE (BANDE DE 500 M)

Si l'on considère que les prairies font partie des surfaces agricoles, les groupements des surfaces en grandes catégories représentent :

OCS	Surface en ha	%
Zones urbaines	200 775	17,4
Zones naturelles	345 855	29,9
Zones agricoles	609 072	52,7

TABLEAU 4 | SYNTHÈSE DES OCS PAR TYPE DE ZONES (BANDE DE 500M)

- Quatrième étape partie b : nous réalisons le **calcul des surfaces à l'intérieur du périmètre des 16m**.

OCS	Surface ha	Surface %
Bâti	16 064,33	20
Routes	27 982,23	35
Surfaces agricoles	3 587,56	4
Prairies	3 261,49	4
Forêts	9 273,53	12
Pelouses & Landes	2 892,43	4
Surfaces minérales	1 507,93	2
Sable/plages et dunes	3 027,49	4
Neiges	8,01	0
Eau	12 906,02	16
Total	80 511,02	100

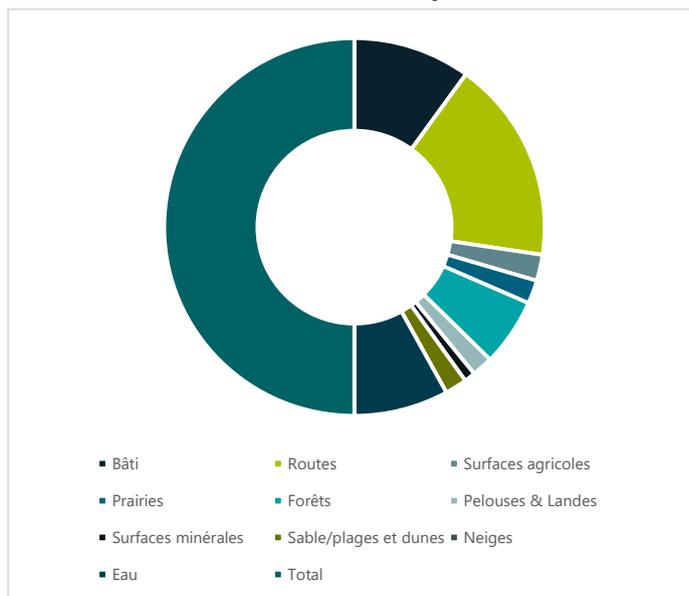


TABLEAU 5 | CLASSES D'OCCUPATION DES SOLS A L'ECHELLE FRANÇAISE POUR LE RESEAU AUTOROUTIER FRANCE (BANDE DE 16 M)

FIGURE 10 | REPARTITION DE L'OCS SUR LES AUTOROUTES EN FRANCE (BANDE DE 16 M)

Si l'on considère que les prairies font partie des surfaces agricoles, les groupements des surfaces en grandes catégories représentent :

OCS	Surface en ha	%
Zones urbaines	45 554	57
Zones naturelles	28 107	35
Zones agricoles	6 849	9

TABLEAU 6 | SYNTHESE DES OCS PAR TYPE DE ZONES (BANDE DE 16M)

- Cinquième étape : nous réalisons le **calcul des ratios par tronçon de 100m**. Pour cela, nous découpons la zone tampon en tronçons de 1km de long :

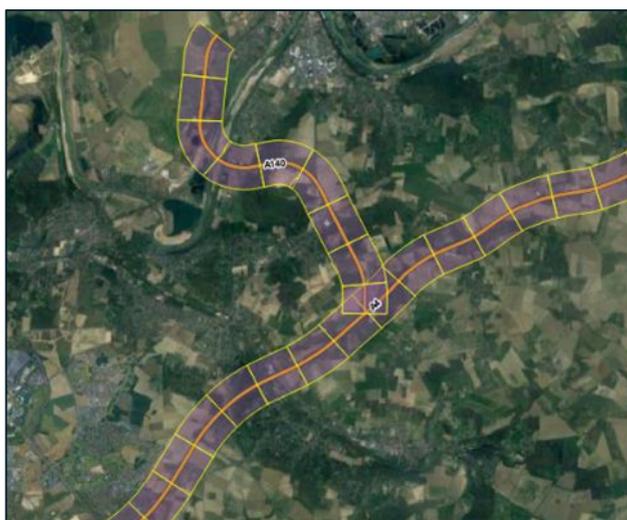
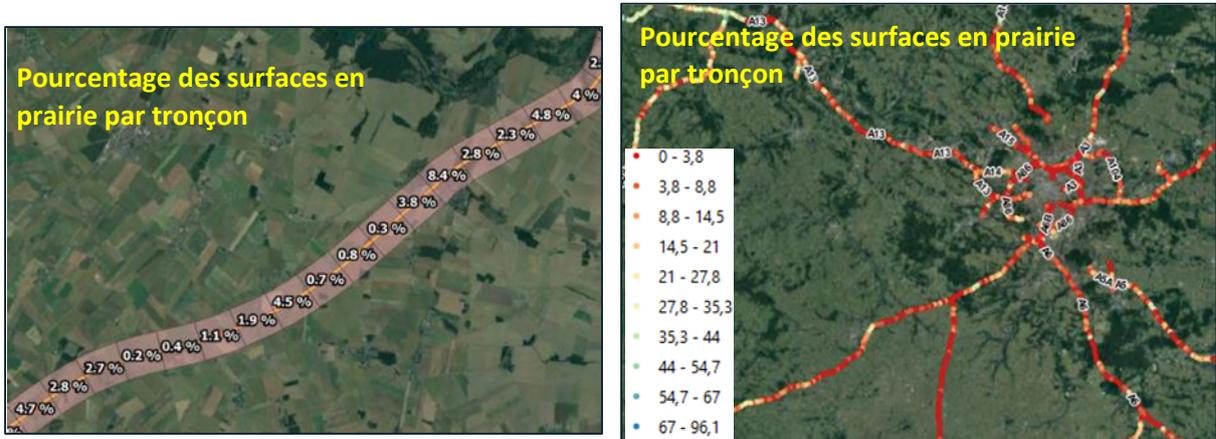


FIGURE 11 | ILLUSTRATION DES TRONÇONS – 1 TRONÇON = 100 M

Procéder par ratio de 100 mètres permet d'avoir un niveau de finesse d'appréciation des statistiques d'occupation du sol lisibles à l'échelle globale (apprécier le pourcentage des surfaces de chaque occupation du sol à une échelle suffisamment fine, mais également suffisamment visible sur une carte à échelle intermédiaire ou régionale, comme présenté par la suite).

Cela nous permet de calculer le pourcentage de chaque occupation par tronçon :



FIGURES 12 A ET B | ILLUSTRATIONS DES POURCENTAGE DES SURFACES EN PRAIRIE PAR TRONÇON, VISUALISATION DE LA PRESENCE DE L'ESPACE DE PRAIRIE EN TRONÇON PAR INTENSITE DE COULEUR

Cette méthode permet d'avoir une appréciation visualisée de l'occupation des sols sur tout le long du linéaire. Dans les cartes ci-dessous et ci-dessus, les couleurs vont du bleu au rouge pour représenter la densité d'occupation du sol par un système de prairie par tronçon en comparaison à d'autres types d'occupation du sol : plus le tronçon est rouge, plus le tronçon est occupé par un système de prairie ; plus le tronçon est bleu, moins le tronçon est occupé par un système de prairie.



FIGURE 13 | POURCENTAGE DES SURFACES DE FORET PAR TRONÇON (MEME PROCEDE QUE FIGURE 12) A L'ECHELLE SOUS-REGIONALE

3.1.2.2 Ouverture : autre approche possible par télédétection

Une seconde approche serait de **calculer les surfaces d'occupation du sol de l'environnement proche du réseau autoroutier en utilisant les données issues des résultats de classification d'images satellitaires.**

Cette méthode a l'avantage de produire des données sur mesure et d'apporter une vision plus globale et pertinente, mais représente un investissement conséquent en moyens techniques et humains (en particulier vue la zone d'étude étendue).

NB : l'éditeur va publier la nouvelle génération de Corine Land Cover qui utilise des données plus fines que celles utilisées dans la première version de l'outil. Les classes d'occupation du sol remplaceront éventuellement plusieurs parties de la méthodologie qui suit.

Pour réaliser les classifications d'occupation du sol, les données suivantes peuvent être utilisées en plus des données d'apprentissage pour réaliser les modèles de classification :

- Les **données optiques** sont utilisées afin de suivre l'évolution de l'activité végétative.
- Une **approche multi-temporelle** est utilisée pour différencier les comportements végétatifs.
- Les produits les plus adaptés à cette problématique sont les **synthèses mensuelles produites par Theia** d'images de niveau 3 qui offrent des données homogènes et régulières à l'échelle nationale.

3.1.2.3 Synthèse des espaces traversés

Pour la France, la répartition du réseau selon l'occupation des sols se base sur :

- Pour le **réseau ferré**, le Système d'Information Géographique (SIG) du Ministère de la Transition Ecologique (MTE), et les données *open data* de la SNCF.
- Pour le **réseau autoroutier**, le rapport de l'ASFA en date de 2022 et les données IGN (Routes 500).
- Pour l'**occupation du sol à l'échelle de la France**, Carte d'occupation du sol OSO + Corine Land Cover.

Synthèse de l'application de la méthodologie et des données trouvées dans la littérature :

Type d'ILT	Réseau	% milieu urbain	% milieu agricole	% milieu naturel	Ha dépendances vertes
Réseau ferré (source : AREP)	35 000 km	26 %	58%	16%	41 440 ha
Réseau autoroutier (source : calcul dont la méthodologie est explicitée ci-avant)	11 412 km dont 8 578 km concedées	17,4%	29,9%	52,7%	39 000 ha ¹⁰

TABLEAU 7 | DONNEES SUR LES RESEAUX FERRES ET AUTOROUTIERS EN FRANCE (SOURCES : AREP ET CALCUL SELON LA METHODOLOGIE EXPLICITEE CI-CONTRE)

Le rapport de l'ASFA indique un inventaire pour l'ensemble du réseau au nombre de 363 pour les aires de services, et 628 pour les aires de repos. Ces sites peuvent être boisés, et doivent être considérés dans l'analyse.

¹⁰ AFSA, 2020.

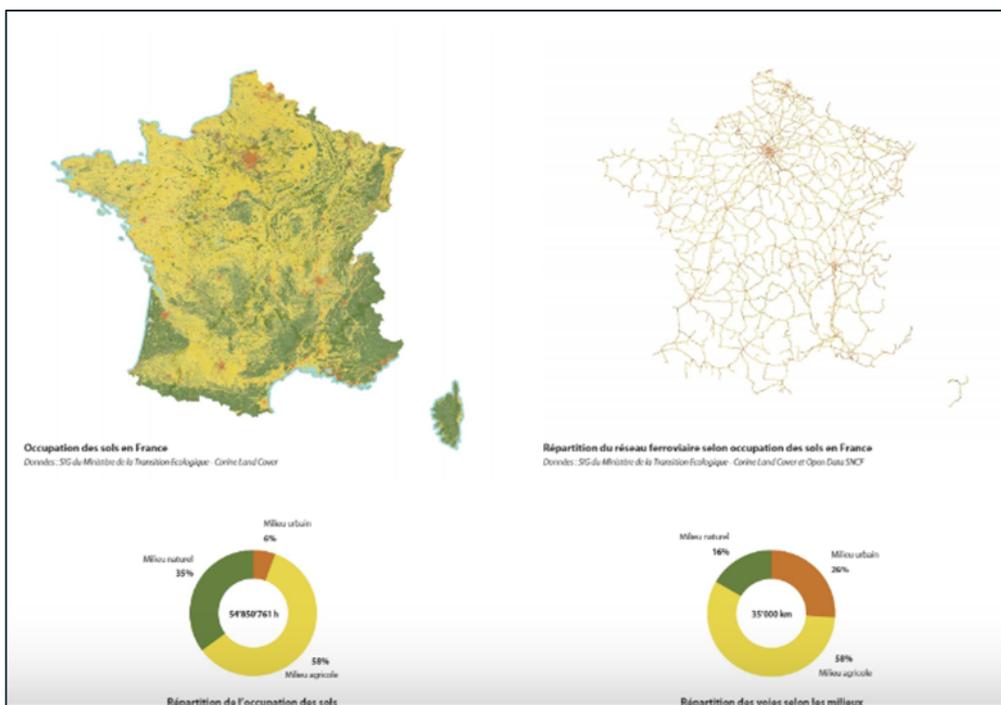


FIGURE 14 | LE RESEAU FERROVIAIRE EN FRANCE (SOURCE : AREP)

Les stocks de carbone selon les classes d'occupation du sol – quelques ordres de grandeur

Si les zones de proximité aux abords des ILT sont essentiellement composées d'espaces végétalisés mais fortement anthropisés, les **zones d'entretien et les zones éloignées et en dehors de la concession** se composent de différents écosystèmes qui doivent être protégés pour assurer la stabilité du carbone stocké dans le sol et la biomasse.

Les écosystèmes terrestres représentant actuellement le plus grand puit carbone en France métropolitaine sont les **forêts**. Elles sont estimées à 90 millions de tonnes de CO₂ éq par an¹¹. Ce chiffre représente 20% des émissions françaises de 2015. Or, les forêts constituent 30% de la surface du territoire métropolitain, elles sont donc l'un des écosystèmes majeurs à protéger.

Les **prairies permanentes saines** sont un autre écosystème à maintenir et protéger. Elles sont un puits de carbone estimé à 3 millions de tonnes de CO₂ éq par an. Selon des études provenant des inventaires des sols, l'estimation de la séquestration de carbone dans les sols de prairies serait de 0.18 tonne de CO₂ éq par hectare par an¹². La conversion de ces systèmes en sols agricoles impliquerait une perte de carbone du sol due à la surproduction et aux perturbations du sol, ils doivent donc être préservés. La conversion en forêt peut diminuer le stock de carbone dans le sol, mais cet effet négatif peut être contrebalancé par l'augmentation du stock de biomasse.

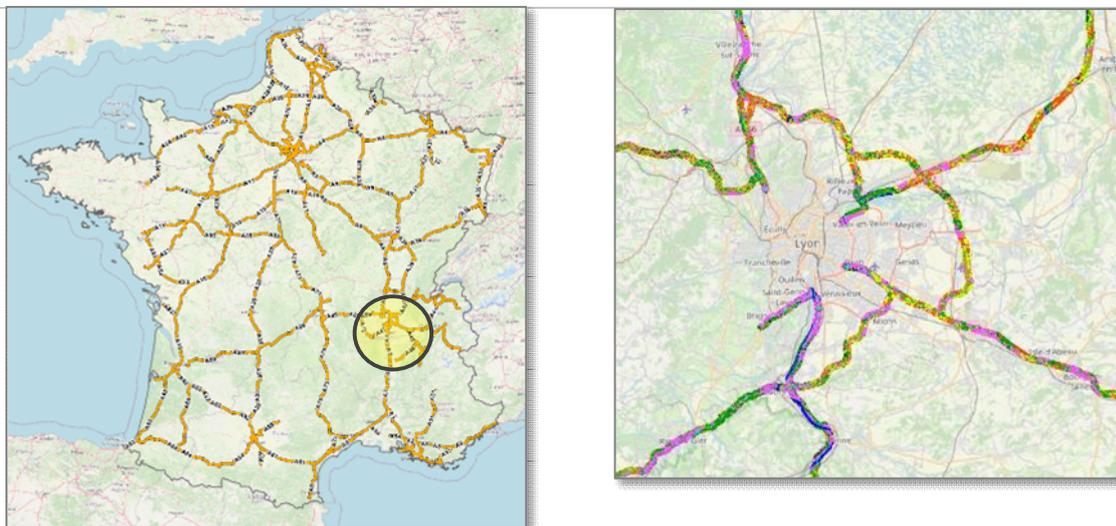
Les **zones humides** sont un autre écosystème clé à protéger. En raison de l'environnement anoxique, les zones humides présentent des niveaux élevés de carbone et le carbone stocké présente une grande stabilité, s'il ne rencontre pas de cycles de séchage et d'humidification qui peuvent augmenter la minéralisation du carbone¹³. Bien que les zones humides soient reconnues comme des éléments clés du stockage du carbone par différentes institutions (par exemple, l'Accord de Paris et le cadre de la politique climatique et énergétique de l'UE à l'horizon 2030), seules 19 % d'entre elles sont considérées comme des zones humides gérées et sont donc comptabilisées

^{11, 12, 15} EFSE (2019) Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques

¹³ Gao, J., Feng, J., Zhang, X., Yu, F. H., Xu, X., & Kuzyakov, Y. (2016). Drying-rewetting cycles alter carbon and nitrogen mineralization in litter-amended alpine wetland soil. *Catena*, 145, 285-290.

dans le bilan d'émissions de GES¹⁴. Les zones humides doivent donc être considérées et protégées comme des stocks de carbone essentiels.

Parmi les **écosystèmes agricoles**, représentant 60% du territoire métropolitain, les terres cultivées sont une source d'émission avec 1 million de tonnes de CO₂ éq par an¹⁵.



FIGURES 15 A ET B | OCCUPATION DU SOL DANS L'ENVIRONNEMENT IMMEDIAT DU RESEAU AUTOROUTIER

3.2 Quantifier les stocks actuel et potentiel des ILT : état de l'art méthodologique

3.2.1 Types de données utilisées

Différentes données sont nécessaires pour la quantification des stocks et des puits de carbone du sol :

- Données directes sur la teneur en carbone du sol,
- Données sur le type de sol,
- Couverture du sol,
- Zones climatiques,
- Autres données selon la zone climato-pédologique et les caractéristiques particulières liées à l'emplacement de l'ILT.

Le croisement de l'ensemble de ces données est nécessaire pour réaliser la modélisation du carbone du sol. Ci-après un tableau récapitulant certaines des données les plus intéressantes. Elles sont classées par :

- Zones géographiques (France à International),
- Niveau hiérarchique (*tier level*) de 1 à 3, où 1 sont des données provenant d'une base de données préexistante (issue de la recherche ou agrégation de données collectées lors d'études), 2 des données personnalisées sur des études régionales/locales, 3 des données collectées sur le terrain, spécifiques à la zone d'étude.
- Dernière date d'actualisation.

¹⁴ Malak, D. A., Marín, A. I., Trombetti, M., & Roman, S. S. (2021). Carbon pools and sequestration potential of wetlands in the European Union. Viena and Malaga: European Topic Centre on Urban, Land and Soil Systems.

Base de données	Tier level	Couverture géographique	Format	Résolution Spatiale	Dernières actualisations	Couverture Temporelle	Source	Fournisseurs de données
Base de Données Géographique des Sols de France	2	Pays - France	.zip	1km	2018	-	Lien	RMQS
Corine land cover	2	Régional - Europe	GEE and raster download	10m	1990, 2000, 2006, 2012, 2018		Lien	Copernicus global land service
European soil database	2	Régional - Europe	ESRI GRID format	1km	2006	Non	Lien	JRC - ESDAC
European soil regions	2	Régional - Europe	Vectorial	125m	2020		Lien	Geological Survey Organisations of Europe
LUCAS 2015 TOPSOIL data	3	Régional - Europe	db	-	2015	Oui	Lien	JRC - EUSO
IPCC default soil classes, version 1.2	1	Global	Geotifs	1km	2021	Non	Lien	ISRIC
IPCC climate zones	1	Global	tif	1km	2020	Non	Lien	TNC
FAO/UNESCO Soil Map of the World	1	Global	pdf				Lien	FAO/UNESCO
Harmonised world soil database	1	Global	ASCII	1km	2012	Non	Lien	FAO/ISRIC/JRC
TERRACLIMATE	2	Global	Netcdf	4km	1958-2018	Non	Lien	NCAR
Global Land Cover Characterization	2	Global	GEE and raster download	1km	1996	Non	Lien	USGS
WorldCover ESA 2020	2	Global	GEE and raster download	10m	2020	Oui	Lien	ESA/Copernicus
Copernicus - Global Land Cover	2	Global	GEE and raster download	100m	2019	Non	Lien	Copernicus global land service
SoilGrids Predicted WRB subgroup classes	3	Global	Geotifs	250m	2020	Oui	Lien	ISRIC
Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries	2	Global	Stac catalogue	10m	2021		Lien	ESRI/Microsoft/Impact Observatory
Dynamic world	3	Global	GEE and raster download	10m	2022	Oui	Lien	Google/WRI
Carte d'occupation des sols (CES OSO)	3	Pays - France	raster download	10m	2020	Oui	Lien	Theia

TABLEAU 8 | BASES DE DONNEES UTILES POUR LA QUANTIFICATION DES STOCKS ET PUIXS DE CARBONE

3.2.2 Type de traitement pour modéliser le potentiel

Différentes approches sont disponibles lorsqu'il s'agit d'estimer les stocks et les puits de carbone, qui peuvent être adaptées à la réalité des infrastructures. Le chapitre ci-dessous recense les possibilités à date pour la production de ce rapport.

