

Le carbone dans les forêts du Massif central : où en est-on ?

Juin 2026

Sommaire

Remerciements	2
Citation de ce rapport	2
Introduction	3
1 Principes et définitions	4
1.1 Notions de stocks et de flux de carbone	4
1.2 Les réservoirs de carbone en forêt	4
1.3 Les flux de carbone en forêt	5
2 Les forêts du Massif central : Aperçu	5
3 Comment évaluer l'état des stocks de carbone forestiers dans le Massif Central ?	7
3.1 Plusieurs sources de données disponibles	7
3.2 Sélection finale des données	9
4 Quelles résolutions spatiales et temporelles pour étudier les dynamiques de séquestration de carbone ?	10
4.1 Deux échelles géographiques : la GRECO et la SER	10
4.2 Différentes périodes temporelles	12
5 Evolution des stocks de carbone dans le Massif central	13
5.1 Stock de carbone dans les arbres vivants	13
5.2 Stocks de carbone dans le bois mort	19
5.3 Carbone organique du sol	20
6 Evolution des flux de carbone	21
6.1 Bilan des flux	22
6.2 Production biologique	23
6.3 Mortalité	24
6.4 Prélèvements	25
7 Les risques associés aux peuplements forestiers du Massif Central	26
7.1 Une dynamique de dépérissement accélérée par le changement climatique	26
7.2 Les tempêtes	26
7.3 Un risque incendie accru	27
Conclusion	28
Bibliographie	29

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme *Forêts & Carbone Massif Central (MC4CO₂)*, co-financé par le FEDER Massif Central et le Commissariat du Massif Central. Nous remercions les membres du COPIL du projet pour leur apports à l'interprétation de ces résultats : Michel Moulin (CFBL), Melissa Prat-Douane (CFBL), Frédéric Lejuez (Forêt Evolution), Simon Durand (Forêt Evolution), Marie Fougerouse (IPAMAC), Frédérique Morvillier (ANCT), Stéphanie Giraud (ANCT), Cécile Sanspeur (Communes forestières), Guillaume David (Communes forestières), Simon Martel (I4CE), Stéphanie Robert (Fibois Nouvelle-Aquitaine), Gaël Lamoury (Fibois Nouvelle-Aquitaine), Marie-Pierre Lalle (Fibois Occitanie), Philippe Hans (DRAAF Occitanie), Maëlle Lebreton (DRAAF Occitanie), Emelyne Faure (Arbogest), Tancrede Neveu (Alliance Forêt Bois), Nicolas Traub (CNPF), Jean-Pierre Loudes (CNPF), Emmanuel Favre d'Anne (CNPF), Manon Raynaud (CNPF), Elsa Bugnot (CNPF), Jean-Baptiste Reboul (CNPF), Camille Gehant (CNPF), Stéphane Grulois (CNPF), Damien Chanteranne (CNPF), François Janex (CNPF), Antonin Lourdais (CNPF), Soraya Bennar (CNPF), Dominique Cacot (CNPF), Edouard Martin (CNPF), Antoine Beucher (CNPF), Pierre Beaudesson (CNPF), Stéphane Latour (CNPF), Noé Dumas (CNPF), Olivier Gleizes (CNPF), Olivier Picard (CNPF), Céline Bergés-Sellam (CNPF), Julia Grimaut (I4CE), Olivier Arfaoui (CNPF), Jeanne Soubeyran (CNPF). Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont accompagnées dans la compréhension des méthodes d'acquisition et des limites d'utilisation des données LiDAR : Julie Aubagnac (ONF), Thomas Villiers (ONF), Raphaële Hemeryck (PNR des Pyrénées ariégeoises), Benoît Renaux (CBN Massif Central), Michel Chartier (CNPF-IDF), Bastien Peuziat (CNPF-IDF).

Citation de ce rapport

"Le carbone dans les forêts du Massif central : où en est-on ?", Institut pour le développement forestier, Centre National de la Propriété Forestière, Juin 2026.

Introduction

Les forêts occupent aujourd'hui plus d'un tiers du territoire du Massif Central. En termes de superficie, elles sont dominées par des essences feuillues (chêne, hêtre, châtaignier, etc.) mais la majorité du volume de bois sur pied est concentré sur des essences résineuses comme le douglas, le sapin pectiné et l'épicéa. Ces forêts constituent aujourd'hui un réservoir mais aussi un puits de carbone important. Toutefois, à l'instar du reste du territoire français, elles sont soumises à des événements climatiques de plus en plus extrêmes et ne sont pas épargnées par les crises sanitaires.

Le projet *Forêt & Carbone Massif Central (MC4CO₂)* a pour ambition de faire du Massif Central un territoire de référence dans la lutte contre le changement climatique, en exploitant le potentiel de la forêt pour séquestrer du carbone tout en garantissant sa résilience face aux aléas climatiques. Coordonné par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), ce projet s'inscrit dans le cadre de la programmation 2021-2027 de la Convention de Massif Central. Il vise à répondre aux enjeux du dérèglement climatique en améliorant la séquestration du carbone dans les forêts privées, en valorisant les stocks de carbone existants et en préparant le Massif Central au développement du marché de la compensation carbone.

Le projet *Forêt & Carbone Massif Central (MC4CO₂)* s'appuie entre autres sur le Label bas-carbone (LBC), une démarche initiée dans le Massif Central grâce au programme VOCAL (Grimault 2015). Il s'agit du premier cadre de certification volontaire de l'État en France qui valorise les projets visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à séquestrer du carbone.

Le projet s'articule autour de quatre objectifs :

- Diagnostiquer avec une approche qualitative et dynamique le stock carbone et les enjeux/risques futurs associés : peuplements à risque de dépérissement...
- Développer les capacités de séquestration de carbone des forêts privées du Massif Central avec ses propres enjeux d'adaptation et de biodiversité.
- Expérimenter/adapter des projets carbone innovants ou pilotes en lien avec de nouvelles méthodes, afin que le Massif Central soit pionnier dans la labélisation de projets via ces futures méthodes.
- Promouvoir le carbone forestier du territoire auprès des entreprises et collectivités.

Cette étude répond au premier objectif en proposant un état des lieux des stocks et des flux de carbone dans le Massif Central.

1 Principes et définitions

1.1 Notions de stocks et de flux de carbone

Le carbone est présent dans les océans, les sols, l'atmosphère, la biomasse végétale, etc. qui constituent une multitude de **réservoirs**. Le carbone y est séquestré sous différentes formes physiques pendant un temps donné et on parle alors de *stock* de carbone.

On définit un *flux* de carbone comme le taux d'échange entre deux réservoirs. Ces réservoirs peuvent être :

- des *sources* de carbone si le flux de carbone entrant est inférieur au flux de carbone sortant. Les sources de carbone *libèrent* du carbone.
- des *puits* de carbone si le flux de carbone entrant est supérieur au flux de carbone sortant. Les puits de carbone *absorbent* du carbone.

1.2 Les réservoirs de carbone en forêt

En forêt, le carbone est séquestré dans différents compartiments :

- La partie aérienne des arbres (tronc, branches, feuillage)
- La partie souterraine des arbres (système racinaire)
- La fraction organique du sol
- La litière
- Le bois mort (chablis, volis, branches, etc.)
- Le sous-étage

Dans les forêts de France métropolitaine, la majorité du carbone est séquestrée dans le sol et la biomasse des arbres vivants. La proportion de carbone dans ces compartiments peut varier selon le type de biome forestier, le niveau de maturité de la forêt, le type de gestion appliqué, etc. Par exemple, dans les vieilles forêts, le stock de carbone dans le bois mort est beaucoup plus élevé que dans des forêts gérées plus jeunes (Figueres 2019).

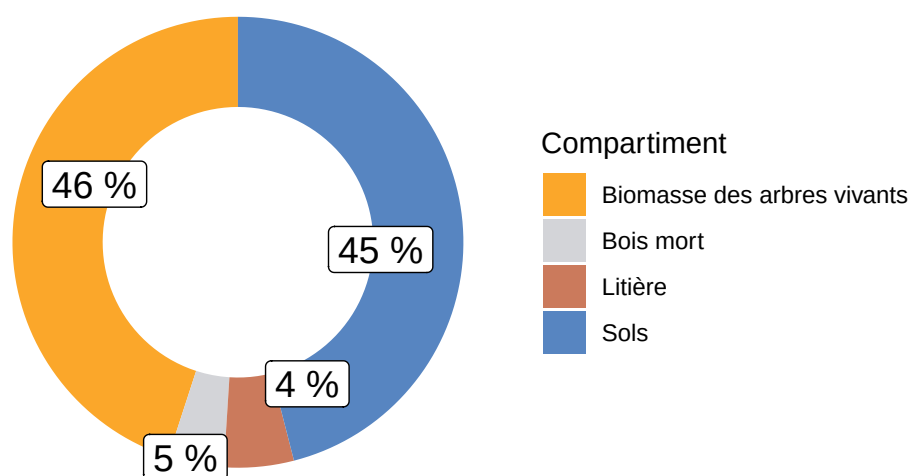


Figure 1: Distribution du carbone forestier entre les différents réservoirs (Source : IGN, 2025)

2 LES FORÊTS DU MASSIF CENTRAL : APERÇU

Compte tenu des données disponibles, seuls certains compartiments sont pris en compte dans cette étude :

Tableau 1: Compartiments pris en compte dans l'étude

Réservoir	Inclus	Source
Biomasse des arbres vivants	Oui	IFN
Biomasse des arbres morts	Non	-
Litière	Non	-
Carbone organique du sol	Oui	IFN

1.3 Les flux de carbone en forêt

Il est également possible de mesurer les flux de carbone en forêt. Il existe plusieurs méthodes pour quantifier ces échanges au sein de l'écosystème, qui sont plus ou moins adaptées selon l'échelle de suivi. Ces méthodes peuvent être regroupées sous deux grands types :

- les flux sont mesurés de façon quasi continue, à l'aide de capteurs (systèmes de tour à flux, satellites, etc.)
- les flux sont estimés de façon indirecte, en calculant le delta entre des stocks mesurés à deux instants différents

Dans le cadre de cette étude, les données relatives aux flux de carbone sont produites par l'IGN, qui les estime à partir de données d'inventaire collectées chaque année.

Tableau 2: Flux de carbone pris en compte dans l'étude

Flux	Inclus	Source
Production biologique	Oui	IFN
Mortalité	Oui	IFN
Prélèvements	Oui	IFN
Bilan des flux	Oui	IFN

2 Les forêts du Massif central : Aperçu

Le Massif central occupe près d'un sixième de la superficie de la France. Il s'agit d'un massif de moyenne montagne, culminant à 1 886 m au Puy de Sancy. Du fait de son étendue, le territoire connaît un climat très variable lié aux influences océaniques ou méditerranéennes (IGN 2012).

2 LES FORÊTS DU MASSIF CENTRAL : APERÇU

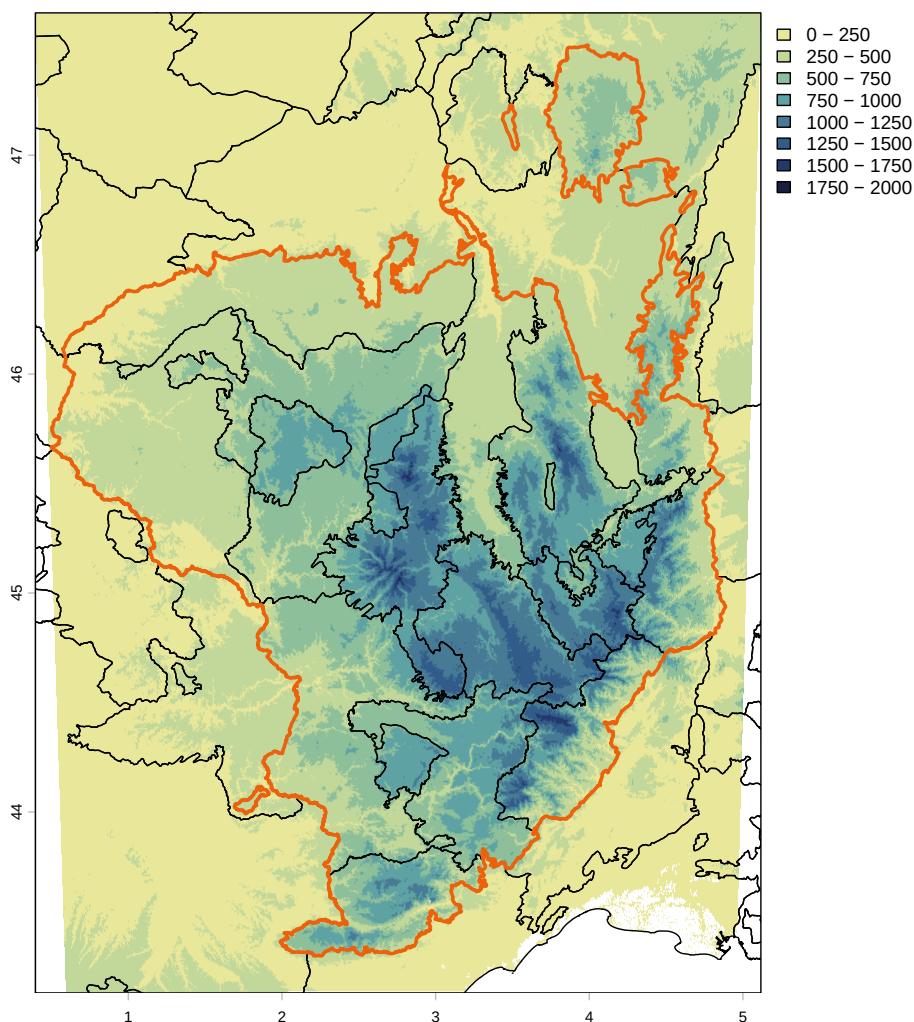


Figure 2: Classes d'altitude dans la GRECO Massif Central

Le Massif central est l'une des régions les plus boisées de France, avec une superficie forestière de 2 938 milliers d'hectares et un capital de 607 millions de m³ de bois sur pied. Il s'agit pourtant d'une région principalement agricole, et le taux de boisement atteint aujourd'hui 39%. La forêt y est à 88% privée. Les peuplements sont majoritairement feuillus en termes de superficie forestière, mais le volume sur pied est équitablement réparti entre feuillus (280 ± 15 millions de m³) et résineux (239 ± 21 millions de m³). Les peuplements résineux sont toutefois beaucoup plus capitalisés que les peuplements feuillus (respectivement 325 ± 23 m³/ha et 171 ± 8 m³/ha). La majorité des peuplement feuillus sont présents entre 200 et 800 m d'altitude, tandis que les peuplements résineux sont plutôt présents entre 400 et 1200 m. Au delà de 1200 m, l'inventaire recense très peu de forêts.

