

# Evaluation de l'effet carbone des principaux itinéraires sylvicoles en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Séquestration dans les peuplements,  
évaluation du stockage dans les produits bois et  
effet de substitution

Décembre 2023





Intitulé de l'étude :

Evaluation de l'effet carbone des principaux itinéraires sylvicoles en Provence-Alpes-Côte d'Azur  
Séquestration dans les peuplements, évaluation du stockage dans les produits bois et effet de substitution

Maître d'ouvrage :

Région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur  
Direction de l'Agriculture, de la forêt et de l'Eau  
Service Agriculture et Forêt  
Hôtel de Région – 27 place Jules Guesde – 13481 Marseille CEDEX 20

Structure de réalisation :

OFFICE NATIONAL DES FORÊTS, Direction territoriale Midi-Méditerranée  
Pôle Ingénierie Financière et Environnement  
505 rue de la Croix Verte - CS 74208 - 34094 MONTPELLIER cedex 5

Auteure de l'étude :

Léa ROMAIN, Chargée de mission du pôle Ingénierie Financière et Environnement

Appui technique :

Benoit LARROQUE, Responsable du pôle Ingénierie Financière et Environnement  
Salomé FOURNIER, Chargée de recherche et développement au réseau Recherche Développement et Innovation (RDI) de l'ONF pour la production des fiches synthétiques par essences, et aide à la construction de l'outil de calcul.  
Christine DELEUZE, Directrice de projet « stratégie carbone » au réseau Recherche Développement et Innovation (RDI) de l'ONF pour la construction de l'outil de calcul et son utilisation.  
Nicolas CHERON, Adjoint au responsable commercial bois de la Région Sud PACA pour la valorisation des produits bois régionaux.

Référence à utiliser :

ONF, 2023. Evaluation de l'effet carbone des principaux itinéraires sylvicoles en Provence-Alpes-Côte d'Azur – Séquestration dans les peuplements, évaluation du stockage dans les produits bois et effet de substitution. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 33p + annexes.



# Table des matières

<b>I. Place de la forêt dans le cycle du carbone .....</b>	<b>1</b>
A. Rôle global des forêts dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre .....	1
1. Contexte mondial : puits ou sources de carbone.....	1
2. Le carbone forestier en France.....	2
B. La forêt et le carbone .....	3
C. Focus sur l'usage du bois.....	4
<b>II. Continuité du travail réalisé sur la séquestration carbone des peuplements : rappel des travaux 2021-2022.....</b>	<b>6</b>
<b>III. Etude 2023 : Stockage carbone dans les produits bois et effet de substitution en région Sud ..</b>	<b>8</b>
A. Méthode de construction et hypothèses de calculs .....	9
1. Séquestration du carbone dans le peuplement juvénile .....	9
2. Stockage du carbone dans les produits bois .....	9
3. Calcul de l'effet de substitution .....	13
B. Focus sur l'effet carbone des produits bois du pin d'Alep et du pin noir en région Sud .....	15
1. Effet carbone du pin d'Alep en F1 .....	16
2. Effet carbone du pin noir en F2.....	18
3. Des différences de séquestration selon l'essence : comparaison du pin noir F2 avec du pin sylvestre F1.....	20
C. Synthèse générale sur l'effet carbone de tous les itinéraires sylvicoles étudiés.....	22
1. Séquestration carbone dans le peuplement forestier .....	22
2. Stockage de carbone dans les produits bois .....	23
3. Effet de substitution des produits bois .....	25
4. Prise de recul sur les résultats : étude comparative avec le douglas.....	27
<b>IV. Recommandations pour conserver et améliorer la fonction carbone des forêts régionales....</b>	<b>28</b>
A. Protéger les stocks – Adapter la durée de révolution des peuplements selon le contexte.....	28
B. Maximiser les flux.....	29
1. Favoriser les filières des produits bois à plus longue durée de vie.....	29
2. Encourager le ré-usage et le recyclage des matériaux bois .....	30
<b>Conclusion .....</b>	<b>31</b>
<b>Table des figures et des tableaux .....</b>	<b>32</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>32</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>33</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>34</b>
ANNEXE I : DESCRIPTIF DES VARIABLES UTILISEES DANS LE LIVRABLE 2022 POUR LA CONSTRUCTION DU TABLEUR DE CALCUL DE SEQUESTRATION CARBONE DANS LES PEUPELEMENTS (ONF, 2022) .....	34
ANNEXE II : FICHES SYNTHESES SUR L'EFFET CARBONE DES ITINERAIRES SYLVICOLES REGIONAUX .....	38



# I. Place de la forêt dans le cycle du carbone

Avec l'adoption de son plan climat 2, la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur s'engage de manière significative dans la transition énergétique et écologique, se focalisant notamment sur la réduction substantielle de son empreinte carbone. La forêt émerge comme un instrument privilégié pour la **séquestration**, le **stockage** des émissions résiduelles et la **substitution**. Cette approche suscite un intérêt particulier parmi les propriétaires forestiers, cherchant à valoriser le service carbone fourni par la forêt, ainsi que par les acteurs économiques impliqués dans la réduction de leur empreinte carbone.

Dans le cadre d'un partenariat avec la Région Sud, l'Office National des Forêts (ONF) propose son expertise pour approfondir la compréhension de la fonction carbone (stock/flux) et identifier des orientations de sylviculture améliorante. Les travaux conduits en 2021 et 2022 ont permis de raisonner sur i) la séquestration carbone de l'écosystème forestier, en prenant en considération les itinéraires sylvicoles principaux.

L'effet global de la gestion forestière dans le cycle du carbone s'apprécie également en ii) estimant l'effet généré par le stockage dans les produits dérivés des différentes récoltes de bois ainsi qu'en iii) évaluant l'effet de substitution rendu possible par l'utilisation des produits bois en alternative à d'autres matériaux plus émissifs en carbone. Ce rapport constitue le sujet d'une étude approfondie se concentrant sur ces deux derniers points, l'évaluation de la séquestration ayant donné lieu à un travail préalable.

## A. Rôle global des forêts dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre

### 1. Contexte mondial : puits ou sources de carbone

A l'échelle mondiale, les principales causes rendant le secteur des terres émetteur net de carbone sont l'agriculture intensive et la déforestation.

D'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'Europe et l'Amérique du Nord sont les deux seuls territoires pour lesquels le bilan des émissions de gaz à effet de serre du secteur des terres est positif en 2019 (GIEC, 2022), c'est-à-dire qu'ils absorbent plus de CO<sub>2</sub> qu'ils n'en n'émettent (absorption 'nette' de CO<sub>2</sub>).

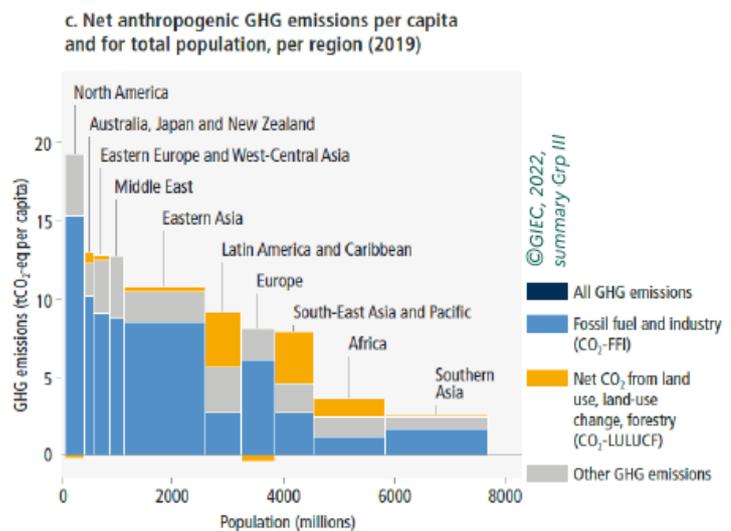


Figure 1 : Emissions nettes des gaz à effet de serre par continent (source : GIEC, 2022)