3.2.2.1 Modèles stochastiques

Généralement, ces modèles **estiment une quantité moyenne de carbone stockée** dans différents réservoirs (biomasse, sol, litière, biomasse morte) **sur la base des stocks moyens de carbone liés à différentes utilisations des sols/climats**.

Une donnée complémentaire importante est généralement l'état d'un écosystème spécifique (en particulier pour les prairies et les forêts : sain, modérément dégradé, dégradé, fortement dégradé) et sa gestion (en particulier pour l'agriculture : agriculture conservatrice/traditionnelle, utilisation de fumier ou compost, utilisation de pratiques durables pour les sols telles que le non-travail du sol, les cultures de couverture, la rotation prolongée, etc). Différentes bases de données ont été créées, comprenant des données issues de la littérature, qui mettent en relation ces caractéristiques avec la teneur en carbone du sol.

Deux des modèles les plus utilisés dans ce sens sont ALDO en France, appuyé sur la base de données et la méthodologie de l'ADEME ; et ExACT pour le monde, appuyé sur la base de données de la FAO, et des facteurs d'émissions du GIEC.

Ces modèles permettent également de quantifier les évolutions de puits de carbone suite à des changements d'utilisation ou de gestion des terres. L'estimation s'appuie sur une base de données qui relie un changement

spécifique de gestion/utilisation des terres à une augmentation/diminution de l'absorption du CO₂ par différents réservoirs (sol/biomasse/litière sont les trois principaux réservoirs considérés dans ces modèles).

D'autres types d'entrées peuvent également être ajoutées (spécifiquement dans ExACT) concernant le risque d'incendie, l'humidification/le drainage des tourbières, les émissions de CO₂ dues à la gestion de ces espaces naturels (utilisation de machines, constructions, irrigation, etc.). En conséquence, ces modèles donnent la différence entre un scénario classique et le scénario amélioré. Ci-après la description des modèles :

■ Outil Aldo

Fournit des estimations par défaut de la séquestration du carbone au niveau administratif local français et fournit pour chaque zone ses stocks de carbone ainsi que les flux de carbone liés au changement d'affectation des sols, à la croissance des forêts et au stockage des produits ligneux. Les données proviennent des cartes Corine Land Cover (CLC) pour l'occupation et les changements d'occupation des sols, de l'inventaire français des sols (GIS Sol, www.gissol.fr) pour les stocks de carbone des sols, de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) pour la biomasse forestière et de la méthodologie nationale d'inventaire des GES¹⁶ pour les produits bois. L'outil donne également des valeurs de référence nationales de séquestration pour plusieurs pratiques agricoles¹⁷. L'outil peut être utilisé pour estimer la séquestration du carbone au cours du passé récent ou pour explorer des scénarios futurs mettant en œuvre plusieurs options d'atténuation.

Avantages	Inconvénients
Estimation rapide	Grande incertitude
Convient aux études à grande échelle	Ne convient pas aux études à petite échelle
Peut être utilisé en combinaison télédétection	Pas de possibilité de modéliser les stocks de carbone actuels
Données sur mesure sur différents EPCI de France	

■ Invest

Invest comprend une suite d'outils permettant de calculer l'offre d'une série de services écosystémiques. Un module calcule les stocks et la séquestration du carbone. Le modèle fait correspondre les densités de stockage du carbone aux classes d'utilisations des terres définies dans des trames. L'outil utilise les valeurs spécifiées des stocks de carbone et de la séquestration par classe et résume les résultats en sorties matricielles de stockage, de séquestration et de valeur, ainsi qu'en totaux agrégés.

Pour chaque type d'utilisation des terres, le modèle requiert une estimation de la quantité de carbone dans au moins un des quatre bassins fondamentaux (biomasse souterraine, biomasse épigée, sol, nécromasse), exprimée en tonnes métriques par hectare (t/ha). Si vous disposez de données pour plus d'un bassin, les résultats modélisés seront plus complets. Le modèle applique simplement ces estimations à la carte de l'utilisation des terres pour produire une carte du stockage du carbone dans les bassins de carbone inclus.

Si vous fournissez une carte de l'occupation des sols actuelle et future, il est possible de calculer la variation nette du stockage du carbone au fil du temps (séquestration et perte). Pour estimer ce changement dans la séquestration du carbone au fil du temps, le modèle est simplement appliqué au paysage actuel et à un paysage futur projeté, et la différence de stockage est calculée, pixel par pixel. Si plusieurs scénarios futurs sont disponibles, les différences entre le paysage actuel et chaque paysage futur alternatif peuvent être comparées.

¹⁶ CITEPA, 2018. Bartaire, Jean-Guy, & Boutang, Jerome (2020). Citepa - Activity report 2016, 2017, 2018, and 2019 (INIS-FR--21-0385). France

¹⁷ Chenu, C., Angers, D., Metay, A., Colnenne-David, C., Klumpp, K., Bamière, L., ... & Pellerin, S. (2014, June). Le potentiel des pratiques agricoles pour augmenter le stockage de C dans les sols cultivés: une évaluation pour la France. In 12ème Journées Nationales d'Etude des Sols (pp. 382-p) ; Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J. P., ... & Chemineau, P. (2017). Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. Environmental Science & Policy, 77, 130-139.

Les résultats du modèle sont exprimés en tonnes métriques (ce qui correspond à des mégagrammes) de carbone par pixel et, si on le souhaite, la valeur de la séquestration en unités monétaires par pixel.

Avantages ¹⁸	Inconvénients
Modèle couvrant de multiples services écosystémiques et leur valeur économique	Incertitudes de résultat lié aux bases de données utilisées
Résultats spatialisés	Surestimation des stocks de carbone
Résolution spatiale des analyses flexible, permettant aux utilisateurs d'aborder des questions à l'échelle locale, régionale ou mondiale	

■ EX-ACT

L'outil Ex-Ante Carbon-balance (EX-ACT) est basé sur la méthodologie du GIEC pour les inventaires d'émissions de GES. Il a été développé par la FAO et est principalement basé sur le volume 4 du Raffinement 2019 des Lignes directrices 2006 pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (GIEC, 2019) et le Supplément 2013 aux Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre : Zones humides (GIEC, 2014).

- Les flux de GES provenant des opérations agricoles, des intrants, du transport et de la mise en œuvre des systèmes d'irrigation sont basés sur Lal (2004).
- Les facteurs d'émission pour l'utilisation de l'électricité sont basés sur la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 2021).
- Les émissions pour les infrastructures à la ferme proviennent de l'Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME, 2021).
- Les facteurs d'émission pour le secteur de la pêche sont dérivés de Parker et Tyedmers (2015), Winther et al. (2009) et Iribaren et al. (2010 et 2011).
- Le stock de carbone du sol dans les mangroves est complété par l'examen d'Atwood et al. (2017).

Bien que ces sujets s'éloignent des considérations retenues pour les ILT (pêche, mangroves...), ce modèle reste toutefois intéressant d'ès lors qu'une partie de l'outil peut être appliqué dans le cas des ILT, notamment en ce qui concerne les données liées à l'agriculture. Une grande partie des ILT s'implantent dans des zones agricoles.

Avantages	Inconvénients
Rapide et facile à utiliser	Pas d'estimation du puits de carbone pour le scénario actuel (seulement pour un changement de scénario)
Pas besoin de calibration/validation	Forte incertitude (environ 40%)
Résultats reconnus basés sur des bases de données du GIEC et de la FAO	
Base de données personnalisable si les informations Tier2/Tier3 sont disponibles	

3.2.2.2 Stocks de carbone à partir de la télédétection

Nous avons également exploré le calcul des stocks de carbone sur la base d'ensembles de données mondiales déjà calculées pour la biomasse aérienne (AGB), la biomasse souterraine (BGB) et le carbone organique du sol (SOC). Pour la biomasse aérienne, des couches mondiales basées sur la télédétection par satellite existent pour

¹⁸ Sharps, K., Masante, D., Thomas, A., Jackson, B., Redhead, J., May, L., ... & Jones, L. (2017). Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of the total environment*, 584, 118-130.

les années suivantes : 2010¹⁹, 2017²⁰ and 2020²¹. Il existe également des couches plus représentatives de certains types de couverture terrestre (e.g. prairies²² ou mangroves²³) ou régions²⁴.

Les biomasses végétales souterraines peuvent être estimées à partir des biomasses aériennes en utilisant les ratios racines/tiges des lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Les estimations du bois mort et de la litière sont généralement réalisées à l'échelle mondiale à l'aide de facteurs de niveau 1, en fonction du type de végétation et de la zone climatique.

Les estimations du carbone organique du sol pour les sols superficiels (profondeur de 0 à 30 cm) sont disponibles à l'échelle mondiale auprès d'un certain nombre de sources^{25, 26}. Des estimations pour d'autres intervalles de profondeur sont également disponibles²⁷, ainsi que des estimations pour des couvertures terrestres spécifiques, telles que les mangroves²⁸.

Avantages	Inconvénients
Rapide	Grande incertitude
Possibilité d'application à différentes échelles et zones	Impossibilité de télédétection directement les stocks souterrains/du sol, mais uniquement par modélisation à partir de la biomasse aérienne et de l'utilisation des sols.
Rentable	
Peut être automatisé grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle	Erreurs possibles dans l'interprétation de l'IA si elle est effectuée automatiquement

3.2.2.3 Modèles empiriques

Un ensemble de modèles empiriques est disponible pour estimer le stock et les puits de carbone du sol. Ils sont généralement conçus pour modéliser les flux de carbone à travers différentes voies (apport des plantes, métabolisme microbien, adsorption/libération du sol) et différents réservoirs (sol, biomasse, réservoir microbien, litière, biomasse morte, etc.). Certains modèles (par exemple MEMS2.0) peuvent également estimer l'augmentation ou la diminution de différentes qualités de carbone dans le sol, caractérisant ainsi différents niveaux de stabilité dans le sol. Ces modèles permettent généralement non seulement d'estimer le bilan carbone et les stocks et puits de carbone associés, mais aussi d'estimer les différents flux de CO₂ qui déterminent le bilan lui-même (CO₂ annuel absorbé dans le sol et la biomasse, CO₂ annuel respiré à partir du sol et de la biomasse, flux de carbone à partir du *pool* microbiologique, etc). Ces modèles sont généralement

¹⁹ Spawn, S.A., and H.K. Gibbs. 2020. Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps for the Year 2010. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763>

²⁰ Santoro, M. and Cartus, O. (2019): ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the year 2017, v1. Centre for Environmental Data Analysis, 02 December 2019. doi.org/10.5285/bedc59f37c9545c981a839eb552e4084

²¹ Dubayah, R.O., J. Armston, S.P. Healey, Z. Yang, P.L. Patterson, S. Saarela, G. Stahl, L. Duncanson, and J.R. Kellner. 2022. GEDI L4B Gridded Aboveground Biomass Density, Version 2. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2017>

²² Xia, J. et al. (2014). Spatio-temporal patterns and climate variables controlling of biomass carbon stock of global grassland ecosystems from 1982 to 2006. *Remote Sensing* 6: 1783-1802.

²³ Simard, M., T. Fatoyinbo, C. Smetanka, V.H. Rivera-monroy, E. Castaneda, N. Thomas, and T. Van der stocken. 2019. Global Mangrove Distribution, Aboveground Biomass, and Canopy Height. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1665>

²⁴ Bouvet, A. et al. (2018). An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR. *Remote Sensing of Environment* 206: 156-173. doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.030

²⁵ ISRIC. SoilGrids250m 2.0. SoilGrids <https://soilgrids.org/> (2020)

²⁶ FAO and ITPS. 2020. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO. <http://54.229.242.119/GSOCmap/>

²⁷ Hengl, T. and Wheeler, I. (2018) Soil organic carbon stock in kg/m² for 5 standard depth intervals (0-10, 10-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm) at 250 m resolution. Available at: <https://zenodo.org/record/2536040#.XkKA9jH7RPY>

²⁸ Sanderman J, Hengl T, Fiske G et al. (2018) A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters* 13: 055002. doi: 10.1088/1748-9326/aabe1c

plus précis en termes de résultats et d'estimations, mais ils nécessitent une grande quantité de données d'entrée et un processus de calibration qui n'est pas toujours possible à réaliser.

Quelques exemples de modèles empiriques :

- CBM-CFS3 et CO2-FIX pour la biomasse (en particulier le secteur forestier)
- YASSO, RothC, MEMS2.0 pour le sol.

Avantages	Inconvénients
Résultats spécifiques sur les flux de carbone dans différents bassins	Prend du temps
Possibilité de modéliser des scénarios actuels	Nécessite un calibrage/une validation du modèle
Plus grande fiabilité	Requiert beaucoup de données.

3.2.2.4 Échantillonnage in situ

Outre la modélisation des stocks et des puits de carbone, il est possible de les évaluer et de les estimer par une analyse sur le terrain. L'analyse de terrain se concentre principalement sur la biomasse et le sol. Les flux peuvent également être estimés grâce à l'utilisation de différents appareils.

■ Analyse de la biomasse

Pour estimer le stock de carbone dans les biomes forestiers, des enquêtes dendrométriques sur le nombre d'arbres par zone, l'analyse du diamètre à la hauteur du tronc sont nécessaires pour utiliser l'équation allométrique et estimer le volume de bois par hectare présent dans une utilisation des terres/zone spécifique. Ce volume peut ensuite être transformé en carbone en utilisant différents facteurs disponibles dans la littérature (bien qu'il soit largement reconnu qu'un facteur de conversion de 0,5 est adéquat pour estimer le contenu en carbone de la biomasse ligneuse).

Pour estimer la biomasse de carbone dans les écosystèmes de prairie, des enquêtes déstructurées sont suggérées, où l'on collecte sur le terrain la biomasse d'une surface connue (généralement 1m²), on la sèche au four et on la pèse. Des facteurs de conversion sont utilisés pour la transformer en stocks de carbone. Bien qu'il s'agisse de la méthode la plus fiable pour obtenir une estimation du carbone stocké dans la biomasse herbacée, certaines précautions doivent être prises : la zone d'échantillonnage doit avoir un couvert herbacé représentatif de la zone, différentes zones d'échantillonnage doivent être prises en compte pour représenter les différents types de couvert herbacé, au moins trois réplicats par type de couvert herbacé sont recommandés, et pour l'échantillonnage, le moment de plus grand développement est suggéré pour avoir une représentation du stock maximum réalisable.

Pour l'estimation du puits de carbone, deux approches sont possibles :

- L'analyse dendrochronologique des carottes de bois prélevées sur le terrain pour analyser l'augmentation annuelle de la biomasse au cours des dernières années,
- Des relevés dendrométriques répétés à des années différentes de la première. L'inconvénient de la méthode dendrométrique est qu'elle ne prend pas en compte la mortalité des arbres et tend à surestimer le puits de carbone de la biomasse.

■ Analyse du sol

Pour le sol, il existe de nombreuses méthodologies pour l'échantillonnage. L'intensité de l'échantillonnage et la conception de l'échantillonnage dépendront des besoins du projet, en particulier s'il doit être certifié ou

non. Si une certification est nécessaire, l'organisme de certification du carbone qui est retenu possède généralement sa méthodologie spécifique (par exemple, VERRA²⁹ ou Gold Standard³⁰).

- D'une manière générale, pour l'échantillonnage du sol, la première étape consiste à identifier les strates qui seront échantillonnées. Pour identifier les strates, il est nécessaire de fusionner les occupations du sol avec les classes de terres présentes dans la zone. L'échantillonnage du sol doit être effectué dans chaque strate, en effectuant au moins 3 répétitions (pour obtenir la variabilité du sol, qui est élevée). La profondeur de l'échantillonnage doit être d'au moins 30 cm, bien qu'il soit préférable d'aller plus loin pour tenir compte des différents effets de la gestion/du changement d'utilisation des terres. La profondeur dépend de la profondeur du profil du sol, mais généralement 50-70cm sont représentatifs, et jamais plus de 2m de profondeur.
- Deux analyses principales doivent être effectuées pour évaluer le carbone du sol : la densité apparente (densité sèche du sol dans un volume connu) et la teneur en carbone (par analyseur CHN, chromatographie en phase gazeuse, méthode de Rockevall). En multipliant la teneur en carbone en % par la densité apparente, il est possible d'obtenir la teneur en carbone du sol en tonnes par hectare. L'échantillonnage du sol est une étape très délicate du processus, il est recommandé de faire appel à des professionnels pour s'assurer que l'échantillonnage représente correctement la variabilité de la zone. En ce qui concerne les indications, la méthodologie du CCR³¹ peut être un bon guide. Pour l'analyse, il est suggéré d'envoyer les échantillons à un laboratoire qui a de l'expérience dans l'analyse des échantillons de sol, car le processus d'homogénéisation et de sous-échantillonnage est essentiel pour obtenir des résultats fiables. Pour la densité apparente, les échantillons doivent être prélevés avec un volume connu et non perturbé, il est donc souvent nécessaire de creuser une tranchée. La méthodologie peut être trouvée dans la base de données de l'USDA³², mais il faut noter que la densité apparente doit être estimée pour chaque profondeur où des échantillons de carbone du sol sont prélevés.
- Une fois que les données sur les stocks de carbone du sol sont recueillies, l'évolution dans le temps peut être observée en répétant l'échantillonnage et l'analyse tous les 3 à 5 ans. Il faut noter que le carbone du sol a un faible temps de réponse, donc 3-5 ans sont nécessaires pour voir des différences significatives, et au moins 10-15 ans pour observer un équilibre dans le système.

En définitive, concernant l'ensemble du processus d'échantillonnage *in situ*, les avantages et inconvénients de telle approche sont les suivants :

Avantages	Inconvénients
Résultats spécifiques sur les flux de carbone dans différents bassins	Prend du temps
Possibilité de modéliser des scénarios actuels	Nécessite un calibrage/une validation du modèle
Plus grande fiabilité	Requiert beaucoup de données

3.2.2.5 Méthodologies issues des organes certificateurs

Il existe différentes méthodologies de certification qui, parmi les différents passages et exigences administratives, présentent également des méthodologies pour les estimations du stock/puits de carbone. Ces méthodologies ont différents types d'approche et, au moins pour le compartiment sol, ont des approches très différentes qui peuvent être plus ou moins spécifiées en fonction de la méthodologie de certification.

²⁹ <https://verra.org/methodology/vm0021-soil-carbon-quantification-methodology-v1-0/>

³⁰ <https://globalgoals.goldstandard.org/402-luf-agr-fm-soil-organic-carbon-framework-methodology/>

³¹ <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas-2018-soil-component-sampling-instructions-surveyors>

³² https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs143_019165.pdf

La plupart d'entre elles (par exemple le Label Bas Carbone – LBC) permettent une première estimation des stocks/puits de carbone basée sur une approche stochastique (par exemple ALDO et ExACT). Certains d'entre eux (par exemple, le LBC basé sur les données de l'ADEME) fournissent une base de données avec les stocks moyens de carbone de différentes utilisations des terres/climats/sols, et les changements de puits de carbone de différents changements d'utilisation des terres et de pratiques. Comme les modèles stochastiques, ils n'offrent pas la possibilité de calculer les puits de carbone pour les scénarios actuels. La structure est similaire aux modèles stochastiques, mais les équations sont présentées et expliquées et ne sont pas intégrées au modèle. L'approche est donc comparable aux modèles stochastiques mais nécessite plus de temps et de travail pour construire le modèle sur la base des équations fournies. Cependant, elle permet un plus haut niveau de personnalisation et de compréhension des différents passages. En général, les modèles empiriques sont également acceptés pour la certification s'ils sont reconnus par la littérature scientifique (par exemple RothC).