3 COMMENT ÉVALUER L'ÉTAT DES STOCKS DE CARBONE FORESTIERS DANS LE MASSIF CENTRAL ?

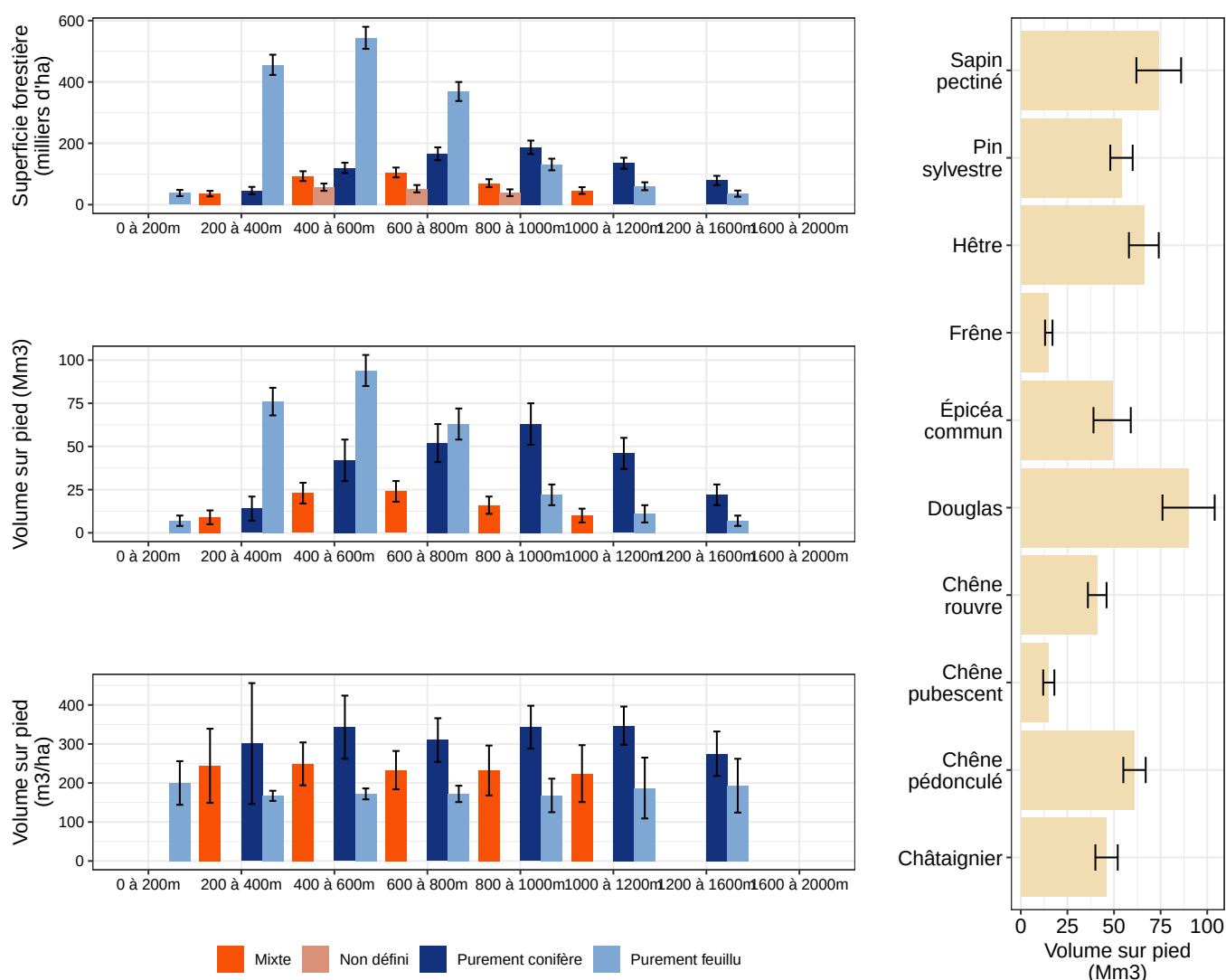


Figure 3: Distribution des volumes par classe d'altitude

3 Comment évaluer l'état des stocks de carbone forestiers dans le Massif Central ?

3.1 Plusieurs sources de données disponibles

3.1.1 L'inventaire forestier national

L'inventaire forestier national (IFN) est supervisé par l'Institut Géographique National (IGN). Les données des campagnes nationales menées annuellement sont disponibles de 2005 jusqu'à 2024. Les résultats de ces inventaires sont disponibles sous forme de données brutes, mais aussi sous forme agrégées à différents niveaux (par classes de diamètres, par types de peuplements, par département, par classes d'altitude, etc.). Différentes plateformes permettent d'accéder aux données, selon l'usage souhaité et l'information recherchée (DataIFN, OCRE, inventIF, Observatoire des forêts).

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons surtout aux variables de stocks de carbone, de flux

3 COMMENT ÉVALUER L'ÉTAT DES STOCKS DE CARBONE FORESTIERS DANS LE MASSIF CENTRAL ?

(accroissement biologique, prélèvements, mortalité, bilan des flux) et aux variables explicatives comme la superficie forestière et le taux de couvert.

3.1.2 La réanalyse de données satellites

De plus en plus de méthodes de suivi des forêts s'appuient sur l'analyse d'images satellitaires, afin de caractériser les peuplements (état sanitaire, taux de boisement, ressource en bois, stocks de carbone, etc).

Le projet SuFoSat (Planells 2024) avait par exemple pour objectifs d'améliorer les méthodes d'estimation de la biomasse sur pied, et de caractérisation des peuplements et de leurs perturbations (coupe rase et dégradation sanitaire). Ce projet a permis de produire une estimation spatialisée des hauteurs et de la biomasse sur pied à une résolution de 10m x 10m (Morin et al. 2024). De la même manière, Schwartz et al. (2023) a produit des cartes de hauteur à une résolution de 10m x 10m, et de volume et de biomasse à une résolution de 30m x 30m pour le territoire français. Dans les deux cas, bien que les méthodes d'analyse permettent une reproductibilité annuelle des résultats, seule l'année 2020 a été traitée car il s'agissait de projets pilotes visant à valider la méthode de réanalyse.

L'analyse de données satellitaires présente un potentiel important pour une cartographie et un suivi fins, réguliers et économiques des stocks de carbone en forêt, compte tenu de la haute résolution spatiale des images et de la fréquence de passage des satellites. Toutefois, si la qualité des estimations de hauteur de végétation est en constante amélioration, le passage au volume et à la biomasse reste délicat. L'incertitude associée à ces variables augmente de façon significative, peu importe le modèle utilisé, lorsque les estimations de volume et de biomasse sont confrontées aux résultats de l'inventaire forestier qui font référence aujourd'hui. Cela s'explique principalement par le fait que l'estimation du volume de bois et du stock de biomasse repose sur des paramètres propres à chaque essence.

En effet, le volume d'un arbre est estimé à l'aide de relations allométriques qui sont fonction de la circonférence et/ou de la hauteur. Ces relations peuvent donner un résultat en volume bois fort tige¹ ou en volume total². La précision du calcul est améliorée si ces relations sont spécifiquement développées pour chaque essence, car elles tiennent mieux compte de l'architecture de l'arbre. La biomasse sèche est ensuite obtenue en multipliant le volume de bois frais par l'infradensité du bois, qui est elle aussi spécifique à l'essence. Comme le montre la figure suivante, l'infradensité peut varier du simple au double selon l'essence observée.

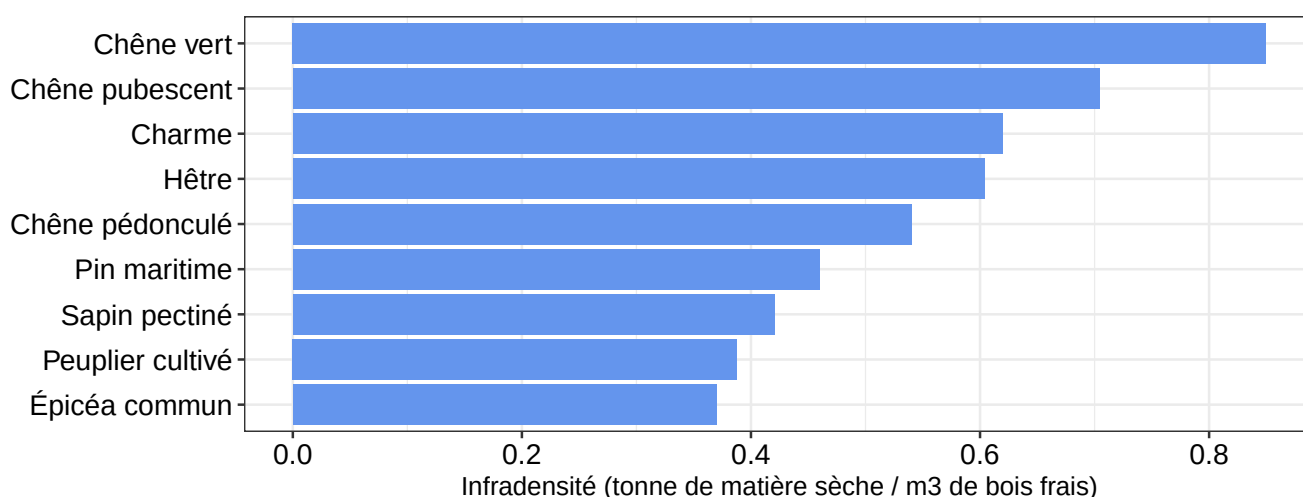


Figure 4: Comparaison de l'infradensité de différentes essences (Source : XyloDensMap, 2025)

La précision de l'estimation du volume, de la biomasse et donc du stock de carbone est ainsi largement conditionnée par la bonne identification des essences forestières. Or, il n'est pas encore possible d'identifier

¹Volume commercialisable de l'arbre

²Volume du tronc et des branches

3 COMMENT ÉVALUER L'ÉTAT DES STOCKS DE CARBONE FORESTIERS DANS LE MASSIF CENTRAL ?

facilement les essences à partir des images satellite. Certains algorithmes sont capables de distinguer les feuillus des résineux, mais des erreurs persistent. Les cartes de volumes et de biomasses disponibles s'appuient donc généralement sur des relations allométriques non-spécifiques et des infradensités moyennes, ce qui participe à la propagation des incertitudes et à une précision limitée. Le tableau suivant présente les performances des estimations de hauteur, de volume et de biomasse des cartes de SuFoSat et FORMS.

Tableau 3: Comparaison des performances des projets FORMS et SuFoSat (d'après Schwartz et al., 2023 et Morin et al., 2024)

Variable	FORMS		SuFoSat	
	MAE	R2	MAE	R2
Hauteur	2.94 m	0.69	3.72 m	0.49
Volume	30 m3/ha	0.63	93.02 m3/ha	0.33
Biomasse	19.3 Mg/ha	0.35	75 Mg/ha	0.26

* MAE : Erreur moyenne absolue

3.1.3 La réanalyse de données LiDAR

L'utilisation de données LiDAR est également intéressante pour le suivi des forêts, mais souffre de limites similaires à celles évoquées pour les images satellitaires. En effet, si la résolution spatiale est encore plus fine, le problème d'identification des essences demeure. Ainsi, cette technologie n'est pas encore mûre en ce qui concerne un suivi précis dans le temps, en particulier dans les jeunes peuplements et les peuplements mélangés.

Le projet LiDAR HD (IGN 2025) a pour vocation d'acquérir des données altimétriques par LiDAR haute densité sur l'ensemble du territoire français afin de produire notamment un nuage de points classés et un modèle numérique de hauteur à très haute résolution. La première campagne de mesure s'étale sur 6 ans et n'est pas encore achevée, ce qui implique qu'ici aussi, les résultats potentiels ne concernent que la date de collecte et qu'ils ne peuvent pas encore être utilisés de façon à décrire une dynamique. D'autres projets plus ponctuels ont permis de réaliser des vols et d'acquérir des données LiDAR sur la zone d'étude afin d'améliorer les algorithmes de traitement des données brutes et d'extrapoler des variables comme la hauteur des arbres et la surface terrière. A ce stade, aucune de ces études n'a été jusqu'à produire des estimations de volume car les données LiDAR souffrent des mêmes limitations que les données satellites concernant la détection des essences.

3.2 Sélection finale des données

Cette étude s'appuie principalement sur les données de l'inventaire forestier national qui sont consolidées à différentes échelles et qui tiennent compte des spécificités liées aux essences dans les estimations de stocks et de flux de carbone. Les autres ressources évoquées ne sont utilisées qu'à titre indicatif pour étayer certains propos.

4 QUELLES RÉOLUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES POUR ÉTUDIER LES DYNAMIQUES DE SÉQUESTRATION DE CARBONE ?

Tableau 4: Récapitulatif des caractéristiques des ressources explorées

Paramètre	IFN	Images satellites	LiDAR
Type de donnée	Inventaire forestier	Raster issu des réanalyses des images satellites Sentinel-1 et 2	Raster issu des réanalyses des nuages de points LiDAR
Couverture temporelle	Annuelle	Annuelle (uniquement 2020)	Unique (un seul vol par zone entre 2021 et 2026)
Couverture spatiale	Nationale	Nationale	Nationale
Résolution spatiale	Variable selon le niveau de significativité recherché	10m ou 30m	Inférieure à 1m
Variables disponibles	Variables dendrométriques classiques (volumes, stocks de carbone, superficie forestière), et variables de flux (accroissement biologique, mortalité, prélèvement).	Hauteur, volume, biomasse	Hauteur, surface terrière, diamètre
Avantages	Données consolidées à différentes échelles, information conservée sur les essences mesurées, incertitude réduite sur les stocks de carbone et information sur la dynamique des stocks et des flux dans le temps.	Résolution spatiale élevée	Résolution spatiale très élevée
Inconvénients	Niveaux de combinaison limités par la significativité des résultats, résolution spatiale faible*	Données disponibles pour une seule année donc l'étude de la dynamique n'est pas possible, incertitudes fortes sur les estimations de volume et de biomasse	Données disponibles pour une seule année donc l'étude de la dynamique n'est pas possible, incertitudes fortes sur les estimations de volume et de biomasse, données brutes très volumineuses

Note:

* Les résultats de l'IFN sont basés sur l'analyse d'un nombre de placettes appartenant à une modalité. Plus la modalité est précise, moins le nombre de placettes correspondant est important et moins le résultat est significatif. L'utilisation de ces données implique souvent de faire un compromis entre les typologies étudiées.

