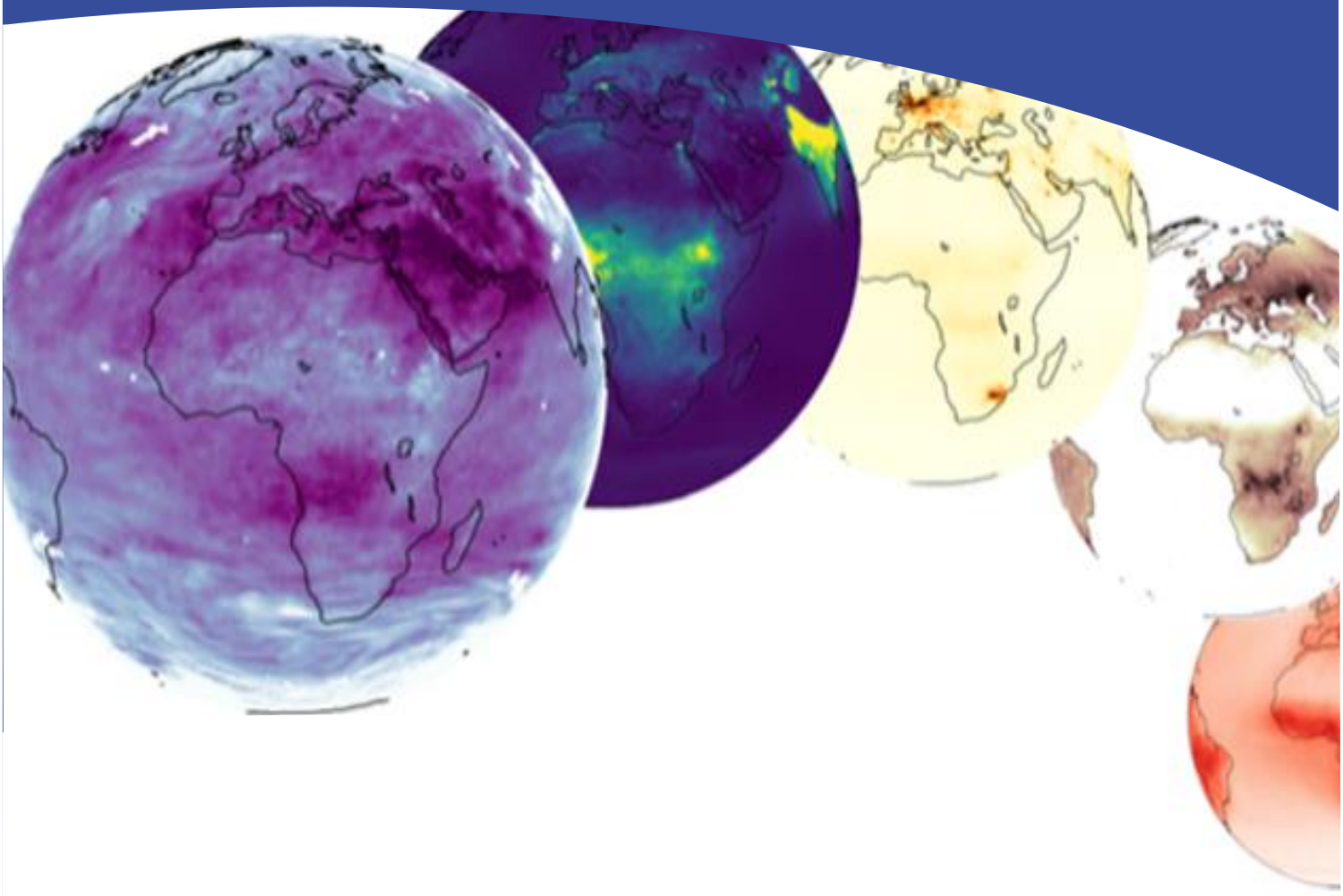
Estimation des flux de carbone

Utilisation des données satellitaires pour estimer les flux de carbone dans la Région Auvergne-Rhône-Alpes

2025



Diffusion : 2026

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr

Atmo votre parten'air AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site *www.atmo-auvergnerhonealpes.fr*

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ***(2025)***
Estimation des flux de carbone – Utilisation des données satellitaires pour estimer les flux de carbone dans la Région Auvergne-Rhône-Alpes

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le formulaire de contact
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Version éditée le (15/09/2026)

Remerciements

Les données satellites d'estimation du NEE combinées SMAP SPL4CMDL sont accessibles sur la plateforme NASA Earthdata (après Login sur la plateforme) : https://nsidc.org/data/spl4cmdl/versions/8 (dernier accès le 22/06/2026).

Les données de BD Forêt® IGN sont disponibles sur la plateforme : https://cartes.gouv.fr/rechercher-une-donnee/dataset/IGNF_BD-FORET (dernier accès le 22/06/2026).

Financement

Cette étude a été rendue possible grâce au cofinancement de la Région Auvergne-Rhône-Alpes et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes :

La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

Elle n'aurait pas pu être réalisée sans les données générales de l'observatoire, financées par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Résumé

Les données satellitaires permettent aujourd'hui de suivre de nombreuses composantes de l'environnement, qu'il s'agisse de la composition chimique de l'atmosphère, de l'état de la végétation ou encore des échanges entre les surfaces continentales et l'atmosphère. Depuis 2020, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (Atmo AuRA) développe l'utilisation de ces observations afin de compléter son expertise reposant historiquement sur les mesures au sol et la modélisation. Après des travaux consacrés à la cartographie régionale du dioxyde d'azote (NO_2), à l'étude de l'ammoniac (NH_3), du méthane (CH_4), à l'utilisation de la mesure satellitaire de la radiation solaire dans les modèles de dispersion et chimie de l'atmosphère ainsi qu'à l'intégration des émissions issues des feux de forêt via le module APIFLAME (Turquety et al., 2020), l'association s'intéresse désormais à l'exploitation des données satellitaires pour caractériser les flux de carbone à l'échelle régionale.

Atmo AuRA mobilise déjà des bilans annuels du secteur UTCATF/LULUCF pour documenter les puits forestiers sur la région, leur répartition territoriale et ses déterminants (accroissement, mortalité et prélèvements). Cette présente étude vise à évaluer le potentiel des produits satellitaires pour analyser les échanges de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les estimations de Net Ecosystem Exchange (NEE) issues du produit SMAP de la NASA ont été exploitées sur la période 2016–2025 puis croisées avec les données de la BD Forêt IGN V2 afin d'estimer la contribution relative des principaux groupes et classes forestières aux flux régionaux de carbone.

Les résultats montrent que les peuplements forestiers contribuent globalement à un NEE négatif sur l'ensemble de la période étudiée, montrant leur rôle important de puits de carbone. Les peuplements feuillus apparaissent comme les principaux contributeurs aux puits régionaux, devant les conifères et les peuplements mixtes. L'analyse détaillée met également en évidence l'importance de plusieurs essences majeures de la région, notamment les sapins-épicéas, les chênes, les hêtres et les châtaigniers.

L'évolution temporelle des contributions forestières révèle toutefois une diminution progressive de l'intensité du puits de carbone entre 2016 et 2025. Cette tendance apparaît cohérente avec les conditions climatiques observées au cours de la période, marquées par plusieurs épisodes de sécheresse et de canicule, ainsi qu'avec les dégradations sanitaires décrites dans les bilans du Département de la Santé des Forêts. Un répit temporaire observé en 2021 semble notamment correspondre à des conditions climatiques plus favorables à la croissance forestière.

Cette étude constitue une première évaluation régionale du potentiel des produits satellitaires SMAP pour le suivi des flux de carbone. Elle démontre l'intérêt de combiner observations satellitaires et données forestières pour améliorer la connaissance des puits de carbone régionaux et ouvre des perspectives pour le développement d'indicateurs environnementaux complémentaires au sein des activités d'observation et d'expertise d'Atmo AuRA.

Sommaire

1. Introduction 8

2. Net Ecosystem Exchange et flux de CO_2 9

2.1. Définition du NEE 9
2.2. Interactions entre la végétation, les forêts et le climat 10
2.3. Méthode d'estimation des flux de carbone au sol 11
2.4. Apport des observations satellitaires 11

3. Méthodologie et données 11

3.1. Principe général de la méthode 11
3.2. Description des données utilisées 12
3.2.1. Données satellitaires SMAP 12
3.2.2. Données forestières IGN 13
3.2.3. Description des classes d'occupation du sol de la BD Forêt IGN 13
3.3. Prétraitement des données SMAP 13
3.4. Reconstruction de la grille spatiale SMAP 14
3.5. Croisement SMAP – BD Forêt et calcul des contributions 14

4. Résultats 15

4.1. Analyse temporelle des flux de NEE 15
4.1.1. Evolution journalière et cycle saisonnier 15
4.1.2. Variabilité interannuelle des flux de carbone 16
4.2. Analyse spatiale des flux de NEE 17
4.2.1. Distribution spatiale des cumuls annuels 17
4.2.2. Variabilité spatiale saisonnière 18
4.3. Caractérisation forestière des pixels SMAP à partir de la BD Forêt IGN V2 20
4.3.1. Répartition des groupes forestiers 21
4.3.2. Composition forestière détaillée 22
4.4. Contribution des groupes forestiers aux flux de NEE 23
4.4.1. Contribution des principales classes forestières 24
4.4.2. Evolution temporelle des contributions des classes forestières 25
4.5. Discussions des évolutions observées 26
4.5.1. Influence des conditions météorologiques 26
4.5.2. Influence de l'état sanitaire des peuplements forestiers 27
4.5.3. Limites liées à la méthode 27

5. Perspectives 28

5.1. Intégration avec d'autres données environnementales 28
5.2. Approfondissement des méthodes 28
5.3. Suivi des peuplements forestiers 29

6. Conclusion 30

Illustrations

Figure 1 – Schéma détaillant les flux de carbone entre l'atmosphère et la végétation au sol (Suni, 2004). **9**

Figure 2 – Chaîne de traitement des données SMAP et BD Forêt de l'IGN pour l'analyse des flux de NEE. **12**

Figure 3 – Evolution journalière du NEE régional issu des données SMAP L4C. **15**

Figure 4 - Moyenne mensuelle du NEE de la région Auvergne Rhône Alpes sur la période 2016–2025. ..... **16**

Figure 5 - Évolution des cumuls annuels moyens régionaux du NEE sur la période 2016–2025 à partir des données SMAP L4C. **17**

Figure 6 - Distribution spatiale des cumuls annuels du NEE pour les années 2016, 2023 et 2025 sur la région Auvergne–Rhône-Alpes. **18**

Figure 7 - Distribution spatiale des cumuls saisonniers du NEE en 2016 sur la région AuRA. **19**

Figure 8 - Distribution spatiale des cumuls saisonniers du NEE en 2023 sur la région AuRA. **19**

Figure 9 - Groupe forestier dominant dans les pixels SMAP d'Auvergne-Rhône-Alpes à partir de la BD Forêt IGN V2. ..... **21**

Figure 10 - Évolution annuelle des contributions par groupes forestiers. **23**

Figure 11 - Contribution moyenne des classes forestières au NEE régional. **24**

Figure 12 - Évolution annuelle des contributions des principales classes forestières au NEE régional. **25**

1. Introduction

Le dioxyde de carbone (CO_2) constitue le principal contributeur au changement climatique (IPCC, 2023). Une partie de ce dioxyde de carbone est absorbée naturellement par les océans et les écosystèmes continentaux, contribuant ainsi à limiter l'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère. Parmi ces écosystèmes, les forêts occupent une place centrale grâce à leur capacité à stocker durablement le carbone dans la biomasse et les sols.

En France comme en Europe, les écosystèmes forestiers représentent l'un des principaux puits de carbone terrestres. Toutefois, plusieurs études récentes mettent en évidence une diminution progressive de leur capacité de séquestration sous l'effet combiné du changement climatique, des sécheresses répétées, des vagues de chaleur, du vieillissement des peuplements ainsi que de l'augmentation des perturbations biologiques et sanitaires (Ciais et al., 2026 ; Ritter et al., 2026). Dans ce contexte, le suivi des échanges de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère constitue un enjeu majeur pour mieux comprendre l'évolution du rôle des forêts dans l'atténuation du changement climatique.

Les forêts couvrent 36 % du territoire de la région Auvergne-Rhône-Alpes, répartis entre 60 % de surfaces feuillus et 40 % de surfaces résineuses (DRAAF, 2023). Cependant, les peuplements forestiers régionaux sont confrontés depuis plusieurs années à des épisodes de sécheresse, de canicule et à une dégradation progressive de leur état sanitaire. L'évaluation de l'évolution du rôle de ces forêts dans le cycle du carbone représente ainsi un enjeu important à l'échelle régionale.