## 2. Le carbone forestier en France

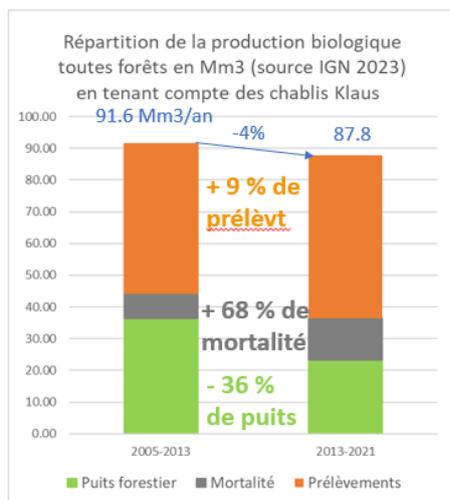


Figure 2 : Répartition de la production biologique de toutes les forêts françaises en Mm3, avec les chablis de Klaus. Nathalie Derrière (source : © IGN 2023)

Au cours du siècle dernier, la forêt française a connu une expansion exceptionnelle, avec une augmentation de plus de 50% de sa superficie et un doublement du volume des arbres sur pied. Cette croissance remarquable toujours en cours explique en grande partie le potentiel du puits forestier français aujourd'hui.

Néanmoins, ce puits de carbone est particulièrement vulnérable aux incidents tels que les tempêtes, les incendies et les dépérissements. Une récente tendance à la baisse de la croissance et à l'augmentation des crises est observée, comme indiqué par l'IGN en 2023. La figure 1 illustre une augmentation des prélèvements de 9% entre les périodes 2005-2013 et 2013-2021. Cela s'explique en partie par les récoltes sanitaires.

L'analyse de l'évolution du puits de carbone forestier se fait sur un temps long pour une meilleure prise en compte des dynamiques de puits/sources qui « dépendent de nombreux facteurs conjoncturels (crises) et structurel (âge des peuplements) » (Observatoire des forêts françaises, 2023). En 2021, 2 des 13 régions françaises sont émettrices de carbone via leur forêt : le Grand Est et les Hauts de France. Le puits forestier de la région Sud PACA se classe au troisième rang à l'échelle nationale (cf. figure 3). Ce type de données est intéressant à analyser sur un pas de temps de plusieurs années pour dégager de réelles tendances.

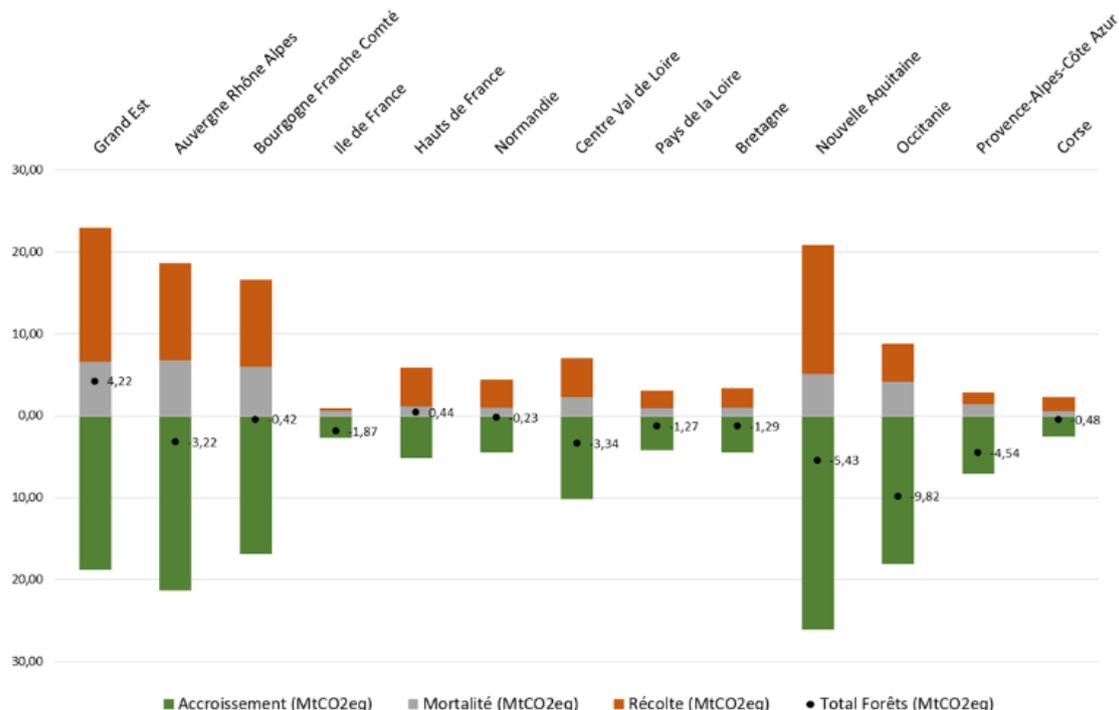


Figure 3 : Principales composantes du puits forestier par région, en 2021 (en MtCO2eq) (source : Observatoire des forêts française 2023)

## B. La forêt et le carbone

Le carbone est engagé à l'échelle du globe dans un i) cycle **long** retraçant les variations de CO<sub>2</sub> atmosphérique provoquées par les grands processus géodynamiques comme la subduction, le volcanisme et la formation de chaînes de montagne, ainsi que les grands changements dans l'évolution de la biosphère. Cette étude permet de réfléchir aux échanges et stockage de carbone selon ii) un cycle plus « **court** » qu'est celui de la matière organique. Il a toute son importance dans les réflexions liées au changement climatique et participe à plus large échelle temporelle à amender le cycle « long » du carbone.

La filière forêt-bois est impliquée sur 3 leviers du cycle du carbone :

- La **séquestration**, c'est-à-dire le pouvoir des arbres à absorber le carbone par la photosynthèse et à en maintenir une partie dans leur bois ;
- Le **stockage** dans les produits bois à plus ou moins longue durée de vie, soit leur capacité à garder ce carbone. Un arbre transformé (valorisé par exemple pour de la construction ou des meubles) renferme un stock de carbone à moyen-long terme. La charpente de la cathédrale de Notre-Dame de Paris a par exemple stocké du carbone pendant 800 ans ;
- La **substitution** : le bois est une ressource naturelle et renouvelable qui peut, pour certains usages, être utilisée à la place de matériaux ou de sources d'énergie plus énergivores ou d'origine fossile comme le plastique, l'aluminium, l'acier ou le pétrole. Lorsqu'on utilise un matériau ou une ressource énergétique plus économe en émissions de carbone par « substitution » à d'autres matériaux ou énergie, on parle d'émissions évitées.