4 Quelles résolutions spatiales et temporelles pour étudier les dynamiques de séquestration de carbone ?

4.1 Deux échelles géographiques : la GRECO et la SER

Le territoire du projet correspond au zonage administratif du Massif central. Ce découpage ne correspond pas à un territoire homogène d'un point de vue pédosylvoclimatique. Il s'étend cependant majoritairement sur la grande région écologique (GRECO) du *Massif Central (G)* et déborde légèrement sur les GRECO limitrophes : *Centre Nord semi-océanique (B)*, *Sud-Ouest océanique (F)* et *Méditerranée (J)*. Il a été décidé de conserver l'échelle de la grande région

4 QUELLES RÉOLUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES POUR ÉTUDIER LES DYNAMIQUES DE SÉQUESTRATION DE CARBONE ?

écologique et des sylvoécorégions pour présenter les résultats de l'étude. Une sylvoécorégion (SER) correspond à une zone géographique suffisamment vaste à l'intérieur de laquelle la combinaison des valeurs prises par les facteurs déterminant la production forestière ou la répartition des habitats forestiers est originale (IGN 2013a). Il s'agit donc d'ensembles géographiques cohérents en termes de contextes pédosylvoclimatiques à l'échelle de chaque entité. De plus, les résultats de l'inventaire forestiers sont consolidés aux échelles de la GRECO et de la SER.

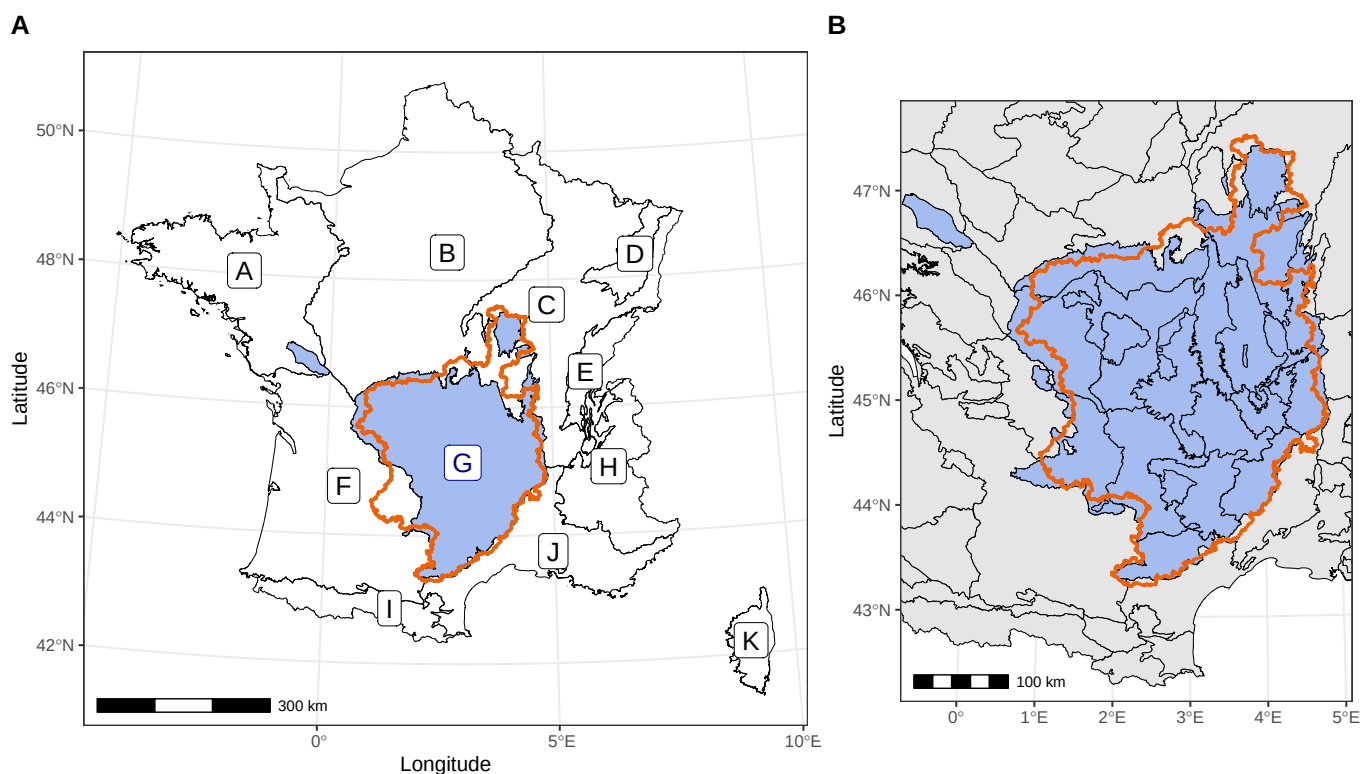


Figure 5: Zone d'étude du projet (A. Superposition du zonage administratif (orange) à la GRECO G, B. Superposition du zonage administratif aux SER majoritairement couvertes).

La figure ci-dessus illustre ce découpage. La carte (A) représente la France métropolitaine découpée en GRECO et fait figurer en bleu la GRECO *Massif central* (G). Les limites administratives du Massif central sont représentées en orange. La carte (B) est une vue rapprochée du territoire d'étude cette fois-ci découpé par sylvoécorégion. A nouveau, les limites administratives figurent en orange, tandis que les sylvoécorégions étudiées dans le cadre du projet sont représentées en bleu. Lorsque les résultats sont présentés à l'échelle de la GRECO, seule la GRECO G est considérée. En effet, la surface des autres GRECO qui sont incluses dans le découpage administratif est très faible par rapport aux surfaces totales respectives de ces GRECO et leur poids dans les résultats finaux serait surestimé. En revanche, lorsque l'on se place à l'échelle de la SER, il est possible de rajouter quelques SER comme la B92 (*Bourbonnais et Charolais*) et la F40 (*Causses du Sud-Ouest*) car la quasi totalité de la surface de ces SER intersecte le découpage administratif, ce qui permet une vision plus complète du territoire d'étude.

4 QUELLES RÉOLUTIONS SPATIALES ET TEMPORELLES POUR ÉTUDIER LES DYNAMIQUES DE SÉQUESTRATION DE CARBONE ?

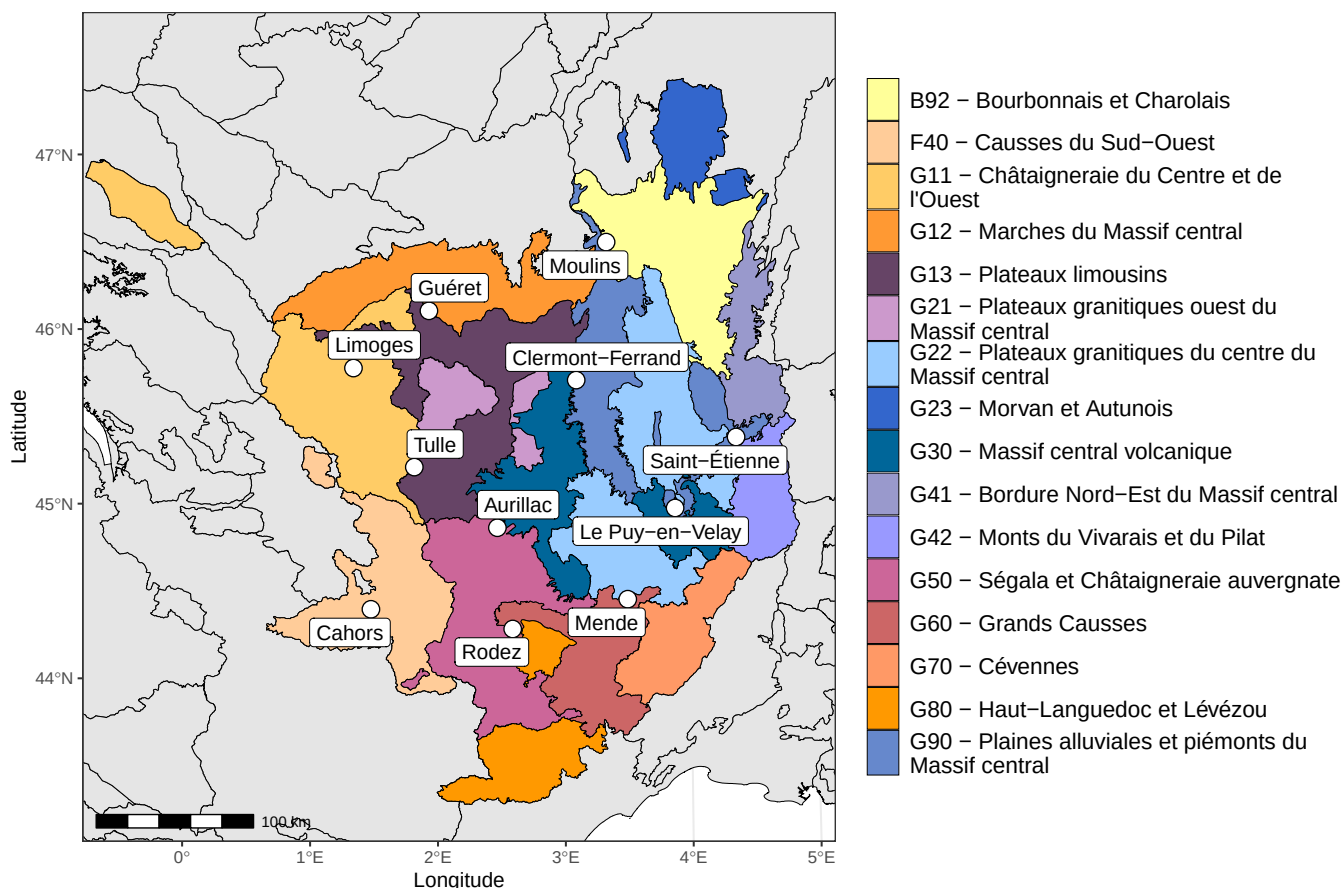


Figure 6: Carte des sylvoécórégions.

4.2 Différentes périodes temporelles

Bien que l'inventaire forestier national repose sur des campagnes annuelles, les résultats sont agrégés par l'IGN sur des lots de cinq campagnes successives afin de consolider les données. Par ailleurs, la dynamique forestière s'observe généralement sur des temps longs, et il est souvent nécessaire de comparer des périodes bien distinctes pour pouvoir observer une évolution significative. D'autres dispositifs comme les tours à flux permettent d'étudier la variabilité inter-saisonnière, mais il n'en existe pas dans le Massif central.

Enfin, les résultats de l'inventaire concernant la séquestration carbone en forêt ne sont pas disponibles pour toutes les périodes. Nous nous intéresserons donc à plusieurs périodes dans le cadre de cette étude, qui sont celles actuellement disponibles pour les variables carbone :

- pour les **stocks** de carbone : 2007 - 2011 et 2020 - 2024
- pour les **flux** de carbone : 2005 - 2013 et 2015 - 2023

5 Evolution des stocks de carbone dans le Massif central

5.1 Stock de carbone dans les arbres vivants

5.1.1 Des stocks en augmentation à l'échelle du territoire

En France, le carbone séquestré dans les arbres vivants en forêt³ est estimé à 1.35 milliard de tonnes de carbone. La GRECO *Massif Central* représente à elle seule près de 19% de ce stock, ce qui en fait le second réservoir de carbone forestier, derrière la GRECO *Centre Nord semi-océanique* (22%). Le stock de carbone moyen dans le Massif Central est aujourd'hui de 90 tC/ha, ce qui est légèrement plus élevé que la moyenne nationale (82 tC/ha). On observe des niveaux de stock similaires dans les GRECO B, C, D, I et E qui englobent également des massifs montagneux pour la plupart.

Tableau 5: Stock total de carbone forestier par GRECO (période de référence : 2020-2024, Source :IGN)

Code	GRECO	Stock total (MtC)	Poids dans le stock national	Stock moyen (tC/ha)
B	Centre Nord semi-océanique	295 ±9	22%	95 ±2
G	Massif central	264 ±10	20%	90 ±3
C	Grand Est semi-continental	207 ±8	15%	93 ±3
F	Sud-Ouest océanique	167 ±7	12%	65 ±3
H	Alpes	89 ±7	7%	69 ±4
A	Grand Ouest cristallin et océanique	67 ±5	5%	88 ±5
I	Pyrénées	65 ±6	5%	95 ±7
D	Vosges	64 ±4	5%	113 ±6
J	Méditerranée	54 ±4	4%	37 ±3
E	Jura	49 ±4	4%	96 ±6
K	Corse	31 ±6	2%	68 ±12

La comparaison des périodes 2007-2011 et 2020-2024 montre une augmentation significative des stocks de carbone totaux et moyens en France métropolitaine, comme dans la GRECO *Massif Central* (d'environ 16% dans les deux cas). Cette augmentation peut s'expliquer par l'augmentation des superficies forestières, qui se sont élevées d'environ 7% entre les deux périodes en France métropolitaine comme dans la GRECO *Massif central*.