Depuis 2020, Atmo AuRA développe l'utilisation des observations satellitaires afin de compléter son expertise. Ce travail constitue une extension de compétences déjà mobilisées sur la télédétection, le traitement de données géospatiales et la modélisation environnementale sur le sujet des flux de carbone. Avant cette étude, les flux de carbone sont déjà utilisés par Atmo AuRA dans le cadre des inventaires territorialisés du secteur UTCATF/LULUCF.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité des données satellitaires à caractériser les variabilités spatiales et temporelles des échanges de carbone entre l'atmosphère et les forêts sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les estimations de ces flux sont analysées sur la période 2016–2025 puis croisées avec les données de classe de végétation afin de quantifier la contribution relative des principaux groupes et classes forestières aux échanges régionaux de carbone. Au-delà de l'analyse des flux eux-mêmes, ce travail vise également à explorer le potentiel de ces données pour le développement futur d'indicateurs régionaux de suivi des puits de carbone et des services écosystémiques associés aux forêts.

2. Net Ecosystem Exchange et flux de CO_2

Les végétaux absorbent le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique par photosynthèse afin de produire la matière organique nécessaire à leur croissance. Une partie de ce carbone est stockée dans la biomasse végétale et les sols forestiers. En parallèle, les végétaux rejettent du CO_2 par décomposition de la matière organique (les feuilles mortes, le bois mort et les racines), respiration des plantes et respirations microbiennes du sol (Suni, 2004).

L'ensemble de ces échanges entre la végétation, les sols et l'atmosphère constitue le cycle dit du carbone. Ces transferts de carbone entre les différents compartiments environnementaux sont communément appelés flux de carbone. Dans les écosystèmes terrestres, ils sont majoritairement associés aux échanges de CO_2 liés aux processus de photosynthèse, de respiration et de décomposition de la matière organique.

Les forêts jouent un rôle majeur dans ce fonctionnement en raison de leur capacité à absorber et stocker d'importantes quantités de carbone, faisant d'elles l'un des principaux puits de carbone terrestres. Afin de quantifier ces flux, plusieurs indicateurs ont été développés, dont le Net Ecosystem Exchange (NEE).

Le fonctionnement simplifié des échanges de carbone entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres est présenté sur la Figure 1.

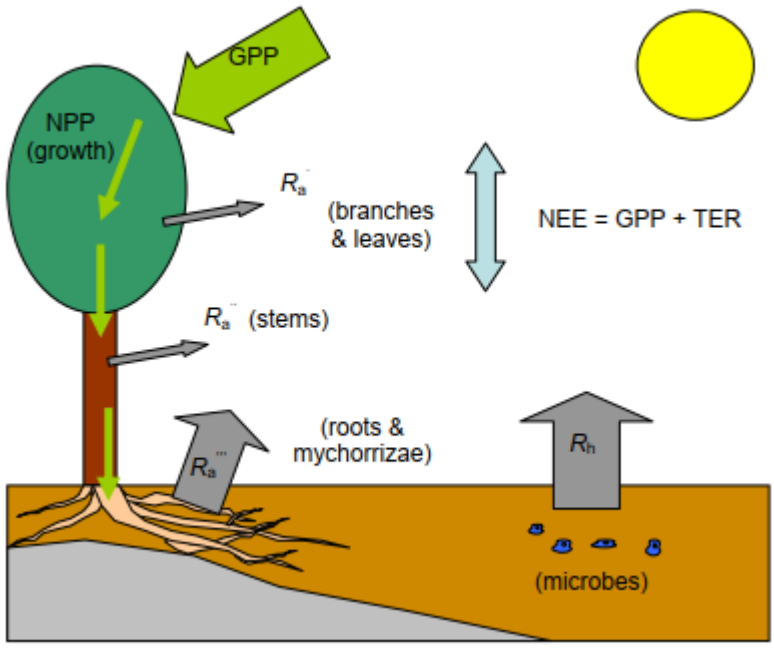


Figure 1 – Schéma détaillant les flux de carbone entre l'atmosphère et la végétation au sol (Suni, 2004).

2.1. Définition du NEE

Le Net Ecosystem Exchange (NEE) correspond au flux net de dioxyde de carbone (CO_2) échangé entre l'écosystème terrestre et l'atmosphère. Il constitue un indicateur central du cycle du carbone, car il traduit le bilan entre les processus d'absorption du carbone par la végétation et les émissions

de carbone liées à la respiration des organismes vivants et à la décomposition de la matière organique. Dans la littérature scientifique, le NEE est couramment utilisé pour caractériser le rôle d'un écosystème comme puits ou source de carbone.

Dans sa formulation classique, le NEE peut être exprimé comme :

$$NEE = R_{eco} - GPP \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Où :

- GPP (Gross Primary Production) correspond à la productivité primaire brute, c'est-à-dire la quantité totale de carbone assimilée par la photosynthèse des végétaux ;
- R_{eco} (Ecosystem respiration) représente la respiration totale de l'écosystème.

Lorsque le NEE est négatif, l'écosystème agit comme un puits de carbone, absorbant davantage de CO_2 qu'il n'en émet. À l'inverse, un NEE positif indique que l'écosystème constitue une source de carbone pour l'atmosphère (Wang et al., 2016 ; Lian et al., 2023). La respiration totale de l'écosystème peut elle-même être décomposée en deux composantes principales :

$$R_{eco} = R_a + R_h \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Où :

- R_a (respiration autotrophe) correspond à la respiration des plantes (feuilles, tiges et racines) ;
- R_h (respiration hétérotrophe) correspond à la respiration des micro-organismes du sol impliqués dans la décomposition de la matière organique.

La quantification du NEE permet de comprendre les échanges entre la biosphère et l'atmosphère, et pour évaluer la contribution des écosystèmes terrestres à l'atténuation du changement climatique.

2.2. Interactions entre la végétation, les forêts et le climat

Les écosystèmes terrestres jouent un rôle majeur dans la régulation du cycle global du carbone. Une part importante du carbone atmosphérique est absorbée par la biosphère terrestre à travers les processus de photosynthèse et stockée dans la biomasse végétale et les sols.

Les forêts couvrent environ 30 % des surfaces continentales et stockent une part importante du carbone terrestre dans leur biomasse et leurs sols (Rodríguez-Veiga et al., 2017). Elles constituent une composante majeure du puits de carbone terrestre : selon Lian et al. (2023), les écosystèmes forestiers contribueraient à plus de la moitié de l'absorption nette de carbone estimée pour les écosystèmes continentaux. À l'échelle globale, cette contribution doit toutefois être replacée dans le bilan général du carbone : sur la période 2010–2019, environ 31 % des émissions anthropiques de CO_2 ont été absorbées par les écosystèmes terrestres dans leur ensemble, contre environ 23 % par les océans, le reste s'accumulant principalement dans l'atmosphère (IPCC, 2021).

Les flux de carbone dans les écosystèmes sont fortement influencés par les conditions climatiques, les perturbations naturelles et les changements d'usage des sols. Les variations de température, de disponibilité en eau ou de rayonnement solaire peuvent modifier l'intensité de la photosynthèse et de la respiration des écosystèmes. De plus, les perturbations telles que les sécheresses, les incendies ou les changements d'occupation des sols peuvent transformer temporairement un puits en source de CO_2.

Les observations satellitaires ont également permis de montrer que la capacité des écosystèmes terrestres à absorber le carbone peut varier fortement dans le temps et dans l'espace, notamment en réponse aux anomalies climatiques (Ray et al., 2019). Ces dynamiques soulignent

l'importance de mieux caractériser la distribution spatiale des flux de carbone afin d'améliorer la compréhension du cycle du carbone à l'échelle régionale et globale.

2.3. Méthode d'estimation des flux de carbone au sol

Les flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère peuvent être estimés à partir de différentes approches complémentaires.

Une première approche repose sur les mesures directes réalisées au sol par les tours de flux utilisant la méthode de covariance des turbulences (eddy covariance). Cette technique permet de mesurer en continu les échanges de CO_2 entre la surface et l'atmosphère à l'échelle locale. Les données issues de ces stations sont regroupées au sein de réseaux internationaux tels que FLUXNET (Baldocchi et al., 2001) ou ICOS (Integrated Carbon Observation System ; Heiskanen et al., 2022), rassemblant plusieurs centaines de sites de mesure répartis à travers le monde et constitue une référence pour l'étude des flux de carbone des écosystèmes terrestres. En Auvergne-Rhône-Alpes, deux stations ICOS permettent notamment de documenter ces échanges : la station de Laqueuille, dans le Puy-de-Dôme, implantée sur un écosystème prairial, et celle du col du Lautaret, en milieu alpin. Ces observations locales permettent d'estimer le bilan carbone des écosystèmes et d'étudier l'influence des conditions environnementales sur les échanges de CO_2 (Wang et al., 2016).

2.4. Apport des observations satellitaires

Les observations réalisées au sol, notamment à travers les réseaux de tours de flux tels que FLUXNET ou ICOS permettent d'obtenir les échanges de CO_2 entre la végétation et l'atmosphère. Cependant ces dispositifs restent spatialement limités et ne permettent pas de représenter directement la variabilité des flux à des échelles régionales.

Dans ce contexte, les observations satellites constituent un complément important pour la surveillance environnementale des flux de carbone. Elles permettent d'obtenir une couverture spatiale des flux de carbone liés au fonctionnement des écosystèmes, tels que la structure de la végétation, l'humidité des sols et des concentrations atmosphériques de CO_2.

Plusieurs missions satellitaires sont aujourd'hui utilisées pour l'étude du cycle du carbone, notamment MODIS, Sentinel, OCO-2 ou la mission Soil Moisture Active and Passive (SMAP). Toutefois, ces produits présentent généralement des résolutions spatiales relativement grossières et un même pixel peut intégrer plusieurs types de couverts végétaux ou d'occupation du sol.

Afin de mieux interpréter les flux observés par satellite, il est alors nécessaire d'associer ces mesures à des données décrivant plus finement les caractéristiques de surface. Dans cette étude, les estimations satellitaires sont croisées avec la BD Forêt de l'IGN afin de caractériser la composition des peuplements forestiers présents à l'intérieur des pixels SMAP. Cette approche permet d'identifier la contribution relative des différents types de couverts forestiers aux flux de carbone observés.

Cette méthode est appliquée à l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes afin de compléter les observations disponibles et d'apporter une information spatialisée sur les relations entre occupation du sol et dynamique des flux de carbone.

3. Méthodologie et données

3.1. Principe général de la méthode

Cette étude repose sur l'exploitation des estimations de NEE issues du produit satellitaire SMAP et de l'inventaire forestier de la BD Forêt IGN. L'objectif est d'analyser la variabilité spatiale et

temporelle des flux de carbone sur la région Auvergne-Rhône-Alpes et d'associer les signaux observés à la composition des couverts forestiers.

L'étude prend en compte une approche temporelle caractérisant les évolutions du NEE sur la période 2016-2025. Cette approche permet d'identifier les tendances mensuelles et annuelles d'absorption ou d'émission de carbone ainsi que certaines variations potentielles liées aux conditions climatiques ou aux changements de couverture végétale. Une approche spatiale reposant sur le croisement entre les pixels de la base de données satellitaire et les polygones forestiers IGN compose la seconde partie de l'étude. Cette seconde approche vise à associer les estimations satellitaires du NEE à la composition du couverts forestiers issus de la BD Forêt IGN, en calculant des fractions surfaciques des différentes classes de végétation présentes dans chaque pixel SMAP afin de mieux caractériser leur contribution relative aux flux de carbone observés. Les étapes de l'étude suivent la ligne directrice suivante (Figure 2) :

- Les données SMAP sont prétraitées et agrégées aux résolutions mensuelles et annuelles sur la période 2016-2025 ;
- Les données de végétation issues de la BD Forêt IGN sont prétraitées et regroupées en grandes classes forestières ;
- Les pixels SMAP sont reconstruits spatialement puis croisés avec les polygones forestiers IGN;
- Les surfaces intersectées sont calculées afin d'estimer les fractions surfaciques de chaque classe de végétation et leur contribution relative au signal de NEE.