La plupart des méthodologies de certification incluent également la nécessité de campagnes de terrain pour :

- Établir l'état initial des stocks et puits du carbone de la zone d'étude et
- Suivre l'évolution du carbone du sol pour calibrer et valider la modélisation.

La définition des strates et le plan d'échantillonnage varient d'une certification à l'autre : certaines (par exemple, le LBC) sont flexibles et permettent à l'utilisateur de proposer une campagne d'échantillonnage sur mesure, d'autres (par exemple, VERRA) exigent un plan d'échantillonnage fixe.

Étant donné la grande variabilité des méthodologies de certification, il n'est pas possible d'en donner une description approfondie, mais nous présentons ci-après un aperçu des certifications et des normes existantes, adapté et développé à partir de Oreade et Brèche, 2022.

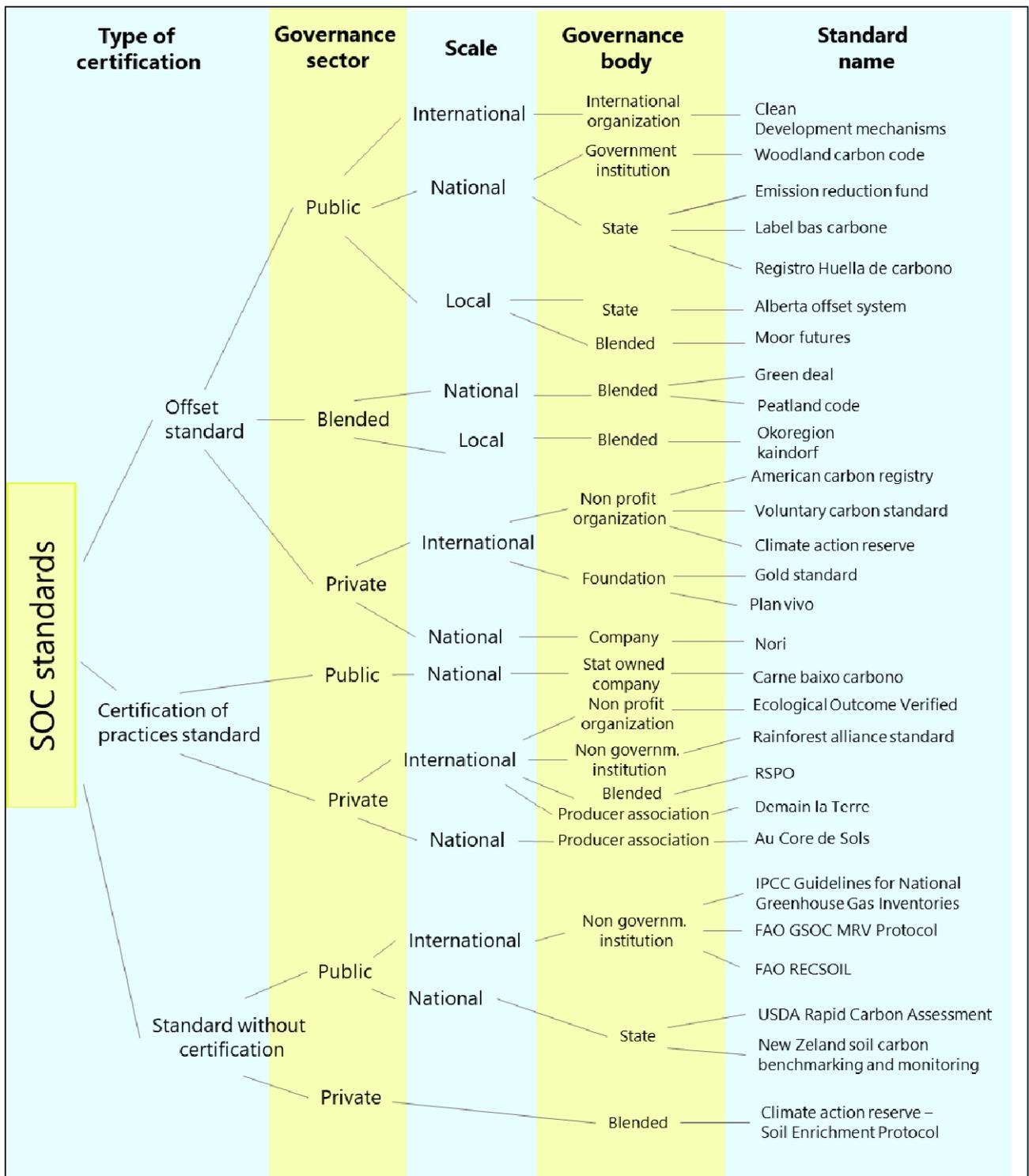


FIGURE 16 | PANORAMA DES STANDARD DE CERTIFICATION DU CARBONE DU SOL (SOURCE : OREADE BRECHE, ADAPTATION)

3.2.3 Identifier les solutions pour augmenter le stock de carbone

Différentes solutions fondées sur la nature (SFN) sont disponibles pour augmenter les stocks de carbone dans les sols et la biomasse. Bien que présentant un objectif commun d'amélioration de la santé des sols et des écosystèmes (qui aura un impact direct sur la capacité de l'écosystème à stocker le carbone de manière stable), les **SFN diffèrent entre les zones proches et les zones éloignées**, étant donné la différence de nature et d'utilisation de ces deux sols.

3.2.3.1 Zones de proximité

Les zones de proximité font face à deux enjeux : d'un côté, les sols fortement anthropisés ont une **faible teneur en carbone** et une faible activité microbiologique, qui fait que ces sols sont particulièrement pauvres. De l'autre, les enjeux de sécurité et de gestion de l'infrastructure nécessitent une **maitrise du risque accrue**, qui passe par une gestion limitative en défaveur de la biodiversité et de la santé des sols.

- La faible teneur en carbone et la faible activité microbiologique signifient que le point de saturation en matière de séquestration carbone est plus éloigné, par conséquent il existe dans ces zones un potentiel de stockage plus élevé.
- La végétation présente évidemment un risque au niveau de cette zone : départ d'incendie, limitation de la visibilité de la signalisation, la chute d'arbre et de branches sont aussi à prendre compte, enfin le volume d'arbre par ses racines peut amener des contraintes déstabilisant l'infrastructure et engageant sa pérennité.

Encadré : retour d'expérience au Royaume-Uni³³

Au Royaume-Uni, une solution de séquestration du carbone compatible avec la sécurité et les services écosystémiques qui a été retenue consiste en la fauche raisonnée ou une coupe partielle de la végétation. Il s'agit alors d'opérer un fauchage des zones les plus proches de l'autoroute uniquement. Cette technique permet d'avoir un accotement routier sécurisé, car il ne réduit pas le champ de vision des utilisateurs, mais également d'accroître le développement de la biodiversité et le piégeage de carbone sur la partie la plus éloignée de l'autoroute. Les accotements routiers du Royaume-Uni qui sont coupés deux fois par an montrent la plus grande biodiversité. Cette solution entraînant une réduction de la fréquence de fauche permet par la même occasion une réduction des coûts de maintenance et d'entretien.

Dans les zones de proximité, il est essentiel de reconstruire le sol et de retrouver sa santé, pour le ramener à un niveau plus proche des sols naturels. Pour cela, il faut améliorer la santé du sol et prendre en compte les trois principales caractéristiques du sol : la structure, les nutriments (dont le carbone) et l'activité biologique. Pour parvenir à une amélioration de ces trois caractéristiques principales, tout en prenant en compte les contraintes et enjeux de sécurité, les deux principaux objectifs doivent être les suivants :

- **Augmenter la production végétale (et donc l'apport de carbone)**. Les arbres et les haies n'étant pas adaptés aux bords de route, la mise en place d'un écosystème de prairie saine est le meilleur moyen de stocker du carbone stable dans le réservoir de carbone du sol. Un mélange d'espèces de graminées et de légumineuses est suggéré pour assurer une bonne résilience du système, l'accueil de biodiversité et un stockage efficace du carbone, en raison de l'apport élevé de carbone labile des espèces de légumineuses et du faible apport de carbone récalcitrant des graminées³⁴. Pour cette raison, le choix d'un mélange de semences qui peut représenter la variété autochtone d'une prairie naturelle, en assurant un développement correct et la résilience, est le meilleur choix pour la revégétalisation des zones de proximité.

³³ O'Sullivan et al., 2016 O'Sullivan, O. S., Holt, A. R., Warren, P. H., & Evans, K. L. (2017). Optimising UK urban road verge contributions to biodiversity and ecosystem services with cost-effective management. *Journal of environmental management*, 191, 162-171.

³⁴ Rossi et al., 2019, 2020 Rossi, L. M., Mao, Z., Merino-Martin, L., Roumet, C., Fort, F., Taugourdeau, O., ... & Stokes, A. (2020). Pathways to persistence: plant root traits alter carbon accumulation in different soil carbon pools. *Plant and soil*, 452(1), 457-478. ; Rossi LMW (2019) *Embankment as a carbon sink: a study on carbon sequestration pathways and mechanisms in topsoil and exposed subsoil*. Ph. D. Thesis, University of Montpellier, France

- **Augmenter l'activité et la diversité microbienne** pour favoriser la production de biomasse, la transformation et la stabilisation du carbone dans le sol. Différentes recherches ont montré comment l'activité microbienne est un élément clé pour la stabilisation du carbone³⁵ et comment cela est particulièrement vrai dans le cas des technosols³⁶. En outre, un système biodiversifié assurera une bonne structuration du sol grâce aux bioproduits des microorganismes, à l'enchevêtrement du sol par les iphes fongiques, et au brassage et au moulage du sol par des ingénieurs naturels tels que les vers de terre, les arthropodes et les nématodes. Un système biodiversifié, avec un mélange d'espèces d'herbes, augmente déjà l'activité microbienne du sol. Cependant, pour donner un premier coup de pouce à ces technosols lourdement remaniés, il est également suggéré d'inoculer des mycorhizes et des bactéries (par exemple des bactéries rhizobium lorsqu'il s'agit d'espèces de légumineuses), qui peuvent augmenter la vitesse de récupération de la santé du sol et l'efficacité du stockage du carbone³⁷. Des inoculum prêts à l'emploi sont déjà présents sur le marché pour certains écosystèmes, mais si ce n'est pas le cas, une étude des communautés microbiennes autochtones, avec la possibilité d'extraire et d'inoculer les plus performantes, est suggérée.
- **L'utilisation d'amendements** tels que le biochar ou le compost pour récupérer le sol et sa santé peut être une solution efficace pour augmenter la santé du sol et enrichir directement sa teneur en carbone³⁸.
- Un autre point clé est le **substrat et la granulométrie du sol**. Le stockage stable du carbone dans le sol est lié à la quantité de fines particules dans le sol (argile) et à son point de saturation. Souvent, ces zones proches sont constituées de sous-sols poreux qui ont une faible saturation en carbone. Un sol loam-argileux peut offrir un bon potentiel de stockage du carbone, car une forte teneur en sable réduirait le potentiel de stockage du carbone tandis qu'une forte teneur en argile réduirait le potentiel d'infiltration de l'eau et pourrait causer des problèmes de stagnation (diminuant le potentiel d'infiltration de l'eau et pouvant poser des problèmes d'engorgement). Un mixte équilibré est donc préférable. Dans le même temps, si le sol est un sous-sol excavé et reconstitué (excavé à plus de 1m de profondeur), il n'est pas suggéré de le revégétaliser directement pour éviter les problèmes d'effet d'amorçage³⁹. Dans ce cas, il est conseillé de recouvrir le sous-sol excavé d'une couche de terre végétale décapée. Si cela n'est pas possible, il est recommandé d'appliquer du fumier ou d'autres engrais organiques en même temps que l'inoculation.

3.2.3.2 Zones d'entretien et zones éloignées (en dehors des dépendances vertes)

La gestion optimale des zones d'entretien dépend de leur utilisation des sols. Pour ces zones, bien qu'elles ne soient pas au contact immédiat avec l'infrastructure, le gestionnaire doit conserver une approche qui permet de maîtriser les risques.

- **Zones d'entretien** : la zone de transition peut être revégétalisée avec des espèces arboricoles, qui garantissent un potentiel plus élevé de séquestration du carbone dans le sol. De plus, avec la mise en place

³⁵ Citrufo et al., 2013 ; Liang et al., 2017; Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Deneff K, Paul E (2013) The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob Chang Biol* 19:988–995 ; Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*, 2(8), 1-6. ; Liang, C., & Zhu, X. (2021). The soil Microbial Carbon Pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration. *Science China Earth Sciences*, 64(4), 545-558.

³⁶ Rossi et al., 2019 Rossi, L. M., Mao, Z., Merino-Martin, L., Roumet, C., Fort, F., Taugourdeau, O., ... & Stokes, A. (2020). Pathways to persistence: plant root traits alter carbon accumulation in different soil carbon pools. *Plant and soil*, 452(1), 457-478. ;

³⁷ Dou, X., He, P., Cheng, X., & Zhou, W. (2016). Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses. *Scientific Reports*, 6(1), 1-9. Guo, Z., Zhang, Z., Zhou, H., Wang, D., & Peng, X. (2019). The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.; Qian, K., Wang, L., & Yin, N. (2012). Effects of AMF on soil enzyme activity and carbon sequestration capacity in reclaimed mine soil. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(4), 553-557..

³⁸ Majumder, S., Neogi, S., Dutta, T., Powel, M. A., & Banik, P. (2019). The impact of biochar on soil carbon sequestration: meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages. *Journal of environmental management*, 250, 109466.

³⁹ Les racines des plantes dans le sol stimulent la décomposition microbienne, un mécanisme appelé effet d'amorçage. See Guenet, B., Camino-Serrano, M., Ciais, P., Tifafi, M., Maignan, F., Soong, J. L., & Janssens, I. A. (2018). Impact of priming on global soil carbon stocks. *Global change biology*, 24(5), 1873-1883.

de zones humides, différents services écosystémiques tels que la phytoremédiation peuvent être stimulés. La gestion et l'entretien des clôtures doit être permis par les solutions choisies.

- **Zone éloignée et en dehors du domaine géré**, le potentiel de stockage du carbone dans le sol dépend de l'utilisation actuelle des terres. Si des zones naturelles sont présentes (prairies, forêts), la meilleure option est généralement de les protéger et de les préserver, mais certaines interventions peuvent augmenter le stock potentiel de carbone si les zones forestières sont sénescentes ou si les prairies sont dégradées. Ces zones ne sont pas soumises aux contraintes de gestion des infrastructures, ce qui permet d'analyser leur potentiel de service écosystémiques de façon plus holistique (stockage du carbone, refuge pour la biodiversité, intégration territoriale...).

Les SFN dans les zones d'entretien et dans les zones éloignées sont généralement les suivantes :

- **Forêt** : Si des zones forestières sont présentes, différentes options de gestion peuvent être choisies. Si la forêt est en bonne santé, sans dépasser son temps de sénescence (50 à 150 ans, selon l'espèce), il est suggéré de la préserver pour obtenir un puits de carbone optimal. Si les forêts sont dégradées et/ou sénescentes, leur capacité à stocker du carbone diminue sensiblement. Dans ce cas, il est proposé une gestion visant à rajeunir la forêt en intervenant sur les plantes sénescentes et le sous-étage, afin de créer de l'espace et de la lumière pour le renouvellement de la forêt et augmenter le taux de stockage du carbone. Dans ce cas, les forêts multi strates avec de multiples espèces se sont avérées plus efficaces que les forêts monospécifiques⁴⁰. Les espèces à fort taux de croissance peuvent être bénéfiques pour le stockage du carbone, mais l'adaptation au climat actuel et futur doit être la clé. Le mode de gestion retenu doit également prendre en compte l'accueil de la biodiversité. Par exemple, il est suggéré, y compris dans les forêts dégradées et/ou sénescentes, de conserver des îlots de sénescence qui sont des refuges efficaces pour la biodiversité.
- **Prairies** : pour les prairies pérennes saines, la meilleure stratégie est de les préserver en l'état. Bien que le puits de carbone puisse être faible pour les prairies saines, le stock de carbone du sol est élevé et un changement de gestion peut mettre en danger le stock, avec des émissions nettes possibles dépassant le taux de séquestration, et créant une source d'émission carbone. En revanche, pour les prairies dégradées, il est suggéré une gestion qui peut augmenter leur niveau de santé, ainsi que la production, l'apport et le stockage de carbone qui y sont liés.
- **Agriculture** : les pratiques agricoles durables mises en œuvre dans les zones à proximité de l'infrastructure peuvent augmenter considérablement le stockage du carbone. Cette augmentation peut être directe (par exemple, application de fumier sur le sol, diminution du travail du sol, paillage) ou indirecte (par exemple, diminution du nombre d'heures d'utilisation des machines, réutilisation des biodéchets pour la fertilisation, diminution des engrais minéraux). Toutes ces pratiques peuvent être modélisées à l'aide de modèles stochastiques et empiriques. La mise en place de contrats avec les agriculteurs peut aider à créer des cycles vertueux entre les gestionnaires d'infrastructures et les gestionnaires agricoles, créant par exemple des crédits carbone pour les différentes parties prenantes et des externalités positives pour les personnes vivant dans les zones rurales.

NB : ces solutions sont préconisées dans le cadre d'infrastructures existantes. Nous avons considéré dans l'étude que la majeure partie du réseau français est déjà construite et présente par conséquent d'ores et déjà un potentiel important. Cependant, il conviendra d'adopter une approche d'écoconception intégrant ces pratiques pour les projets en cours de développement ou à venir.

⁴⁰ Díaz, S., Hector, A., & Wardle, D. A. (2009). Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. Current Opinion in Environmental Sustainability, 1(1), 55-60.

3.2.3.3 Synthèse des types de solutions existantes

Voici une synthèse non exhaustive de SFN qui peuvent être mises en œuvre :

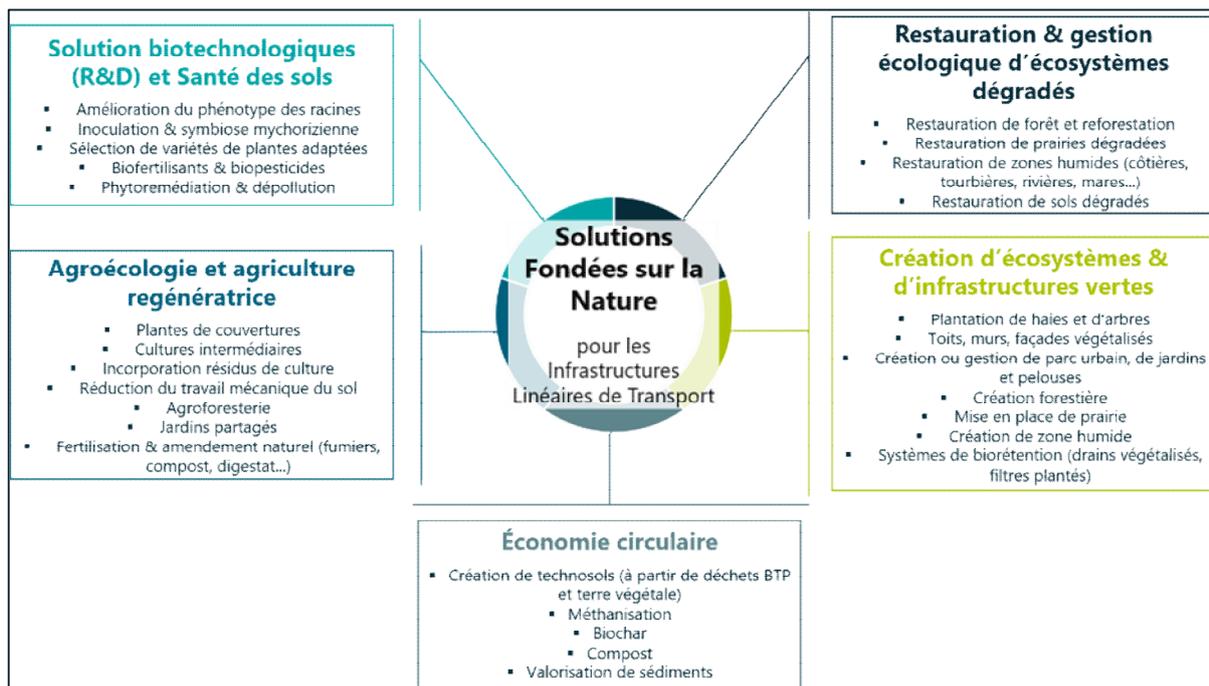


FIGURE 17 | SCHEMA DES SOLUTIONS FONDEES SUR LA NATURE PAR TYPOLOGIE

3.3 Retours d'expériences

3.3.1 Initiatives scientifiques et techniques passées ou en cours

Différentes initiatives de recherche coexistent autour du carbone du sol. La plus emblématique et connue en Europe est certainement **4 pour 1000** (4p1000 - <https://4p1000.org/>), elle promeut le stockage du carbone dans les sols en mettant en avant différents types de solutions autour de l'agriculture.