Tableau 6: Evolution du stock de carbone forestier en France et dans le Massif central

Période	Stock total (MtC)		Stock moyen (tC/ha)	
	France métropolitaine	GRECO G	France métropolitaine	GRECO G
2007-2011	1 160 (± 17)	227 (± 8)	75 (± 1)	82 (± 3)
2020-2024	1 353 (± 20)	264 (± 10)	82 (± 1)	90 (± 3)

³ D'après la définition de l'IFN, le compartiment "arbres vivants" comprend les tiges, les racines, et les branches

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

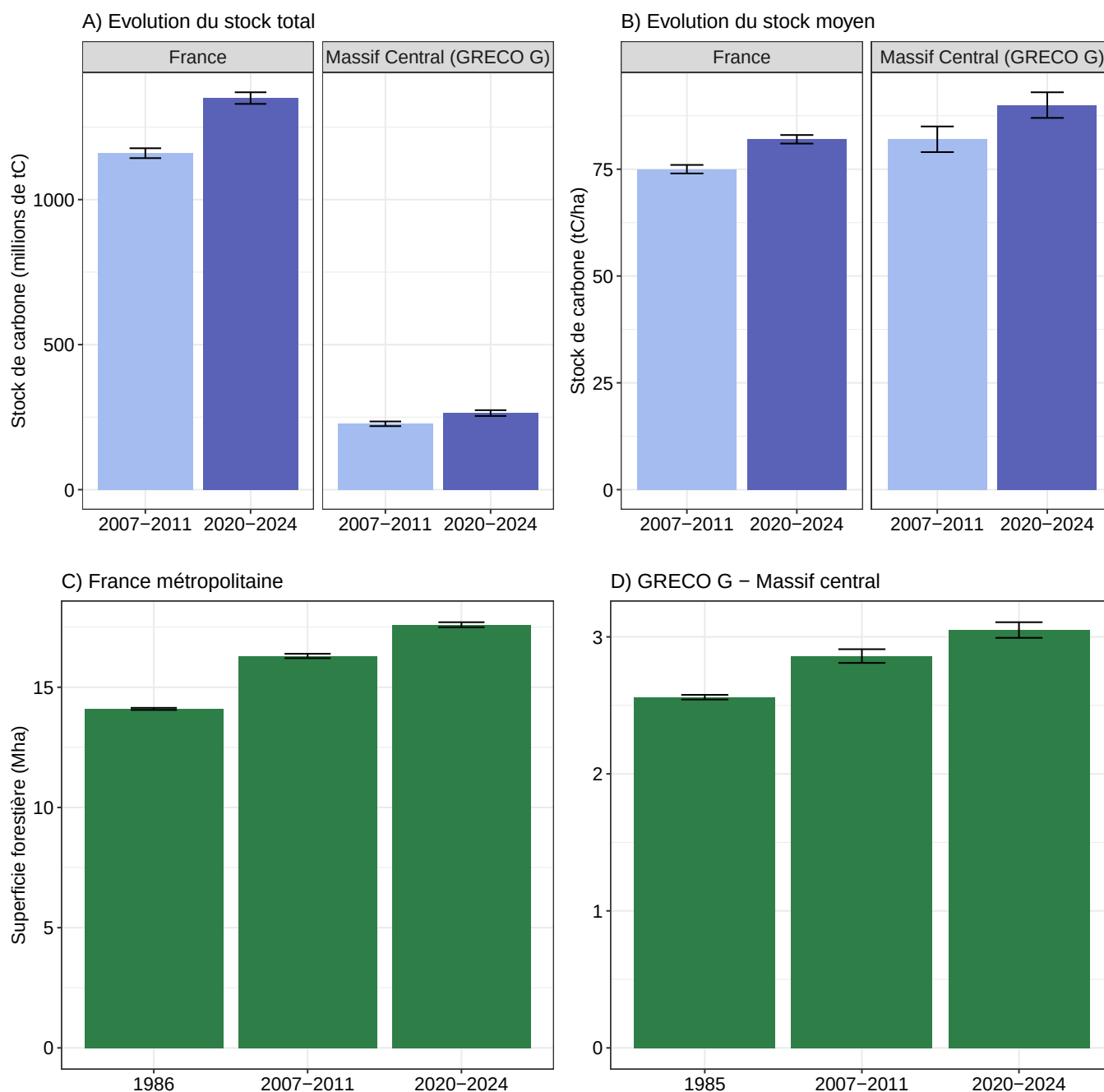


Figure 7: Evolution des stocks de carbone et de la superficie forestière en France et dans le Massif central

5.1.2 Des variations locales moins marquées

Si les variations de stocks de carbone sont significatives à l'échelle de la GRECO, ces évolutions sont moins flagrantes à des résolutions plus fines comme celle de la sylvoécocorégion. La comparaison des périodes 2007-2011 et 2020-2024 ne montre d'augmentation significative du stock de carbone total que pour la SER G22 (*Plateaux granitiques ouest du Massif Central*). Pour toutes les autres SER, bien qu'une tendance à l'augmentation semble se dessiner, il est impossible de conclure car les barres d'incertitudes associées aux résultats se recoupent. Cette conclusion est

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

également vraie en ce qui concerne le stock de carbone moyen à l'hectare : il n'y a pas d'évolution significative du stock de carbone moyen entre les deux périodes étudiées.

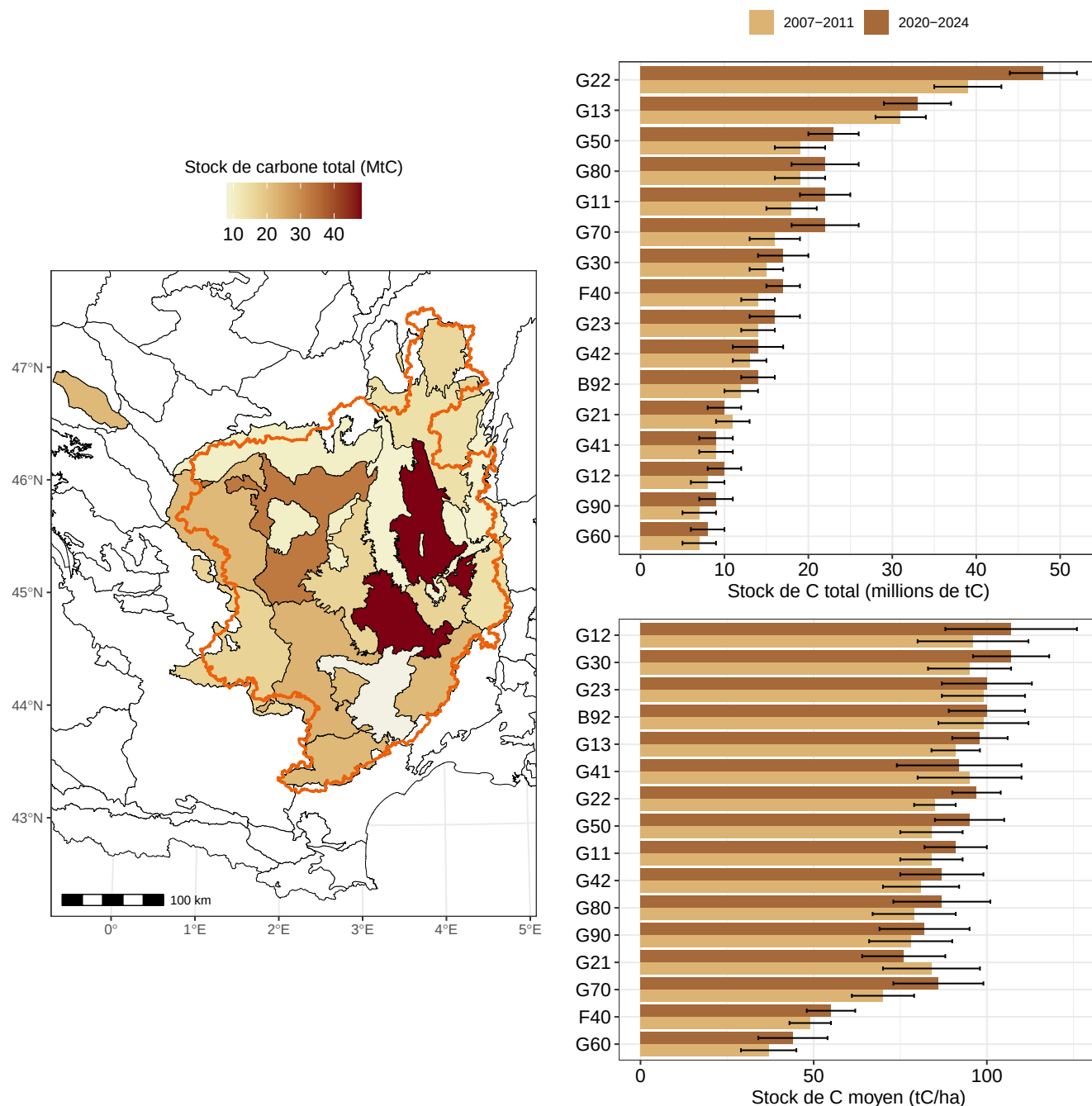


Figure 8: Evolution des stocks de carbone par SER

Pour autant, il existe des différences entre les SER : les SER G13 (33 millions de tC) et G22 (48 millions de tC) présentent les stocks de carbone totaux les plus élevés du Massif Central, tandis que les SER G21, G41, G12 (10 MtC), G90 et G60 (8 MtC) présentent les stocks de carbone totaux les plus faibles. Ces différences peuvent

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

s'expliquer de plusieurs façons. La première tient au fait que la superficie des SER, leur superficie forestière et leur taux de boisement sont variables. Le stock de carbone total est ainsi positivement corrélé à la superficie forestière totale. Certaines régions de France ont vu leur superficie forestière fortement augmenter depuis les années 1980, suite à l'exode rural mais aussi aux campagnes de boisement soutenues par le Fonds forestier national (FFN). Ces "nouvelles" forêts, plus récentes, contribuent à l'augmentation du stock de carbone.

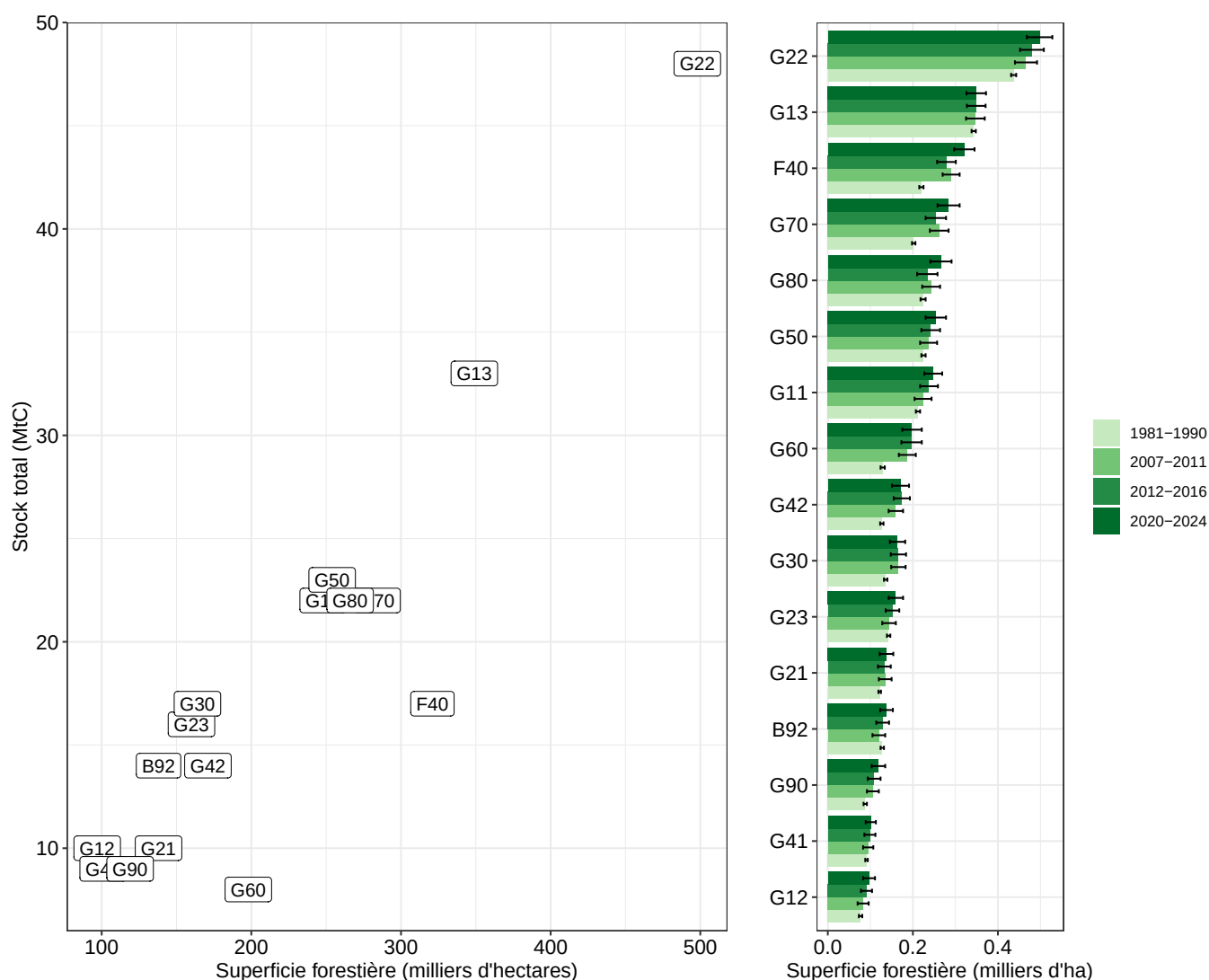


Figure 9: Comparaison des superficies forestières et des stocks de carbone par sylvoécocorégion.

L'autre variable qui peut expliquer ces disparités de stock entre les SER est la hauteur de la strate arborée. En effet, le stock de carbone d'un arbre est aussi fonction de sa hauteur. Les cartes de hauteur de végétation issues des données satellites montrent des variations clairement visibles entre les SER. Ainsi, les SER G60 et F40 ressortent comme des zones où la hauteur totale des arbres est bien plus basse que dans les SER G13 et G22. Ces différences de hauteurs sont intimement liées aux conditions pédosylvoclimatiques observées au sein de la SER. La SER G60 (*Grands Causses*) se distingue par exemple par des précipitations moyennes, de faibles réserves utiles et un vent souvent fort, qui en font une zone assez sèche (IGN 2013d). La SER F40 (*Causses du Sud-Ouest*) est également caractérisée par des sols pauvres à fortes contraintes hydriques (IGN 2013b). A l'inverse, la SER G13 (*Plateaux limousins*) présente un régime des précipitations plus élevé (plus de 1100 mm par an en moyenne) et de meilleures stations, ce qui induit

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

des conditions de croissance plus favorables (IGN 2013c). La hauteur des peuplements peut aussi s'expliquer par leur âge.