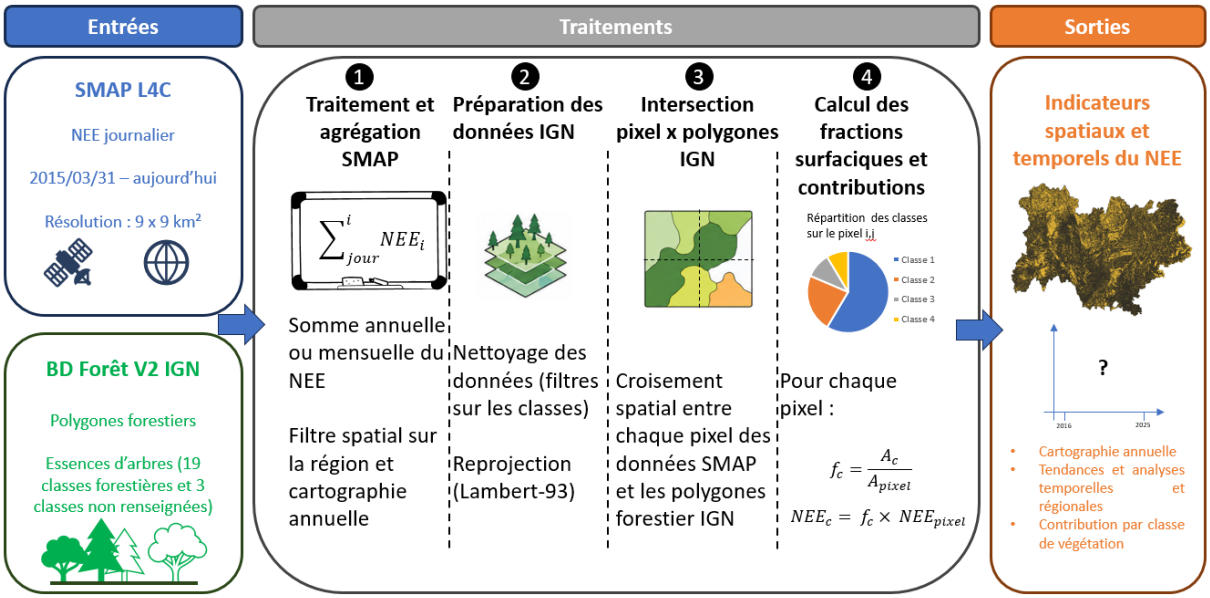


Figure 2 – Chaîne de traitement des données SMAP et BD Forêt de l'IGN pour l'analyse des flux de NEE.

La mise en œuvre de cette méthodologie repose sur l'utilisation conjointe de données satellitaires issues du produit SMAP L4C et de données forestières de la BD Forêt de l'IGN.

3.2. Description des données utilisées

3.2.1. Données satellitaires SMAP

Les données satellitaires utilisées dans cette étude proviennent de la mission SMAP développée par la NASA. Bien que la mission SMAP soit principalement dédiée à l'observation de l'humidité des sols, plusieurs produits dérivés permettent d'estimer des variables liées au cycle du carbone à l'échelle globale.

L'étude repose sur l'utilisation du produit SMAP Level-4 Carbon version 8 [1]qui fournit les estimations de NEE à une résolution spatiale d'environ 9 x 9 km² et à une résolution temporelle journalière. Ce produit combine des observations satellitaires, des données météorologiques et des modèles biogéochimiques afin de produire des estimations spatialisées des flux de carbone entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère (Jones et al., 2018 ; Kimball et al., 2025).

En complément du NEE, le produit SMAP L4C fournit également la productivité primaire brute (GPP) et les composantes de respiration de l'écosystème.

3.2.2. Données forestières IGN

Les données forestières utilisées dans cette étude proviennent de la BD Forêt® version 2 produite par l'IGN [2]. Cette base de données vectorielle décrit la répartition spatiale des formations forestières françaises sous forme de polygones géoréférencés d'une surface minimale de 0,5 hectares.

Chaque polygone est associé à plusieurs informations relatives à la composition forestière, notamment les essences d'arbres dominantes. Dans cette étude, la variable ESSENCE est utilisée pour identifier les principales classes de végétation présentes sur le territoire de la région AuRA.

Les données de la BD Forêt proviennent toutefois de campagnes de cartographies réalisées à différentes périodes selon les départements et les zones géographiques. Cette variabilité temporelle peut introduire une certaine hétérogénéité dans la représentation des peuplements forestiers à l'échelle régionale. La qualité des classifications dépend également du processus de photo-interprétation utilisé par l'IGN, ce qui constitue une source d'incertitude supplémentaire dans l'analyse spatiale.

3.2.3. Description des classes d'occupation du sol de la BD Forêt IGN

La variable ESSENCE de la BD Forêt permet d'identifier les principales essences forestières présentes dans chaque polygone. Les données utilisées dans cette étude comprennent notamment des classes détaillées telles que les chênes, hêtres, châtaigniers, douglas, sapins, épicéas ou encore différents types de pins.

Afin de faciliter l'analyse spatiale à l'échelle des pixels SMAP (~ 9 km), ces classes détaillées ont ensuite été regroupées en grandes catégories forestières :

- Feuillus ;
- Conifères ;
- Mixtes.

Les regroupements ont été réalisés à partir des essences dominantes renseignées dans la base IGN. Les peuplements feuillus regroupent principalement les chênes, hêtres, châtaigniers, peupliers et robiniers, tandis que les peuplements de conifères regroupent les pins, sapins, épicéas, douglas et mélèzes. Les classes NC, NR et NE ont été exclues des regroupements principaux et intégrées aux surfaces non classées lors du calcul des fractions surfaciques.

3.3. Prétraitement des données SMAP

[1] Produit SMAP L4C, version 8 : https://nsidc.org/data/spl4cmdl/versions/8.
[2] BD Forêt® version 2, IGN : https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article646.

Les données SMAP L4C ont été téléchargées depuis la plateforme NASA Earthdata [3] sous forme de fichiers journaliers couvrant la période du 31 mars 2015 au 01 janvier 2026. Les valeurs de NEE sont extraites des fichiers et filtrées sur l'empreinte de la région Auvergne-Rhône-Alpes à partir des contours administratifs de la région. Les pixels situés en dehors du domaine d'étude ont été exclus de l'analyse.

Les séries journalières de NEE sont agrégées aux résolutions mensuelles et annuelles. Ces agrégations permettent d'analyser les évolutions temporelles des flux de carbone et d'identifier les tendances générales d'absorption ou d'émission du CO_2 sur la période d'étude. Les données annuelles agrégées sont ensuite utilisées pour l'analyse spatiale et le croisement avec les données forestières IGN.

3.4. Reconstruction de la grille spatiale SMAP

Les données SMAP utilisées dans cette étude sont fournies sous forme de points correspondant aux centres des pixels de la grille satellitaire. Afin de permettre les traitements spatiaux avec les données forestières IGN, une reconstruction géométrique de cette grille est réalisée.

Les coordonnées des centres de pixels sont utilisées afin de calculer les limites spatiales de chaque cellule à partir des positions des pixels voisins. Cette étape permet de reconstruire une grille régulière sous forme de polygones représentant l'emprise spatiale complète des pixels SMAP.

Les pixels reconstruits constituent ensuite le support des traitements géographiques utilisés pour le croisement avec les données de la BD Forêt IGN.

3.5. Croisement SMAP – BD Forêt et calcul des contributions

Une analyse spatiale est réalisée entre les polygones reconstruits des pixels SMAP et les données forestières de la BD Forêt IGN. Les traitements géométriques sont effectués après reprojection des données dans le système Lambert-93 afin de garantir la cohérence des calculs de surfaces.

Chaque pixel SMAP est intersecté avec les polygones forestiers afin d'identifier les différents types de peuplements présents dans son empreinte spatiale. Pour chaque classe de végétation, une fraction surfacique est calculée selon :

$$f_c = \frac{A_c}{A_{pixel}} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Où :

- A_c représente la surface occupée par la classe végétale c dans le pixel ;
- A_{pixel} représente la surface totale du pixel SMAP.

Les fractions surfaciques obtenues sont ensuite appliquées aux estimations de NEE afin d'estimer la contribution relative de chaque groupe forestier :

$$NEE_c = f_c \times NEE_{pixel} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Où :

- NEE_c représente la contribution associée à la classe c ;

[3] Accès NASA Earthdata au produit SPL4CMDL.008 : https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/nsidc-cprd-spl4cmdl-008.

- NEE_{pixel} correspond à la valeur du NEE estimée pour le pixel considéré.

Les classes détaillées de la BD Forêt sont regroupées en grands ensembles de végétation (feuillus, conifères et peuplements mixtes) afin de faciliter l'interprétation des résultats à l'échelle régionale.

4. Résultats

Cette partie présente les principaux résultats obtenus à partir des analyses temporelles du NEE ainsi que des traitements spatiaux réalisés à partir du croisement entre les données satellitaires et les informations forestières de la BD Forêt IGN V2. Une attention particulière est portée à l'identification des tendances observées et à la contribution relative des différentes classes forestières aux flux de carbone.

4.1. Analyse temporelle des flux de NEE

L'analyse temporelle vise à caractériser les variations des échanges de carbone observés sur la région Auvergne–Rhône-Alpes à partir des données SMAP L4C. Les séries journalières permettent d'étudier la dynamique saisonnière des flux, tandis que les cumuls mensuels et annuels sont utilisés pour analyser leur variabilité à plus grande échelle temporelle.

4.1.1. Evolution journalière et cycle saisonnier

Afin de caractériser les variations temporelles des flux de carbone à l'échelle régionale, une analyse des moyennes journalières du NEE a été réalisée sur la période 2016-2025. La Figure 3 représente la moyenne régionale journalière du NEE.

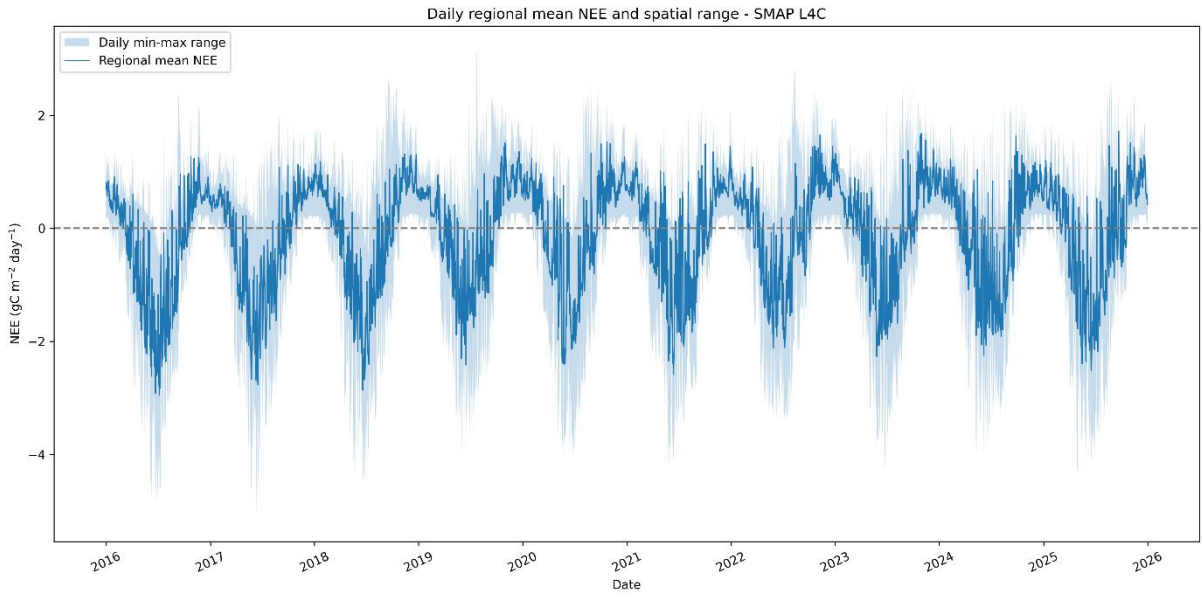


Figure 3 – Evolution journalière du NEE régional issu des données SMAP L4C.

La figure met en évidence un cycle annuel des flux de carbone sur l'ensemble de période étudiée. Les minima observés au cours des périodes estivales correspondent aux valeurs négatives du NEE, traduisant une absorption importante du CO_2 par les écosystèmes terrestres lors de la croissance des végétaux. Les périodes hivernales présentent des valeurs proches de l'équilibre, voire légèrement positives, qui traduisent une diminution de la photosynthèse lors de la période de

dormance végétale. Le bilan des échanges devient positif, indiquant une émission nette de CO_2 vers l'atmosphère.