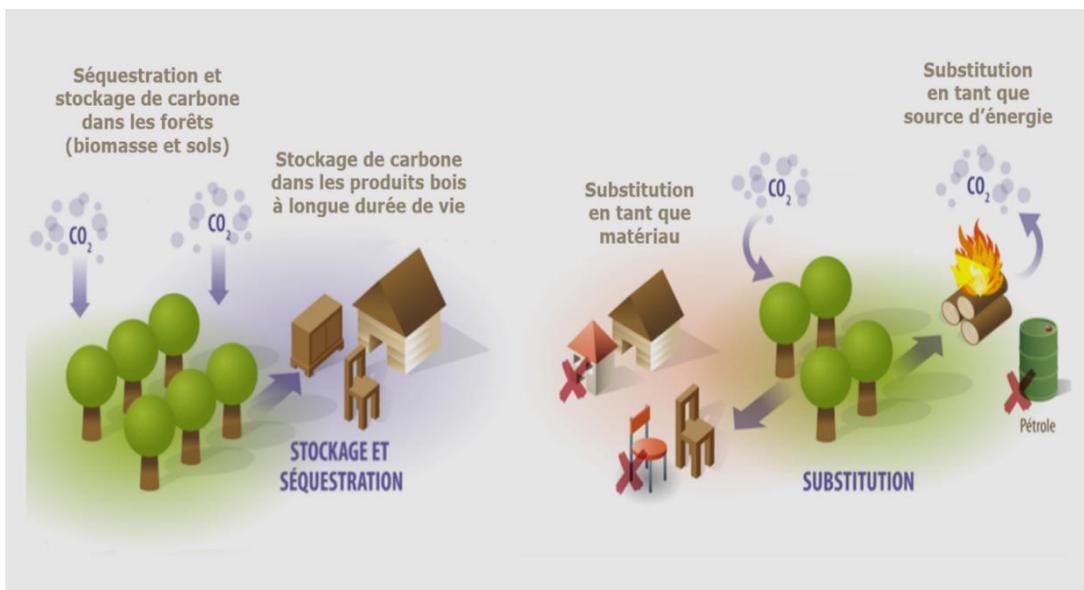


Figure 4 : Illustration de la séquestration, du stockage et de la substitution carbone appliqués à l'écosystème forestier

Les arbres stockent du carbone tout au long de leur cycle de vie.

Face à un contexte d'incertitude, le gestionnaire forestier doit veiller à une bonne adaptation de la forêt vis-à-vis du changement climatique. Par exemple, pour la plantation, le choix des essences influence la capacité de la « pompe carbone ».

Le premier facteur à considérer pour maximiser la capacité d'une essence à capter du carbone sur le long terme est son adaptation à la station en environnement changeant en s'assurant autant que faire se peut de sa compatibilité avec les conditions climatiques à venir.

Les **sols forestiers** revêtent également un enjeu majeur car ils contiennent les plus importantes réserves de carbone en comparaison aux autres types de sol (artificialisés, vignes, vergers et cultures ...etc.). La dynamique de cumul carbone dans un sol est très lente mais la dynamique de perte peut-être rapidement accélérée lors du renouvellement forestier ou des récoltes de crises. Des méta-analyses ont permis d'identifier les pressions agissant directement sur les sols forestiers (tassement des machines, coupes rases, exports des menus bois, travail en plein dans les régénérations naturelles ...etc.). Devant l'enjeu de limitation des émissions, la conservation du carbone du sol est importante.

Cette étude fait l'hypothèse que toutes les précautions connues actuellement pour la préservation du carbone du sol sont prises en compte. L'incertitude nationale sur la capacité réelle du sol à séquestrer du carbone et l'absence de données « RENECOFOR<sup>1</sup> » en région Sud ne nous permettent pas de comptabiliser précisément les stocks de carbone de ce compartiment.

### C. Focus sur l'usage du bois

La sylviculture amène le forestier à couper du bois plusieurs fois dans la vie d'un peuplement. Considérant que le peuplement suit une dynamique de croissance classique et ne subit aucune attaque sanitaire ou risque naturel, il est possible d'effectuer les opérations sylvicoles comme suit en contexte méditerranéen : dans un premier temps un dépressage<sup>2</sup>, puis selon la fertilité du peuplement 2 à 5 coupes d'éclaircie. S'en suit la coupe d'ensemencement, et environ 10 ans après la coupe définitive, clôturant ainsi le cycle sylvicole.

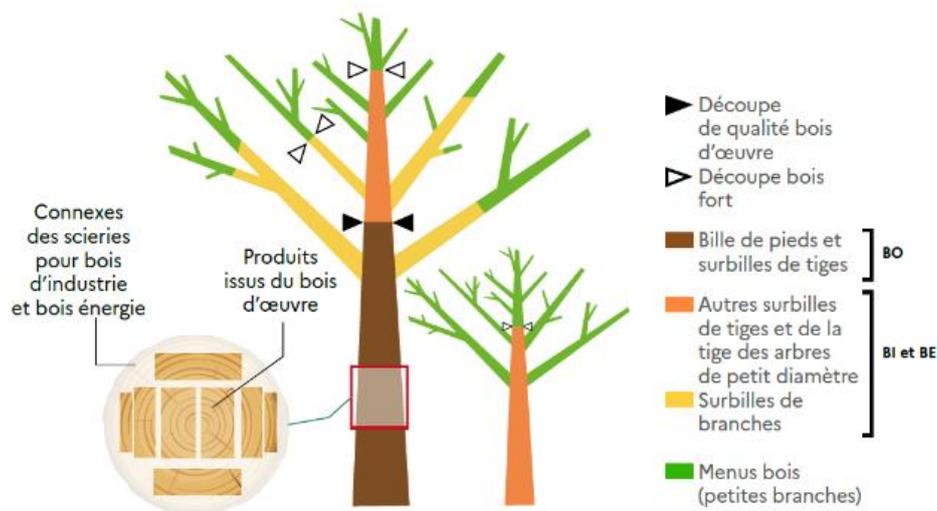
Chaque coupe engendre un export de bois en dehors de l'écosystème forestier, signifiant aussi un export du stock de carbone (ou « dette » carbone vis-à-vis du peuplement). Il est directement transféré dans un nouveau « système » : celui des produits bois. Il est nécessaire d'appréhender les points relatifs à chacun de ces systèmes en visant une certaine forme d'équilibre global.

Plusieurs avenir sont envisageables pour chaque produit selon l'essence, puis selon les singularités du bois : diamètre (directement dépendant de l'âge d'exploitation et de la fertilité), nombre de nœuds, altération biologique, essence, ... etc. Le facteur « essence » est prépondérant, il donne une première indication sur le devenir des produits avant même de voir un peuplement croître. Le facteur « filière » intervient aussi, dépendant des capacités de transformation locales, un sapin sera utilisé comme BE plutôt que BI papier (dire d'expert, N. Chéron).

---

<sup>1</sup> RENECOFOR est un réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

<sup>2</sup> Opération consistant à desserrer, à réduire la densité des semis ou des plants pour accroître la croissance et la vigueur du jeune peuplement. Contrairement aux éclaircies, on n'exporte pas ni ne commercialise le bois coupé.



Infographie réalisée par l'ADEME

Figure 5 : Récolte et usage du bois (source : ADEME, 2021)

On distingue 3 usages possibles pour les grumes de bois :

- Le **bois d'œuvre (BO)**, bois qui n'est ni dégradé ni déchiqueté (charpente, traverses de chemin de fer, ...etc.), utilisé par les métiers manuels tels que la menuiserie et la tonnellerie ;
- Le **bois d'industrie (BI)**, destiné à la production d'emballage, d'ameublement ou destiné à la trituration (panneau et papier) ;
- Le **bois d'énergie (BE)**, qui est utilisé à des fins énergétiques pour produire de la chaleur (ou potentiellement de l'électricité par cogénération).

Tout comme l'écosystème forestier, les produits bois sont un réservoir de carbone. La durée de vie du carbone dépend directement de l'usage des produits : le bois transformé en pellets existe moins longtemps dans notre environnement que le bois utilisé pour une charpente. Lorsque le bois énergie est brûlé pour produire de la chaleur, le carbone qu'il stockait est relargué dans l'atmosphère.

On peut conclure que les durées de vie des différents produits bois s'organisent ainsi :

**Construction > Ameublement > Emballage > Papier/Carton > Energie**

On observe dans la littérature que la durée de vie moyenne du BE est 20 à 50 fois inférieure à celle du BO.