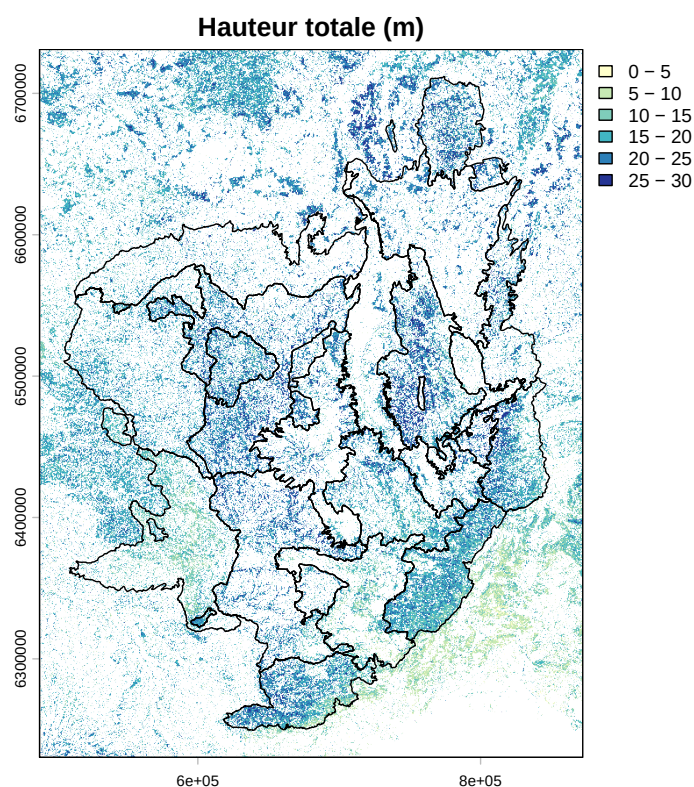
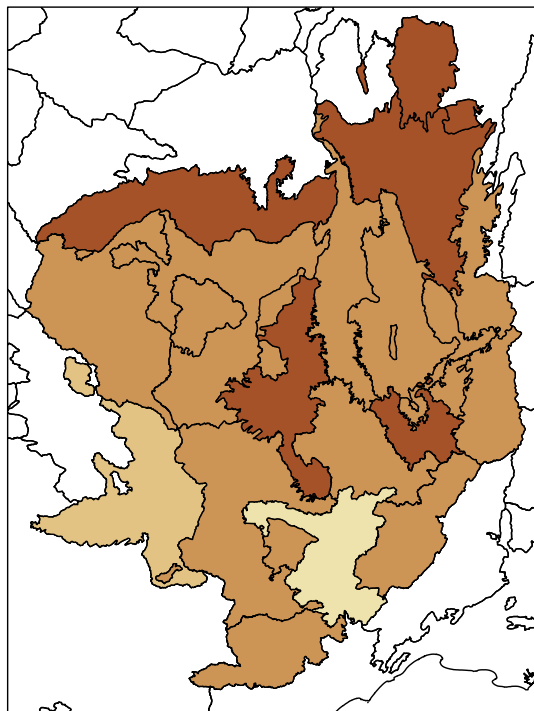


Figure 10: Carte des hauteurs de végétation à une résolution spatiale de 10m, d'après les données de Morin et al., 2024

Ces différences sont moins marquées en ce qui concerne les niveaux de séquestration moyens à l'hectare. Compte tenu des incertitudes associées, la plupart des SER de la zone d'étude présentent des valeurs similaires à la séquestration moyenne de la GRECO G (~90 tC/ha). Toutefois, les SER F40 (*Causses du Sud-Ouest*) et G60 (*Grands Causses*) se distinguent par des niveaux bien plus faibles (~50 tC/ha).

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

A) D'après les données d'inventaire (tC/ha)



B) D'après les données satellites (tC/ha)

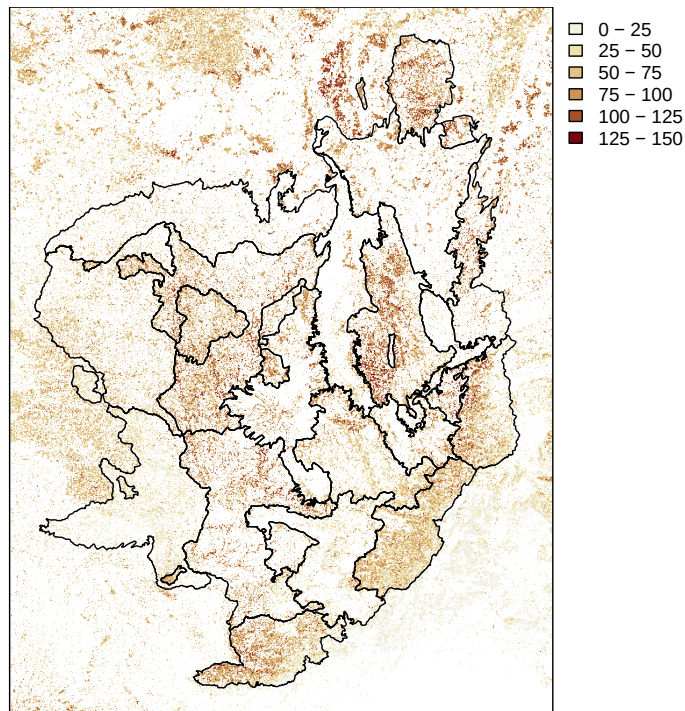


Figure 11: Carte des stocks de carbone moyens d'après les données d'inventaire (A) et dans la biomasse aérienne à une résolution spatiale de 10 m, d'après les données de Morin et al., 2024 (B)

On peut également noter qu'il n'y a pas nécessairement de lien entre le stock moyen à l'hectare et le stock total de carbone. En effet, certaines SER présentent des stocks moyens à l'hectare parmi les plus élevés, alors que le stock total est particulièrement bas. C'est notamment le cas des SER G12 et G30. Ces SER présentent respectivement des taux de boisement de 14% et de 25%, mais la hauteur moyenne des peuplements est de 20 m. Dans les zones boisées, le stock de carbone des arbres est donc effectivement important, mais puisque le taux de boisement est limité, le stock de carbone total reste faible.

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

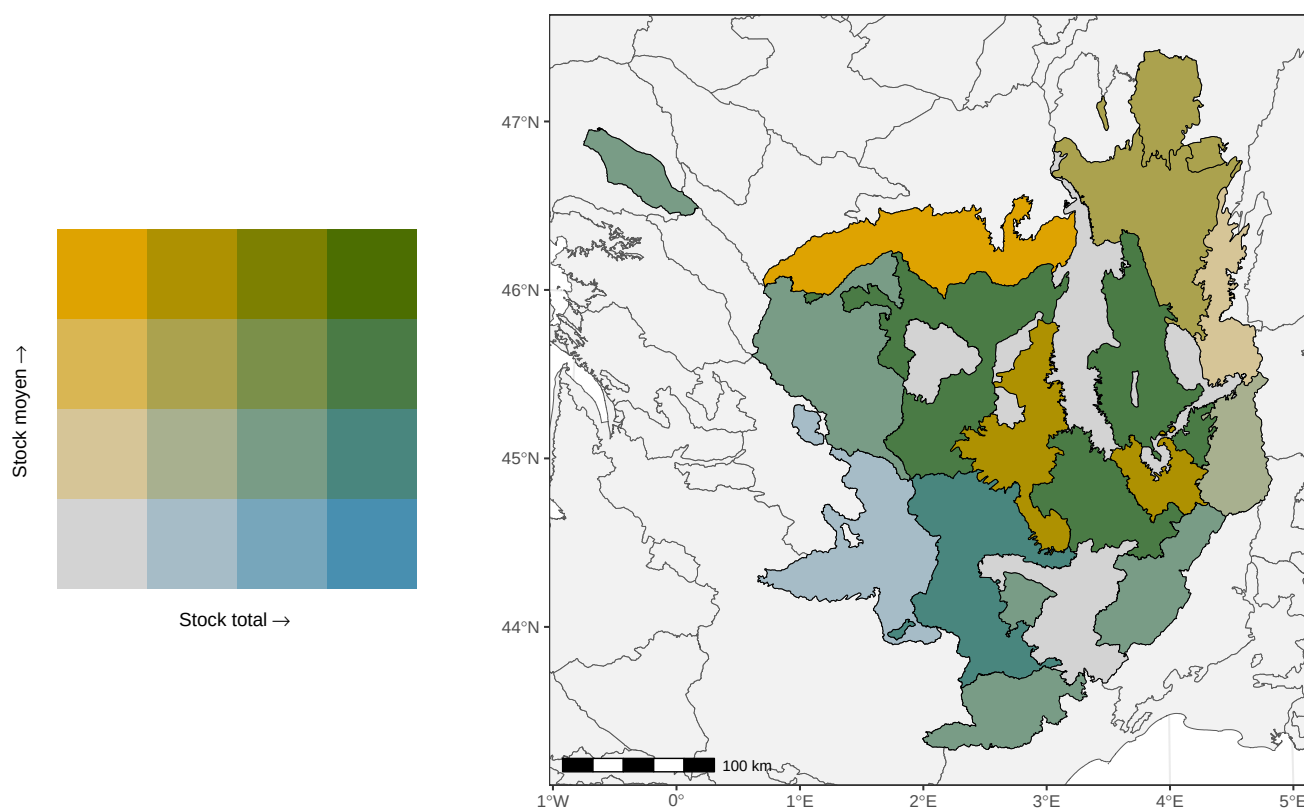


Figure 12: Stock de carbone moyen à l'hectare et total pour la période 2020-2024.

5.2 Stocks de carbone dans le bois mort

A l'échelle nationale, le carbone stocké dans le bois mort est estimé à 126 MtC (soit environ 7 tC/ha) sur la période 2015-2019. Cela représente approximativement 9% du carbone stocké dans la biomasse ligneuse. Ce stock est difficile à estimer avec précision à cause de la dynamique de décomposition du bois mort qui altère l'infradensité du bois au cours du temps. Le protocole d'inventaire de l'IGN permet toutefois de quantifier le volume de bois mort en forêt, ce qui permet d'approcher le stock de carbone.

L'IGN estime ainsi le volume de bois mort au sol à 300 ± 8 millions de m^3 et de bois mort sur pied à 159 ± 5 millions de m^3 en France métropolitaine. Les volumes de bois mort sur pied les plus importants se situent en zone de montagne (Massif central, Alpes du Nord, Pyrénées, Vosges), ce qui s'explique notamment par des conditions d'exploitation plus difficiles à cause du relief. Ainsi, dans le Massif central, la présence de bois mort est plus importante entre 200 et 800 m d'altitude (Figure 13).

Les volumes de bois mort sur pied et au sol sont plus élevés dans la GRECO *Massif central* que dans toute autre GRECO du territoire français (Figure 13). De manière générale, le volume de bois mort au sol est proche de la moyenne de la GRECO ($22.9 \pm 1.3 m^3/ha$) dans toutes les SER sauf dans les SER G60 (*Grands Causses*) et F40 (*Causses du Sud-Ouest*) où il est significativement moins élevé ($7.7 \pm 4.7 m^3/ha$ et $6.9 \pm 1.7 m^3/ha$). Le volume de bois mort sur pied de plus de 5 ans est plus variable : il est plus important dans les SER G50 (*Ségala et Châtaigneraie auvergnate*), G70 (*Cévennes*), et G12 (*Marches du Massif central*) ($12.9 \pm 2.9 m^3/ha$, $9.9 \pm 3.3 m^3/ha$, et $8.3 \pm 3.4 m^3/ha$), et significativement plus bas dans les SER G90 (*Plaines alluviales et piémonts du Massif central*), G21 (*Plateaux granitiques ouest du Massif central*) et G23 (*Morvan et Autunois*) ($2.2 \pm 1.2 m^3/ha$, $3.7 \pm 0.9 m^3/ha$ et $3.2 \pm 1.4 m^3/ha$).

Le volume de bois mort sur pied est plus élevé dans les forêts privées hors PSG ($6.8 m^3/ha$ contre $4 m^3/ha$ dans les forêts privées sous PSG et $4.7 m^3/ha$ dans les forêts publiques), tandis que le volume de bois mort au sol est

5 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE DANS LE MASSIF CENTRAL

équivalent peu importe le type de propriété ($22.9 \pm 1.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ en moyenne).

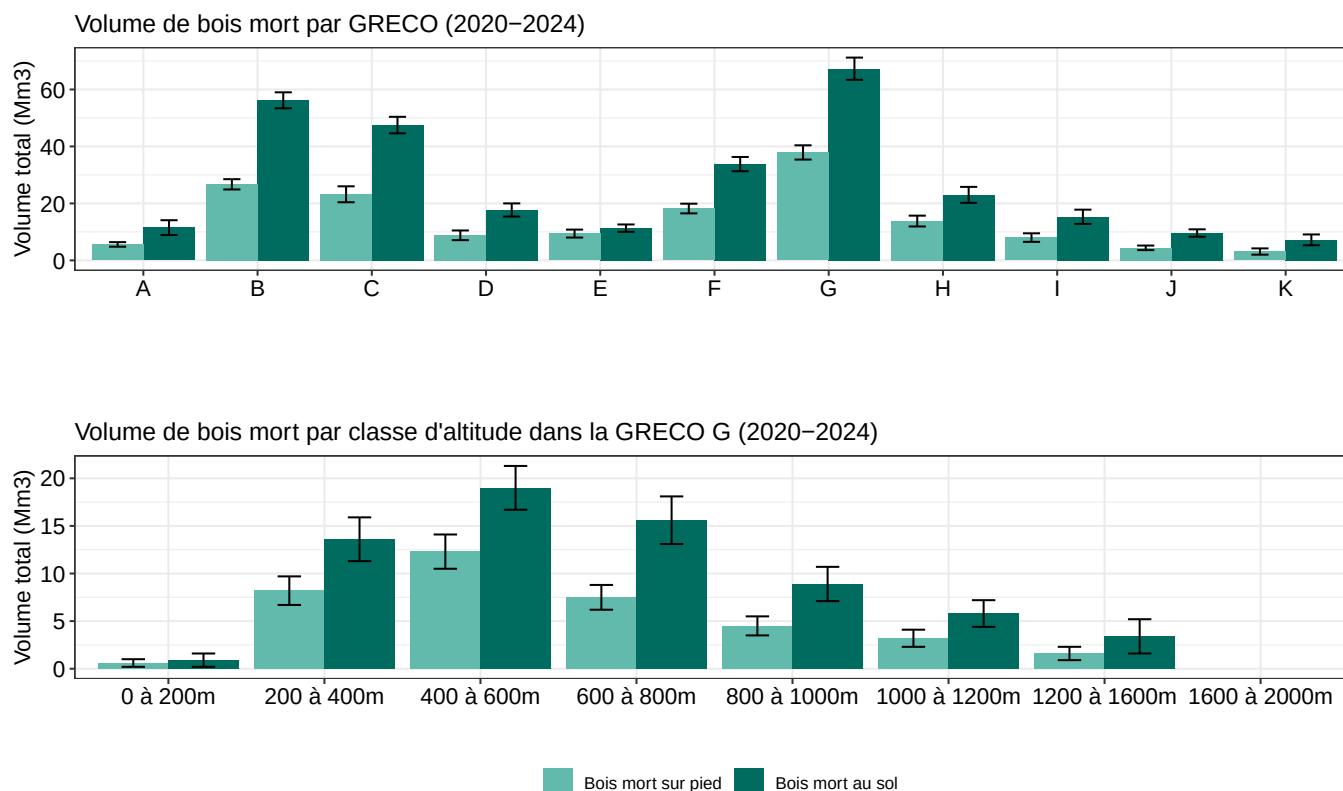


Figure 13: Répartition du volume de bois mort par GRECO et par classe d'altitude

Bien que ces résultats ne donnent pas directement le stock de carbone dans le bois mort, ils montrent qu'il s'agit d'un réservoir potentiel important dans le Massif central.