D'autres exemples existent au niveau international :

- En Europe :
 - **Carbon farming climate action** : programme de recherche action piloté par la Commission Européenne dans le cadre de sa politique « De la Ferme à la Fourchette » visant spécifiquement les enjeux de stockage et séquestration du carbone dans les pratiques agricoles ([lien](#)).
- Dans le monde :
 - **L'initiative pour le carbone du sol** est un programme d'engagement et de vérification basé aux Etats-Unis rassemblant agriculteurs, entreprises et chercheurs, qui permet et incite les agriculteurs et la chaîne d'approvisionnement alimentaire à augmenter le nombre d'acres consacrés à la gestion de l'agriculture régénérative afin de maximiser les résultats régénératifs (<https://www.soilcarboninitiative.org/>).
 - **USDA First Phase of Soil Carbon Monitoring Efforts through Conservation Reserve Program Initiative** : initiative du département de l'agriculture des Etats-Unis dont l'objectif est d'investir 10 millions de dollars dans l'agriculture régénérative ([lien](#)).
 - **Ateliers Koronivia sur l'agriculture**, qui comprenaient les sols et le SOC pour l'atténuation du changement climatique et ont été initiés lors de la COP23 en 2018, porté par l'ONU.
 - **Le programme RECSOIL de la FAO** est un mécanisme permettant d'intensifier la gestion durable des sols en mettant l'accent sur le carbone organique du sol ([lien](#)).

Encadré : Analyse des programmes de recherche en cours ou passés

Tous les programmes listés ci-dessus se concentrent principalement ou exclusivement sur les sols agricoles et, parfois, sur les sols naturels. Aucune attention n'est accordée aux sols anthropisés, aux sols urbains ou aux sols connectés aux infrastructures. Compte tenu de l'importance et des possibilités de ces sols, il est nécessaire d'élaborer des programmes de recherche sur mesure pour ces écosystèmes particuliers.

3.3.2 Entretien et enquêtes

3.3.2.1 Préparation et diffusion

En complément de la revue de la littérature et de la présentation des résultats de l'étude exploratoire présentés ci-dessus, nous avons enquêté auprès de responsables Exploitation, responsables Maintenance, responsables Environnement aux seins d'ILT ; ainsi qu'auprès d'experts techniques et chercheurs travaillant sur les sujets liés à la restauration des écosystèmes, séquestration et puits carbone (dans le domaine des ILT ou non).

Un questionnaire a été élaboré⁴¹ sur l'outil Google Form, dont l'objectif était de **comprendre leurs enjeux, leur positionnement par rapport à la problématique de séquestration carbone au sein des dépendances vertes d'ILT, et les contraintes qu'ils identifient**. Le second objectif était de **collecter un maximum de retour d'expériences sur les projets** prévus, en cours et mis en œuvre au niveau des ILT.

Le questionnaire a ensuite été diffusé au sein de listes d'experts scientifiques et techniques (groupes de travaux ITTECOP, réseaux internes d'entreprises comme Egis ou Vinci, chercheurs UMR Eco&Sols...)⁴².

Au total, **12 réponses** ont été obtenues.

3.3.2.2 Résultats

■ Profils des sondés

Les sondés se répartissent **de façon équitable dans chaque catégorie de sondés (50-50)**, soit six répondant au profil « Employé d'une ILT en charge de l'exploitation/maintenance/responsable environnement » et six répondant au profil « Expert technique/chercheur travaillant sur les sujets liés à la restauration des écosystèmes, séquestration et puits carbone ».

CONCERNANT LES EMPLOYÉS D'ILT CHARGÉ DE L'EXPLOITATION/MAINTENANCE/RESPONSABLE ENVIRONNEMENT

Les sondés travaillent dans les Concessions suivantes :

LISEA

APRR | AREA

ATLANDES

Egis

Gebze Izmir Motorway Operation and Maintenance (GIB)

VINCI Autoroutes

On notera que l'un des répondant n'est pas employé d'un ILT du territoire métropolitain mais d'une autoroute en Turquie (Izmir). Ce profil est exclu de l'analyse qui suit, on peut cependant noter par rapport aux réponses de ce sondé que bien que celui-ci ne connaisse que partiellement le sujet de la séquestration carbone, un plan de réduction des émissions chiffré et objectif a été mis en place. Cependant, le sondé nous apprend qu'en Turquie des autorisations sont nécessaires pour mettre en place des projets de puits de carbone. Cette information reste toutefois à vérifier.

⁴¹ Voir en Annexe 1.

⁴² Voir en Annexe 1 la liste non exhaustive des personnes sollicitées, et la liste exhaustive des sondés.

- 4 sondés ont un rôle se rapprochant de « **Responsable Environnement** » (*Responsable Innovation ; Directrice de l'Environnement ; Responsable Biodiversité, milieux naturels et cadre de vie ; Directeur Environnement et Développement Durable*).
- 2 sondés ont un rôle se rapprochant du rôle de « **Directeur Général** » (*Directeur Général ; General Director*).

Les sondés travaillent dans des concessions dont le **réseau** s'étend de **[104 km à 4443 km]**, et la superficie totale des **emprises vertes** varie de **[50 ha à 30 000 ha]**.

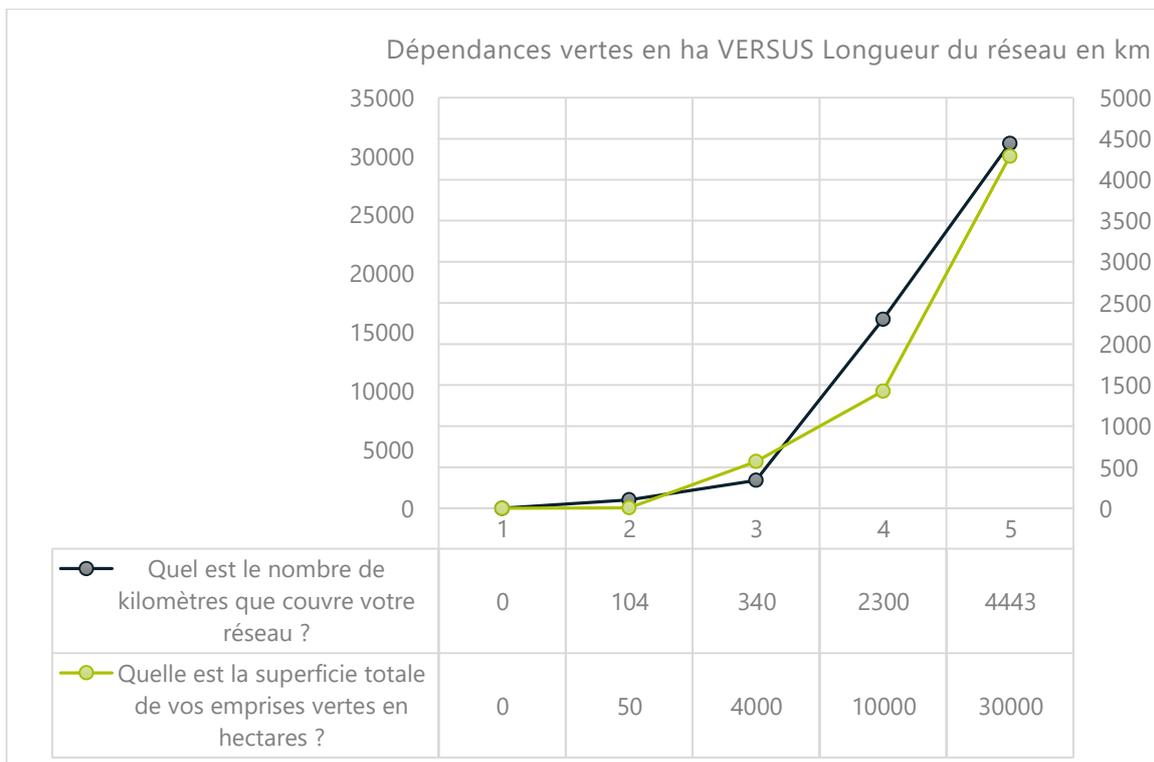
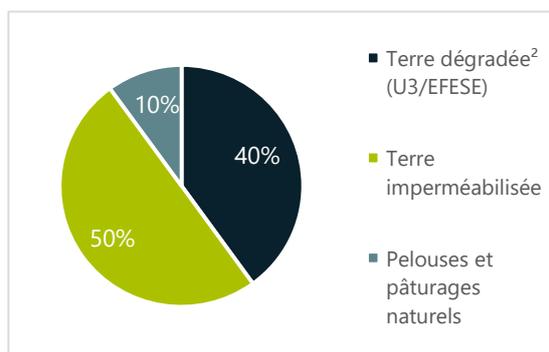


FIGURE 18 | ANALYSE COMPARATIVE DE LA SUPERFICIE DES DEPENDANCES VERTES VERSUS LONGUEUR DU RESEAU

Seul un sondé connaît la répartition des différents modes d'occupation des sols du foncier concédé :

FIGURE 19 | REPARTITION DES MODES D'OCCUPATION DES SOLS SUR UN FONCIER CONCEDE, 4000HA ET 340KM DE LINEAIRE



Toutes les ILT **ont une stratégie de réduction des émissions de CO2**, la plupart des stratégies sont chiffrées et objectivées (« Réduction de 50% sur le scope 1 et 2; réduction de -20% sur le scope 3 amont et aval. », « -46% des émissions GES en 2030 »). Une grande partie des actions se concentre néanmoins sur les **réductions d'émissions du parc de véhicules et l'optimisation énergétique** (scope 3) (« Réduire nos consommations d'énergie et celle des clients de l'autoroute », « Suivi et réduction des émissions du parc de véhicules par migration vers véhicules électriques / hybrides », « Déploiement du photovoltaïque »).

Les sondés travaillent dans les organisations suivantes :

AM écologie

Cerema

SARL ASUP

EGIS

IRD

Cluster Eau Milieux Sols Paris Ile-de-France

- Deux sondés ont un rôle se rapprochant de « **Responsable Biodiversité – Écologie** » (*Écologue ; Responsable des opérations biodiversité en interface avec les infrastructures de transport*)
- Deux sondés ont un rôle se rapprochant de « **Chargé ou chef d'études-projets-travaux** » (*Cheffe de projet sols ; Ingénieur chargé d'études / travaux*)
- Un seul sondé a un rôle de « **Chercheur** » (*Chercheur en écologie des sols*)
- Un seul sondé a un rôle de « **Directeur Général** » (*Co-gérant*)

Les missions principales des sondés :

- Expertise, évaluation, diagnostic (4 sondés)
- Formation, sensibilisation (1 sondé)
- Mise en place d'actions (1 sondé)

Globalement, **50%** des sondés disent qu'ils travaillent sur des questions généralistes de **Biodiversité**, et **50%** des sondés disent qu'ils travaillent sur le sujet de la **Santé des sols**, tout rôle et toute mission confondue.

- Connaissance du sujet séquestration carbone des sols et développement de projets de puits carbone

AUPRES DES GESTIONNAIRES D'ILT

L'ensemble des sondés a déjà **entendu parler de la Stratégie Nationale Bas Carbone, Totalement** (3 sondés sur 5) ou **Partiellement** (2 sondés sur 5). Le même résultat s'applique lorsqu'on leur demande s'ils ont connaissance de la séquestration naturelle du carbone par le sol et les plantes. Fait notable, il s'agit des mêmes sondés qui connaissent Partiellement la SNBC et Partiellement la séquestration naturelle du carbone.

Dur cinq sondés, **deux seulement évoquent des projets de puits de carbone** en place ou bientôt mis en place par leurs entreprises (quatre projets) :

- Un **projet de plantation forestière** avec une essence non autochtone (**Eucalyptus**) à vocation d'utilisation énergétique sur 7 hectares de dépendance non utilisés, à court-moyen terme (10~15 ans).
- Un **projet de plantation forestière** avec une essence autochtone (**Chêne**) sur un délaissé – 1350 chênes.
- Une **étude de comparaison de sols avec et sans éco pâturage**.
- Un **projet de désimperméabilisation des sols**.

L'ensemble des acteurs sont prêts à étudier la faisabilité et le potentiel de séquestration de carbone dans les sols pour leur entreprise. En revanche, aucun des sondés ne développe ou ne finance de projets relevant du Label Bas Carbone, même si deux sondés ont connaissance de certains projets financés par le LBC.

Encadré : le Label Bas Carbone

Il s'agit d'un cadre de certification carbone national volontaire. Porté par le Ministère de la Transition écologique et solidaire, ce référentiel offre des garanties sur la qualité des projets locaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre ou de séquestration naturelle du carbone. Il permet de rémunérer des actions bénéfiques pour le climat sur une base volontaire, par exemple pour compenser les émissions résiduelles d'un projet. Pour s'engager, les financeurs souhaitent que la qualité et l'intégrité environnementale des projets soient certifiées. Le Label Bas Carbone leur offre ces garanties et permet ainsi de diriger des financements vers des projets vertueux pour le climat et l'environnement.

AUPRES DES EXPERTS TECHNIQUES ET CHERCHEURS

Seuls **deux sondés développent ou ont connaissance de projets de séquestration du carbone dans le sol** et les plantes. Les projets sont de natures variées : milieux urbain/restauration de sites, projets agricoles, projets forestiers ou espaces naturels (y compris en montagne – « TOPSOL ») ... Les calendriers de développement ne dépassent pas les **cinq ans maximum**.

- Freins et opportunités perçus à la mise en place de projets de séquestration carbone sur le sol et les plantes

Les freins perçus par les **gestionnaires d'ILT** à la mise en place de projets de puits carbone varient :

Quelles sont les contraintes majeures que vous voyez concernant le développement d'un projet de séquestration carbone pour votre entreprise ?	Quels sont les enjeux d'un projet de séquestration carbone pour votre entreprise ?
Coût	?
Exploitation (accès pour le terre-plein central) et risque incendie	La séquestration est un moyen propre du concessionnaire autoroutier sur lequel il peut agir directement alors que sur les émissions (trafic), on ne peut pas considérer que l'impact est direct car les décisions des autres acteurs (conducteurs, transporteurs...) sont indépendantes.
Accessibilité des parcelles	Participer à la dynamique en faveur de la séquestration carbone
Trop tôt pour se positionner. Tout dépend de la zone. [réponse dans la question destinée aux Experts techniques et chercheurs : absence de savoirs sur le pouvoir du sol à séquestrer le carbone ; compétition des projets sur le foncier non bâti]	Répondre à la stratégie du Groupe qui s'engage à respecter la trajectoire Climat.
Concurrence d'usage des sols	Valorisation des projets de restauration écologique, éviter des désirs de compensation carbone.

En synthèse, on peut identifier qu'un des freins principaux relève de **contraintes d'exploitation** (accès, sécurité, coût). Cependant, les projets de puits de carbone semblent être perçus comme de bons moyens pour s'engager et « **agir directement** » et concrètement.

Les freins perçus par les **Experts techniques et Chercheurs** à la mise en place de projets de puits carbone varient :

Quelles sont les principales contraintes pour développer et suivre des projets de séquestration carbone dans les écosystèmes selon vous ?	Quelles sont les principales opportunités pour développer et suivre des projets de séquestration dans les écosystèmes selon vous ?
	<i>Disponibilité des parcelles sur le très long terme</i>
<i>Absence de savoirs sur le pouvoir du sol à séquestrer le carbone ; compétition des projets sur le foncier non bâti</i>	<i>Volonté de la direction, engagement du Groupe [...], plan stratégique biodiversité Groupe</i>
<i>Mesure de la quantité de carbone séquestrée</i>	<i>Restauration de sites dégradés, gestion de sites abandonnés</i>
<i>Si carbone veut dire simplement Arbre, les contraintes des dépendances vertes sont assez fortes pour limiter leur implantation</i>	<i>Mise en place du ZAN</i>
<i>Méconnaissance du compartiment sol, de son fonctionnement, des continuums pédologiques</i>	<i>Développement des outils techniques et fiables de quantification du carbone dans les sols ; développement des approches spatialisées de la séquestration du carbone dans les sols</i>
<i>La fiabilité des données et des projections.</i>	<i>Projets de déconstruction, de restauration, de renaturation, de désimperméabilisation, de compensation.</i>
<i>le temps (le stockage du carbone est un processus qui se déroule à l'échelle de 5-10 ans, l'homogénéité des méthodes (rock eval, CHN, NIRS etc.), de ne prendre en compte que le C</i>	<i>Le développement de l'agroécologie, la déprise agricole qui favorise le développement de prairie, les futures directives européennes (soil health for 2030)</i>
<i>Une temporalité difficile à prévoir</i>	<i>Des plans de plantation importants qui sont portés par des collectivités, du foncier identifié pour créer des actions locales</i>

En synthèse, on peut identifier qu'un des freins principaux relève de la **connaissance scientifique sur le « compartiment sol »** (pédologie, processus de stockage du carbone, temporalité, méthodes). Certains soulèvent également le sujet des contraintes d'exploitation.

En revanche les opportunités sont nombreuses et notamment :

- La **disponibilité des parcelles** notamment à long terme (via concessions, via le ZAN, via la déprise agricole, grâce à la réglementation européenne et l'engagement des collectivités locales).
- Les **méthodes et techniques qui évoluent** vers une meilleure fiabilité des données et une spatialisation des informations.

■ Solutions identifiées

On peut classer les réponses des sondés s'agissant des **solutions** identifiées en plusieurs catégories :

- Réduction du travail mécanique du sol
- Renaturation et recréation d'écosystèmes (via désimperméabilisation, reconstruction de sols détériorés ou de zones humides)
- Apports de matière organique (biochar, compost) et incorporations de résidus de culture (bois mort, paillage)
- Stimulation mycorhizienne

3.3.2.3 Synthèse de l'enquête

Bien que le nombre de répondant ne permette pas d'avoir un aperçu représentatif de la connaissance des gestionnaires d'ILT sur le stockage du carbone dans les sols, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les gestionnaires ILT semblent s'emparer progressivement du sujet de la décarbonation, à travers la mise en place de **stratégies** de réductions d'émissions et de **sensibilisation** au sujet du stockage du carbone dans les sols, y compris dans les emprises vertes. Peu de projets ont été mis en place, le premier

frein semble être la **dimension opérationnelle** des projets et les **contraintes d'exploitation**. Cependant, tous les sondés sont ouverts à la discussion.

- Les experts techniques et chercheurs voient d'avantage les **freins scientifiques et techniques** et notamment le manque de certitudes scientifiques relatives au stockage du carbone dans le sol à moyen et long terme. Les solutions identifiées par les sondés correspondent à celles identifiées dans le présent document.

4 CAS PRATIQUE : A 28

4.1 Cadre de l'expérimentation

La zone d'étude retenue est l'autoroute A28, située dans le Nord-Est de la France, d'une longueur de 365 Km et traversant 26 EPCI différentes, reliant Rouen à Alençon. Compte tenu de la nature exploratoire de l'étude et de la vaste zone d'intérêt, une macroconstruction des caractéristiques écologiques a été envisagée.