Par ailleurs, il est encore aujourd'hui difficile d'estimer précisément la durée de vie du carbone dans chacun des réservoirs (forestier, produits bois, sol, océans ...). Elle dépend de plusieurs facteurs : l'usage principal, la dégradation, ou le recyclage du produit. Plusieurs chercheurs travaillent à préciser des « schémas de filière<sup>3</sup> » et les valeurs de durée de vie moyenne restent encore variables selon les sources. Les données sur lesquelles nous nous sommes appuyées restent donc incertaines. Pour pallier ces incertitudes, plusieurs valeurs théoriques pour un même produit sont sélectionnées couvrant un large intervalle des valeurs existantes.

<sup>3</sup> Modèle représentatif des flux de l'amont de la filière forêt-bois, jusqu'à l'aval avec la prise en compte des différentes étapes de billonnage.

## II. Continuité du travail réalisé sur la séquestration carbone des peuplements : rappel des travaux 2021-2022

Un rapport méthodologique et 14 fiches synthétiques ont été produits en 2022 afin d'évaluer les capacités de **séquestration de certains peuplements** concernant tout particulièrement la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Les 14 itinéraires étudiés sont les suivants :

- ✓ Le sapin pectiné en fertilités 1 et 2 (F1 et F2)<sup>4</sup> ;
- ✓ Le pin sylvestre en F1 et F2 ;
- ✓ Le pin noir en F1 et F2 ;
- ✓ Le pin d'Alep en F1 et F2 ;
- ✓ Et le cèdre de l'Atlas en F2, F3 et F4 selon 2 densités de plantation : 1 100 plants/ha et 1 600 plants/ha.

*Rappel : Les modélisations de croissance s'appuient sur des itinéraires conduits en futaie régulière.*

Les fiches synthétiques 2022 décrivent plus précisément l'itinéraire sylvicole dans leur en-tête.

A la différence des autres essences étudiées dont les modèles de croissance sont issus des guides de sylviculture relatifs à la région Sud (Guide de sylviculture de Montagne des Alpes du Sud et mémento sylvicole Pinède de pin d'Alep), le cèdre de l'Atlas est étudié au travers du guide national – faute de ne pas avoir de référentiel local.

La liste des variables utilisées pour les calculs de séquestration est rappelée en annexe I ci-dessous.

À l'heure actuelle, les spécialistes de l'ONF se consacrent à améliorer la précision des modèles de croissance du mélèze d'Europe et du chêne vert. L'évaluation de la fonction carbone de ces deux espèces pourra être envisagée ultérieurement.

### → Contenu des abaques

Pour chaque itinéraire, il est précisé dans l'en-tête des abaques : l'essence, la fertilité, l'origine des graines (plantation ou régénération naturelle), la densité et le guide sylvicole utilisé.

Deux graphiques s'ensuivent et décrivent 1) la courbe de séquestration du carbone et 2) le flux du carbone dans le peuplement au cours de son cycle de production.

Enfin, le tableau regroupant les principales variables dendrométriques, d'éclaircies et de comptabilité carbone figure en conclusion de fiche. Un exemple pour le sapin pectiné en F1 est présenté ci-dessous.

---

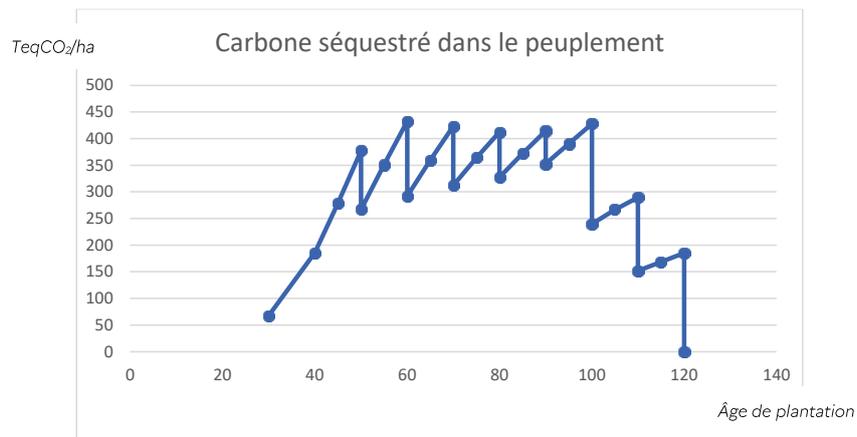
<sup>4</sup> La classe de fertilité d'un peuplement se définit par la hauteur dominante (hauteur des 100 plus grosses tiges par hectare) à un âge de 50 ans (âge de la souche).

## Abaques déclinés par essences et fertilité

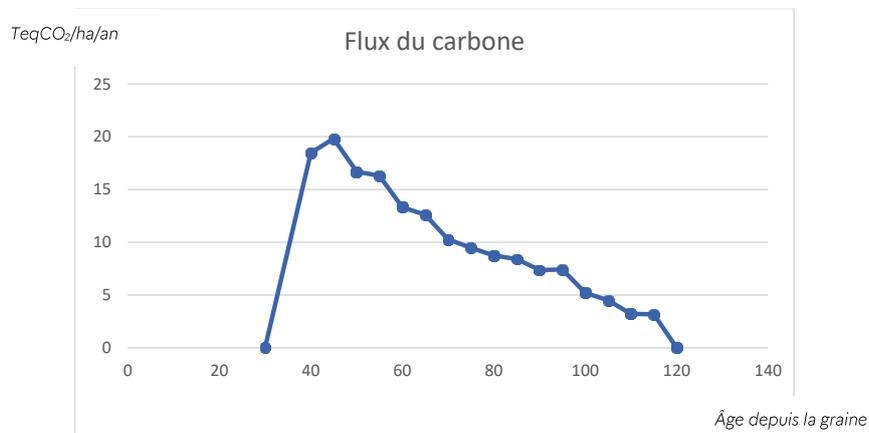
### Fiche synthétique pour le Sapin pectiné, en fertilité 1

Sapin pectiné (*Abies alba*), pour une plantation à une densité de 1 600 plants / ha sur une station en fertilité 1, en cohérence avec le Guide de sylviculture de Montagne Alpes du sud.

Graphique 1 : Carbone séquestré dans une plantation de sapin en fertilité 1



Graphique 2 : Flux du carbone une plantation de sapin en fertilité 1



Fiches réalisées dans le cadre de la convention ONF/Région Sud Axe carbone années 2021-2022 à partir des tables dendrométriques du réseau Recherche, Développement et Innovation de l'ONF.