5.3 Carbone organique du sol

L'évaluation des stocks de carbone du sol est délicate compte tenu de la densité d'échantillonnage nécessaire pour tenir compte de la forte hétérogénéité. Il existe quelques ressources spécifiques au territoire métropolitain, dont les résultats s'accompagnent d'incertitudes importantes. Elles permettent toutefois d'obtenir des ordres de grandeur concernant les stocks de carbone organique du sol. Ainsi, l'INRAE propose une cartographie des stocks de carbone dans les trente premiers centimètres du sol, qui a été intégrée à la carte mondiale des stocks de carbone de la FAO (Martin 2019). Cette carte s'appuie sur les données de mesures des réseaux RMQS et IGCS, et a une résolution de 1 km. Cette étude montre notamment que les stocks de carbone les plus élevés se situent dans les zones d'altitude, ce qui s'explique par l'effet combiné du climat (températures faibles et pluviométrie élevée, avec des périodes d'anoxie⁴ peu favorables à la minéralisation du carbone) et du mode d'occupation du sol (prédominance de prairies permanentes et de forêts) (Pellerin and Bamière 2019). A cela s'ajoute un effet important de la minéralogie (sols volcaniques, dont des andosols), que l'on retrouve dans le Massif central et notamment dans la SER G30.

⁴L'anoxie désigne le manque total d'oxygène dans un sol.

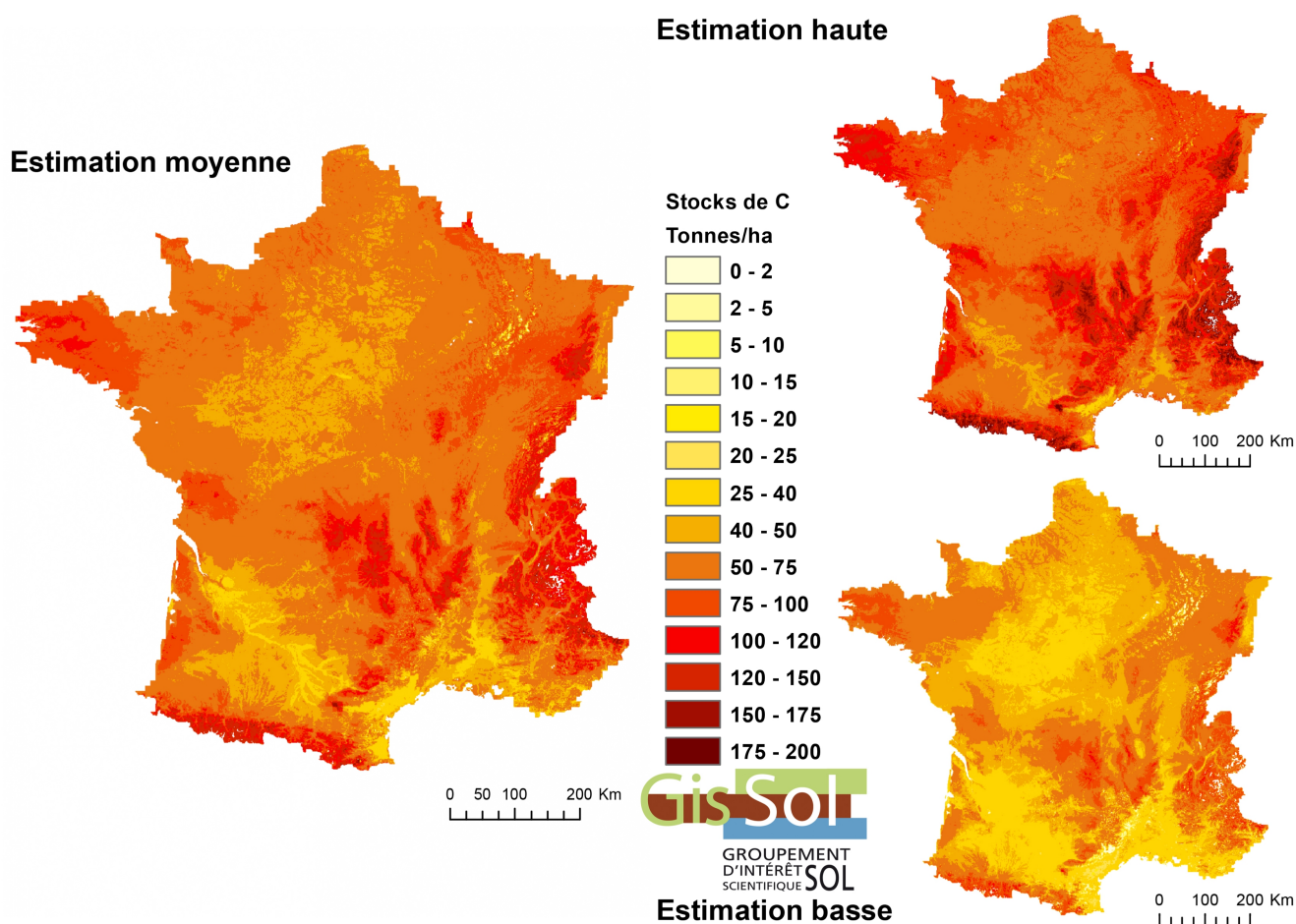


Figure 14: Estimation des stocks de carbone organique de 0 à 30 cm de profondeur en France métropolitaine hors Corse (Source : GisSol, 2017)

Le réseau RMQS est en pleine campagne de remesure et devrait pouvoir produire de nouvelles estimations dans un futur proche (Munera-Echeverri et al. 2025).

6 Évolution des flux de carbone

Par convention, les flux de carbone entrant sont comptés négativement dans le bilan, et les flux sortants sont comptés positivement. Le bilan final, si il est négatif, indique que le réservoir étudié est un puits net de carbone. Si il est positif, alors le réservoir agit comme une source de carbone.

A l'échelle de la GRECO *Massif Central*, la comparaison des flux de carbone en forêt concorde avec les observations de l'IGN à l'échelle nationale :

- Le stock de carbone forestier continue d'augmenter et la forêt est toujours un puits de carbone, mais ce puits ralentit et a été divisé par deux entre les périodes observées
- La production biologique a diminué de plus de 7% entre les deux périodes, en partie à cause des conditions climatiques
- La mortalité a doublé dans les forêts de la zone d'étude, témoignant des crises sanitaires subies (scolytes de

6 EVOLUTION DES FLUX DE CARBONE

l'épicéa, et du sapin pectiné) et des conditions climatiques de plus en plus extrêmes (épisodes de sécheresse et de canicule répétés).

- Les prélèvements de bois en forêt semblent avoir augmenté, mais pas de façon significative. Les prélèvements prennent en compte les coupes sanitaires en réponse aux dépérissements observés.

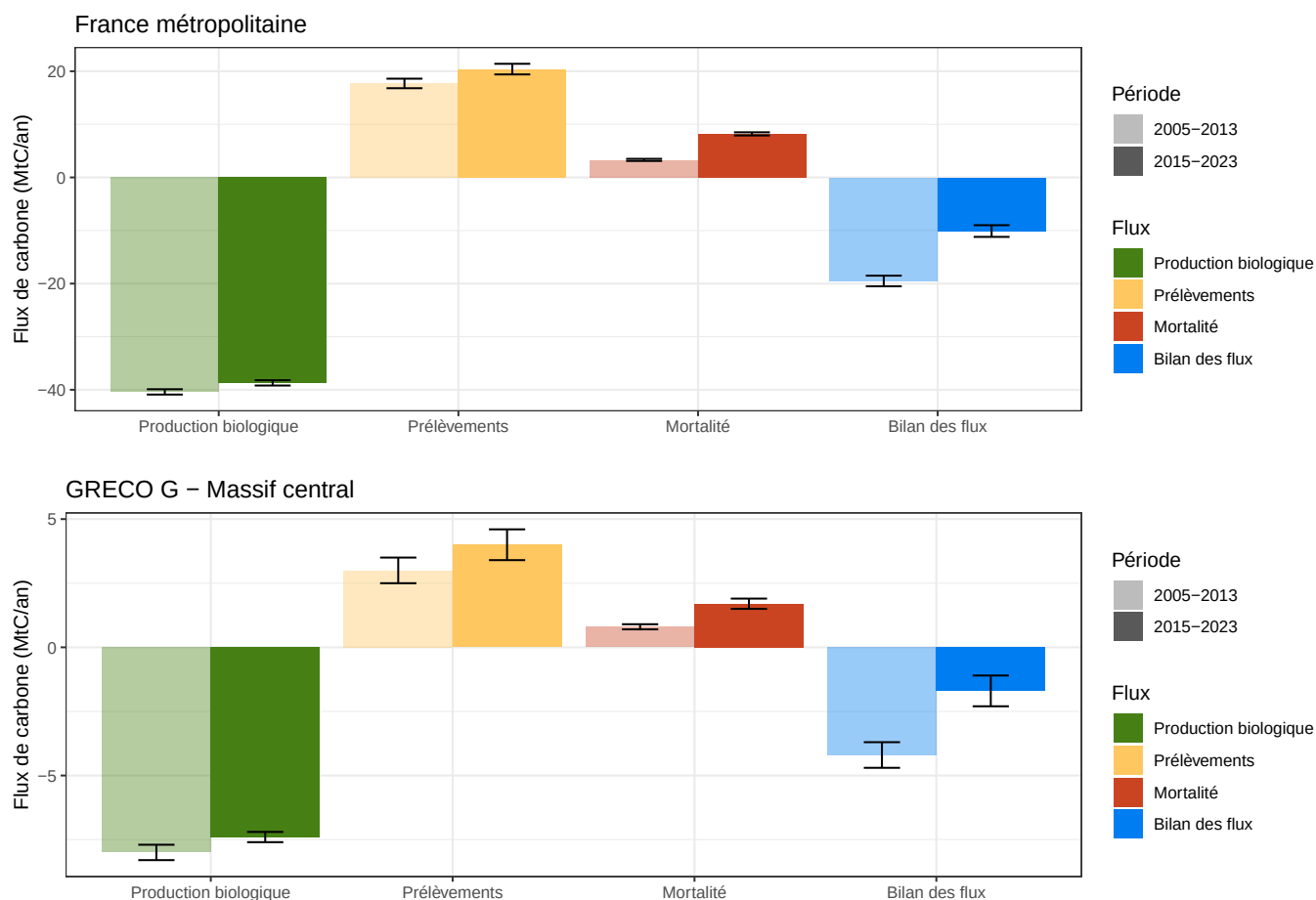


Figure 15: Flux de carbone forestier à l'échelle nationale et à l'échelle de la GRECO Massif Central

6.1 Bilan des flux

Le bilan des flux tel que défini par l'IGN se calcule de la façon suivante : $Bilan\ des\ flux = Production\ biologique - Mortalité - Prélèvements$

L'évolution du bilan des flux à l'échelle des SER n'est pas significative entre les deux périodes. En revanche, certaines SER qui participent de façon plus importante au maintien du puits de carbone total semblent subir un effondrement du puits plus important, comme la SER G22. Certaines SER voient leur bilan s'approcher de 0 tC/an, voire même devenir positif si on tient compte des intervalles de confiance associés aux résultats. Ces SER sont donc potentiellement déjà des sources de carbone (G12, et G41 notamment).