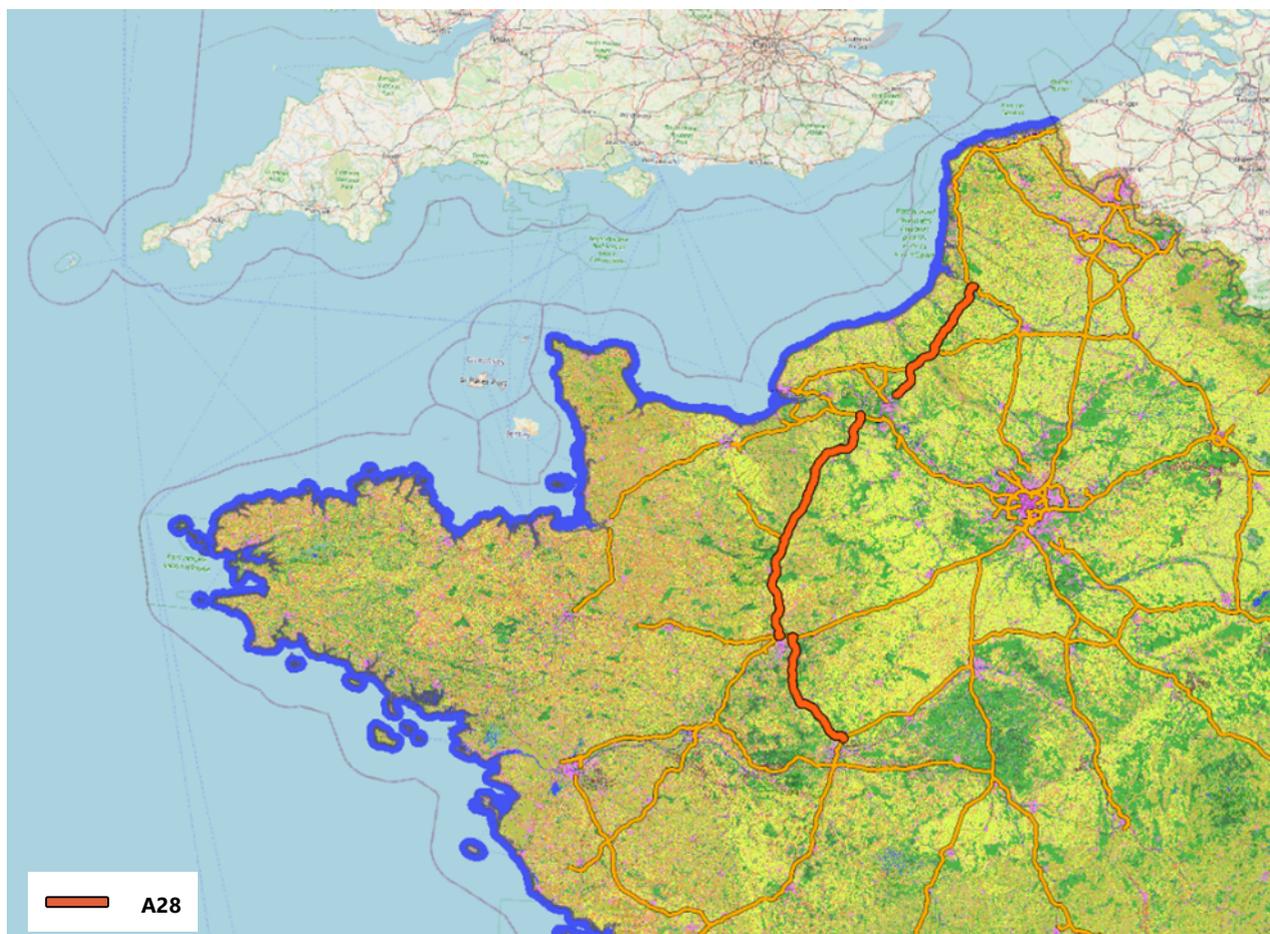


FIGURE 20 | LOCALISATION DE L'A28 A L'ECHELLE DU QUART NORD-OUEST DE LA FRANCE METROPOLITAINE

La zone se trouve dans la région bioclimatique atlantique (caractérisée par un climat maritime tempéré⁴³). Les sols sont classés comme des sols argileux à forte activité, caractérisés par une fertilité élevée et une teneur en carbone organique du sol variant entre 0,5 et 4%⁴⁴.

⁴³ Kerstin Sundseth K, Houston J, Eriksson M, (2019) Natura 2000 in the Atlantic Region, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities

⁴⁴ Meersmans et al., 2012 ; Meersmans, J., Martin, M. P., Lacarce, E., De Baets, S., Jolivet, C., Boulonne, L., ... & Arrouays, D. (2012). A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 841-851. Fernandez-Ugalde, O; Scarpa, S;

L'occupation du sol est fortement **anthropisée**, avec une grande partie à **vocation agricole**. Les **forêts** de feuillus représentent le paysage naturel original bien qu'elles aient été fortement utilisées et transformées en forêts de conifères ou en paysages agricoles. Les **prairies** gérées provenant de terres agricoles historiquement peu gérées représentent un important réservoir de biodiversité, bien qu'avec le temps, l'agriculture intensive accrue dans la région ait transformé l'habitat semi-naturel en monocultures intensives et en systèmes de production animale.

L'utilisation de produits phytosanitaires et l'utilisation intensive de fumier ont provoqué des problèmes **d'eutrophisation** et **d'enrichissement en nutriments**. L'urbanisation et l'industrialisation accrues de la zone ont contribué à la fragmentation des écosystèmes et à l'imperméabilisation des sols, faisant de la préservation et des pratiques de gestion durable des éléments clés pour la région⁴⁵.

Encadré : durée de la séquestration carbone versus durée de la concession

Dans cette étude, nous modélisons la séquestration du carbone sur 20 ans. Cette « durée de vie » du carbone stockée est communément admise dans la plupart des méthodes, par ailleurs, les concessions sont renouvelées dans cette même échelle de temps. Toutefois, la durée de la concession et plus précisément son renouvellement, qui impliquerait potentiellement un changement de gestionnaire, n'a pas été particulièrement prise en compte dans cette modélisation. Une pratique vertueuse pour assurer le maintien de la séquestration du carbone indépendamment du gestionnaire en charge de l'infrastructure serait d'intégrer cet objectif au contrat de concession, voire d'imposer dans le cahier des charges et le contrat de concession les pratiques retenues.

4.2 Méthodologie

4.2.1.1 Étapes

Dans le cadre de cette expérimentation, les étapes méthodologiques suivies sont les suivantes :

- Télédétection pour classer les occupations du sol dans :
- La bande de 16 mètres de l'autoroute représentant la zone de proximité et la zone d'entretien. Sur cette zone, les managers peuvent intervenir directement
- La bande de 500 mètres de l'autoroute : représentant la zone éloignée où les gestionnaires peuvent intervenir si des projets à grande échelle avec des parties prenantes sont mis en œuvre



FIGURES 21 A ET B | REPRESENTATIONS DES BANDES DE 16 ET DE 500 METRES DE PART ET D'AUTRE DE L'AUTOROUTE

Orgiazzi, A.; Panagos, P.; Van Liedekerke, M; Marechal A. & Jones, A. [LUCAS 2018 Soil Module. Presentation of dataset and results](#). EUR 31144 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-54832-4, doi:10.2760/215013, JRC129926

⁴⁵ Kerstin Sundseth K, Houston J., Eriksson M, (2019) Natura 2000 in the Atlantic Region, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities

- Modélisation grâce aux outils Ex-Act et ALDO 1.0 pour quantifier les stocks de carbone in situ des principaux types d'utilisation des sols. Cette approche est particulièrement adaptée à une étude à grande échelle comme celle-ci, où des données d'entrée doivent être disponibles pour l'ensemble de la zone d'étude.
- ALDO utilise les données de l'ADEME concernant stock de carbone actuel des sols et de la biomasse, et modélise le puits de carbone potentiel en lien avec les différents changements d'utilisation des sols ou aux pratiques de gestion. ALDO dispose d'une base de données personnalisée pour les stocks de carbone et le puits de carbone pour chaque EPCI. Étant donné que l'A28 couvre 26 EPCI différents, des valeurs moyennes ont été utilisées pour les scénarios de modélisation, car les changements d'affectation des sols ne sont pas spatialement explicites. Cet outil est particulièrement adapté pour un cas d'étude en France.
- L'outil ExACT utilise des données qui sont de plus large échelle, cependant cet outil permet de modéliser davantage de scénarios. Il est utilisé dans le cadre de cette expérimentation uniquement pour les scénarios dont la modélisation précise n'est pas permise par ALDO.
- Les scénarios modélisent l'évolution des stocks de carbone sur 20 ans, comme un point de saturation potentiel prudent des écosystèmes⁴⁶. L'augmentation du carbone dans les différents réservoirs (biomasse, litière, sol) a été modélisée de façon linéaire. Cette augmentation ne représente pas la réalité du stockage du carbone mais est souvent utilisée comme une simplification lorsque les durées de modélisation sont suffisamment longues (>5 ans).

4.2.1.2 Scénarios modélisés

Les scénarios modélisés ont été sélectionnés pour permettre une implication progressive et croissante des différentes parties prenantes dans le projet. L'objectif est de présenter un aperçu des augmentations potentielles des puits de carbone lors de la mise à l'échelle d'un projet de gestion des sols.

NB : cette étude s'est concentrée sur des scénarios et pratiques en lien avec la gestion des sols et de la biomasse. Cependant, une pratique vertueuse et intéressante pourrait faire l'objet d'une étude similaire, il s'agit de la mise en place de panneaux photovoltaïques sur les espaces pouvant en accueillir (principalement zones d'entretien). Par ailleurs, la mise en place de panneaux photovoltaïques peut être compatible avec la présence de biomasse selon la typologie des projets photovoltaïques (voir à ce sujet les recherches récentes sur l'agri-voltaïsme).

■ Scénario 1 : Reboisement complet

Ce scénario propose de sélectionner des zones adaptées au reboisement, à partir d'un travail effectué par la Société Forestière pour le compte de Routalis. Ce scénario présente le potentiel le plus élevé en termes de stock de carbone par hectares, mais n'est concentré que sur une petite partie des terres disponibles de l'A28. Ce scénario se concentre sur une partie mineure de la zone de proximité et la zone d'entretien (bande de 16 mètres) directement gérée par le concessionnaire.

Ce scénario présente l'investissement le plus faible en termes de conception, d'analyse et de participation des parties prenantes, et de surface concernée, et c'est donc le scénario le plus facile à mettre en œuvre parmi ceux proposés. Dans ce scénario, nous modélisons un reboisement de toutes les zones appropriées avec des espèces adaptées à la zone.

Malgré les avantages élevés en termes de carbone, ce scénario peut avoir un impact sur d'autres services écosystémiques (comme sur la biodiversité ou l'utilisation de l'eau), sa faisabilité n'est pas assurée de façon réaliste du fait de ces externalités à prendre en compte.

■ Scénario 2 : Gestion de la bande de 16 mètres à partir de l'autoroute

Cette zone représente la totalité de la zone de proximité et la zone d'entretien (bande de 16 mètres) et est directement gérée par les gestionnaires de l'autoroute ALIS et permet donc une intervention directe sur les

⁴⁶ Bockel, L., Grever U, ChloF., EX-ACT - User manual. Estimating and Targeting Greenhouse Gas Mitigation in Agriculture. FAO

terrains qui jouxtent l'infrastructure. Dans ce scénario, nous cherchons à modéliser plusieurs options de gestion qui peuvent être mises en œuvre indépendamment ou en synergie.

- Le reboisement de 10% des prairies,
- La revégétalisation de 10% des sols agricoles,
- L'utilisation de haies sur 10% des prairies,
- L'utilisation de haies sur 10% des sols agricoles,
- L'utilisation de biochar sur 5% des sols,
- L'utilisation d'inoculation sur 5% des sols.

Les deux derniers sous scénarios de modélisation sont pensés pour la récupération des sols dégradés dans la zone de l'autoroute.

NB : Cette classification a été effectuée sur la base de l'analyse des utilisations des terres présentée dans la partie de ce présent rapport « Méthode pour caractériser l'environnement proche du réseau autoroutier en se basant sur un référentiel existant » (3.1.2.1). Ces résultats sont donc une extrapolation des usages des terres, bien qu'il n'y ait pas spécifiquement d'activité et notamment d'activité agricole sur ces sols.

■ **Scénario 3 : Contrats avec les gestionnaires de la zone (Autogrill) et gestion des déchets verts pour réutiliser la biomasse à valoriser comme compost**

Ce scénario permet de créer une chaîne vertueuse pour réutiliser de manière durable les déchets biologiques, en cohérence avec le scénario 2. Ce scénario vise à mettre en place une valorisation des biodéchets des restaurants sur les aires d'autoroute afin de produire du compost qui sera utilisé sur les zones agricoles à proximité.

Il s'agit concrètement de mettre en place une collecte séparative des biodéchets et d'installer un composteur modulaire électromécanique ou à rotation manuelle sur chacune des aires.

■ **Scénario 4 : Contrat de PSE avec toute l'agriculture sur le parcours de la route**

Ce scénario représente un fort potentiel d'intervention sur la zone éloignée et en dehors de la concession et donc une implication des parties prenantes qui gèrent les terres. Ce scénario vise à accompagner les agriculteurs implantés à côté de la route vers une agriculture durable voire régénérative (hectares d'espaces agricoles dans la zone). Ce scénario reconnecte l'infrastructure à son territoire et va au-delà des zones de proximité ou zones d'entretien, en essayant d'impliquer la plupart des gestionnaires agricoles dans les zones d'influence de l'infrastructure grâce à la mise en place de contrat pour services environnementaux (PSE). Ce scénario se concentre sur les zones éloignées et en dehors de la concession.

4.3 Résultats

4.3.1 Occupation du sol



FIGURE 23 | ZONE D'ETUDE DES 500M SUR FOND DE CARTE GOOGLE EARTH SAT

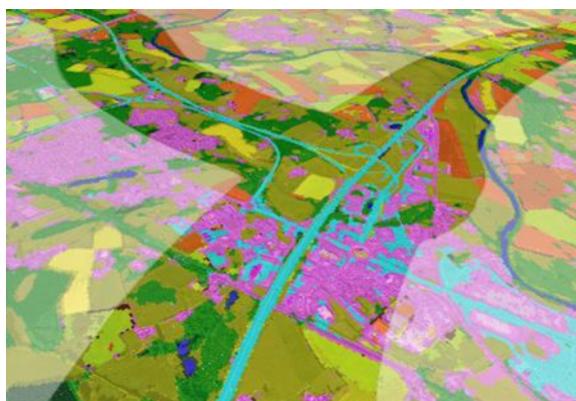


FIGURE 23 | ZONE D'ETUDE DES 500M SUR FOND CARTE D'OCCUPATION DES SOLS OSO

■ Occupation des sols agrégée par grande catégorie d'utilisation des sols :

	500m		16m	
	Ha (arrondi)	%	Ha (arrondi)	%
Bâti	2 572	6,9	468	24,6
Routes	1 058	2,8	864	45,4
Cultures	17 684	47,5	179	9,4
Prairies	9 127	24,5	184	9,7
Forêts	6 570	17,7	192	10,1
Landes ligneuses	71	0,2	11	0,6
Sable, surfaces minérales	23	0,1	0,33	0,0
Eau	105	0,3	3	0,2
Total	37 209	100	1 901	100

TABLEAU 9 | OCCUPATION DES SOLS AGREGEE PAR GRANDE CATEGORIE D'UTILISATION DES SOLS (A28)

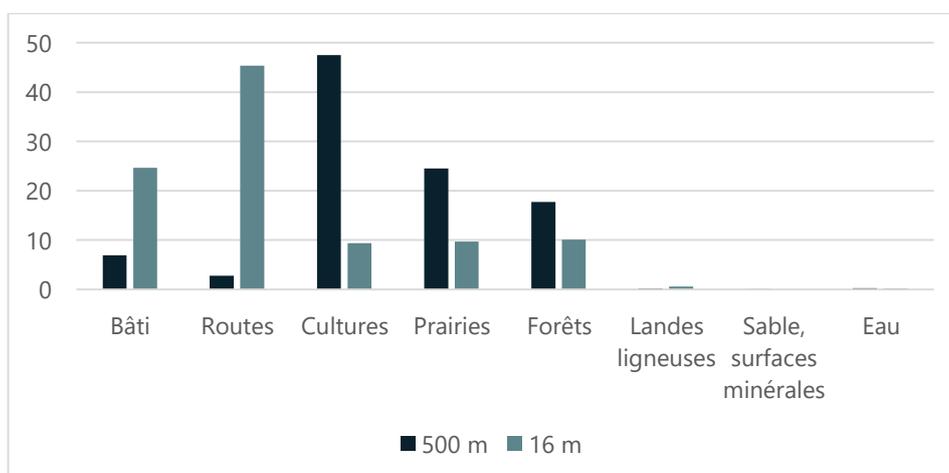


FIGURE 24 | OCCUPATION DES SOLS PAR UTILISATION ET ZONE

4.3.2 Bilan carbone

4.3.2.1 Scénario 1 : Reboisement complet

Utilisation des terres avant le projet	Action	Surface (ha)	t CO ₂ par ha par an
Forêt	Restauration	4.6	2.7
Prairie	Reboisement	24.4	4.6
Agriculture	Reboisement	2.9	6.1
Moyenne		31.8	5.3

TABLEAU 10 | RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 1

Le tableau 10 présente la synthèse de la répartition des zones concernées par les changements d'affectation des sols sur la base des travaux de l'étude de la Société Forestière sur les zones de reboisement possibles. Les interventions prévues sont de deux types :

- **Reboisement des prairies et des terres agricoles** : pour les prairies, le changement d'affectation des sols pourrait avoir des répercussions sur la biodiversité et le carbone du sol (il pourrait y avoir des pertes de carbone dues aux changements d'affectation des sols, car les prairies présentent généralement les stocks de carbone du sol les plus élevés), mais le bilan net reste positif car la biomasse forestière a un fort potentiel de stockage du carbone. Dans les sols agricoles, le reboisement améliore la santé du sol et les services écosystémiques tels que le stockage du carbone dans le sol et la biomasse et la biodiversité.
- **Restauration et entretien des forêts** : les forêts dégradées diminuent le potentiel de stockage du carbone en raison d'une mortalité élevée, d'une faible restauration et d'un faible taux de croissance. Des interventions telles que l'élimination de tout ou partie des plantes sénescentes et malades, la coupe de la végétation qui sous-stocke le carbone et l'ouverture d'espaces pour promouvoir la restauration des plantes, sont modélisées. La restauration des forêts a prouvé qu'elle augmentait le stockage du carbone au fil du temps⁴⁷.

Selon les données de l'ADEME, le reboisement de terres agricoles présente le puits de carbone potentiel le plus élevé (6,1 t CO₂/ha/an, tableau 4), suivi du reboisement de prairies (4,6 t CO₂/ha/an). Pour la restauration des forêts dégradées, l'outil ExACT a été utilisé pour la modélisation, car l'outil ALDO ne permet pas de modéliser la restauration des forêts. L'état de dégradation a été modélisé pour passer de « Faible dégradation » à « Très faible dégradation », stockant 2,7 t CO₂/ha/an supplémentaires par rapport à un scénario sans mesures de restauration.

Pour l'ensemble du scénario de reforestation, le potentiel de stockage du carbone est égal à 2580 t CO₂ eq. sur une période de 20 ans. Le changement d'affectation des terres de la prairie à la forêt a le potentiel de stockage de carbone le plus élevé car c'est celui qui présente la plus grande surface dans la zone d'étude (tableau 10, figure 25).

⁴⁷ Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. Carbon balance and management, 13(1), 1-13.