Age (années)	Coupe (1 = avant, 2 = après)	hauteur dominante (m)	densité	surface terrière	diamètre moyen	volume total	production totale	accroissmt moyen	accroissmt courant	vol. tot. récolté	stock carbone aérien	stock carbone racinaire	Stock carbone total	carbone récolté	flux annuel carbone
30	1	NA	NA	NA	NA	80.51	NA	NA	NA	NA	53.28	16.49	69.77	NA	NA
70	1	16.99	2299	46.07	15.97	411.1	411.1	5.87	14.5	NA	272.08	69.65	341.73	NA	11.75
75	1	17.48	2240	52.93	17.35	483.6	483.6	6.45	9.62	NA	320.06	80.39	400.46	NA	7.77
75	2	17.41	877	23.03	18.28	215.58	483.6	6.45	9.62	268.02	142.68	39.37	182.05	177.38	7.77
80	1	17.83	867	27.66	20.15	263.7	531.71	6.65	9.22	NA	174.52	47.04	221.57	NA	7.43
85	1	18.16	855	31.99	21.83	309.79	577.81	6.8	9.23	NA	205.03	54.24	259.27	NA	7.43
90	1	18.47	844	36.24	23.38	355.94	623.96	6.93	9.44	NA	235.58	61.32	296.9	NA	7.59
95	1	18.75	838	40.54	24.82	403.15	671.17	7.06	7.53	NA	266.82	68.45	335.27	NA	6.05
95	2	18.75	515	27.12	25.89	275.61	671.17	7.06	7.53	127.54	182.41	48.92	231.33	84.41	6.05
100	1	18.98	512	30.49	27.53	313.28	708.83	7.09	7.06	NA	207.34	54.78	262.12	NA	5.66
105	1	19.18	505	33.57	29.09	348.6	744.15	7.09	6.3	NA	230.71	60.2	290.92	NA	5.05
110	1	19.34	499	36.35	30.45	380.11	775.67	7.05	6.51	NA	251.57	64.99	316.56	NA	5.21
115	1	19.49	493	39.17	31.8	412.67	808.23	7.03	5.32	NA	273.12	69.88	343	NA	4.26
115	2	19.46	359	29.13	32.14	310.19	808.23	7.03	5.32	102.48	205.29	54.3	259.6	67.83	4.26
120	1	19.59	355	31.43	33.57	336.81	834.85	6.96	4.09	NA	222.91	58.4	281.31	NA	3.27
125	1	19.67	345	33.12	34.96	357.27	855.3	6.84	4.44	NA	236.45	61.52	297.97	NA	3.55
130	1	19.77	338	34.98	36.3	379.46	877.5	6.75	4.86	NA	251.14	64.89	316.03	NA	3.88
135	1	19.86	333	36.99	37.61	403.75	901.79	6.68	4.63	NA	267.22	68.54	335.76	NA	3.69
135	2	19.71	250	28.03	37.78	307.85	901.79	6.68	4.63	95.9	203.75	53.94	257.69	63.47	3.69
140	1	19.78	249	29.99	39.16	330.98	924.92	6.61	4.08	NA	219.05	57.51	276.56	NA	3.25
145	1	19.84	248	31.74	40.37	351.38	945.31	6.52	3.69	NA	232.55	60.63	293.18	NA	2.95
150	1	19.91	246	33.31	41.52	369.84	963.78	6.43	3.54	NA	244.77	63.43	308.21	NA	2.82
150	2	19.44	147	22.03	43.69	252.35	963.78	6.43	3.54	117.49	167.01	45.25	212.26	77.76	2.82
155	1	19.5	147	23.49	45.1	270.05	981.48	6.33	3.5	NA	178.73	48.04	226.77	NA	2.79
160	1	19.57	147	24.92	46.46	287.54	998.98	6.24	2.31	NA	190.31	50.78	241.09	NA	1.84
160	2	18.01	76	13.2	47.03	153.26	998.98	6.24	2.31	134.28	101.43	29.12	130.56	88.88	1.84
165	1	18.06	76	14.15	48.69	164.83	1010.54	6.12	1.72	NA	109.09	31.06	140.15	NA	1.37
170	1	18.08	75	14.85	50.21	173.43	1019.15	5.99	NA	NA	114.78	32.49	147.27	NA	NA
170	2	18.08	0	0	0	0	1019.15	5.99	NA	173.43	0	0	0	114.78	NA

### III. Etude 2023 : Stockage carbone dans les produits bois et effet de substitution en région Sud

Pour faire suite à ce travail, nous nous sommes intéressés au stockage du carbone dans les produits bois et à l'effet de substitution engendré par les mêmes itinéraires que présentés précédemment. Une nouvelle calculatrice a été construite à partir d'une trame proposée par Cédric Girardy (ONF, 2020). Les calculs sont conduits sur les 14 mêmes couples essences/classes de fertilité que ceux de l'étude 2022 centrée sur la séquestration par les peuplements.

Dans cette partie, les méthodes de calculs sont présentées puis un focus est fait sur deux essences majeures en Provence-Alpes-Côte d'Azur (pin d'Alep et pin noir avec pour cette dernière une analyse comparée au pin sylvestre). S'ensuit une synthèse générale sur l'effet carbone des 14 couples essences/fertilités retenus en région.

Les fiches synthétiques 2023 présentent les résultats de séquestration carbone dans le peuplement, de stockage carbone dans les produits bois et de l'effet de substitution pour les 14 couples essences/fertilités. De nouvelles fiches synthétiques analysent l'effet carbone de l'allongement de la durée de révolution et du bois d'industrie panneau pour le pin d'Alep en F1 et le pin noir en F2. Enfin, une dernière fiche permet de prendre du recul sur nos résultats en étudiant le douglas en F2 et en le comparant aux résultats d'une autre étude plus précise.

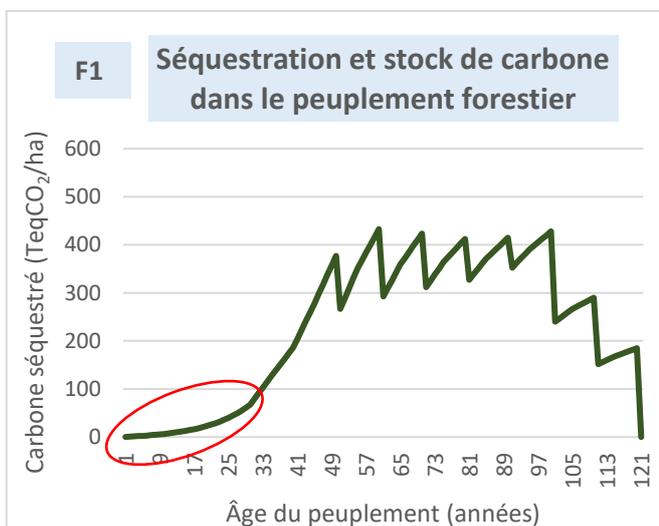
Remarque importante : Il n'est pas possible de sommer directement les trois bilans carbone (issus des compartiments séquestration/stockage/substitution) puisque dans le cas de la séquestration et du stockage il s'agit de flux physiques mesurés alors que la substitution fait référence à des calculs d'émissions évitées, relatifs à un scénario de référence. En d'autres termes, séquestration et stockage renseignent sur un effet carbone de plus ou moins longue durée alors que la substitution traduit un gain carbone définitif.

## A. Méthode de construction et hypothèses de calculs

### 1. Séquestration du carbone dans le peuplement juvénile

Pour conforter les calculs produits dans la précédente étude sur la séquestration du carbone dans le peuplement, l'étude de Fournier *et al.*, (2022) a été utilisée afin de modéliser la croissance juvénile des peuplements (de 0 à 30 ans). Le graphique correspondant voit sa première partie complétée par une courbe exponentielle qui n'existait pas dans les abaques précédents – faute de la disponibilité de l'étude Fournier *et al.* lors de la rédaction de la précédente étude.

Figure 6 : Ajout du stock de carbone séquestré pendant la phase juvénile du peuplement. Exemple sur le sapin pectiné en F1



### 2. Stockage du carbone dans les produits bois

- Les proportions de bois d'œuvre (BO), bois d'industrie (BI) et bois d'énergie (BE) des produits bois

Pour les peuplements de la région Sud, il a été choisi de découper en 4 catégories de produits les usages possibles du bois : **le BO, le BI papier, le BI panneau et le BE**. Aucune entreprise de transformation du bois en panneau n'existe localement aujourd'hui. Pour évaluer l'effet carbone potentiel d'une telle filière, une simulation de production de BI panneau sera effectuée pour les bois du pin d'Alep et du pin noir.

Le dire d'expert des spécialistes ONF du classement des bois et l'historique des ventes sont ici utilisés pour estimer le pourcentage en type de produits pour chaque itinéraire et chaque coupe. Des « fiches devenir produit bois » sont renseignées par ces experts afin de cibler l'usage des produits bois en région Sud pour chaque itinéraire concerné par notre étude.

Les références de la littérature témoignent de pertes de volume liées à l'opération de coupe pouvant s'élever jusqu'à 8%. L'hypothèse faite ici est que tout le bois est valorisé et qu'il n'y a pas de pertes liées à des coupes. Un ratio de 50% est en revanche appliqué au BO pour prendre en compte le rendement matière (les chutes lors de la transformation en bois de sciage).