6 EVOLUTION DES FLUX DE CARBONE

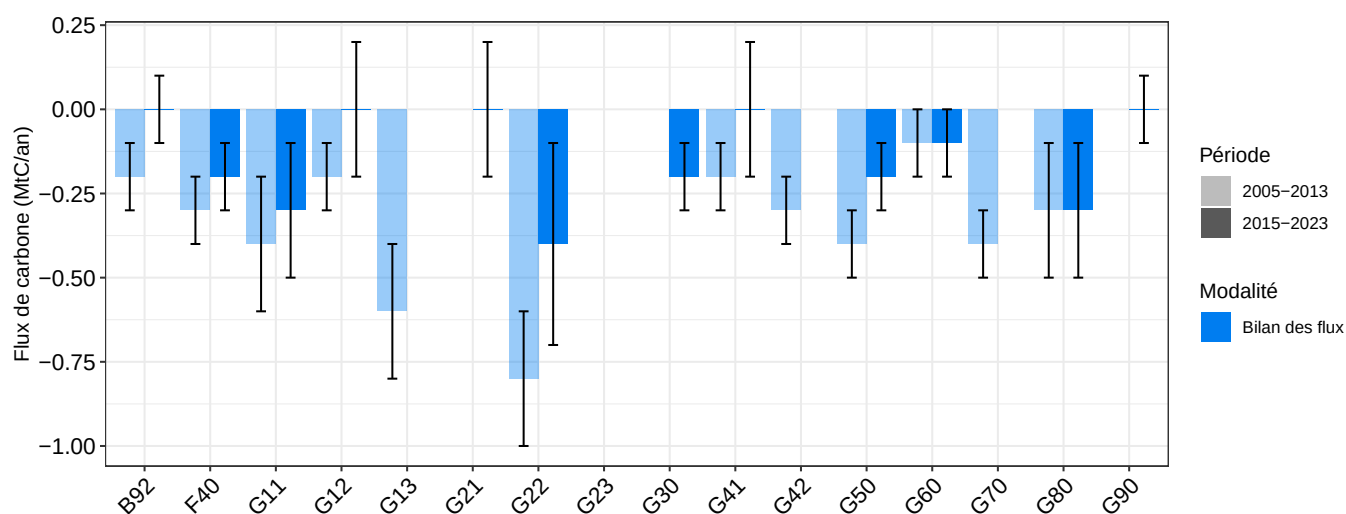


Figure 16: Evolution du bilan des flux de carbone entre les périodes 2005-2013 et 2015-2023 dans les sylvéco-régions de la zone d'étude

6.2 Production biologique

Le flux de carbone associé à la production biologique est très variable d'une SER à l'autre, mais a peu évolué entre les deux périodes. Les SER G22 (*Plateaux granitiques du centre du Massif central*) et G13 (*Plateaux limousins*) présentent des accroissements significativement plus élevés que les autres SER, tandis que les SER G12 (*Marches du Massif central*), G60 (*Grands Causses*) et G90 (*Plaines alluviales et piémonts du Massif central*) présentent les accroissements les plus faibles. Compte tenu des conclusions présentées plus haut, on peut faire l'hypothèse que ces différences de production sont en partie liées à la superficie forestière. Les SER G22 et G13 ont effectivement les superficies forestières les plus importantes, et on retrouve les SER G12 et G90 en bas du classement. De plus, et comme expliqué plus haut, les conditions pédosylvoclimatiques jouent un rôle essentiel dans la croissance et la productivité des peuplements.

6 EVOLUTION DES FLUX DE CARBONE

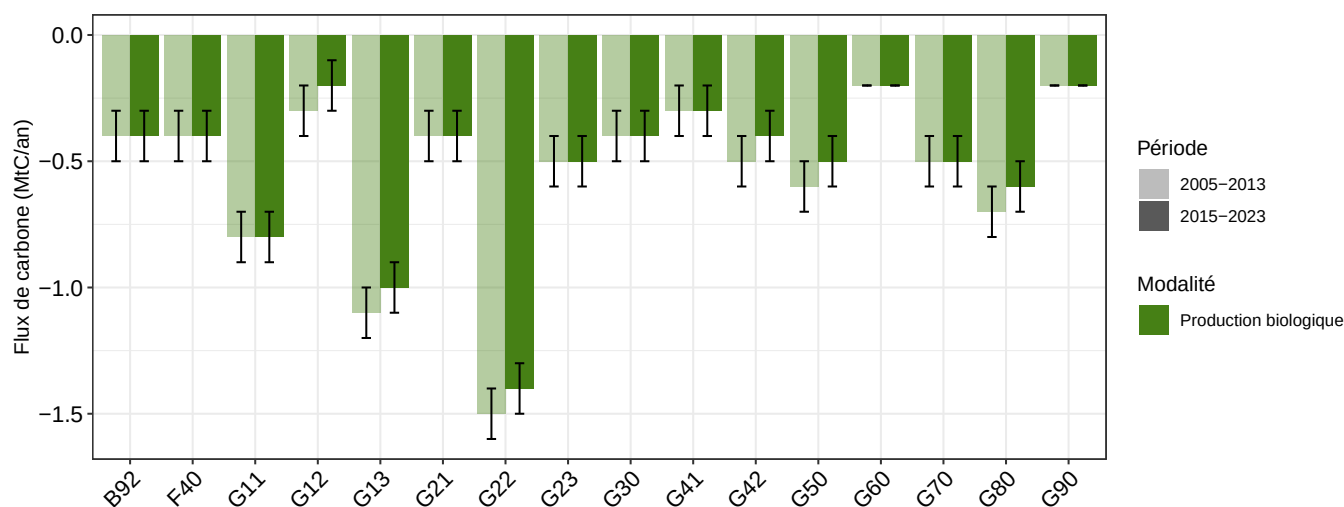


Figure 17: Evolution du flux de carbone associé à la production biologique entre les périodes 2005-2013 et 2015-2023 dans les sylvécorégions de la zone d'étude

6.3 Mortalité

Le flux de carbone lié à la mortalité a augmenté dans la plupart des SER du Massif central, passant parfois du simple au double.

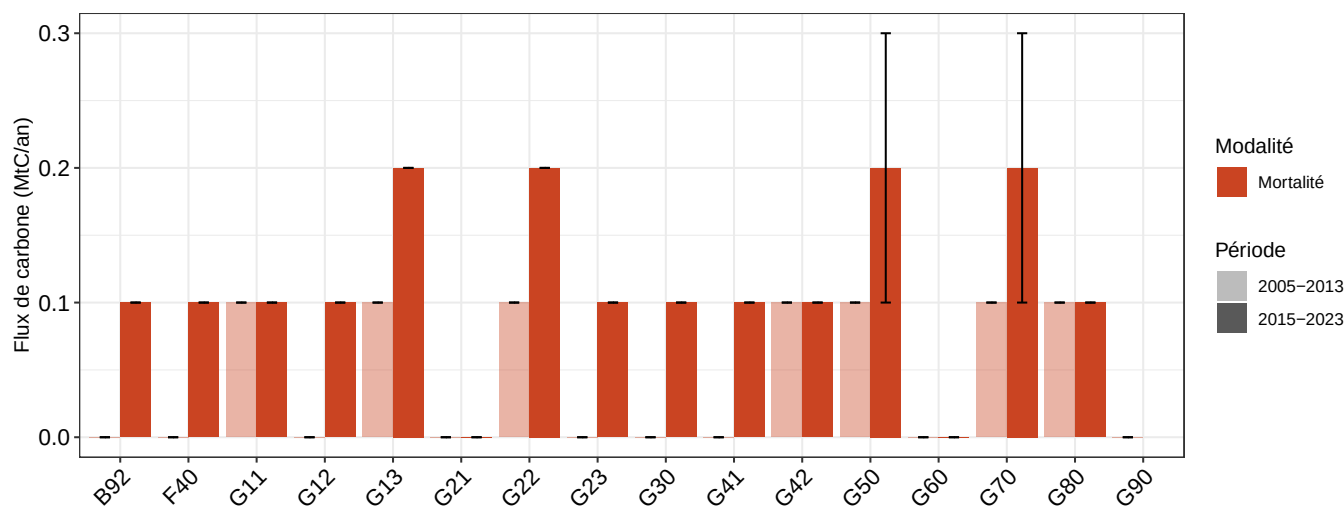


Figure 18: Evolution du flux de carbone associé à la mortalité entre les périodes 2005-2013 et 2015-2023 dans les sylvécorégions de la zone d'étude

La mortalité en forêt a fortement augmenté ces dernières années, le volume de bois mort sur pied passant de 119 millions de m³ en 2013 à 159 million de m³ en 2024. La mortalité récente (moins de 5 ans) explique principalement cette augmentation car elle a doublé au cours de la dernière décennie, à cause des épisodes de sécheresse successifs combinés aux agressions biotiques (encr, scolyte, chalarose, etc.). Le volume de bois mort sur pied de plus de cinq ans est plutôt stable. Ces tendances se reflètent à l'échelle de la GRECO G : la mortalité récente est en constante

6 EVOLUTION DES FLUX DE CARBONE

augmentation depuis 2015. Elle est relativement stable pour certaines essences comme les chênes, le Douglas et l'épicéa mais est en nette progression pour le châtaignier, le pin sylvestre et le sapin pectiné. Certaines SER, comme la G22 et la G70 accusent une augmentation de la mortalité plus importante dans le pin sylvestre et le sapin pectiné pour la première et dans le châtaignier pour la seconde. Ce volume de bois mort sur pied récent constitue également un stock de carbone en forêt, qui est cependant voué à fluctuer à cause de la décomposition du bois mort.

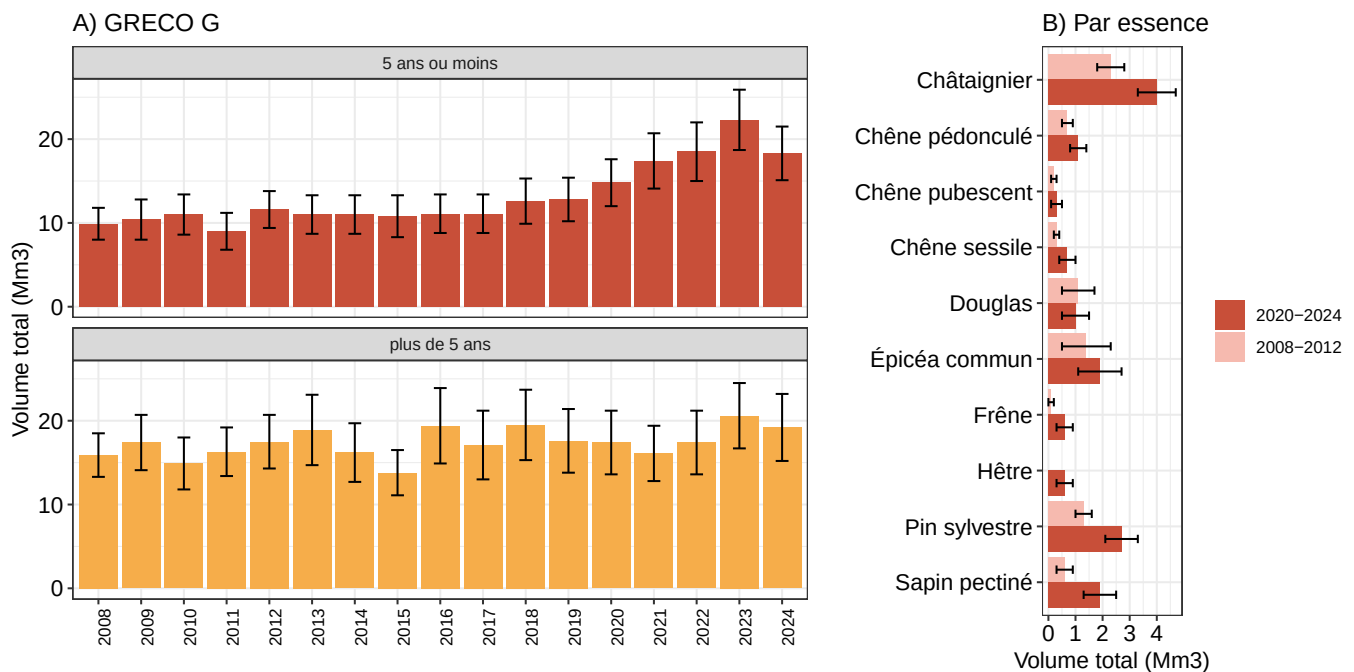


Figure 19: Evolution du volume total de bois mort sur pied récent (moins de 5 ans) et ancien

6.4 Prélèvements

A l'instar de la GRECO *Massif central*, le flux de carbone généré par les prélèvements n'a pas évolué de façon significative entre les deux périodes au sein des SER. On observe par ailleurs une forte variabilité entre les SER et des intervalles de confiance assez larges sur cette composante du bilan. Cela peut s'expliquer par la difficulté d'évaluer avec précision le volume de bois prélevé en forêt. Bien que l'inventaire forestier national s'appuie sur un échantillonnage systématique, il a du mal à capter l'intégralité de la récolte (en particulier l'autoconsommation et le bois rond).

7 LES RISQUES ASSOCIÉS AUX PEUPELEMENTS FORESTIERS DU MASSIF CENTRAL

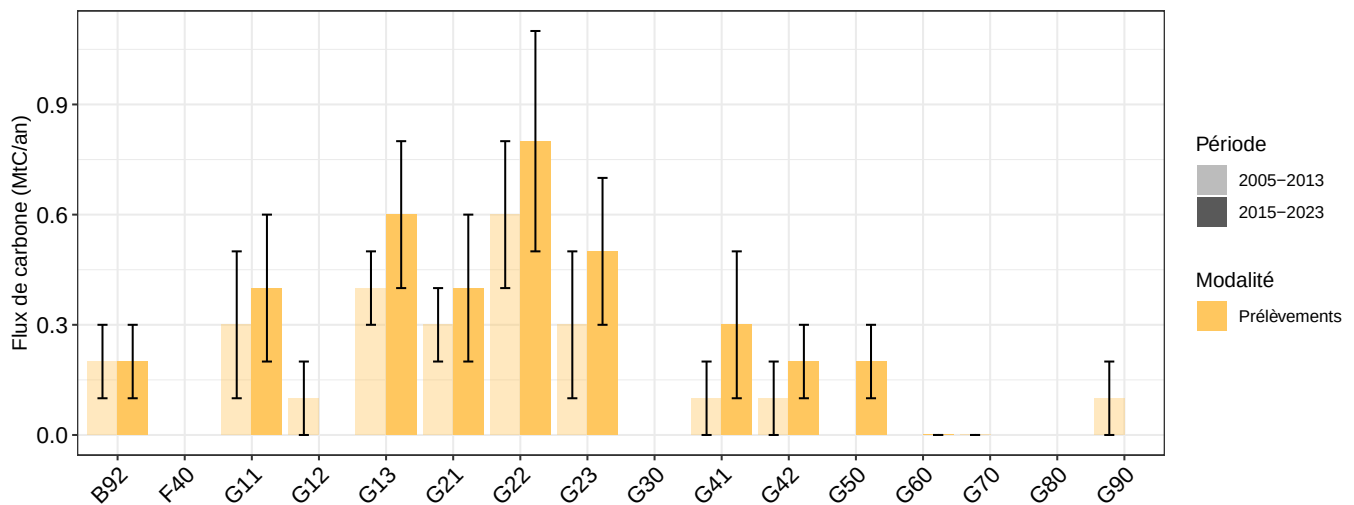


Figure 20: Evolution du flux de carbone associé aux prélèvements entre les périodes 2005-2013 et 2015-2023 dans les sylvécorégions de la zone d'étude

7 Les risques associés aux peuplements forestiers du Massif Central

Les peuplements forestiers du Massif Central, et par extension le réservoir et le puits de carbone sont exposés à des risques naturels biotiques et abiotiques qui peuvent être amplifiés par le changement climatique.