Les périodes associées à une absorption nette du carbone sont relativement plus courtes au cours de l'année mais présentent des amplitudes plus importantes, avec des minima atteignant fréquemment entre -2 et -3 gC.m^{-2}.jour^{-1} et localement proches de -4 gC.m^{-2}.jour^{-1}. À l'inverse, les phases d'émission nette montrent des amplitudes plus faibles, généralement comprises entre +0.5 et +1.5 gC.m^{-2}.jour^{-1}. Cette différence suggère qu'une part du bilan annuel de carbone est contrôlée par une période estivale relativement courte mais caractérisée par une forte activité photosynthétique.

Afin de mieux mettre en évidence le comportement saisonnier moyen des échanges de carbone, une climatologie mensuelle a été calculée (Figure 4).

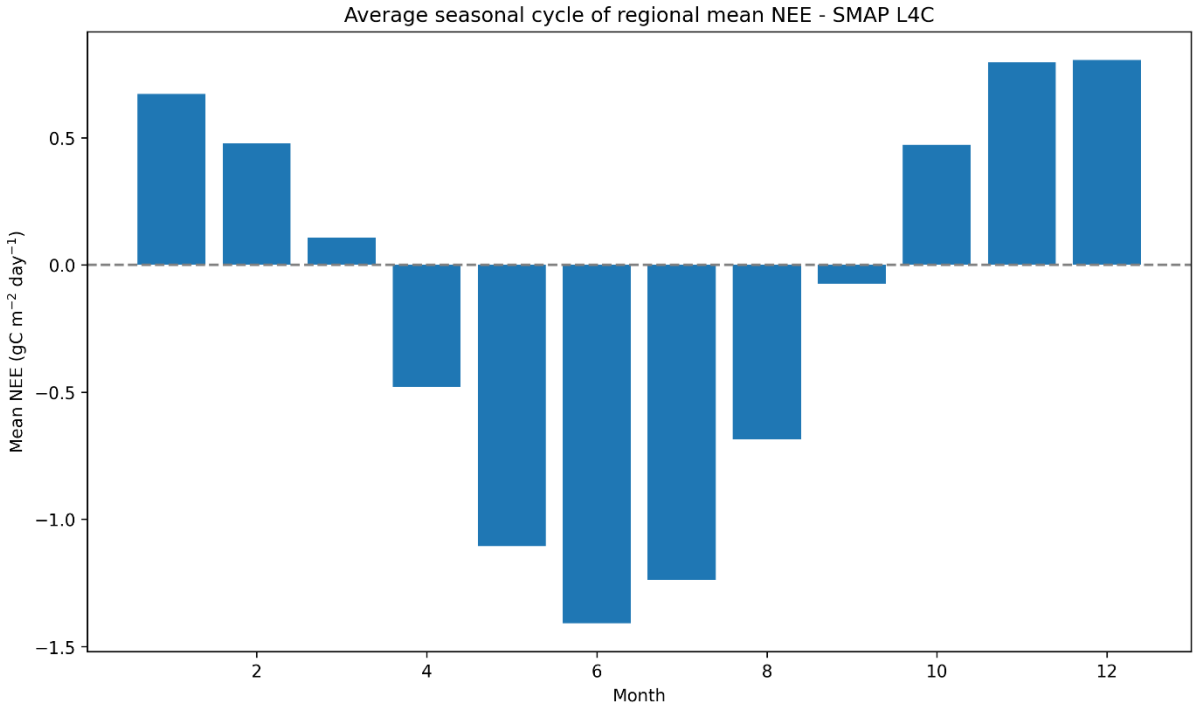


Figure 4 - Moyenne mensuelle du NEE de la région Auvergne Rhône Alpes sur la période 2016–2025.

Les valeurs de NEE sont positives durant la période hivernale, avec des maximas observés entre novembre et janvier atteignant environ 0,8 gC.m^{-2}.jour^{-1}. Durant cette période, la faible activité photosynthétique liée à la dormance végétale se traduit par une émission de CO_2 qui est amplifiée par la décomposition toujours active en hiver.

À partir du printemps, les valeurs diminuent progressivement et deviennent négatives entre avril et septembre, indiquant une phase d'absorption nette du carbone par les écosystèmes terrestres. Les valeurs les plus négatives sont observées au début de l'été, avec un minimum proche de -1,4 gC.m^{-2}.jour^{-1} en juin, correspondant à une activité photosynthétique maximale et à la période de croissance végétale.

Les périodes d'absorption apparaissent plus courtes mais présentent des amplitudes plus importantes que les périodes d'émission, suggérant une absorption du carbone plus intense durant la période de croissance végétale.

4.1.2. Variabilité interannuelle des flux de carbone

Au-delà des variations saisonnières observées précédemment, les cumuls annuels du NEE permettent d'analyser les différences entre années et d'identifier d'éventuelles évolutions des échanges de carbone à l'échelle régionale. La Figure 5 présente l'évolution de cumuls annuels du NEE régional moyens calculés sur la période d'étude.

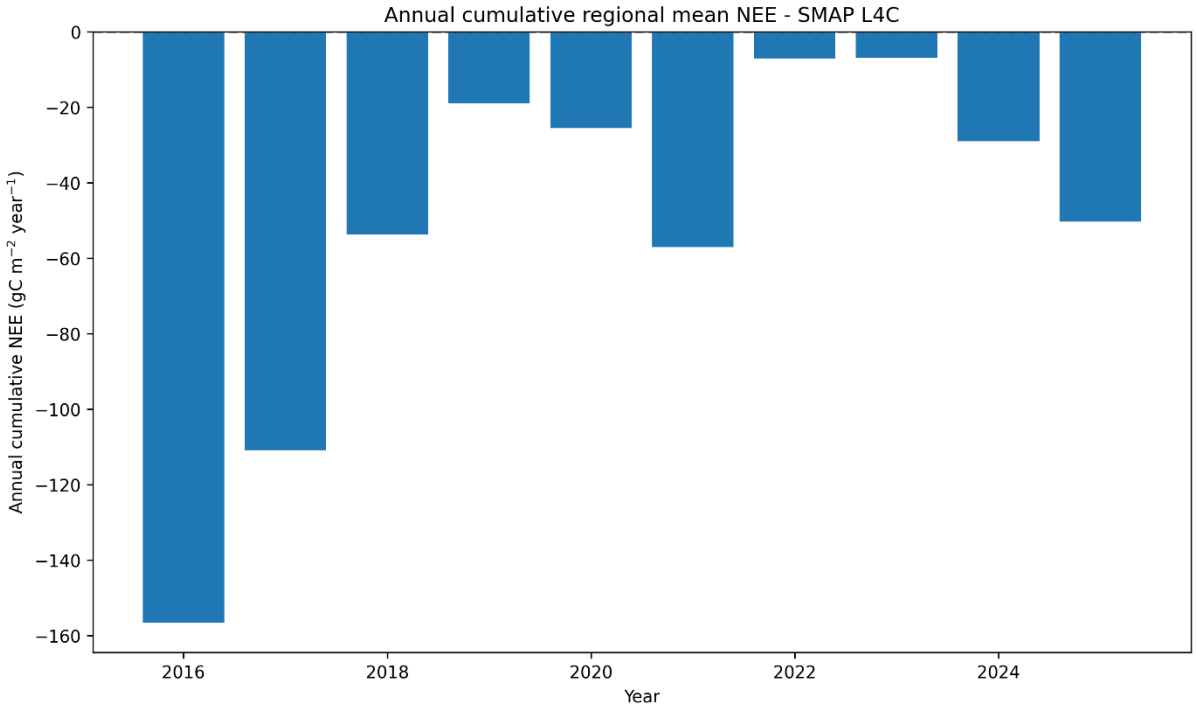


Figure 5 - Évolution des cumuls annuels moyens régionaux du NEE sur la période 2016–2025 à partir des données SMAP L4C.

La figure met en évidence une variabilité interannuelle des flux de carbone. Les valeurs restent négatives pour l'ensemble des années, indiquant que les écosystèmes terrestres étudiés conservent globalement un rôle de puits de carbone.

Les cumuls annuels présentent toutefois des différences importantes entre années, avec des valeurs atteignant environ -157 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ en 2016 contre des valeurs faiblement négatives sur les années les plus récentes (entre -10 et -50 $gC.m^{-2}.an^{-1}$).

4.2. Analyse spatiale des flux de NEE

Afin de compléter l'analyse temporelle, une approche spatiale est réalisée afin d'étudier la distribution géographique des flux de carbone au sein de la région AuRA. Les cartes de NEE permettent d'identifier certaines différences spatiales dans les échanges de carbone ainsi que leur évolution.

4.2.1. Distribution spatiale des cumuls annuels

Les années 2016, 2023 et 2025 permettent d'illustrer différentes situations observées au cours de la période, allant d'une forte absorption nette du carbone à des situations plus proches de l'équilibre (Figure 6).

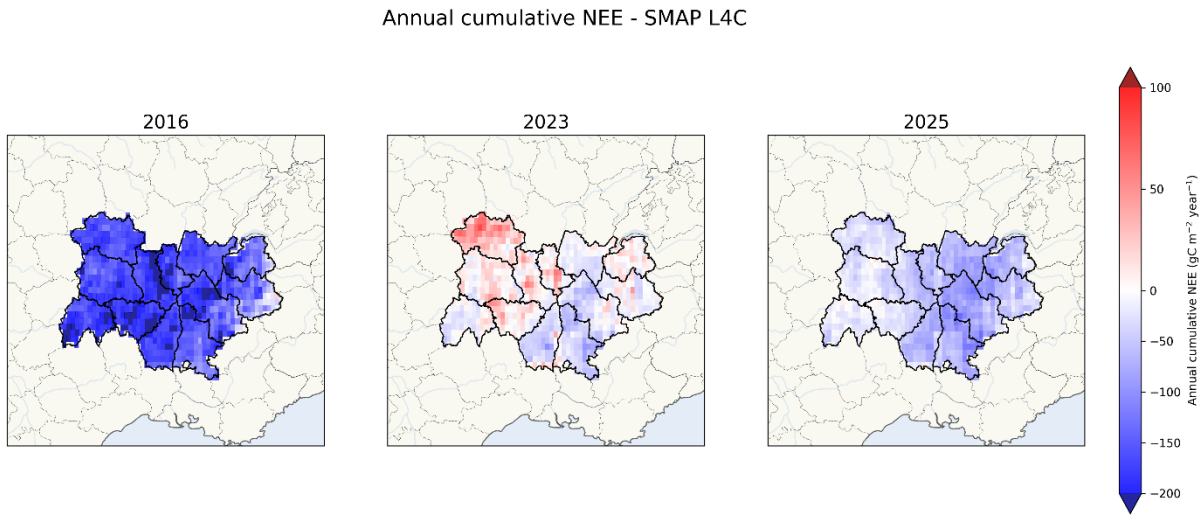


Figure 6 - Distribution spatiale des cumuls annuels du NEE pour les années 2016, 2023 et 2025 sur la région Auvergne–Rhône-Alpes.

La comparaison montre un contraste interannuel. En 2016, la majorité des pixels présentent des valeurs fortement négatives comprises entre -100 et -200 $gC.m^{-2}.an^{-1}$, traduisant une absorption importante du CO_2 sur une grande partie de la région. L'année 2023 se distingue par la présence de nombreuses zones proches de l'équilibre, voire localement positives, particulièrement en Auvergne (avec des maxima approchant 80 $gC.m^{-2}.an^{-1}$), la Loire, le Rhône, la Savoie, la Haute-Savoie. Cette situation traduit une diminution marquée de la capacité d'absorption observée cette année-là. En 2025, les valeurs redeviennent négatives sur la majeure partie du territoire, mais restent moins intenses qu'en 2016.

4.2.2. Variabilité spatiale saisonnière

Afin de préciser l'origine des contrastes interannuels mis en évidence précédemment, la distribution spatiale des cumuls saisonniers de NEE a été analysée pour les années 2016 (Figure 7) et 2023 (Figure 8). Ces deux années représentent respectivement une année caractérisée par une forte absorption nette à l'échelle régionale et une année présentant un bilan annuel plus proche de l'équilibre. Les cumuls saisonniers ont été calculés pour l'hiver (DJF), le printemps (MAM), l'été (JJA) et l'automne (SON).