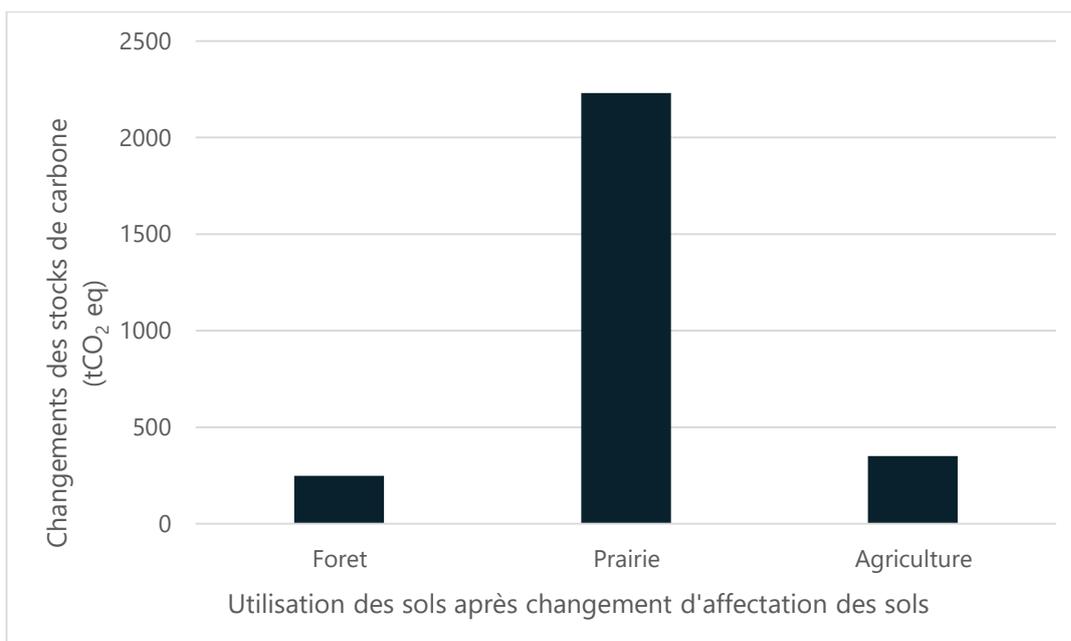


FIGURE 25 | MODELISATION DE L'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE APRES LA MISE EN ŒUVRE DU SC. 1

4.3.2.2 Scénario 2 : Gestion de la bande de 16 mètres à partir de l'autoroute

Intervention	Surface (ha)	t CO ₂ par ha par an	Source
10% prairie reboisée	18.4	4.6	ADEME
10% sols agricoles reboisés	17.9	6.1	ADEME
10% prairies avec haies	18.4	2.2	ADEME
10% sols agricoles avec haies	17.9	1.2	ADEME
5% sol amendé de biochar	19.1	0.5	Gross et al., 2021
5% sol inoculé	19.1	0.2	Kahlon et al., 2012
Surface totale	110.8		
Moyenne par puits		2.5	

TABLEAU 11 | RESULTATS DE MODELISATION DU SCENARIO 2

Le tableau 11 présente la surface de la zone soumise à des interventions sur la totalité de l'A28. La surface totale d'intervention est de 111 ha, et le potentiel de stockage de carbone le plus élevé est la revégétalisation des sols agricoles.

Les surfaces d'intervention retenues étant similaires, le stock de carbone supplémentaire sur 20 ans peut être atteint du plus élevé au moins élevé de la façon suivante (voir figure 10) :

- Revégétalisation des sols agricoles : 2 183 tCO₂ eq,
- Reboisement de prairies : 1 681 tCO₂ eq,
- Implantation de haies aux abords des prairies : 794 tCO₂ eq,
- Implantation de haies aux abords d'espaces agricoles : 445 tCO₂ eq,
- Utilisation de biochar : 191 tCO₂ eq,
- Inoculation de microbactéries : 76 tCO₂ eq.

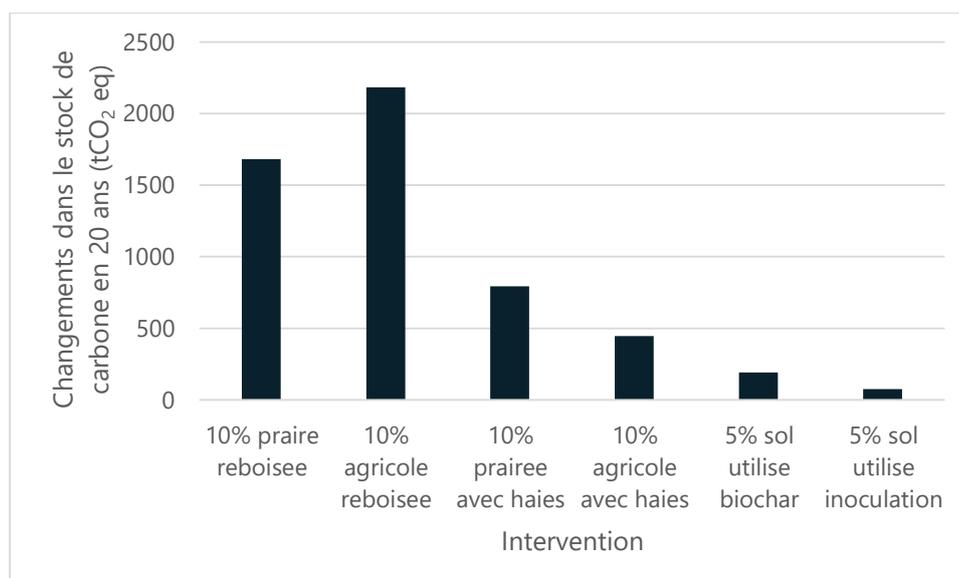


FIGURE 26 | MODELISATION DE L'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE APRES LA MISE EN ŒUVRE DU SC. 2

4.3.2.3 Scénario 3 : Contrats avec les gestionnaires de la zone (Autogrill) et gestion des déchets verts pour réutiliser la biomasse à valoriser comme compost

Le gisement potentiellement captable est calculé en prenant comme hypothèse un ratio de 140 g⁴⁸ de biodéchets générés par repas, et un nombre de repas journalier moyen sur une aire de 200 repas (incluant déjeuner et dîner).

Paramètre	Unité	Quantité
Nombre de repas sur une aire de service	u/jour	200
Quantité de biodéchets générés par repas	g/u	140
Quantité de biodéchets générés par jour	kg/j	28
Quantité de biodéchets générés par an	tonnes/an	10,2
Compost généré par an	tonnes/an	2,6

TABLEAU 12 | PARAMETRES ET HYPOTHESES DE MODELISATION DU SCENARIO 3

Basé sur ces hypothèses, la quantité de biodéchets mobilisable est de 10 tonnes par an permettant une production de compost de 2,6 tonnes par an.

Si l'on considère 5 aires de services, cela représente 13 tonnes de composts produits par an.

Bilan carbone

En prenant pour hypothèse que les biodéchets sont initialement envoyés en incinération, l'impact carbone du passage au compostage est basé sur les facteurs d'émission suivants (source ADEME) :

Type de traitement	Facteur d'émission ADEME (kg CO ₂ /tonne déchets)
Incinération de biodéchets	45
Compostage de biodéchets	9
Facteur net	36

TABLEAU 13 | FACTEURS D'EMISSIONS PAR TYPE DE TRAITEMENT ENVISAGE POUR LE SCENARIO 3

⁴⁸ ADEME : « Etude estimative de la production de biodéchets au sein des établissements de restauration », 2011

Ainsi sur une aire générant 10,2 tonnes de biodéchets par an, le bilan carbone est de 367 kg CO₂e évitées par an. Sur 5 aires de services, la valorisation des biodéchets en compost représente 1,8 tonnes de CO₂ évitées par an.

4.3.2.4 Scénario 4 : Contrat de PSE avec les agriculteurs le long du linéaire de la route

Le scénario 4 propose de modéliser la séquestration potentielle de carbone liée à l'application de différentes pratiques recommandées dans les scénarios 1, 2 et 3 (agriculture durable, utilisation de haies et agroforesterie) sur différentes zones à côté de la route, correspondant à 30/60/90% de terres agricoles dans la bande de 500m autour de l'autoroute A28 (respectivement 5 300 ha, 10 600 ha, 15 900 ha). Ce scénario vise à montrer le fort potentiel d'un projet communautaire à grande échelle impliquant les acteurs agricoles de la région⁴⁹.

- Le puits de carbone potentiel des **pratiques agricoles durables** (consistant en l'utilisation de cultures de couverture et l'ensemencement direct par le travail du sol tous les 4 ans) comprend également les réductions d'émissions de CO₂ eq. Grâce à la réduction du travail mécanisé intensive, fortement émetteur, et est estimé à 1,3 t CO₂ eq/ha/an.
- Le puits de carbone potentiel de **l'agroforesterie** est estimé à 3,8 t CO₂ eq/ha/an
- Le puits de carbone potentiel des **haies** est estimé à 1,24 t CO₂ eq/ha/an.

La figure 27 présente la modélisation de l'augmentation totale du stockage de carbone dans le sol avec les différentes pratiques appliquées sur différents pourcentages de surfaces des zones agricoles (pour rappel : 30/60/90%).

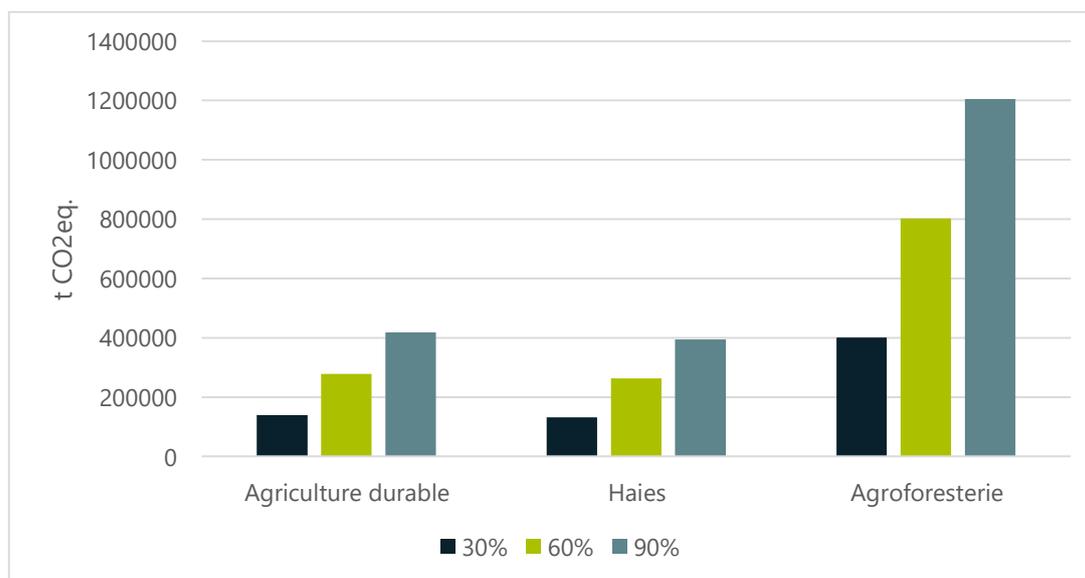


FIGURE 27 | MODELISATION DE L'EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE APRES REPLICATION DES PRATIQUES PRECONISEES AU-DELA DU PERIMETRE DE L'INFRASTRUCTURE DANS UNE BANDE DE 500M DE LARGEUR

⁴⁹ Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. Carbon balance and management, 13(1), 1-13.

4.3.3 Synthèse des scénarios modélisés

- Le **premier scénario** que nous avons modélisé est un petit projet de reboisement de 31 ha sur des zones de proximité et zones d'entretien déjà sélectionnées par l'agence forestière. Ce scénario permettrait de stocker à 2580 t CO₂ eq. sur une période de 20 ans. Le changement d'affectation des terres de la prairie à la forêt représente le potentiel de stockage de carbone le plus élevé.
- Le **deuxième scénario** présente un changement dans les usages et la gestion des terres sur une bande de 16m de large de part et d'autre de l'autoroute représentant la totalité des zones de proximité et zones d'entretien, qui a été choisie parce qu'elle est sous le contrôle direct des gestionnaires de l'autoroute. On constate que sur 20 ans, la revégétalisation de 10% des sols agricoles et des prairies a le plus fort potentiel de stockage de carbone dans le sol (respectivement 2100 et 1600 tCO₂ eq.), suivie par la plantation de haies (800 tCO₂ eq. sur les prairies et 445 tCO₂ eq. sur les sols agricoles) et enfin l'utilisation de biochar et d'inoculation sur les 5% des zones intéressées (191 tCO₂ eq. et 75 tCO₂ eq.).
- Le **troisième scénario** considère la possibilité d'impliquer les partenaires de l'autoroute et notamment les stations gérées par Autogrill. Nous avons modélisé que sur une aire d'autoroute générant 10,2 tonnes de biodéchets par an, le bilan carbone est de 367 kg CO₂eq évitées par an. Sur 5 aires de services, la valorisation des biodéchets en compost représente 1,8 tonnes de CO₂ eq évitées par an.
- Enfin, le **dernier scénario** prévoit une implication directe des gestionnaires agricoles dans la bande de 500m autour de l'A28 représentant les zones éloignées en dehors de l'infrastructure, en dehors de la concession, comme un scénario intégré qui vise à reconnecter l'infrastructure avec ses riverains. Si l'on considère une période de 20 ans, les résultats montrent que la mise en œuvre de l'agroforesterie sur cette zone aurait l'impact le plus élevé sur le bilan carbone, jusqu'à 1,2 millions de tonnes de CO₂ eq. si les 90% de cette zone étaient concernés par le changement d'utilisation des terres, suivi par l'utilisation de pratiques agricoles durables et l'utilisation de haies (de 400 000 à 180 000 tonnes de CO₂ eq. selon la zone concernée par l'intervention).

5 OUVERTURE : APPLICATION A L'ECHELLE DE L'ENSEMBLE DU RESEAU DES ILT

5.1 Exemples de mesures pouvant être mobilisées par les gestionnaires d'ILT

Au-delà des scénarios modélisés dans le cas d'étude de l'A28 présenté précédemment, un ensemble de mesures peuvent être mobilisées pour la restauration et protection des dépendances vertes des ILT.

L'enjeu pour les gestionnaires consiste à analyser les bénéfices de chacune des mesures retenues par rapport aux bénéfices qu'elles apportent. Une analyse est proposée ci-contre permettant de comparer les mesures en faveur de la séquestration carbone, leurs co-bénéfices et leurs limites ; et les mesures en faveur de la biodiversité, leurs co-bénéfices notamment en matière de séquestration carbone et leurs limites.

- Clé d'entrée : augmentation de la séquestration carbone

Scénario	Impact carbone	Co-bénéfices	Limites
Reboisement prairie	4.6 t CO ₂ eq/ha/an.	Augmentation du couvert arboré. Création de nouvelles niches écologiques.	Attention au bilan écologique : perte des niches écologiques spécifiques aux prairies. Complications juridiques pour les prairies déclarées permanentes conservées pour leur richesse en biodiversité.
Reboisement terres agricoles	6.1 t O ₂ eq/ha/an.	Augmentation du couvert arboré. Création de nouvelles niches écologiques et augmentation de la biodiversité.	Perte de surface agricole. Contraintes juridiques pour la conversion de terres agricoles en forêt.

Scénario	Impact carbone	Co-bénéfices	Limites
		Augmentation de la qualité du paysage.	Comparer les coûts et le stockage carbone d'un reboisement vs terre agricole laissées en jachère.
Restauration et entretien de forêt	Variable selon l'état de la forêt au départ.	Augmente la résilience de la forêt. Peut augmenter la biodiversité si on favorise le développement de nouvelles espèces et si on limite le développement d'espèces envahissantes.	Gestion plus coûteuse.
Utilisation de compost et biochar	0,5 t CO ₂ eq/ha/an.	Amélioration de la santé des sols. Augmentation de la fertilité des sols. Assainissement des sols. Limitation de la bioaccumulation de métaux lourds dans les plantes. Amélioration de la qualité de l'eau.	Attention au bilan écologique / carbone : bien vérifier la source de la production du biochar (le bilan peut être positif si issu de déchets agricoles mais peut être négatif si issu de coupe de bois par exemple).
Agriculture durable et agroforesterie	Jusqu'à 3,8 t CO ₂ eq/ha/an	Création de nouvelles niches écologiques et augmentation de la biodiversité. Limitation des maladies et ravageurs de culture (et donc des besoins en produits phytosanitaires). Amélioration de la qualité de l'eau. Augmentation de la fertilité des sols. Augmentation de la qualité du paysage.	Agriculture plus coûteuse et besoin de plus de temps travail.

TABLEAU 14 | ANALYSE DES CO-BENEFICES ET LIMITES PAR SCENARIOS EN FAVEUR DE LA SEQUESTRATION CARBONE

■ Clé d'entrée : mesures en faveur de la biodiversité

Scénario	Impact carbone (approche qualitative)	Co-bénéfices	Limites
Plantation de haies arbustives pour renforcer des continuités écologiques	++	Création de nouvelles niches écologiques et augmentation de la biodiversité. Augmentation de la fertilité des sols. Augmentation de la qualité du paysage.	Augmentation du coût d'entretien.
Plantation d'arbres hautes tiges pour réduire le risque de collision	++	Création de nouvelles niches écologiques et augmentation de la biodiversité.	
Pratique des hibernacula, en	/	Augmentation de la fertilité du sol.	Impact paysager qui peut être négatif.

Scénario	Impact carbone (approche qualitative)	Co-bénéfices	Limites
laissant les produits de coupe sur place		Création de niche écologiques (entomofaune).	
Une fauche annuelle tardive des milieux en herbe (hors période de reproduction des oiseaux) et un faucardage des roselières tous les 3 ans	/	Augmentation de la biodiversité (entomofaune & avifaune). Réduction de la fréquence et du temps de travail.	Peut gêner la visibilité des conducteurs (si pratiqué en bordure de route).
Mélange de jachères florales	/	Augmentation de la biodiversité (insectes pollinisateurs et avifaune). Augmentation de la qualité du paysage.	Augmentation du coût d'entretien.
Désimperméabilisation de parking	+	Amélioration de la santé des sols. Augmentation de la biodiversité. Rétablissement des continuités hydrologiques.	Coûteux. Gestion des déchets de bitume à prévoir.

TABLEAU 15 | ANALYSE DES CO-BENEFICES ET LIMITES PAR SCENARIOS EN FAVEUR DE LA BIODIVERSITE

5.2 Extrapolation simplifiée de l'analyse réalisée sur l'A28 à l'échelle du territoire français

Extrapoler les résultats obtenus à l'échelle dans le cadre de l'analyse sur l'A28 à l'échelle nationale est un exercice particulièrement complexe car il nécessite de connaître avec précisions un ensemble de données relativement difficiles à caractériser. L'objectif de ce paragraphe est de donner une **appréciation globale du potentiel de puits de carbone du réseau autoroutier**, afin de donner à ce rapport une **vocation exploratoire et prospective** permettant d'estimer une tendance comparable avec les objectifs de la France en matière de stratégie nationale bas carbone et d'objectifs nationaux de puits de carbone.

5.2.1 Modélisation des scénarios présentés à l'échelle du territoire métropolitain

Pour réaliser une analyse à l'échelle de la France, selon la méthodologie présentée dans ce rapport, les différentes classes d'occupations des sols des dépendances vertes de l'ensemble des ILT du territoire doivent être connues. Afin de simplifier l'extrapolation, nous proposons de réaliser l'analyse sur le **réseau autoroutier** uniquement, nous nous basons pour cela sur les résultats présentés dans les tableaux disponibles dans ce présent rapport (voir scénarios pour le détail).

En repartant des **hypothèses utilisées pour les scénarios présentés en partie 4**, et en se basant sur différentes **données disponibles dans ce présent rapport**, nous obtenons les résultats présentés ci-après. A noter que le scénario 1 n'étant pas réaliste (reboiser intégralement les zones aux abords du réseau autoroutier n'est pas viable techniquement et opérationnellement), il ne sera pas modélisé dans l'analyse.

5.2.1.1 Scénario 2 à l'échelle de la France : gestion de la bande de 16 mètres à partir de l'autoroute

Le scénario 2 se base sur un mix de solutions variées (reboisement, agriculture améliorée, prairies améliorées, plantations de haies...), mises en œuvre dans la bande des 16 mètres de part et d'autre des ILT autoroutières.

Nous utilisons comme source de données la répartition de l'occupation des sols présentée dans le tableau 5, et les facteurs d'émissions négatives présentés dans le tableau 8.

Input 1 (reboisement) : $nb\ ha\ «\ prairie\ »\ * 10\% * 4,6\ tCO_2eq/ha/an$
 $3\ 261,49\ ha * 10\% * 4,6\ tCO_2eq/ha/an =$
 $1\ 500,29\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{30\ 005,7\ tCO_2eq/ 20\ ans}$

Input 2 (reboisement) : $nb\ ha\ «\ surfaces\ agricole\ »\ * 10\% * 6,1\ tCO_2eq/ha/an$
 $3\ 587,56\ ha * 10\% * 6,1\ tCO_2eq/ha/an =$
 $2\ 188,41\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{43\ 768,2\ tCO_2eq/ 20\ ans}$

Input 3 (haies) : $nb\ ha\ «\ prairie\ »\ * 10\% * 2,2\ tCO_2eq/ha/an$
 $3\ 261,49\ ha * 10\% * 2,2\ tCO_2eq/ha/an =$
 $801,13\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{16\ 022,6\ tCO_2eq/ 20\ ans}$

Input 4 (haies) : $nb\ ha\ «\ surfaces\ agricole\ »\ * 10\% * 1,2\ tCO_2eq/ha/an$
 $3\ 587,56\ ha * 10\% * 1,2\ tCO_2eq/ha/an =$
 $430,5\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{8\ 610,1\ tCO_2eq/ 20\ ans}$

Input 5 (haies) : $«\ superficie\ totale\ »\ en\ ha * 5\% * 0,35\ tCO_2eq/ha/an$
 $80\ 511,02 * 5\% * 0,35\ tCO_2eq/ha/an =$
 $1408,94\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{28\ 178,9\ tCO_2eq/ 20\ ans}$

Le potentiel de séquestration carbone des dépendances vertes dans la bande des 16 m de part et d'autre des ILT autoroutières représente **[126 585,5 tCO₂eq / 20 ans]**.