7.1 Une dynamique de dépérissement accélérée par le changement climatique

Comme abordé plus haut, un certain nombre d'essences sont fragilisées par les épisodes successifs de sécheresse et de canicule qui les rendent sensibles à des ravageurs de faiblesse. Les derniers rapports de suivi du Département de la santé des forêts (DSF) font état de crises sur de multiples essences (scolytes sur le sapin et l'épicéa, dépérissement du sapin pectiné, rougissement du pin sylvestre, chalarose du frêne, encre du châtaignier, etc.). L'explosion de la mortalité récente dans les relevés de l'inventaire traduit cette sensibilité accrue des peuplements.

7.2 Les tempêtes

Les impacts des tempêtes historiques de 1999, et dans une moindre mesure de 2009, sur le stock de carbone forestier et le puits sont bien visibles dans les inventaires réalisés par le CITEPA (Citepa 2026). Ces événements réduisent temporairement le stock de carbone sur pied, mais aussi le puits : ce dernier est passé de -39.4 MtCO₂ eq en 1999 à -23.1 MtCO₂ eq en 2000, en France, d'après les estimations du CITEPA. On estime par ailleurs la réduction du puits de carbone causée par le passage de *Lothar* à 16 MtC à l'échelle de l'Europe (Lindroth et al. 2009). Les effets du passage de *Lothar* et *Martin* en 1999 ont été contrebalancés dans les années qui ont suivi, notamment grâce à une forte dynamique de reboisement.

7 LES RISQUES ASSOCIÉS AUX PEUPELEMENTS FORESTIERS DU MASSIF CENTRAL

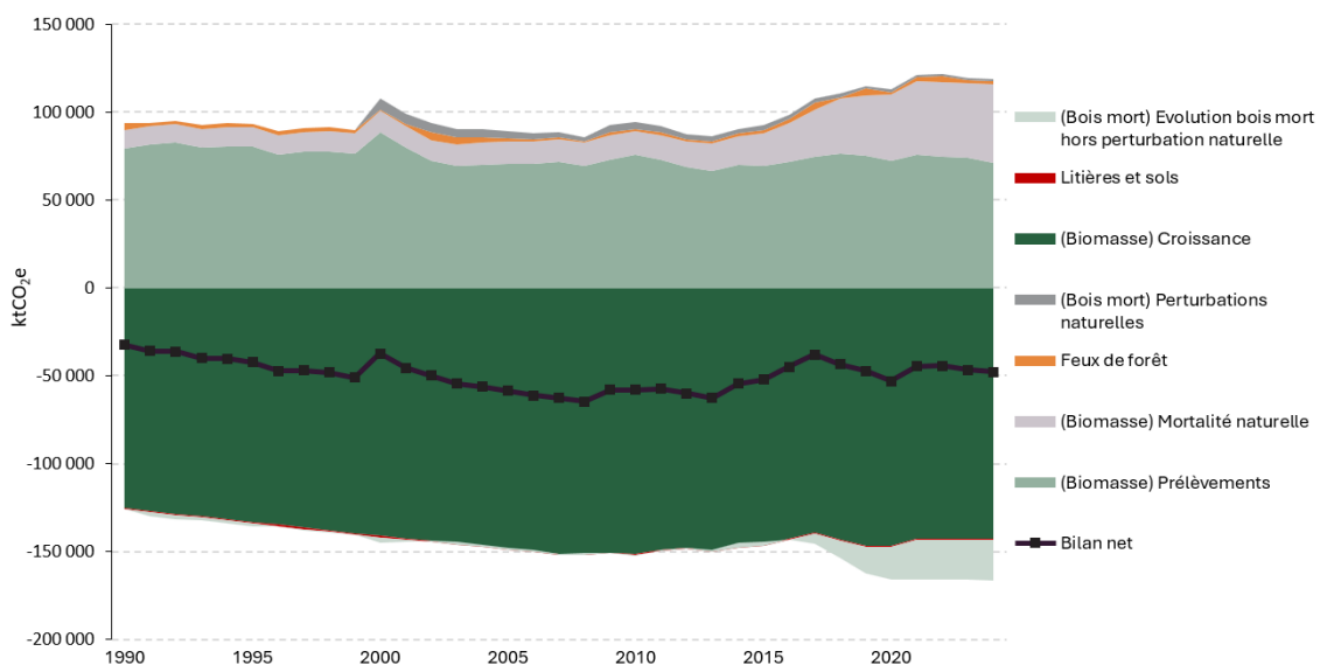


Figure 21: Bilan net pour le sous-secteur forêt de l'UTCATF, France hexagonale uniquement, en kt CO₂e (Source : CITEPA, 2026)

7.3 Un risque incendie accru

Au cours des dernières décennies, la saison des feux s'est étendue et la fréquence des incendies a augmenté à l'échelle mondiale, et le régime de feux est particulièrement sensible au changement climatique Grünig, Seidl, and Senf (2023).

Au delà de la perte nette de superficie forestière, les incendies affectent les réservoirs de carbone et constituent des sources d'émissions de gaz à effet de serre non négligeables. Les émissions mondiales liées aux feux de forêts auraient ainsi augmenté de 60% entre 2001 et 2023 (Jones et al. 2024). En France, plusieurs incendies exceptionnels de par leur surface et leur sévérité ont marqué les dernières années. Les incendies de Landiras et de la Teste-de-Buch en 2022 ont touché plus de 18 000 ha et dégagé près de 4.9 MtCO₂, ce qui représente plus de la moitié des émissions annuelles de gaz à effet de serre de la Gironde (Jalabert, Martel, and Pétillon 2023). Les émissions liées à la combustion de biomasse souterraine, souvent négligées, viennent alourdir le bilan. Une étude des émissions liées à la saison de feux de 2022 en France a abouti à un bilan de 6.15 MtCO₂ (±2.65 MtCO₂) émises, dont 55% seraient issues de la biomasse souterraine (Vallet et al. 2025). A cela s'ajoutent les émissions de monoxyde de carbone dont 84% seraient également issues de la combustion de biomasse souterraine. L'étude montre également que la combustion couvante, observée sur les sols tourbeux, présentant des dépôts de lignite superficiels est responsable de niveaux d'émissions plus élevés. Au total, la saison de 2022 aurait généré 7.95 MtCO₂ (±3.62 MtCO₂), réduisant de 30% le puits de carbone forestier cette année là.

Les forêts du Massif Central sont également concernées par le risque incendie. Les départements de la Drôme et de l'Ardèche sont identifiés comme comportant des massifs forestiers particulièrement exposés. A cela s'ajoutent des "nouveaux territoires de feu" (l'Ain, le Cantal, l'Isère, la Haute-Loire et le Rhône), et des territoires d'extension future (l'Allier, le Puy-de-Dôme, la Savoie et la Haute-Savoie). Au delà de la perte nette de surface forestière, les incendies sont également des sources d'émission de carbone importantes.

Conclusion

Le Massif Central constitue un réservoir de carbone conséquent pour le territoire métropolitain puisqu'il concentre près de 19% du carbone stocké dans les arbres vivants. Le stock de carbone organique du sol y est également très important, en particulier dans les zones d'altitude boisées, et dans les sols volcaniques comme les andosols. Toutefois les niveaux de séquestration sont variables d'une sylvoécocorégion à l'autre, ce qui s'explique par les conditions pédosylvoclimatiques et par l'historique sylvicole de la région.

Bien que le stock de carbone continue d'augmenter, le Massif Central n'est pas épargné par la baisse du puits de carbone forestier observée à l'échelle nationale. Cette diminution du puits s'explique principalement par une hausse de la mortalité. La mortalité récente (moins de cinq ans) a particulièrement augmenté ces dernières années et traduit notamment les crises sanitaires qui affectent certaines essences comme le châtaignier, le sapin pectiné et le pin sylvestre. L'épicéa est également touché mais les niveaux de mortalité, bien qu'élevés, sont stables.

La dégradation du puits de carbone forestier est le résultat de la détérioration des conditions climatiques, des crises sanitaires graves, mais aussi de phénomènes météorologiques plus fréquents et plus extrêmes (incendies, tempêtes, etc.).

La diversification des approches et le développement de sylvicultures adaptatives deviennent essentielles pour permettre de limiter les impacts du changement climatique et accélérer l'adaptation des forêts. Les initiatives comme MC4CO2 ont ainsi un rôle important à jouer dans l'accompagnement des propriétaires, en favorisant la vulgarisation et la diffusion des connaissances, et en soutenant les dispositifs expérimentaux.

Bibliographie

- Citepa. 2026. "Rapport Secten – Emissions de Gaz à Effet de Serre Et de Polluants Atmosphériques 1990-2025."
- Figueres, Soisick. 2019. "Assessment of Carbon Storage Potential in Old-Growth Pyrenean Forests." Rapport de stage de fin d'étude. INRAE.
- Grimault, Julia. 2015. "Projet Voluntary CARbon Land Certification (VOCAL)." *I4CE*. <https://www.i4ce.org/projet/projet-voluntary-carbon-land-certification-vocal/>.
- Grünig, Marc, Rupert Seidl, and Cornelius Senf. 2023. "Increasing Aridity Causes Larger and More Severe Forest Fires Across Europe." *Global Change Biology* 29 (6): 1648–59. <https://doi.org/10.1111/gcb.16547>.
- IGN. 2012. "GRECO G - Massif Central." https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/GRECO_G.pdf.
- . 2013a. "Fiches Descriptives Des Grandes Régions Écologiques (GRECO) Et Des Sylvoécorégions (SER) - INVENTAIRE FORESTIER." <https://inventaire-forestier.ign.fr/?article773>.
- . 2013b. "Sylvoécorégion F40 Causses Du Sud-Ouest." <https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/F40.pdf>.
- . 2013c. "Sylvoécorégion G13 Plateaux Limousins." https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/G_13.pdf.
- . 2013d. "Sylvoécorégion G60 Grands Causses." https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/G_60.pdf.
- . 2025. "Cartographie 3D France Entière Par LiDAR - Institut - IGN." *Institut Géographique National*. <https://www.ign.fr/institut/programme-lidar-hd-vers-une-nouvelle-cartographie-3d-du-territoire>.
- Jalabert, Stéphanie, Simon Martel, and Thomas Pétilon. 2023. "Première Quantification de l'impact Carbone Des Feux de l'été 2022 En Gironde," no. 3.
- Jolly, W. Matt, Mark A. Cochrane, Patrick H. Freeborn, Zachary A. Holden, Timothy J. Brown, Grant J. Williamson, and David M. J. S. Bowman. 2015. "Climate-Induced Variations in Global Wildfire Danger from 1979 to 2013." *Nature Communications* 6 (1): 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>.
- Jones, Matthew W., Sander Veraverbeke, Niels Andela, Stefan H. Doerr, Crystal Kolden, Guilherme Mataveli, M. Lucrecia Pettinari, et al. 2024. "Global Rise in Forest Fire Emissions Linked to Climate Change in the Extratropics." *Science* 386 (6719): eadl5889. <https://doi.org/10.1126/science.adl5889>.
- Lindroth, Anders, Fredrik Lagergren, Achim Grelle, Leif Klemetsson, Ola Langvall, Per Weslien, and Janno Tuulik. 2009. "Storms Can Cause Europe-wide Reduction in Forest Carbon Sink." *Global Change Biology* 15 (2): 346–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01719.x>.
- Martin, Manuel. 2019. "La Carte Nationale Des Stocks de Carbone Des Sols Intégrée Dans La Carte Mondiale de La FAO." *Gis Sol*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15454/JCONRJ>.
- Morin, David, Milena Planells, Stéphane Mermoz, and Florian Mouret. 2024. "Estimation of Forest Height and Biomass from Open-Access Multi-Sensor Satellite Imagery and GEDI Lidar Data: High-Resolution Maps of Metropolitan France." *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8071003>.
- Munera-Echeverri, Jose Luis, Line Boulonne, Nicolas Saby, Dominique Arrouays, and Manuel Martin. 2025. "Statistiques d'évolution Des Stocks de Carbone Organique Des Sols Français Selon Le Réseau de Mesures de La Qualité Des Sols: Premiers Résultats." Genève, Suisse. <https://hal.science/hal-05291606v1>.
- Pellerin, Sylvain, and Laure Bamière. 2019. "Stocker Du Carbone Dans Les Sols Français : Quel Potentiel Au Regard de l'objectif 4 Pour 1000 Et à Quel Cout ?" INRAE. https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf.
- Planells, Milena. 2024. "Suivi Des Forêts Par Satellite." Ademe.
- Schwartz, Martin, Philippe Ciais, Aurélien De Truchis, Jérôme Chave, Catherine Ottlé, Cedric Vega, Jean-Pierre Wigneron, et al. 2023. "FORMS: Forest Multiple Source Height, Wood Volume, and Biomass Maps in France at 10 to 30 m Resolution Based on Sentinel-1, Sentinel-2, and GEDI Data with a Deep Learning Approach." *ESSD – Land/Land Cover; Land Use*. <https://doi.org/10.5194/essd-2023-196>.
- Vallet, Lilian, Charbel Abdallah, Thomas Lauvaux, Lilian Joly, Michel Ramonet, Philippe Ciais, Morgan Lopez, Irène Xueref-Remy, and Florent Mouillot. 2025. "Soil Smoldering in Temperate Forests: A Neglected Contributor to Fire Carbon Emissions Revealed by Atmospheric Mixing Ratios." *Biogeosciences* 22 (1): 213–42. <https://doi.org/10.5194/bg-22-213-2025>.



Pour en savoir plus

Projet Forêts & Carbone Massif central (MC4CO2)

Retrouvez la présentation du projet, ses objectifs et ses actions : www.cnpf.fr/mc4co2

Contact : **Justine Husson – Coordinatrice du projet**

Mail : justine.husson@cnpf.fr

Institut pour le développement forestier (IDF) - service de Recherche, Développement et Innovation (RDI) du CNPF

Découvrez les missions du service : <https://www.cnpf.fr/le-cnpf-et-la-foret-privee/organisation-du-cnpf/l-idf-et-la-rd-le-service-de-recherche-et>



Avec la participation de