Dans cette analyse, les mois de janvier, février et décembre d'une même année civile sont regroupés pour représenter l'hiver. Cette convention permet de conserver une correspondance directe entre la somme des quatre saisons et le cumul annuel, mais ne représente pas une saison hivernale chronologiquement continue. Le script additionne bien les trois cumuls mensuels de chaque saison, de sorte que les résultats sont exprimés en $gC.m^{-2}.saison^{-1}$, et non sous la forme d'une moyenne mensuelle.

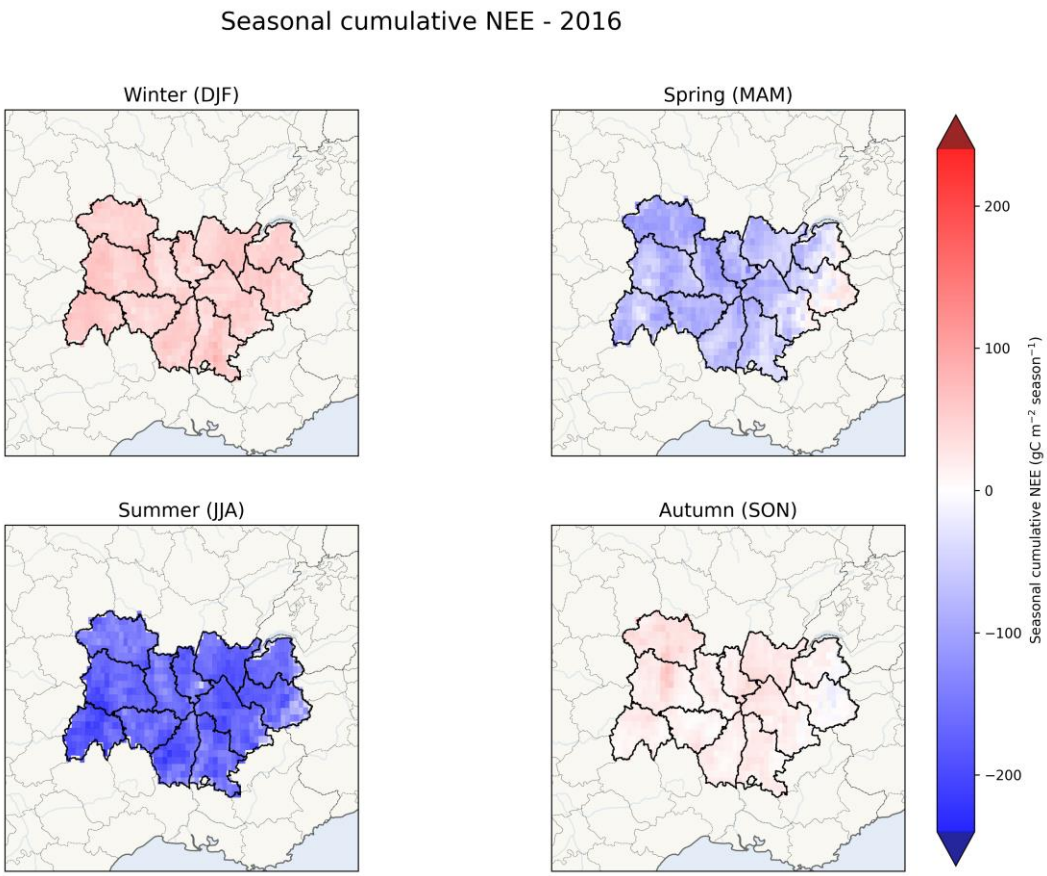


Figure 7 - Distribution spatiale des cumuls saisonniers du NEE en 2016 sur la région AuRA.

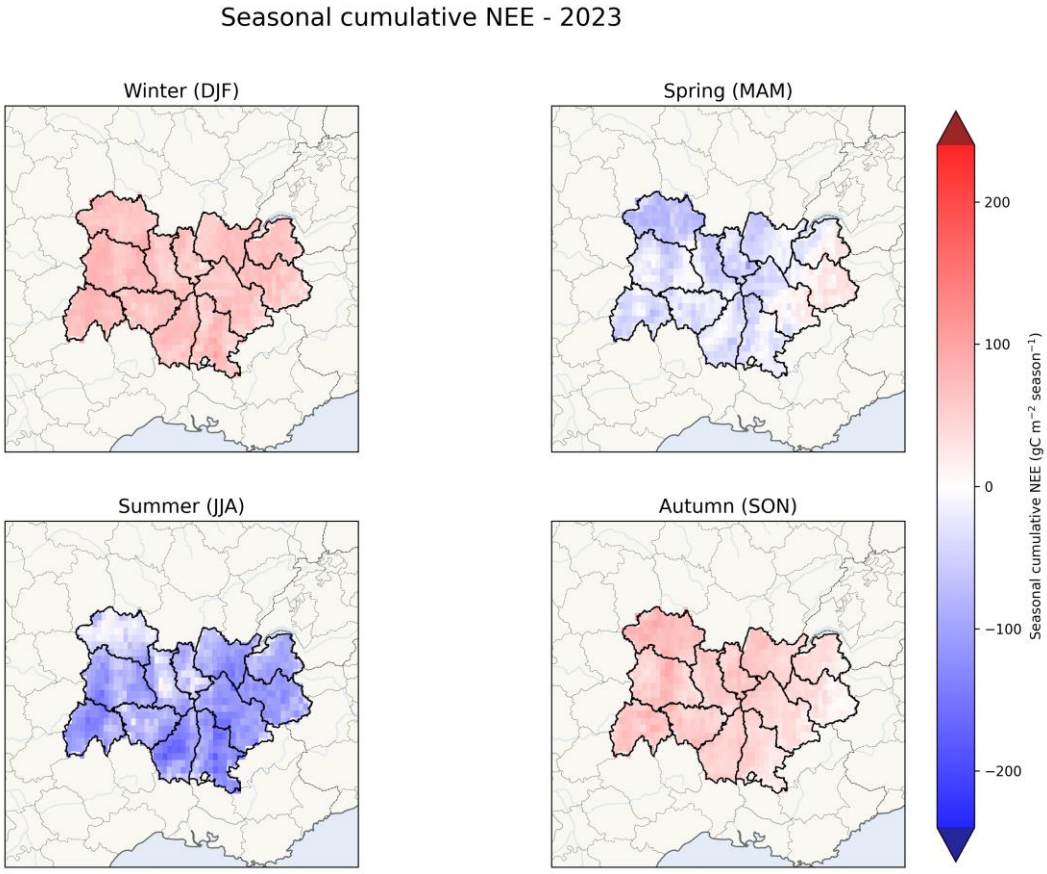


Figure 8 - Distribution spatiale des cumuls saisonniers du NEE en 2023 sur la région AuRA.

Les deux années présentent une organisation saisonnière générale comparable. Les valeurs de NEE sont positives en hiver, deviennent négatives au printemps, atteignent leur minimum en été, puis redeviennent positives en automne. Ce cycle traduit l'alternance entre une période hivernale durant laquelle la respiration de l'écosystème est supérieure à l'assimilation du carbone par la végétation et une période de croissance végétale caractérisée par une absorption nette de CO_2. Cette organisation est cohérente avec le cycle saisonnier régional mis en évidence précédemment à partir des séries temporelles journalières et mensuelles.

En 2016, les valeurs hivernales sont positives sur la quasi-totalité du territoire régional, indiquant une émission nette de CO_2. Elles demeurent toutefois d'amplitude relativement modérée et spatialement assez homogène. Au printemps, le NEE devient négatif sur la majeure partie de la région, traduisant la reprise de l'activité photosynthétique. L'absorption apparaît particulièrement marquée dans les secteurs occidentaux, méridionaux et centraux, tandis que certains pixels situés à l'est de la région restent plus proches de l'équilibre.

L'été 2016 se distingue par des valeurs fortement négatives et relativement homogènes sur l'ensemble du territoire. Les cumuls saisonniers atteignent fréquemment entre environ −150 et −220 $gC.m^{-2}.saison^{-1}$, indiquant une absorption nette particulièrement importante durant cette période. Cette forte contribution estivale explique une grande partie du cumul annuel très négatif observé en 2016. En automne, les valeurs redeviennent faiblement positives ou proches de l'équilibre, en lien avec le ralentissement de l'activité photosynthétique en fin de période de végétation.

En 2023, la situation hivernale reste globalement comparable à celle de 2016, avec des valeurs positives sur l'ensemble de la région. Au printemps, une absorption nette est encore observée dans une grande partie du territoire, mais son intensité apparaît plus faible et sa distribution plus hétérogène qu'en 2016. Plusieurs secteurs, notamment dans l'est de la région, présentent des valeurs proches de zéro ou localement positives.

La principale différence entre les deux années apparaît durant l'été. Le NEE reste négatif en 2023, confirmant que les écosystèmes régionaux continuent globalement à absorber du CO_2 pendant la période de croissance. Cette absorption est cependant nettement moins intense qu'en 2016. Les valeurs sont généralement comprises entre environ −50 et −120 $gC.m^{-2}.saison^{-1}$, avec plusieurs secteurs occidentaux et septentrionaux proches de l'équilibre. En automne, les émissions nettes sont également plus généralisées et plus intenses qu'en 2016.

La comparaison montre ainsi que le contraste entre les cumuls annuels de 2016 et de 2023 ne résulte pas d'une inversion complète du cycle saisonnier. Il s'explique principalement par un affaiblissement de l'absorption printanière et surtout estivale en 2023, associé à un retour plus marqué vers des valeurs positives en automne. L'année 2016 se caractérise donc par une période d'absorption à la fois plus intense et plus largement distribuée spatialement, tandis qu'en 2023 le puits estival subsiste mais présente une intensité réduite et une plus forte hétérogénéité régionale.

Ces cartes décrivent le signal net estimé à l'échelle des pixels SMAP. Les différences spatiales observées peuvent dépendre conjointement des conditions météorologiques, de la disponibilité en eau, de la phénologie, du relief et de la composition des surfaces couvertes par chaque pixel. Elles ne peuvent pas être attribuées directement à un type forestier à partir des seules données de NEE. La section suivante complète cette analyse en croisant la grille SMAP avec la BD Forêt IGN V2 afin de caractériser la composition forestière des pixels et d'estimer la contribution relative des grands groupes puis des différentes classes forestières.

4.3. Caractérisation forestière des pixels SMAP à partir de la BD Forêt IGN V2

Afin de mieux caractériser les surfaces forestières associées aux estimations de NEE, les informations issues de la BD Forêt ont été croisées avec la grille spatiale des pixels SMAP. Cette approche permet d'identifier la composition forestière de chaque pixel et d'estimer la contribution relative des principaux groupes forestiers au signal régional de NEE.

Les différentes essences présentes dans a BD Forêt ont été regroupées en trois grands ensembles de végétation : feuillus, conifères et peuplements mixtes. Les fractions surfaciques associés à chacun de ces groupes ont ensuite été calculées pour l'ensemble des pixels de la région Auvergne-Rhône-Alpes.

4.3.1. Répartition des groupes forestiers

La Figure 9 présente la classe forestière dominante au sein de chaque pixel SMAP de la région. La classe dominante correspond au groupe forestier présentant la plus forte fraction surfacique parmi les classes forestières dans le pixel. L'intensité de la couleur représente la fraction surfacique associée à cette classe dominante : les teintes les plus foncées correspondent aux pixels les plus homogènes tandis que les teintes les plus claires traduisent une coexistence plus importante de plusieurs groupes forestiers au sein du pixel.