5.2.1.2 Scénario 3 à l'échelle de la France : contrats avec les gestionnaires de la zone (Autogrill) et gestion des déchets verts pour réutiliser la biomasse à valoriser comme compost

Le scénario 3 se base sur un modèle impliquant les aires de services sur l'ensemble des autoroutes du réseau français. Nous avons retenu l'hypothèse de ne pas considérer les aires de repos dans la modélisation, car on estime d'une part que le volume de biodéchets généré par les aires de repos est moindre, et d'autre part que la collecte et gestion des biodéchets est trop complexe dans ce cadre. Nous utilisons comme sources de données le nombre d'aires de services présentées dans le rapport de l'ASFA de 2020, soit 363, et le facteur d'émissions négatives présenté en synthèse du scénario 3.

*Nb aires de services * 1,8 tCO₂eq évité / an*
 $363 * 1,8\ tCO_2eq\ évité / an =$
 $653,4\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{13\ 068\ tCO_2eq. Evitées\ sur\ 20\ ans}$

Le potentiel d'émissions évitées si l'ensemble des stations-services s'engagent dans un plan de gestion des biodéchets représente **[13 068 tCO₂eq / 20 ans]**, n'est pas intégré dans ce calcul l'utilisation du compost généré directement dans les dépendances vertes des ILT.

5.2.1.3 Scénario 4 à l'échelle de la France : contrat de PSE avec les agriculteurs le long du linéaire de la route

Le scénario 4 est le plus ambitieux car il considère une implication des acteurs locaux à proximité de l'ensemble des autoroutes du réseau. Dans ce scénario, nous considérons la bande de 500 mètres de part et d'autre des ILT autoroutières. Nous utilisons comme source de données le tableau 2 et les facteurs d'émissions retenus pour le scénario 4.

Input 1 (agriculture durable) : $nb\ ha \llcorner milieu\ agricole \gg * 30\% * 1,3\ tCO_2eq/ha/an$
 $392\ 356\ ha * 30\% * 1,3\ tCO_2eq/ha/an =$
 $153\ 018,84\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{3\ 060\ 376,8\ tCO_2eq/20\ ans}$

Input 2 (agroforesterie) : $nb\ ha \llcorner milieu\ agricole \gg * 30\% * 3,8\ tCO_2eq/ha/an$
 $392\ 356\ ha * 30\% * 3,8\ tCO_2eq/ha/an =$
 $447\ 285,84\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{8\ 945\ 716,8\ tCO_2eq/20\ ans}$

Input 3 (haies) : $nb\ ha \llcorner milieu\ agricole \gg * 30\% * 1,2\ tCO_2eq/ha/an$
 $392\ 356\ ha * 30\% * 1,2\ tCO_2eq/ha/an =$
 $141\ 248,16\ tCO_2eq/an\ soit\ \mathbf{2\ 824\ 963,2\ tCO_2eq/20\ ans}$

Le potentiel de séquestration carbone des dépendances vertes dans la bande des 500 m de part et d'autre des ILT autoroutières au-delà des 16 m représente [**12 008 918,6 tCO₂eq / 20 ans**].

5.2.1.4 Synthèse : compilation des scénarios

Si l'on compile les trois scénarios modélisés à l'échelle du territoire métropolitain (scénario 2, 3 et 4), on obtient les potentiels suivants :

Séquestration carbone : 12 135 504,1 tCO₂eq séquestrées / 20 ans soit 606 775,21 tCO₂eq/an
Emissions évitées : 13 068 tCO₂eq évitées / 20 ans soit 653,4 tCO₂eq évitées / an

Par rapport aux 11 000km du réseau autoroutier (source : tableau 4), cela représente :

Séquestration carbone : 1 103,23 tCO₂eq séquestrée/km/20 ans soit 55,16 tCO₂eq séquestrée/km/an
Emissions évitées : 1,188 tCO₂eq évitées/km/20 ans soit 0,06tCO₂eq évitée/km/an

5.2.2 Comparaison par rapport à la Stratégie Nationale Bas Carbone

La France via la SNBC 2 souhaite « augmenter les **puits de carbone** (naturels et technologiques) d'un facteur 2 par rapport à aujourd'hui [2020] pour absorber les émissions résiduelles incompressibles à l'horizon 2050 »⁵⁰. L'ambition de la France est de doubler la taille du puits de carbone français pour atteindre un puits de **80M tCO₂eq** sur le territoire national.

⁵⁰ Stratégie Nationale Bas Carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone. Synthèse. Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Mars 2020.

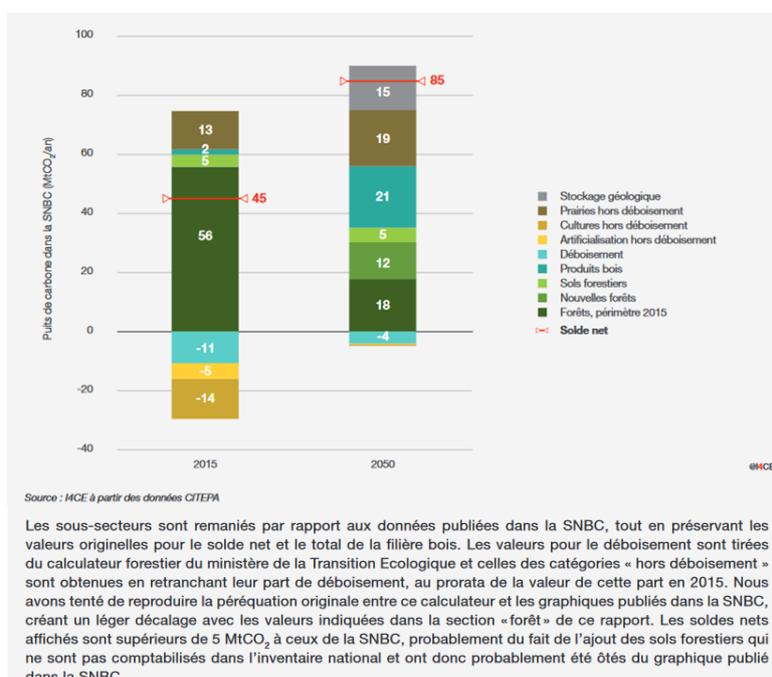


FIGURE 28 | PUIFS DE CARBONE DANS LA SNBC (SOURCE : I4CE A PARTIR DES DONNEES CITEPA)

Comparativement, « La SNBC vise une réduction de 28 % des émissions du **secteur des transports** en 2030 par rapport à 2015. Le secteur des transports a émis à hauteur de **139 MtCO₂ eq en 2017** hors soutes internationales (la part française des soutes internationales représente 23 MtCO₂ eq), soit 30 % des émissions nationales (35% en comptant les soutes internationales). Ces émissions ont augmenté de +11,8% entre 1990 et 2017, dont une forte augmentation constatée entre 1990 et 2004 (+18,9%) ».

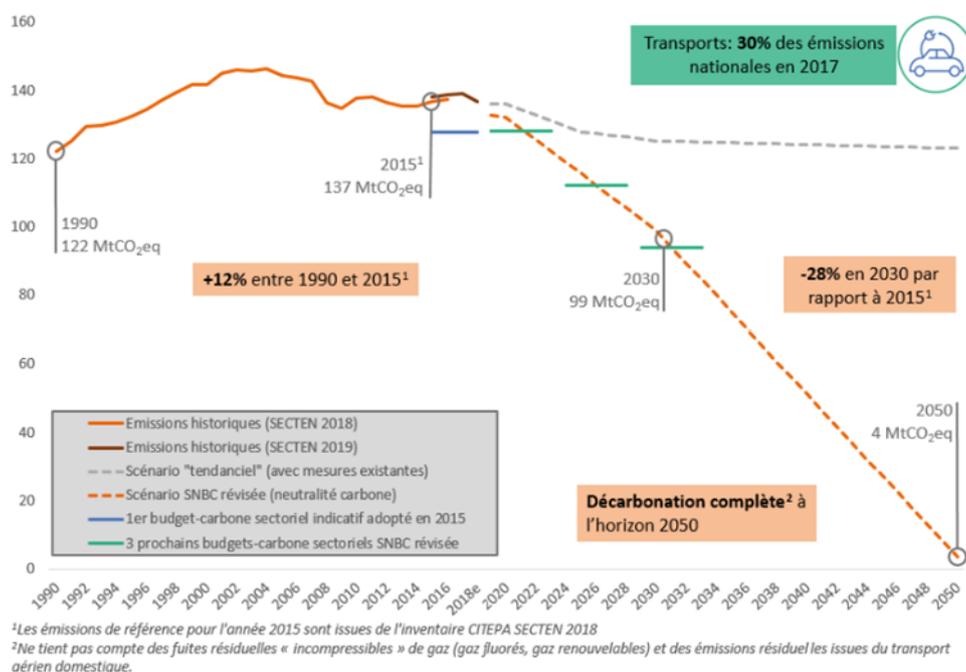


FIGURE 29 | HISTORIQUE ET PROJECTION DES EMISSIONS DU SECTEUR DES TRANSPORTS ENTRE 1990 ET 2050 (EN MtCO₂EQ) (SOURCE : SNBC 2)

Le potentiel de séquestration carbone représenté par les dépendances vertes des ILT autoroutiers (environ 12M tCO₂eq tel que modélisé dans ce rapport) pourrait représenter **environ 15% des besoins en puits de carbone** (80M tCO₂eq) à l'échelle nationale, et **environ 8% du volume d'émissions dues au secteur des transports** (139M tCO₂eq).

Selon I4CE, à la suite d'une analyse de la SNBC et notamment concernant le potentiel de développement de puits de carbone à l'échelle du territoire, « ces leviers sont donc réalistes techniquement mais devront reposer sur des changements de pratiques majeurs et rapides. »⁵¹

5.3 Limites, attendus et ouverture

5.3.1 Limites et attendus

Pour augmenter les puits et les stocks de carbone dans les ILT, différents problèmes sont identifiés tant dans les zones proches que dans les zones éloignées.

5.3.1.1 Disponibilité et qualité de l'information

■ Zones à proximité

Aucune information ou norme n'est disponible pour le type de sols utilisés dans les zones proches des ILT. Il est nécessaire d'établir des liens plus étroits entre les ingénieurs géotechniques et les écologistes du sol afin de mieux comprendre les propriétés du sol et les travaux du sol dans les zones proches. Cela passe par une caractérisation de la végétation en présence, par la réalisation d'études sur la façon dont le travail et la gestion du sol peuvent influencer l'activité microbienne du sol et la santé des sols en général dans les zones spécifiques et fortement anthropisées aux abords des ILT.

■ Zones d'entretien et zone éloignées en dehors de la concession

Il y a peu d'informations sur l'utilisation des sols dans les zones reculées proches des infrastructures. Une enquête sur l'utilisation des terres peut aider à estimer le potentiel d'un plan de gestion des terres géré par les gestionnaires d'infrastructures. Par ailleurs, les gestionnaires d'ILT ne sont pas forcément propriétaires ni même concessionnaire des espaces présentant le plus de potentiel. Cet état de fait entraîne un manque de connaissance et d'accès aux données nécessaires pour construire des scénarios d'aménagements durables des sols.

5.3.1.2 Méthodes : un fort besoin d'uniformisation

La standardisation des méthodes est nécessaire pour permettre la répliquabilité des projets de puits de carbone aux abords des ILT. La figure 7 recense la plupart des méthodologies existantes, si une grande partie d'entre elles utilisent les mêmes données et étapes, il n'en demeure pas moins que des disparités subsistent et ne rendent pas possible un déploiement uniformisé et à grande échelle. Une méthodologie plus standardisée pour l'évaluation du carbone du sol peut être utile pour l'estimation homogène du stock et du puits de carbone du sol.

Enfin, dans les zones éloignées en dehors de la concession, plus de méthodologies et surtout davantage de SFN sont disponibles car ces zones ne présentent pas de spécificité aux infrastructures.

5.3.1.3 Conditions d'exploitation et sécurité

Les gestionnaires d'ILT sont particulièrement vigilants au sujet des conditions de sécurité et d'exploitation des infrastructures. Si le changement climatique et les mesures et actions préconisées dans ce rapport commencent à être étudiées par les gestionnaires d'ILT, il n'en demeure pas moins que les actions mises en œuvre doivent être développées en cohérence avec les enjeux d'exploitation.

Par ailleurs, les facteurs écologiques liés à la santé des sols (structure - nutriments - micro/macrofaune) ne sont pas pris en compte lors de la construction d'infrastructures et leur impact sur ces sols de proximité est mal connu. De ce fait, mettre en place des solutions doivent être imaginées lorsque c'est possible, y compris en réalisant des analyses et mesures de sols précises aux abords des (futurs) infrastructures.

⁵¹ GRIMAUULT Julia, TRONQUET Clothilde, BELLASSEN Valentin, BONVILLAIN Thomas, FOUCHEROT Claudine. "Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? Analyse de la Stratégie Nationale Bas-Carbone 2". I4CE. Paris, Février 2022.

5.3.1.4 Aspect multi-dimensionnel des projets de puits de carbone

Il est nécessaire d'établir un lien entre les gestionnaires d'infrastructures et les parties prenantes des zones reculées. La superposition de limites foncières rend les projets de puits carbone aux abords des ILT particulièrement complexes : propriété de l'État ou de la collectivité, concession généralement accordée à une entreprise privée ou parapublique, domaines privés aux abords de l'ILT...

Des projets participatifs menés par les gestionnaires d'infrastructures pourraient créer une coopération et des liens positifs entre les infrastructures, la population et les services écosystémiques. Une gestion vertueuse de ces espaces financée par les gestionnaires d'infrastructures et les entités nationales/internationales peut permettre de créer des crédits carbone pour les gestionnaires, selon le cadre réglementaire en vigueur.

6 CONCLUSION

Avec la présente étude, nous avons observé qu'il existe un potentiel important de séquestration du carbone dans la biomasse et le sol sur le réseau routier et autoroutier des ILT en France, étant donné l'étendue du réseau, si l'on y ajoute le potentiel représenté par les ILT ferrés et les transports urbains, ce potentiel devient véritablement significatif.

Le potentiel de séquestration du carbone dans les zones qui jouxtent les ILT dépend de plusieurs facteurs : sécurité, typologie d'occupation du sol, etc.

- **Dans les zones de proximité et zones d'entretien**, l'intervention peut être directe, avec des pratiques comme l'inoculation de microbactéries directement dans le sol, le biochar, ou des changements de pratiques, qui peuvent être directement mis en œuvre par l'opérateur routier.
- **Dans les zones éloignées**, en revanche, l'implication de différentes parties prenantes est fondamentale pour mettre en œuvre des projets à grande échelle notamment concernant les changements dans les pratiques de gestion (par exemple, l'agriculture durable, le reboisement, etc.) ou les utilisations des terres (reboisement, conservation, etc.).

La zone analysée a donc un impact direct sur le type de projets, les investissements et le potentiel de stockage du carbone des interventions.

Pour étudier le potentiel des sols à proximité des ILT, connaître la classification de l'utilisation du sol est fondamentale, pour cela les techniques de télédétection croisées avec les bases de données existantes (ex. Carte d'occupation du sol OSO et Corine Land Cover) sont le moyen le plus facile de classifier les utilisations du sol. D'autres informations sur la zone, telles que la teneur en carbone du sol ou les propriétés du sol, peuvent être extraites des bases de données nationales et internationales existantes présentées dans le tableau 3 (p. 16). Ces données sont préliminaires à la modélisation et l'analyse des sols réalisées en laboratoire à la suite d'un travail de terrain.

Pour quantifier les stocks de carbone et les puits de carbone potentiels dans les différentes zones situées à proximité des ILT, différentes approches sont possibles, qui impliquent des coûts plus élevés et une précision variable :

- **Modèles stochastiques et télédétection** : il s'agit de l'approche la plus simple, qui permet d'évaluer le stock de carbone et les puits potentiels découlant des changements d'occupation/de gestion des sols sur la base de données statistiques recueillies dans différentes régions pédo-climatiques. Ces modèles sont faciles à utiliser et très adaptés à l'étude d'un potentiel global, mais ils présentent une grande incertitude (+/-40%) lorsqu'il s'agit d'évaluer l'augmentation ou la diminution réelle du stock de carbone.
- **Modèles empiriques** : ces modèles sont plus fiables que les modèles stochastiques, mais ils nécessitent une calibration, une validation et des données spécifiques, ce qui rend leur utilisation plus longue et plus coûteuse.
- **Travail sur le terrain et analyse** : cette méthodologie assure une plus grande précision, mais elle implique des coûts élevés et un travail sur le terrain et en laboratoire qui prend du temps. Cependant, cette étape est nécessaire si l'objectif du projet est d'être certifié pour le crédit du marché du carbone, pour lequel différentes agences de certification existent (pour une vue d'ensemble, voir la figure 7, page 23).

Pour comprendre le potentiel des ILT françaises à stocker du carbone avec différentes pratiques, une étude appliquée sur le **cas pratique de l'A28** a été réalisée à l'aide de modèles statistiques, afin de simuler un changement dans les pratiques et une implication accrue des différents acteurs dans le projet.

Le cas pratique montre comment une gestion de proximité et en cohésion avec les zones éloignées des autoroutes pourrait augmenter avec succès le stockage du carbone dans la biomasse et le sol. L'étendue de l'intervention et le nombre d'acteurs impliqués influencent grandement le potentiel de stockage du carbone dans le contexte des infrastructures.

En extrapolant ce cas pratique à l'échelle de la France, on obtient un potentiel de séquestration carbone par les dépendances vertes des ILT autoroutiers de l'ordre de **12M tCO₂eq séquestrées / 20 ans** soit plus de 600 000 tCO₂eq par an. Ces résultats doivent cependant être confirmés par une analyse plus précise et robuste prenant en compte l'ensemble des paramètres techniques et opérationnels des dépendances vertes.

Le projet exploratoire InfraSolC confirme :

L'intérêt de poursuivre à travers un programme de R&D la caractérisation des sols dans les dépendances vertes des infrastructures et de proposer un cadre méthodologique robuste permettant de valoriser d'un point de vue de la comptabilité carbone les actions de gestion et/ou d'aménagement des dépendances vertes ;

L'intérêt d'expérimenter d'ores et déjà avec des concessionnaires et exploitants la mise en œuvre de solutions déjà éprouvées (valorisation des biodéchets en compost, financement de l'agroforesterie... au-delà des emprises).

Valorisation scientifique :

Les résultats du projet exploratoire Infra-sol C seront valorisés dans l'ouvrage collectif en cours de rédaction et qui sera édité par Quae et dont le titre provisoire est « Infrastructures créatives : alternatives, connectivités, impacts, opportunités, gouvernance ».

7 NOTES ET ANNEXES

ANNEXE 1 – ENQUETE

- Questionnaire vierge (voir ci-dessous).

QUESTIONNAIRE VIERGE

INFRA-SoIC - ITTECOP : Les dépendances vertes, puits carbone à préserver et valoriser

Le projet exploratoire INFRA – SoIC traite de la question du potentiel de séquestration additionnelle de carbone des dépendances vertes d'infrastructures linéaires de transport (ILT) au regard des contraintes spécifiques de ces espaces liées à l'exploitation, aux contraintes réglementaires, juridiques et contractuelles (entre concédants, concessionnaires, exploitants) mais aussi dans une démarche d'ancrage territorial.