#### Exemple sur le sapin pectiné en F1

La première coupe sur un peuplement de sapin pectiné en F1 est effectuée à l'âge de 50 ans. Les produits qui en résultent sont uniquement transformés en BE (100%). Les usages évoluent avec l'âge du peuplement jusqu'à obtenir en coupe définitive (120 ans) un bois permettant la production

de 60 % de BO et 40% de BE. Les diamètres des bois plus importants en fin de cycle sylvicole permettent une transformation intéressante en BO.

Le tableau ci-dessous montre un exemple pour le sapin pectiné.

Fiche devenir produit bois : Sapin pectiné									
Fertilité 1									
Age de coupe	50	60	70	80	90	100	110	120	
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	103	143	114	87	63	193	139	180.	
Diamètre moyen (cm)	16	28	33	35	39	47	47	55	
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	5	10	40	40	60
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0	0
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	100	95	95	90	60	60	40
Fertilité 2									
Age de coupe	75	95	115	135	150	160	170		
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	198	198	75	70	83	97	125		
Diamètre moyen (cm)	16	23	30	37	38	45	50		
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	0	5	10	15	20	
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0	
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0	
	Bois énergie	100	100	100	95	90	85	80	

#### b. Variabilité des données de durées de vie moyennes des produits bois

Pour décrire le processus de décomposition de certains stocks de carbone, des modèles de décroissance exponentielle ont été imaginés par les experts scientifiques, notamment sur la base des hypothèses du GIEC (Pingoud et Wagner, 2006). Ils dépendent de la nature, de la durée de vie de chaque produit bois selon l'usage qu'en fait l'utilisateur et des aléas qui peuvent l'impacter (accident, incendie, casse ...etc.). Les durées de vie ne dépendent pas de l'essence du bois choisie pour le produit. Elles sont donc les mêmes pour chaque itinéraire de l'étude. On simplifie les modèles en estimant une probabilité stable de mise en déchetterie ou valorisation énergétique des produits bois. Ces différents principes expliquent la progressive décroissance du stock de carbone après chaque « pic » dans les produits bois (voir ci-dessous).

Du fait de l'existence d'une large incertitude sur les valeurs de durée de vie moyenne des produits bois, il a été choisi de prendre en compte dans cette étude 3 références bibliographiques couvrant l'intervalle de confiance :

- La version 2 de la **méthode de reboisement du Label Bas Carbone (LBC, 2020)** qui renseigne les temps de demi-vie du BO et BI pour des peuplements à 30 ans. Nous avons gardé les mêmes temps de demi-vie pour les itinéraires sylvicoles de cette étude qui vont au-delà de 30 ans de sylviculture ;

- Deux études financées par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) :
  - **Cornillier et al.** (2017, projet GESFOR). Le BO et le BI panneau n'étant pas identifiés clairement, des regroupements ont été faits pour y correspondre :
    - Le BO correspond à la moyenne des durées de vie des bois de « construction second œuvre » et « construction structure » ;
    - Le BI panneau correspond à la moyenne des durées de vie des bois de « l'ameublement » (par exemple MDF et panneau de particules) et « construction structure » (par exemple OSB).
  - **Valade et al.** (2017, projet BICAFF). Les durées de vie moyennes sont sensiblement différentes par rapport aux documents précédents, notamment pour la transformation en panneau et en papier.

**Remarque :** Certaines ressources bibliographiques renseignent des « durées de vie moyennes » de produits bois (exemple : ADEME, 2017), tandis que d'autres indiquent des « temps de demi-vie<sup>5</sup> » (exemple : Label Bas Carbone, 2020). Pour s'affranchir de cette distinction, un facteur  $\ln(2)$  a été appliqué aux durées de vie moyennes.

L'ensemble des valeurs sont renseignées dans le tableau 1. Le facteur  $\ln(2)$  n'est pas appliqué aux durées de vie moyennes présentées ci-dessous.

Tableau 1 : Récapitulatif des temps de demi-vie et durées de vie moyennes choisies pour tous les itinéraires de cette étude

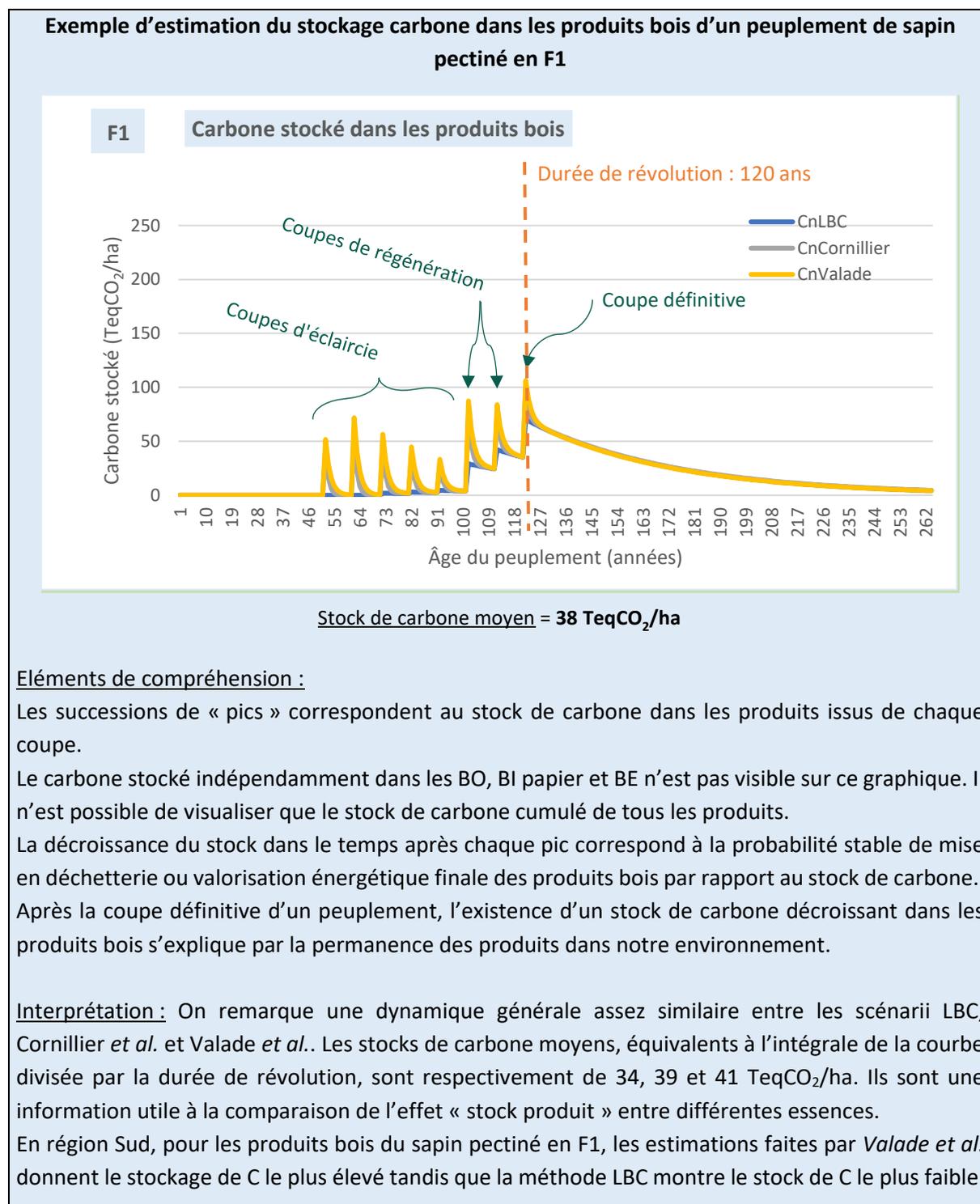
Sources de donnée	Catégorie de produit	Temps de demi-vie * Durée de vie moyenne **
Méthode LBC V2, 2020	Bois d'œuvre	35 ans *
	Bois d'industrie panneau	25 ans *
	Bois d'industrie papier	2 ans *
	Bois d'énergie	/
Cornillier et al., 2017	Bois d'œuvre	51.5 ans **
	Bois d'industrie panneau	47 ans **
	Bois d'industrie papier	0.5 an **
	Bois d'énergie	1 an **
Valade et al., 2017	Bois d'œuvre	50 ans **
	Bois d'industrie panneau	4 ans **
	Bois d'industrie papier	4 ans **
	Bois d'énergie	1.7 an **