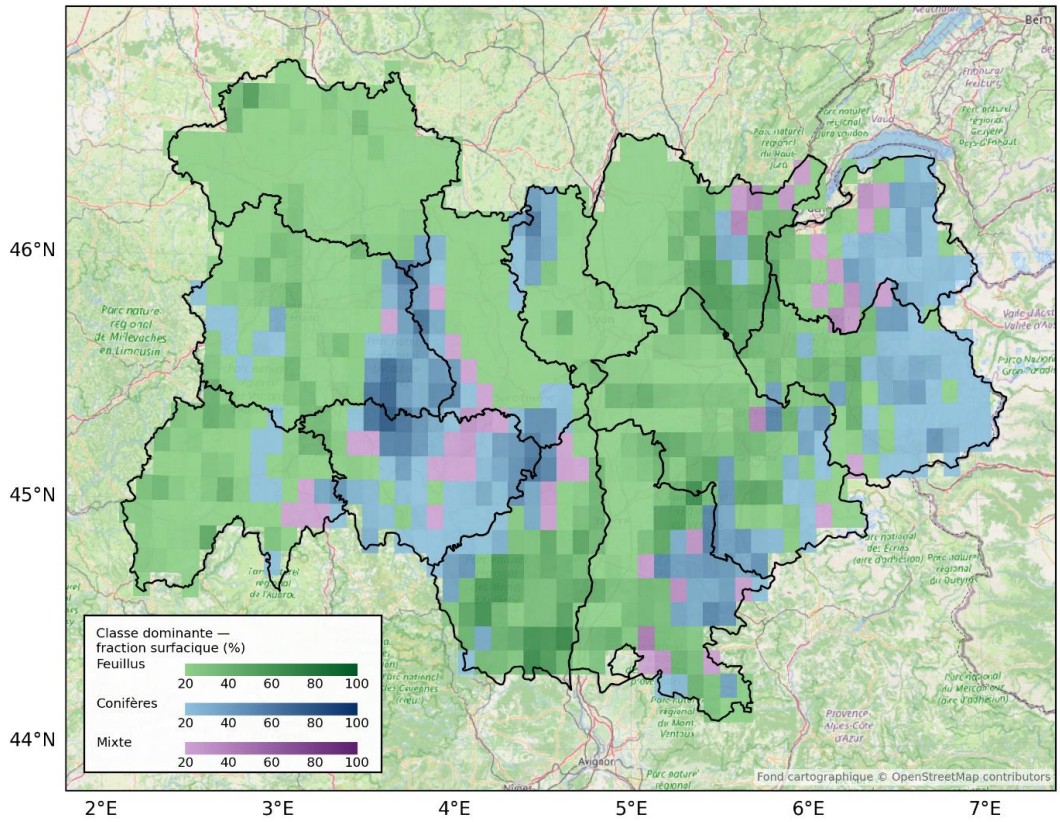


Figure 9 - Groupe forestier dominant dans les pixels SMAP d'Auvergne-Rhône-Alpes à partir de la BD Forêt IGN V2.

Les résultats mettent en évidence une prédominance des peuplements de feuillus sur une grande partie de la région. Les feuillus sont principalement concentrés sur l'Ouest de l'Auvergne et les zones de basses altitudes en Rhône-Alpes. Plusieurs secteurs présentent des fractions de feuillus supérieures à 80% notamment dans la forêt de Tronçais dans l'Allier ou encore dans le Sud de l'Ardèche. Les peuplements de conifères apparaissent principalement dans les zones de montages, principalement dans le Livradois-Forez, la Haute-Loire, le Vercors, les massifs du Lyonnais et les Alpes. Les peuplements mixtes restent plus localisés et apparaissent principalement dans les zones de transitions entre les secteurs feuillus et conifères.

L'intensité variable des fractions surfacique de peuplement forestier met en évidence l'hétérogénéité de certains des pixels SMAP. Si plusieurs pixels sont dominés par une seule catégorie forestière sur plus de 80 à 90 % de leur surface, d'autres présentent des fractions dominantes plus faibles, révélant une coexistence importante de plusieurs groupes forestiers au sein d'une même empreinte satellite. Cette hétérogénéité justifie l'utilisation des fractions surfaciques dans l'estimation des contributions relatives des différents peuplements aux flux de carbone.

4.3.2. Composition forestière détaillée

Les fractions surfaciques des différents groupes forestiers ont été agrégées à l'échelle de l'ensemble des pixel SMAP de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Cette approche permet de quantifier la représentation relative des principaux types de peuplements forestiers au sein de la zone d'étude.

Le Tableau 1 présente les fractions surfaciques moyennes associées aux principales classes forestières identifiées dans les pixels SMAP. Les valeurs correspondent à la part moyenne occupée par chaque classe forestière au sein de l'ensemble des pixels étudiés.

Tableau 1 – Fraction surfacique moyenne des essences forestières identifiées dans les pixels SMAP de la région Auvergne–Rhône-Alpes.

Essence forestière	*Fraction moyenne (%)*
Feuillus	12.5
Sapins, épicéas	9.4
Mixte	7.3
Chênes sempervirents	6.6
Pins maritimes	5.0
Chênes décidus	4.7
Châtaigniers	4.3
Hêtres	3.8
Pins d'Alep	3.5
Pins sylvestres	3.3
Conifères	2.4
Douglas	2.4
Pin mélangés	1.4
Pin à crochets, pins cembros	1.3
Pin laricios, pins noirs	1.2
Mélèzes	0.5
Robiniers	0.4
Pins autres	0.4
Peuplier	0.3

Les résultats mettent en évidence une forte diversité des classes forestières dans les pixels compris à l'intérieur de la région. La classe générique « Feuillus » représente à elle seule 12.5 % de la surface moyenne des pixels, tandis que les peuplements de Sapin-épicéa occupent 9.4 % en moyenne. Les peuplements mixtes représentent quant à eux 7.3 % de la surface moyenne.

L'analyse des classes détaillées permet également de regrouper les différentes formations selon leur appartenance aux grands ensembles forestiers. En additionnant les classes feuillues identifiées dans la BD Forêt IGN V2 (Feuillus, Chênes décidus, Chênes sempervirents, Châtaignier, Hêtre, Robinier et Peuplier), la fraction surfacique moyenne associée aux peuplements feuillus atteint environ 32.6 % de la surface des pixels SMAP. De manière analogue, l'ensemble des classes résineuses (Sapin–Épicéa, Douglas, Pins, Mélèzes et classe générique Conifères) représente environ 30.8 % de la surface moyenne des pixels.

4.4. Contribution des groupes forestiers aux flux de NEE

Afin d'étudier le rôle des différents types de peuplements forestiers dans les échanges de carbone observés à l'échelle régionale, les fractions surfaciques calculées à partir de la BD Forêt IGN V2 ont été combinées aux estimations de NEE issues de SMAP. Les contributions des groupes forestiers ont été estimées à partir de la fraction surfacique occupée par chaque groupe au sein des pixels SMAP et des valeurs annuelles de NEE associées.

Les analyses sont réalisées selon trois grands groupes forestiers : les peuplements dominés par les feuillus, les peuplements dominés par les conifères et les peuplements mixtes. La Figure 10 présente l'évolution annuelle des contributions associées aux trois grands groupes forestiers sur la période 2016–2025.

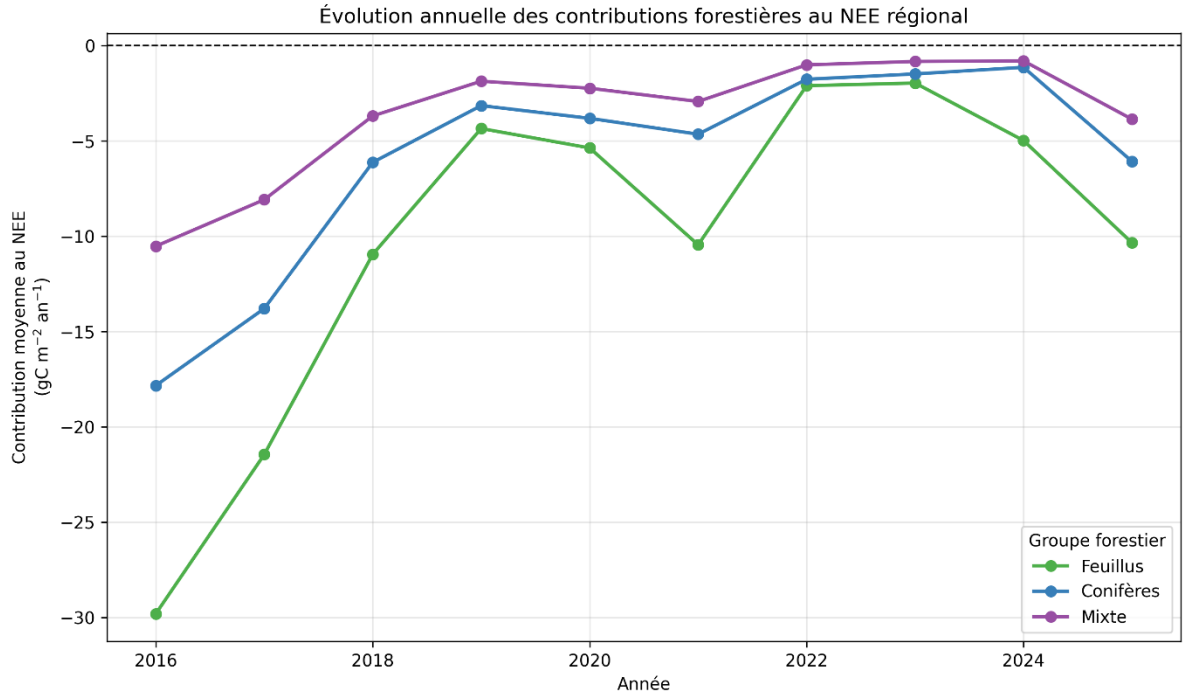


Figure 10 - Évolution annuelle des contributions par groupes forestiers.

Les trois groupes présentent des contributions négatives sur l'ensemble de la période étudiée, traduisant leur participation au rôle de puits de carbone observé à l'échelle régionale. Les peuplements dominés par les feuillus présentent les contributions les plus importantes, avec des valeurs comprises entre environ −30 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ en 2016 et −2 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ en 2023–2024. Les conifères présentent également des contributions négatives marquées mais d'amplitude plus faible, tandis que les peuplements mixtes constituent le groupe le moins contributeur sur l'ensemble de la période.

Une évolution progressive des contributions est observée entre 2016 et 2024, avec un rapprochement des valeurs vers 0 $gC.m^{-2}.an^{-1}$ pour les trois groupes forestiers. Cette tendance traduit une diminution de l'intensité du puits de carbone régional au cours de la période étudiée et apparaît cohérente avec les évolutions précédemment observées pour les estimations régionales de NEE. Un renforcement temporaire du puits de carbone est néanmoins observé en 2021, avant une nouvelle diminution entre 2022 et 2024. Ces variations interannuelles peuvent être associées à la variabilité des conditions météorologiques et climatiques influençant la productivité végétale et les échanges de carbone des écosystèmes forestiers. Une diminution plus marquée des contributions est de nouveau observée en 2025 pour l'ensemble des groupes forestiers.

4.4.1. Contribution des principales classes forestières

L'analyse précédente met en évidence le rôle relatif des trois grands groupes forestiers dans le signal régional de NEE. Toutefois, chacun de ces groupes regroupe plusieurs classes forestières présentant des caractéristiques écologiques et biogéographiques différentes.

La Figure 11 présente la contribution moyenne au NEE régional calculée pour l'ensemble des classes forestières identifiées dans les pixels SMAP sur la période 2016–2025. Les valeurs correspondent aux contributions moyennes pondérées par les fractions surfaciques observées au sein des pixels. Les classes « Feuillus », « Conifères » et « Mixte » apparaissant dans cette figure correspondent aux classes génériques présentes dans la nomenclature de la BD Forêt IGN V2, et non aux regroupements agrégés utilisés précédemment pour l'analyse par grands groupes forestiers.

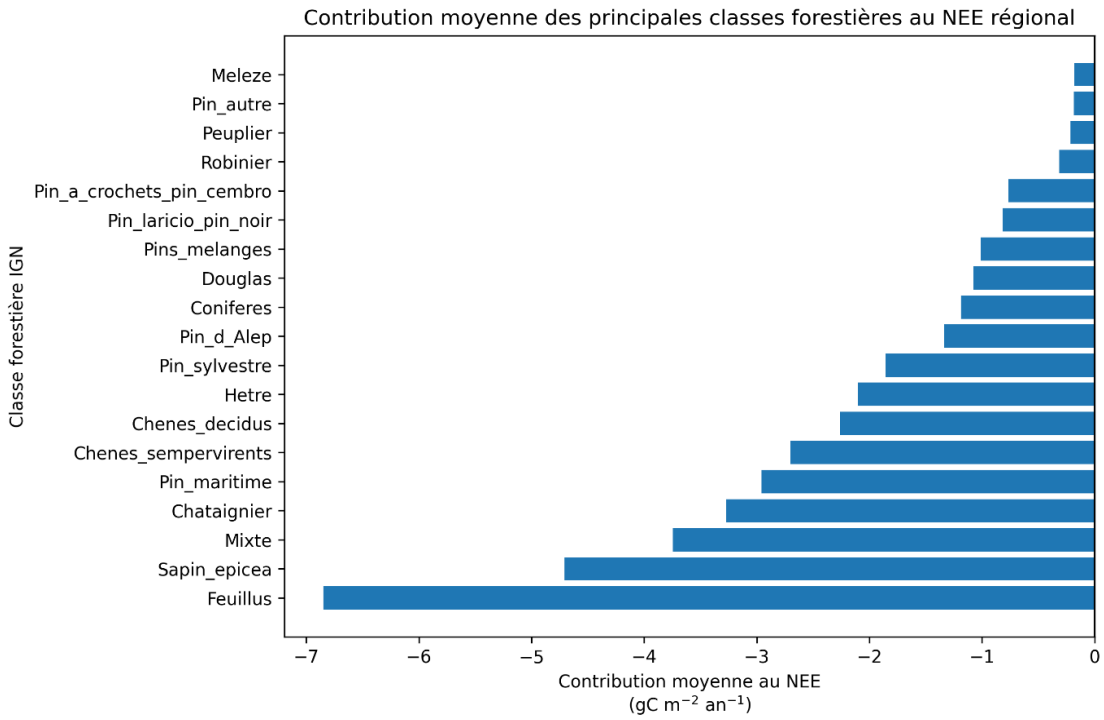


Figure 11 - Contribution moyenne des classes forestières au NEE régional.