INTRODUCTION

<https://ittecop.fr/fr/>

L'objectif de ce questionnaire à destination des personnes en charge de l'exploitation / maintenance des espaces verts ou du service environnement des ILT est de comprendre leurs enjeux, leur positionnement par rapport à la problématique de séquestration carbone au sein de leur dépendances vertes et les contraintes qu'ils identifient. De la même manière, des experts et chercheurs sont également sollicités afin de récolter un maximum de retour d'expériences sur les projets prévus / en cours / mis en œuvre au niveau des ILT.

Adresse e-mail

VOUS ÊTES

- Employé d'une ILT en charge de l'exploitation/maintenance/responsable environnement
- Expert technique/chercheur travaillant sur les sujets liés à la restauration des écosystèmes, séquestration et puits carbone

SI VOUS AVEZ-REPONDU : Votre activité concerne la gestion et l'exploitation d'Infrastructures Linéaires de Transport.

Vous êtes... Nom/prénom

- Employé d'une ILT en charge de l'exploitation/maintenance/responsable environnement
 - Pour quelle société travaillez-vous ?
 - Quel est votre rôle au sein de cette entreprise ?
 - Quel est le nombre de kilomètres que couvre votre réseau ?
 - Avez-vous une stratégie de réduction des émissions de CO2 ?
 - Oui
 - Non

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Avez-vous une stratégie de réduction des émissions de CO2 ?

Pouvez-vous nous la décrire en quelques phrases (objectifs stratégiques, cibles)

Oui

chiffrées, moyens et
ressources alloués) ?

Avez-vous déjà entendu parler de la Stratégie Nationale Bas Carbone ?

- Oui, j'en ai pris connaissance
- Partiellement
- Non
- Je ne sais pas

La Stratégie Nationale Bas Carbone

La SNBC a été introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV). Il s'agit d'une feuille de route pour lutter contre le changement climatique à l'échelle de la France. Ce programme a deux ambitions principales :

- Atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050
- Réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français

Connaissez-vous la séquestration carbone naturelle ou les « puits carbone » ?

- Oui
- Partiellement
- Non
- Je ne sais pas

Le service de régulation du climat résultant de la fixation de CO₂ atmosphérique dans la biomasse est appelé communément la « séquestration de carbone » et le « stockage de carbone ». Si le(s) mécanisme(s) sous-jacent(s) est (sont) le(s) même(s), ces deux expressions désignent des éléments différents :

Le stockage de Carbone (C) désigne la quantité de C présente dans un ou plusieurs pools de C présents dans l'écosystème considéré, et ce à un moment précis. Il s'agit d'une mesure de l'état du stock de C à un instant t.

La mesure/l'estimation des stocks de C se fait en considérant de nombreux compartiments.

Les principaux sont :

- La biomasse aérienne qui comprend les parties aériennes des arbres (tronc, branches, feuillage), des buissons et des herbacées. Elle peut se décliner en Above Ground Biomass (AGB) vivante et AGB morte, ce qui désigne essentiellement les arbres morts et les gros débris de bois.
- La biomasse souterraine qui comprend les racines (fines et épaisses) des arbres mais

aussi celles des buissons et herbacées.

- Le C organique du sol (SOC), parfois décliné en différents sous-compartiments en fonction de la vitesse de décomposition de la matière organique (MO) considérée.
- La litière/la matière organique morte qui comprend la matière organique morte à la surface du sol – tant des feuilles sénescentes que des débris de bois, etc.

La séquestration de C est le processus dynamique qui soutient le service de régulation du climat. Cependant, sa mesure est rarement effectuée, et sa modélisation est plus répandue.

Les réseaux d'infrastructures linéaires de transports possèdent des espaces qui ont le potentiel d'être aménagés afin de fournir des services écosystémiques : la protection de la biodiversité, la régulation des inondations, et le stockage de carbone en leur sein.

Avez-vous déjà étudié la faisabilité de développer des projets de puits carbone sur votre réseau d'infrastructures pour compenser une partie de vos émissions de CO₂ ?

- Oui, nous avons réalisé une/plusieurs étude(s) de faisabilité
- Oui, des projets sont déjà en place / vont se mettre en place
- Non, mais c'est en cours de réflexion
- Je ne sais pas
- Non, jamais abordé

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Oui, nous avons réalisé une/plusieurs étude(s) de faisabilité

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Oui, des projets sont déjà en place / vont se mettre en place

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Non, jamais abordé

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Non, mais c'est en cours de réflexion

Je ne sais pas

Quels en sont les principaux résultats ?

Pouvez-vous nous décrire le(s) projet(s) ?

Pour quelle(s) raison(s) ?

Seriez-vous prêt à étudier la faisabilité et le potentiel de séquestration de carbone dans les sols pour votre entreprise ?

Quelle est la superficie totale de vos emprises vertes en hectares ?

Avez-vous une idée de la répartition des différents modes d'occupation des sols de votre foncier concédé ? (% ou ha)

¹ Espaces verts urbains d'une surface supérieure à 25 ha. Y compris parcs urbains et cimetières avec végétation. Infrastructures des terrains de camping, des terrains de sport, des parcs de loisirs, des golfs, des hippodromes. Y compris les parcs aménagés non inclus dans le tissu urbain. Ces espaces peuvent être caractérisés par un taux de couverture arboré.

² Espaces ne faisant pas l'objet d'une utilisation économique et sur lesquels la végétation ne peut s'établir du fait d'une dégradation des sols. Ces espaces couvrent : D'anciens sites artificialisés (voir catégorie U1) ne faisant plus l'objet d'une utilisation et n'ayant pas fait l'objet de travaux de restauration (anciennes mines et carrières, anciens sites d'orpaillage illégal en Guyane, etc.) ; Des terres rendues stériles du fait d'une dégradation chimique (pollution) ou physique (érosion intense) des sols survenue au cours de l'ère industrielle (à partir de 1750).

- Zones artificialisées bâties
- Espaces verts urbains¹ (U2/ EFESE)
- Terre dégradée² (U3/EFESE)
- Terre imperméabilisée
- Pelouses et pâturages naturels
- Zones humides / marais intérieurs
- Prairies permanentes
- Forêt
- Je ne sais pas

Quelles sont les contraintes majeures que vous voyez concernant le développement d'un projet de séquestration carbone pour votre entreprise ?

Quels sont les enjeux d'un projet de séquestration carbone pour votre entreprise ?

Développez-vous ou financez-vous des projets relevant du « Label bas Carbone » Français ?

- Oui
- Non
- Je ne sais pas

SI VOUS AVEZ REPONDU :

Développez-vous ou financez-vous des projets relevant du « Label bas Carbone » Français ?

Oui

Nature du projet
Calendrier
développement

de

SI VOUS AVEZ REPONDU :

Développez-vous ou financez-vous des projets relevant du « Label bas Carbone » Français ?

Non

Volume de certificats de réduction d'émissions attendus

Personne contact

Connaissez-vous des projets relevant du « Label bas Carbone » en cours de développement dans votre région ou en France ?

Oui

Non

*Vous avez répondu **Oui** à la question Connaissez-vous des projets relevant du « Label bas Carbone » en cours de développement dans votre région ou en France ?*

Nature du projet

Calendrier de développement

Volume de certificats de réduction d'émissions attendus

Personne contact

Acceptez-vous que l'on vous recontacte personnellement pour échanger directement par mail si nous souhaitons approfondir certains points ?

SI VOUS AVEZ-REPONDU :

Vous êtes...

- Expert technique/chercheur travaillant sur les

Nom/prénom

Pour quel établissement travaillez-vous ?

Quel est votre rôle ?

Quelles sont vos missions principales en tant que chercheur/expert technique ? (fonction, phases d'intervention, suivi)

sujets liés à la restauration des écosystèmes, séquestration et puits carbone

Développez/participez-vous (à) des projets de séquestration carbone dans les sols et les plantes ?

Oui

Non

SI VOUS AVEZ REPONDU :

Développez/participez-vous (à) des projets de séquestration carbone dans les sols et les plantes ?

Oui

Connaissez-vous des projets de séquestration de carbone dans les sols et les plantes dans votre région ou en France ?

Quelles sont les principales contraintes pour développer et suivre des projets de séquestration carbone dans les écosystèmes selon vous ?

Quelles sont les principales opportunités pour développer et suivre des projets de séquestration dans les écosystèmes selon vous ?

Quelles solutions connaissez-vous pour augmenter significativement la séquestration de carbone dans les sols et les plantes ?

Acceptez-vous que l'on vous recontacte personnellement pour échanger directement par mail si nous souhaitons approfondir certains points ?

Oui

Non

Calendrier de développement

Nature du projet

Volume de séquestration attendu

Personne contact

ANNEXE 2 - BIBLIOGRAPHIE

Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Deneff K, Paul E (2013) The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob Chang Biol* 19:988–995

Gao, J., Feng, J., Zhang, X., Yu, F. H., Xu, X., & Kuzyakov, Y. (2016). Drying-rewetting cycles alter carbon and nitrogen mineralization in litter-amended alpine wetland soil. *Catena*, 145, 285-290.

ADEME : « Etude estimative de la production de biodéchets au sein des établissements de restauration », 2011

Bernal, B., Murray, L. T., & Pearson, T. R. (2018). Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. *Carbon balance and management*, 13(1), 1-13.

Bockel, L., Grever U, ChloF., EX-ACT - User manual. Estimating and Targeting Greenhouse Gas Mitigation in Agriculture. FAO

Bouvet, A. et al. (2018). An above-ground biomass map of African savannahs and woodlands at 25 m resolution derived from ALOS PALSAR. *Remote Sensing of Environment* 206: 156–173. doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.030

Carter N, Killion A, Easter T, Brandt J, Ford A. 2020. Road development in Asia: assessing the range-wide risks to tigers. *Science Advances* DOI 10.1126/sciadv.aaz9619

Chaplin-Kramer, R., Ramler, I., Sharp, R., Haddad, N. M., Gerber, J. S., West, P. C., ... & King, H. (2015). Degradation in carbon stocks near tropical forest edges. *Nature communications*, 6(1), 1-6.

Chenu, C., Angers, D., Metay, A., Colnenne-David, C., Klumpp, K., Bamière, L., ... & Pellerin, S. (2014, June). Le potentiel des pratiques agricoles pour augmenter le stockage de C dans les sols cultivés: une évaluation pour la France. In 12ème Journées Nationales d'Etude des Sols (pp. 382-p)

CITEPA, 2018. Bartaire, Jean-Guy, & Boutang, Jerome (2020). Citepa - Activity report 2016, 2017, 2018, and 2019 (INIS-FR--21-0385). France

Díaz, S., Hector, A., & Wardle, D. A. (2009). Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 55-60.

Dou, X., He, P., Cheng, X., & Zhou, W. (2016). Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses. *Scientific Reports*, 6(1), 1-9.

Dubayah, R.O., J. Armston, S.P. Healey, Z. Yang, P.L. Patterson, S. Saarela, G. Stahl, L. Duncanson, and J.R. Kellner. 2022. GEDI L4B Gridded Aboveground Biomass Density, Version 2. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2017>

EFESE (2019) Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques

FAO and ITPS. 2020. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO. <http://54.229.242.119/GSOCmap/>

Fernandez-Ugalde, O; Scarpa, S; Orgiazzi, A.; Panagos, P.; Van Liedekerke, M; Marechal A. & Jones, A. LUCAS 2018 Soil Module. Presentation of dataset and results, EUR 31144 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2022, ISBN 978-92-76-54832-4, doi:10.2760/215013, JRC129926

Freitas, S. R., Hawbaker, T. J., & Metzger, J. P. (2010). Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest ecology and management*, 259(3), 410-417.

Global Infrastructure Mapping and Modelling – Plans, Trains and Automobiles, 2022.

- Guenet, B., Camino-Serrano, M., Ciais, P., Tifafi, M., Maignan, F., Soong, J. L., & Janssens, I. A. (2018). Impact of priming on global soil carbon stocks. *Global change biology*, 24(5), 1873-1883.
- Guo, Z., Zhang, Z., Zhou, H., Wang, D., & Peng, X. (2019). The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol. *Scientific reports*, 9(1), 1-10
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240.
- Hengl, T. and Wheeler, I. (2018) Soil organic carbon stock in kg/m² for 5 standard depth intervals (0–10, 10–30, 30–60, 60–100 and 100–200 cm) at 250 m resolution. Available at: <https://zenodo.org/record/2536040#.XkKA9jH7RPY>
- Ibisch, P. L., Hoffmann, M. T., Kreft, S., Pe'Er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., Dellasala, D. A., Vale, M. M., Hobson, P. R., & Selva, N. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354, 1423– 1427.
- ISRIC. SoilGrids250m 2.0. SoilGrids <https://soilgrids.org/> (2020)
- Kerstin Sundseth K, Houston J., Eriksson M, (2019) Natura 2000 in the Atlantic Region, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities
- Kerstin Sundseth K, Houston J., Eriksson M, (2019) Natura 2000 in the Atlantic Region, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities
- Liang, C., Schimel, J. P., & Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology*, 2(8), 1-6. ; Liang, C., & Zhu, X. (2021). The soil Microbial Carbon Pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration. *Science China Earth Sciences*, 64(4), 545-558.
- Majumder, S., Neogi, S., Dutta, T., Powel, M. A., & Banik, P. (2019). The impact of biochar on soil carbon sequestration: meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages. *Journal of environmental management*, 250, 109466.
- Malak, D. A., Marín, A. I., Trombetti, M., & Roman, S. S. (2021). Carbon pools and sequestration potential of wetlands in the European Union. Viena and Malaga: European Topic Centre on Urban, Land and Soil Systems.
- Meersmans, J., Martin, M. P., Lacarbe, E., De Baets, S., Jolivet, C., Boulonne, L., ... & Arrouays, D. (2012). A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 841-851
- O'Sullivan, O. S., Holt, A. R., Warren, P. H., & Evans, K. L. (2017). Optimising UK urban road verge contributions to biodiversity and ecosystem services with cost-effective management. *Journal of environmental management*, 191, 162-171.
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J. P., ... & Chemineau, P. (2017). Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture. *Environmental Science & Policy*, 77, 130-139.
- Qian, K., Wang, L., & Yin, N. (2012). Effects of AMF on soil enzyme activity and carbon sequestration capacity in reclaimed mine soil. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(4), 553-557..
- Rossi LMW (2019) Embankment as a carbon sink: a study on carbon sequestration pathways and mechanisms in topsoil and exposed subsoil. Ph. D. Thesis, University of Montpellier, France
- Rossi, L. M., Mao, Z., Merino-Martin, L., Roumet, C., Fort, F., Taugourdeau, O., ... & Stokes, A. (2020). Pathways to persistence: plant root traits alter carbon accumulation in different soil carbon pools. *Plant and soil*, 452(1), 457-478.

Sanderman J, Hengl T, Fiske G et al. (2018) A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters* 13: 055002. doi: 10.1088/1748-9326/aabe1c

Santoro, M. and Cartus, O. (2019): ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the year 2017, v1. Centre for Environmental Data Analysis, 02 December 2019. doi.org/10.5285/bedc59f37c9545c981a839eb552e4084

Sharps et.al, 2017 Sharps, K., Masante, D., Thomas, A., Jackson, B., Redhead, J., May, L., ... & Jones, L. (2017). Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of the total environment*, 584, 118-130.

Simard, M., T. Fatoyinbo, C. Smetanka, V.H. Rivera-monroy, E. Castaneda, N. Thomas, and T. Van der stocken. 2019. *Global Mangrove Distribution, Aboveground Biomass, and Canopy Height*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1665>

Spawn, S.A., and H.K. Gibbs. 2020. *Global Aboveground and Belowground Biomass Carbon Density Maps for the Year 2010*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1763>

Tardieu. L., Roussel. S., Thompson. J.D., Labarraque. D., Salles. J.M. (2015). Combining direct and indirect ecosystem service loss into environmental impact assessment for infrastructure construction. *Journal of environmental management* 152, 145-157

Xia, J. et al. (2014). Spatio-temporal patterns and climate variables controlling of biomass carbon stock of global grassland ecosystems from 1982 to 2006. *Remote Sensing* 6: 1783-1802.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Typologies et caractérisation des dépendances vertes d'un ILT autoroutière (source : Direction interdépartementale des routes Centre Ouest, 2012)	9
Figure 2 Typologie et caractérisation des dépendances vertes d'une ILT ferrée (Source : AREP)	10
Figure 3 Carte d'occupation des sols de la France Métropolitaine pour l'année 2020 (Source : CNES)	11
Figure 4 Carte du réseau autoroutier français (Source : Route_500, IGN).....	11
Figure 5 Illustration des espaces considérés pour l'étude.....	12
Figure 6 Illustration de l'extraction par classes de l'OCS sur une zone.	12
Figure 7 Rendu de l'Extrapolation de l'analyse	12
Figure 8 Illustration de la vectorisation des classes d'OCS	13
Figure 9 Répartition de l'OCS sur les autoroutes en France (Bande de 500 M).....	13
Figure 10 Répartition de l'OCS sur les autoroutes en France (Bande de 16 M).....	14
Figure 11 Illustration des tronçons – 1 tronçon = 100 m	14
Figures 12 a et b Illustrations des pourcentage des surfaces en prairie par tronçon, visualisation de la présence de l'espace de prairie en tronçon par intensité de couleur.....	15
Figure 13 Pourcentage des surfaces de forêt par tronçon (même procédé que figure 12) à l'échelle sous-régionale.....	15
Figure 14 Le réseau ferroviaire en France (Source : AREP)	17
Figures 15 a et b Occupation du sol dans l'environnement immédiat du réseau autoroutier	18
Figure 16 Panorama des standard de certification du carbone du sol (Source : Oréade Brèche, adaptation).26	
Figure 17 Schéma des Solutions Fondées sur la Nature par typologie.....	30
Figure 18 Analyse comparative de la superficie des dépendances vertes versus longueur du réseau	32
Figure 19 Répartition des modes d'occupation des sols sur un foncier concédé, 4000ha et 340km de linéaire	32
Figure 20 Localisation de l'A28 à l'échelle du quart nord-Ouest de la France métropolitaine.....	36
Figures 21 a et b Représentations des bandes de 16 et de 500 mètres de part et d'autre de l'autoroute	37
Figure 23 Zone d'étude des 500m sur fond de carte Google Earth Sat.....	40
Figure 23 Zone d'étude des 500m sur Fond Carte d'occupation des sols OSO 2020	40
Figure 24 Occupation des sols par utilisation et zone	40
Figure 25 Modélisation de l'évolution des stocks de carbone après la mise en œuvre du sc. 1	42
Figure 26 Modélisation de l'évolution des stocks de carbone après la mise en œuvre du sc. 2	43
Figure 27 Modélisation de l'évolution des stocks de carbone après répliation des pratiques préconisées au-delà du périmètre de l'infrastructure dans une bande de 500M de largeur	44
Figure 28 Puits de carbone dans la SNBC (Source : I4CE à partir des données CITEPA).....	50
Figure 29 Historique et projection des émissions du secteur des transports entre 1990 et 2050 (en MtCO ₂ eq) (Source : SNBC 2).....	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Typologies d'ILT et étendue (Source : Mémento des transports, SOeS, 2014)	8
Tableau 2 Classes d'occupation des sols pour le réseau autoroutier pour 2022	11
Tableau 3 Classes d'occupation des sols à l'échelle française pour le réseau autoroutier France (bande de 500 M).....	13
Tableau 4 Synthèse des OCS par type de zones (bande de 500M)	13
Tableau 5 Classes d'occupation des sols à l'échelle française pour le réseau autoroutier France (bande de 16 M).....	14
Tableau 6 Synthèse des OCS par type de zones (bande de 16M).....	14
Tableau 7 Données sur les réseaux ferrés et autoroutiers en France (Sources : AREP et calcul selon la méthodologie explicitée ci-contre)	16
Tableau 8 Bases de données utiles pour la quantification des stocks et puits de carbone	19
Tableau 9 Occupation des sols agrégée par grande catégorie d'utilisation des sols (A28).....	40

Tableau 10 Résultats de modélisation du scénario 1	41
Tableau 11 Résultats de modélisation du scénario 2	42
Tableau 12 Paramètres et hypothèses de modélisation du scénario 3	43
Tableau 13 Facteurs d'émissions par type de traitement envisagé pour le scénario 3.....	43
Tableau 14 Analyse des co-bénéfices et limites par scénarios en faveur de la séquestration carbone.....	46
Tableau 15 Analyse des co-bénéfices et limites par scénarios en faveur de la biodiversité.....	47