Pour chacun des itinéraires sylvicoles retenus, trois courbes se superposent sur le même graphique traduisant la variabilité des stocks de carbone calculé selon chaque référence bibliographique. Par exemple, le stock de carbone dans les produits bois en fonction de l'âge du peuplement est légendé « CnCornillier » lorsqu'il est calculé selon Cornillier *et al.*, 2017.

<sup>5</sup> Temps nécessaire à la baisse de moitié du stock de carbone dans les produits bois.

Le stock de carbone moyen dans les produits bois, équivalent à l'intégrale de la courbe divisée par la durée de révolution, est calculé pour chacune des références citées (cette valeur n'apparaît pas sur les graphiques suivants).

Une valeur moyenne des trois références bibliographiques est ensuite calculée afin de pouvoir comparer les itinéraires sylvicoles entre eux. Elle est dénommée « Stock de carbone moyen ».



c. Limites et simplifications du modèle employé :

En raison de la variabilité et de la complexité des données existantes concernant le carbone stocké dans les peuplements forestiers et leurs produits bois, certaines simplifications de calculs sont faites :

1. Le billonnage étant plus complexe dans la réalité, la prise en considération de seulement 4 catégories de produits simplifie l'analyse de stockage carbone. Il est possible de prendre en considération d'autres types de produits et sous-produits comme le bois granulé, les plaquettes ... etc. ;
2. Il convient également de rappeler que les valeurs des durées de vie moyennes et des temps de demi-vie restent incertaines à l'échelle nationale et ne sont pas spécifiquement adaptées aux catégories de produits sélectionnées dans cette étude. L'interprétation des graphiques doit être mise en corrélation avec les hypothèses faites pour chaque méthode ;
3. Seule la première transformation du bois en BO, BI papier ou BE est prise en compte ici. Par conséquent, le stockage de carbone est sous-estimé faute d'estimation liée à de possibles usages en cascade.

Toutefois pour évaluer l'effet carbone additionnel relatif au recyclage et ré-usage des matériaux bois, notre étude modélisera l'effet carbone pour le douglas en Provence-Alpes-Côte d'Azur qui sera comparé aux résultats d'une autre étude considérant pour cette essence, un schéma de filière plus complet, intégrant le recyclage des produits bois (cf. partie III.C.3.). Même si le potentiel de cette essence reste modeste en région Sud, il est apparu intéressant de valoriser des durées et stockage allant au-delà de la 1<sup>ère</sup> transformation.

### 3. Calcul de l'effet de substitution

a. Variabilité des données de coefficient de substitution

De la même manière que les durées de vie moyennes des produits, l'estimation de l'effet de substitution est variable pour un même produit bois donné, traduisant encore une incertitude sur les valeurs à l'échelle nationale.

3 références ont été sélectionnées pour illustrer la variabilité des coefficients de substitution appliqués à chaque produit :

- La **méthode de reboisement du LBC (version 2, 2020)** dont l'annexe 1 renseigne sur les coefficients de substitution pour des peuplements allant au-delà de 30 ans ;
- **Valade et al., 2017** ;
- Les **Indicateurs de Gestion Durable (IGD) de 2020** qui s'appuient sur l'expertise INRAE-IGN sur la forêt et le carbone de 2017, servant de références de comptabilité française, consolidées et contradictoires.

L'ensemble des valeurs sont renseignées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Récapitulatif des coefficients de substitution choisis pour tous les itinéraires de cette étude

Sources de donnée	Catégorie de produit	Coefficient de substitution
Méthode LBC V2, 2020	BO	1.52
	BI panneau	0.77
	BI papier	0
	BE	0.25

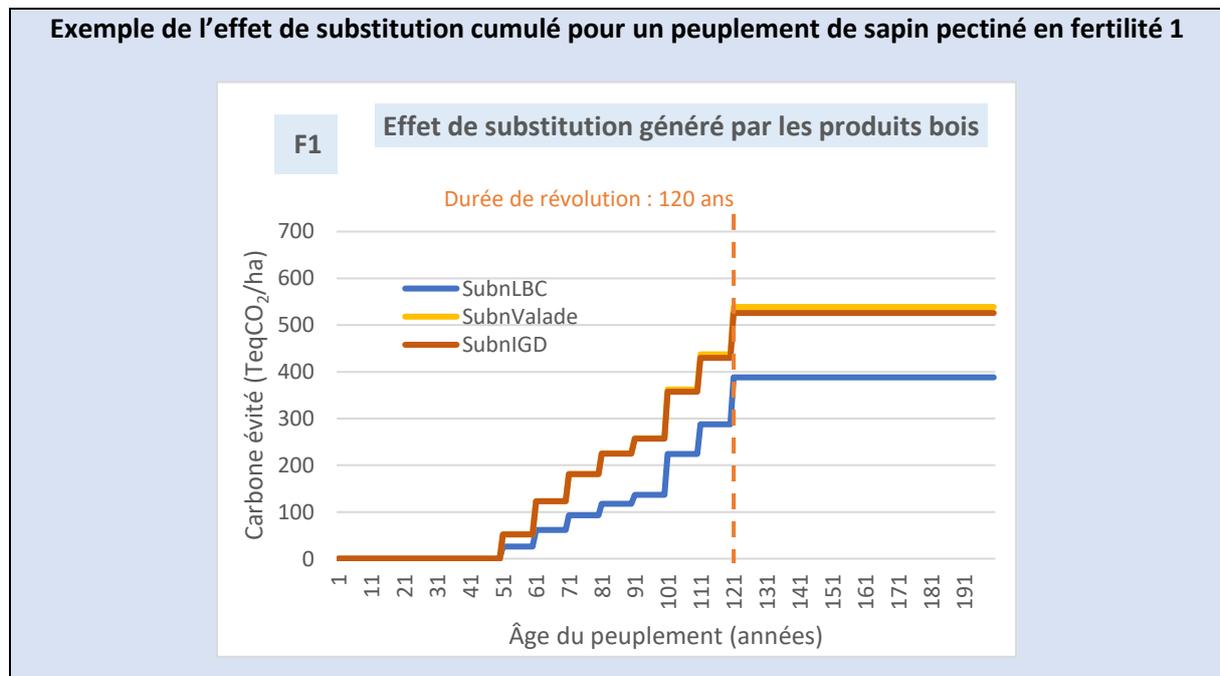
<i>Valade et al., 2017</i>	BO	1.2
	BI panneau	0.53
	BI papier	0
	BE	0.5
Indicateurs de Gestion Durable, 2017	BO	1.1
	BI panneau	1.1
	BI papier	0
	BE	0.5

Un effet de substitution est lisible graphiquement au moment de la valorisation en produit bois. Cet effet est cumulatif tout au long de la vie du peuplement, d'où l'observation d'une courbe « en escalier ». La quantité **totale** de CO<sub>2</sub> évité à l'issue du cycle sylvicole est lisible après la coupe définitive.