Les résultats montrent que les contributions les plus importantes au signal régional de NEE sont associées aux classes forestières les plus représentées au sein des pixels SMAP. La classe générique des feuillus présente la contribution moyenne la plus élevée, avec une valeur proche de -7 $gC.m^{-2}.an^{-1}$, suivie des peuplements de Sapin–Épicéa ($-4,7$ $gC.m^{-2}.an^{-1}$) et des peuplements mixtes ($-3,7$ $gC.m^{-2}.an^{-1}$).

Parmi les essences forestières détaillées, les Châtaigniers, les Pins maritimes, les Chênes sempervirents, les Chênes décidus et les Hêtres apparaissent comme les principaux contributeurs au puits de carbone régional. Ces classes correspondent également à certaines des essences les plus présentes dans la région Auvergne–Rhône-Alpes, comme cela a été mis en évidence dans la section 4.3.2.

À l'inverse, les classes telles que les Peupliers, les Robiniers, les Pins à crochets et Pins cembros, les Pins autres ou encore les Mélèzes présentent des contributions beaucoup plus faibles. Cette faible contribution s'explique principalement par leur représentation spatiale plus limitée dans les pixels SMAP de la région.

4.4.2. Evolution temporelle des contributions des classes forestières

Les contributions annuelles au NEE régional ont été calculées pour les principales classes forestières identifiées dans la BD Forêt IGN V2. Cette analyse permet d'évaluer si certaines classes présentent des dynamiques temporelles distinctes ou si les variations observées reflètent principalement l'évolution du signal régional de NEE.

La Figure 12 présente l'évolution annuelle des contributions moyennes des principales classes forestières sur la période 2016–2025.

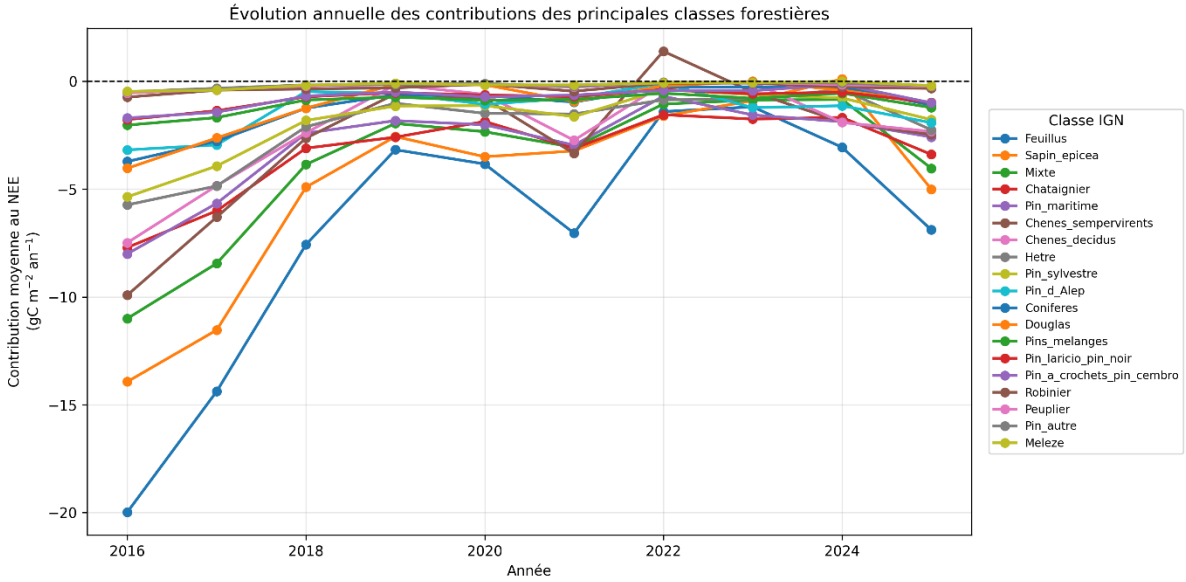


Figure 12 - Évolution annuelle des contributions des principales classes forestières au NEE régional.

La figure met en évidence une évolution temporelle relativement homogène des différentes classes forestières au cours de la période étudiée. Pour l'ensemble des classes, les contributions les plus négatives sont observées entre 2016 et 2018, tandis qu'un rapprochement progressif vers des valeurs proches de zéro est observé jusqu'en 2023–2024. Une diminution plus marquée des contributions apparaît de nouveau en 2025.

Plusieurs classes semblent présenter un renforcement temporaire de leur contribution autour de l'année 2021, avant une nouvelle diminution entre 2022 et 2024. Toutefois, ces variations doivent être interprétées avec prudence. En effet, les contributions calculées reposent sur la combinaison des fractions surfaciques forestières et des valeurs de NEE estimées à l'échelle des pixels SMAP. Les évolutions observées sont principalement pilotées par la variabilité interannuelle du NEE associé aux pixels. Cette dynamique est similaire à celle mise en évidence précédemment pour les groupes

forestiers agrégés (Figure 9), suggérant que les variations temporelles observées à l'échelle des classes forestières reflètent avant tout l'évolution du signal régional de NEE plutôt que des différences de comportement propres aux différents types de peuplements.

Ainsi, les différences de trajectoires observées entre classes forestières ne traduisent pas nécessairement des réponses intrinsèques propres à chaque type de peuplement. Elles pourraient davantage refléter les variations spatiales et temporelles du signal régional de NEE ainsi que la répartition des différentes classes forestières au sein des pixels étudiés.

Les classes présentant les contributions les plus importantes dans la Figure 10, notamment les Feuillus, les peuplements de Sapin–Épicéa et les peuplements Mixtes, conservent néanmoins des contributions plus marquées sur l'ensemble de la période. Cette hiérarchie resterait cohérente avec leur importance surfacique relative dans la région Auvergne–Rhône-Alpes.

Par conséquent, ces résultats doivent être considérés comme une première estimation de l'influence potentielle des différentes classes forestières sur le signal régional de NEE. Une attribution plus robuste des flux de carbone aux essences forestières nécessiterait une approche permettant de dissocier explicitement l'effet de la composition forestière de celui de la variabilité spatiale du NEE.

4.5. Discussions des évolutions observées

Les résultats obtenus mettent en évidence une diminution progressive de l'intensité des absorptions de carbone par la végétation en Auvergne-Rhône-Alpes sur la période 2016-2025. Les différents groupes forestiers ainsi que la majorité des classes forestières présentent une évolution convergente caractérisée par un rapprochement progressif vers des valeurs de contribution proches de zéro, traduisant une réduction apparente du rôle de puits de carbone des écosystèmes forestiers de la région.

Cette évolution apparaît globalement cohérente avec les tendances observées à l'échelle nationale et européenne. Les travaux de Ciais et al. (2026) mettent en évidence une diminution rapide du puits de carbone des forêts françaises depuis la fin des années 2000, tandis que Ritter et al. (2026) soulignent une réduction du puits forestier européen sous l'effet combiné des sécheresses, des vagues de chaleur, des incendies, des attaques d'insectes et de l'augmentation de la mortalité forestière.

4.5.1. Influence des conditions météorologiques

L'analyse des bilans climatiques régionaux et nationaux met en évidence une succession d'années marquées par des conditions de plus en plus contraignantes pour les écosystèmes forestiers.

Les années 2017 à 2020 ont été caractérisées par plusieurs épisodes de sécheresse, des températures supérieures aux normales saisonnières ainsi que des déficits hydriques répétés (Météo-France, 2018 ; Météo-France, 2019 ; Météo-France, 2020 ; Météo-France, 2021). Les bilans du Département de la Santé des Forêts (DSF) signalent également une augmentation progressive des stress hydriques subis par les peuplements forestiers régionaux, avec trois années consécutives de sécheresse particulièrement marquée entre 2018 et 2020 (DSF, 2019 ; DSF, 2020 ; DSF, 2021).

L'année 2021 apparaît comme une rupture temporaire au sein de cette dynamique. Le DSF souligne que les sécheresses ont été moins marquantes que lors des années précédentes et que la saison de végétation a offert « un certain répit » aux peuplements forestiers régionaux (DSF, 2022). Cette amélioration temporaire des conditions climatiques pourrait expliquer le renforcement observé du puits de carbone au cours de cette période.

À partir de 2022, les conditions deviennent à nouveau particulièrement défavorables. Les bilans régionaux font état d'une sécheresse hivernale marquée, d'un printemps chaud et sec ainsi que d'épisodes de canicule affectant fortement la végétation (DSF, 2023). Les effets de la sécheresse estivale et des vagues de chaleur sont explicitement mentionnés comme ayant fortement marqué les forêts régionales. Cette situation se prolonge en 2023, 2024 et 2025 avec la persistance d'épisodes chauds et secs ainsi qu'une augmentation des contraintes hydriques sur plusieurs massifs forestiers régionaux (DSF, 2024 ; DSF, 2025 ; DSF, 2026).

Ces éléments suggèrent qu'une partie des variations observées dans les contributions au NEE pourrait être associée à l'évolution des conditions climatiques régionales au cours de la période étudiée.

4.5.2. Influence de l'état sanitaire des peuplements forestiers

Les bilans sanitaires régionaux mettent également en évidence une dégradation progressive de l'état sanitaire de nombreuses essences présentes en Auvergne–Rhône-Alpes.

Dès 2017, des mortalités importantes sont signalées dans les sapinières ainsi qu'une augmentation des dépérissements de pins. Les années suivantes sont marquées par une extension des attaques de scolytes sur les épicéas, une augmentation des mortalités dans les peuplements de sapins et de pins (DSF, 2018), ainsi qu'un dépérissement croissant des hêtraies et des châtaigneraies (DSF, 2019 ; DSF, 2020 ; DSF, 2021).

Les bilans les plus récents montrent que plusieurs essences identifiées dans cette étude figurent parmi les peuplements les plus affectés : hêtre, châtaignier, sapin, épicéa, douglas ou encore pin sylvestre (DSF, 2022 ; DSF, 2023 ; DSF, 2024 ; DSF, 2025 ; DSF, 2026). Les évolutions observées dans les Figure 10 et Figure 12 pourraient ainsi refléter partiellement, l'impact cumulé de ces phénomènes de dépérissement et de mortalité sur la capacité de séquestration du carbone des peuplements forestiers régionaux.

4.5.3. Limites liées à la méthode

L'interprétation des résultats doit néanmoins être réalisée avec prudence compte tenu de la méthode employée.

Les contributions estimées reposent sur une combinaison entre les fractions surfaciques issues de la BD Forêt IGN V2 et les valeurs de NEE issues du produit SMAP. Les estimations produites ne correspondent pas à des mesures directes des flux de carbone propres à chaque essence forestière mais à des contributions statistiques déduites de la composition des pixels SMAP.

La résolution spatiale relativement grossière des données SMAP implique qu'un même pixel peut contenir simultanément plusieurs classes forestières ainsi que d'autres occupations du sol. Les coefficients estimés reflètent ainsi principalement la relation observée entre la composition forestière des pixels et les valeurs régionales de NEE.

Par conséquent, les différences observées entre classes forestières ne doivent pas être interprétées comme des valeurs absolues de séquestration propres à chaque essence. Elles constituent plutôt des indicateurs relatifs permettant d'identifier les classes les plus fortement associées aux variations du NEE régional.

5. Perspectives

Les travaux réalisés dans cette étude ont permis de développer une méthodologie de croisement entre les estimations de NEE issues des produits SMAP et les informations de composition forestière fournies par la BD Forêt IGN V2. Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de cette approche pour analyser les relations entre la structure des peuplements forestiers et les flux régionaux de carbone. Plusieurs perspectives peuvent toutefois être envisagées afin d'améliorer et d'approfondir ces analyses.

Au-delà des résultats obtenus, cette étude permet à Atmo AuRA d'acquérir une première expérience dans l'exploitation opérationnelle des produits satellitaires dédiés au suivi du cycle du carbone. Elle contribue ainsi à élargir le champ des indicateurs environnementaux mobilisables par l'observatoire régional et à renforcer les capacités d'analyse des interactions entre qualité de l'air, changement climatique et fonctionnement des écosystèmes.

5.1. Intégration avec d'autres données environnementales

Une première perspective consisterait à intégrer des données environnementales complémentaires afin d'améliorer l'interprétation des variations observées du NEE. Les données météorologiques issues des stations au sol pourraient notamment permettre de caractériser plus finement l'influence des précipitations, des températures ou encore des épisodes de sécheresse sur les flux de carbone observés à l'échelle régionale.

L'utilisation conjointe de produits atmosphériques régionaux ou de modèles de transport du carbone constituerait également une piste intéressante afin de confronter les estimations issues de SMAP à d'autres sources indépendantes d'information. Une telle approche permettrait de mieux distinguer les effets liés aux conditions météorologiques de ceux associés à l'évolution des peuplements forestiers.

5.2. Approfondissement des méthodes

L'approche développée dans cette étude peut également être approfondie à plusieurs niveaux méthodologiques. Une analyse à l'échelle départementale permettrait notamment d'identifier d'éventuelles disparités spatiales au sein de la région AuRA et de mieux relier les résultats aux contextes climatiques et forestiers locaux.

La comparaison avec les inventaires et bilans nationaux tels que ceux produits par l'ALDO ou le CITEPA constituerait également une étape importante pour évaluer la cohérence des estimations obtenues.

L'amélioration des méthodes de propagation des incertitudes représente une autre perspective. L'utilisation de simulations de Monte-Carlo plus complètes permettrait de mieux quantifier les incertitudes associées aux différentes étapes de traitement, depuis la reconstruction des pixels SMAP jusqu'à l'estimation des contributions forestières.

Par ailleurs, l'analyse pourrait être étendue à une échelle taxonomique plus fine afin d'étudier individuellement les principales essences forestières présentes dans la région. Une évolution méthodologique particulièrement prometteuse consisterait à estimer directement des coefficients de contribution propres à chaque classe forestière à partir de l'ensemble des fractions surfaciques présentes dans les pixels SMAP. Cette approche permettrait de mieux dissocier les effets respectifs des différentes essences sur le signal régional de NEE.

Enfin, l'assimilation des résultats dans des modèles régionaux de cycle du carbone ou de fonctionnement des écosystèmes forestiers pourrait permettre d'améliorer la représentation des échanges de carbone à l'échelle territoriale.

5.3. Suivi des peuplements forestiers

Dans cette étude, les fractions surfaciques issues de la BD Forêt IGN V2 ont été considérées comme constantes sur l'ensemble de la période analysée. Cette hypothèse constitue une simplification nécessaire mais ne permet pas de prendre en compte les évolutions réelles des peuplements forestiers.

De futures études pourraient intégrer des informations temporelles relatives aux coupes forestières, aux opérations de reboisement, aux perturbations sanitaires, aux incendies ou encore aux changements de composition des peuplements. L'utilisation de séries temporelles satellitaires à plus haute résolution spatiale permettrait également de suivre l'évolution de l'occupation forestière et de mieux représenter les dynamiques observées à l'échelle régionale.

Ces différentes perspectives ouvrent la voie à une meilleure compréhension des interactions entre climat, état sanitaire des forêts et flux de carbone, tout en renforçant le potentiel d'utilisation des produits satellitaires dans le suivi des écosystèmes forestiers régionaux.

6. Conclusion

Cette étude a pour objectif d'exploiter les estimations de Net Ecosystem Exchange (NEE) issues des produits SMAP afin de caractériser les échanges de carbone associés aux peuplements forestiers de la région AuRA à partir des informations fournies par la BD Forêt IGN V2.

Les travaux réalisés permettent de reconstruire la géométrie des pixels SMAP, d'estimer les fractions surfaciques des différentes classes forestières présentes dans chaque pixel et de développer une méthodologie permettant de relier la composition forestière régionale aux estimations de NEE. Cette approche conduit à la production d'indicateurs spatiaux et temporels décrivant les contributions relatives des principaux groupes forestiers ainsi que des différentes classes de végétation identifiées dans la région.

Les résultats obtenus montrent que les peuplements forestiers contribuent de manière négative au NEE régional sur l'ensemble de la période étudiée, traduisant leur rôle de puits de carbone. Les peuplements feuillus apparaissent comme les principaux contributeurs à ce puit régional, suivis des peuplements de conifères puis mixtes. A l'échelle des classes forestières, les contributions les plus importantes sont observées pour les classes les plus représentées dans la région, notamment les feuillus, les peuplements de sapins-épicéas, les peuplements mixtes ainsi que plusieurs essences majeures telles que les chênes, les hêtres ou les châtaigniers.

L'analyse temporelle montre toutefois une diminution progressive de l'intensité de ce puits de carbone entre 2016 et 2025. Malgré un renforcement temporaire observé en 2021, les contributions forestières tendent globalement à se rapprocher de valeurs plus faibles au cours des dernières années. Cette évolution apparaît cohérente avec les bilans climatiques et sanitaires régionaux qui mettent en évidence une succession d'épisodes de sécheresse, de vagues de chaleur et de phénomènes de dépérissement affectant de nombreuses essences forestières en Auvergne–Rhône-Alpes. Elle rejoint également les conclusions de travaux récents montrant une diminution du puits de carbone des forêts françaises et européennes sous l'effet combiné des changements climatiques et des perturbations forestières.

Les résultats obtenus suggèrent ainsi que les forêts de la région conservent aujourd'hui un rôle important dans l'absorption du carbone atmosphérique, mais que leur capacité de séquestration pourrait être progressivement affectée par l'intensification des contraintes climatiques et sanitaires observées au cours des dernières décennies. Dans un contexte de changement climatique, le maintien de cette fonction de puits de carbone apparaît comme un enjeu majeur pour les écosystèmes forestiers régionaux.

Enfin, cette étude met en évidence l'intérêt des données satellitaires et des bases de données forestières nationales pour le suivi des flux de carbone à grande échelle. Les perspectives identifiées ouvrent la voie à des analyses plus fines intégrant l'évolution des peuplements forestiers, les conditions climatiques et les données sanitaires afin d'améliorer la compréhension des mécanismes contrôlant les échanges de carbone entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère.

Cette étude démontre l'intérêt des observations satellitaires pour suivre l'évolution des flux de carbone à l'échelle régionale et pour caractériser le rôle des forêts dans la séquestration du CO_2 atmosphérique. Elle s'inscrit dans la stratégie d'Atmo AuRA visant à développer de nouvelles approches d'observation environnementale fondées sur la complémentarité entre mesures au sol, modélisation et données satellitaires. À terme, ces travaux pourraient contribuer au développement d'indicateurs régionaux de suivi des puits de carbone et à une meilleure évaluation de la résilience des écosystèmes face au changement climatique.

Bibliographie

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., & Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 82(11), 2415–2434.

Ciais, P., Zhou, C., Schneider, P., Schwartz, M., Besic, N., Vega, C., & Bontemps, J.-D. (2026). *An outlook on the rapid decline of carbon sequestration and perspectives for an improved monitoring of French forests*. Comptes Rendus Géoscience, 358, 27–49. https://doi.org/10.5802/crgeos.309.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2018). *Bilan de la santé des forêts – 2017*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2019). *Bilan de la santé des forêts – 2018*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2020). *Bilan de la santé des forêts – 2019*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2021). *Bilan de la santé des forêts – 2020*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2022). *Bilan de la santé des forêts – 2021*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2023). *Bilan de la santé des forêts – 2022*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2024). *Bilan de la santé des forêts – 2023*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2025). *Bilan de la santé des forêts – 2024*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

Département de la Santé des Forêts (DSF). (2026). *Bilan de la santé des forêts – 2025*. DRAAF Auvergne–Rhône-Alpes, Service régional de l'alimentation, Pôle Santé des Forêts. https://agriculture.gouv.fr/bilans-annuels-en-sante-des-forets.

DRAAF Auvergne-Rhône-Alpes. (2023). La forêt d'Auvergne-Rhône-Alpes. https://draaf.auvergne-rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/la-foret-d-auvergne-rhone-alpes-a5353.html.

Heiskanen, J., Brümmer, C., Buchmann, N., Calfapietra, C., Chen, H., Gielen, B., Gkritzalis, T., Hammer, S., Hartman, S., Herbst, M., Janssens, I. A., Jordan, A., Juurola, E., Karstens, U., Kasurinen, V., Kruijt, B., Lankreijer, H., Levin, I., Linderson, M.-L., … Kutsch, W. (2022). The Integrated Carbon Observation System in Europe. Bulletin of the American Meteorological Society, 103(3), E855–E872. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0364.1.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://doi.org/10.1017/9781009157896.

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jones, L. A., Kimball, J. S., Reichle, R. H., Madani, N., Glassy, J., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Cleverly, J., Desai, A. R., Eamus, D., Euskirchen, E. S., Hutley, L. B., Macfarlane, C., & Scott, R. L. (2018). The SMAP Level 4 Carbon Product for Monitoring Ecosystem Land–Atmosphere CO_2 Exchange. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(1), 640–656. https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2729343.

Kimball, J. S., Endsley, A., Jones, L. A., Kundig, T., & Reichle, R. (2025). *SMAP L4 Global Daily 9 km EASE-Grid Carbon Net Ecosystem Exchange (SPL4CMDL, Version 8)* [Data set]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, Boulder, Colorado, USA. https://doi.org/10.5067/U7SN8JDZL0UC.

Lian, Y., Li, H., Renyang, Q., Liu, L., Dong, J., Liu, X., Qu, Z., Lee, L.-C., Chen, L., Wang, D., & Zhang, H. (2023). Mapping the net ecosystem exchange of CO_2 of global terrestrial systems. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 116, 103176. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103176.

Météo-France. (2018). *Bilan climatique annuel 2017*. Météo-France. https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-publications-de-meteo-france/bilans-climatiques-annuels-de-2014-2018.

Météo-France. (2019). *Bilan climatique annuel 2018*. Météo-France. https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-publications-de-meteo-france/bilans-climatiques-annuels-de-2014-2018.

Météo-France. (2020). *Bilan climatique annuel 2019*. Météo-France. https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-publications-de-meteo-france/2019-les-bilans-climatiques.

Météo-France. (2021). *Bilan climatique annuel 2020*. Météo-France. https://meteofrance.fr/actualite/publications/les-publications-de-meteo-france/publications/2020-les-bilans-climatiques.

Ray, R. L., Ibironke, A., Kommalapati, R., & Fares, A. (2019). Quantifying the impacts of land-use and climate on carbon fluxes using satellite data across Texas, U.S. Remote Sensing, 11(14), 1733. https://doi.org/10.3390/rs11141733.

Ritter, F., Ciais, P., Senf, C., Santoro, M., Xu, Y., Pelissier-Tanon, A., Schwartz, M., Fayad, I., Carvalhais, N., Brandt, M., Fensholt, R., Besnard, S., & Avitabile, V. (2026). Alarming decline in the carbon sink of European forests driven by disturbances. National Science Review. Advance article. https://doi.org/10.1093/nsr/nwag354.

Rodríguez-Veiga, P., Wheeler, J., Louis, V., Tansey, K., & Balzter, H. (2017). Quantifying forest biomass carbon stocks from space. Current Forestry Reports, 3, 1–18. https://doi.org/10.1007/s40725-017-0052-5.

Suni, T. (2004). *Turbulent surface fluxes and ecosystem functioning in boreal coniferous forests*. Report Series in Aerosol Science, 69. Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki, Finland. Doctoral dissertation.

Turquety, S., Menut, L., Siour, G., Mailler, S., Hadji-Lazaro, J., George, M., Clerbaux, C., Hurtmans, D., & Coheur, P.-F. (2020). APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: Impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. Geoscientific Model Development, 13, 2981–3009. https://doi.org/10.5194/gmd-13-2981-2020.

Wang, Y., Tang, X., Yu, L., Hou, X., & Munger, J. W. (2016). Comparison of net ecosystem carbon exchange estimation in a mixed temperate forest using field eddy covariance and MODIS data. SpringerPlus, 5, 491. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2134-4.