De la même manière que le stock de carbone dans les produits bois, l'effet de substitution est calculé pour chaque référence bibliographique et cela pour tous les itinéraires sylvicoles retenus. Trois courbes se superposent faisant individuellement référence à une source de donnée. L'effet de substitution issu de la donnée Cornillier *et al.* sera par exemple légendé « CnCornillier ».

Une moyenne de l'effet total de substitution des 3 littératures est ensuite calculée, dénommée « Moyenne de l'effet total de substitution ». Comme chaque itinéraire a une durée de révolution qui lui est propre, il faut calculer un effet de substitution annuel – dénommé « Effet moyen de substitution/an » - pour pouvoir comparer différents itinéraires entre eux. Un exemple est donné ci-dessous pour l'itinéraire du sapin pectiné en F1.

Par ailleurs, il faut normalement soustraire les valeurs d'un scénario de référence pour regarder la substitution. Ici, ce n'est pas le cas, c'est pourquoi les valeurs de la substitution ne sont pas à prendre en absolu mais comme des éléments de réflexion.



Moyenne de l'effet total de substitution = 484 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 4.03 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Interprétation possible :

« D'après Valade *et al.*, un hectare de sapin pectiné en F1, conduit selon un itinéraire classique de futaie régulière, permet d'éviter jusqu'à 539 tonnes de CO<sub>2</sub> au bout de 120 ans de sylviculture »  
(lecture de la valeur à 120 ans de la courbe jaune).

« Un hectare de sapin pectiné en F1 conduit selon un itinéraire classique de futaie régulière, permet d'éviter l'émission de 484 TeqCO<sub>2</sub> en moyenne au bout de 120 ans de sylviculture, soit 4 TeqCO<sub>2</sub> en moyenne chaque année (selon les 3 références bibliographiques). »

b. Limites du modèle de notre étude :

Le calcul d'un coefficient de substitution s'appuie sur des analyses de cycles de vie (ayant déjà des hypothèses de calcul) et se rapporte à un type de produit bois. Utilisés à l'échelle nationale, ces calculs ne sont pas aujourd'hui consolidés. Par exemple, il est possible de trouver plusieurs produits très différents sous la dénomination « panneau », selon la filière locale. Il en résulte une forte imprécision sur les valeurs à l'échelle nationale.

## B. Focus sur l'effet carbone des produits bois du pin d'Alep et du pin noir en région Sud

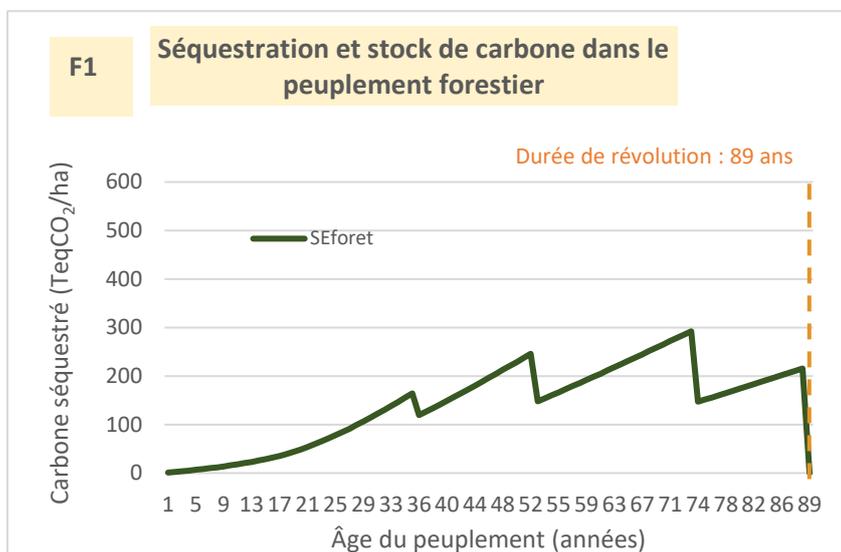
Cette partie a pour but de détailler les résultats des modélisations sur deux essences sylvicoles choisies pour leur représentativité en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. La F1 est retenue pour le pin d'Alep qui renseigne sur le contexte méditerranéen, la F2 pour le pin noir, illustratif du contexte continental pré montagnard.

En outre, une modélisation spécifique a été produite pour évaluer l'effet carbone de l'allongement de la durée de révolution de l'itinéraire sylvicole : un scénario reporte la coupe définitive de 10 ans (scénario +10), un autre de 20 ans (scénario +20). La vitesse de croissance du peuplement est choisie constante pour les années supplémentaires de l'itinéraire. Ces scénarii permettent une première approximation des variations de séquestration et de stock de carbone dans le peuplement et dans les produits, dans l'hypothèse d'une révolution rallongée à des fins de performance de la fonction carbone. **Ce calcul ne prend pas en compte les risques associés** (incendies, sécheresses, dépérissements...). Les conclusions ne sont donc valables que pour des peuplements avec très peu de vulnérabilité.

Enfin, pour évaluer l'effet carbone du BI panneau, un nouveau scénario a été imaginé dans lequel les produits du pin noir et de pin d'Alep sont transformés potentiellement en BI panneau (ce qui n'est pas le cas à ce jour).

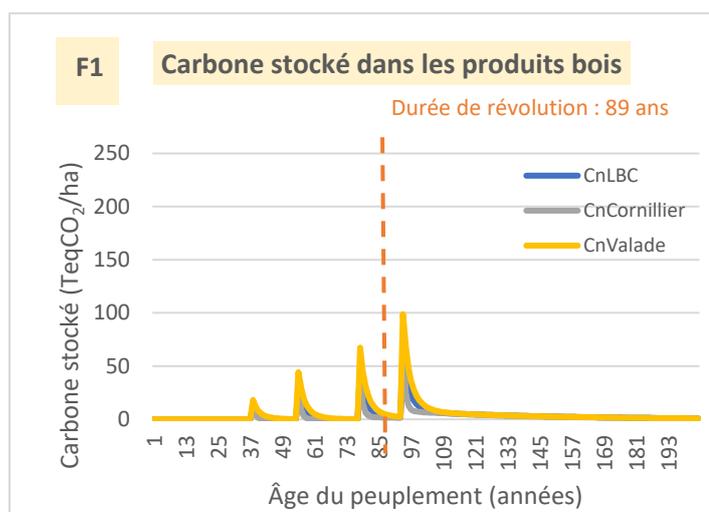
## 1. Effet carbone du pin d'Alep en F1

### a. Effet carbone global : séquestration dans le peuplement, stockage dans les produits bois et effet de substitution

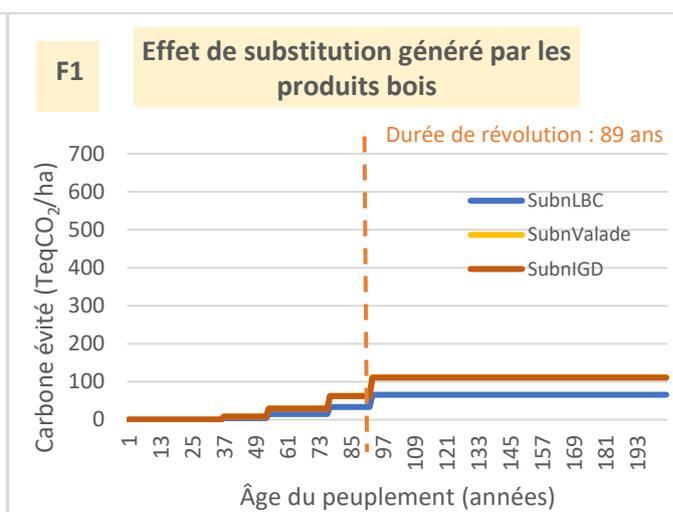


Le stock de carbone moyen dans un peuplement de pin d'Alep en F1, est de **140 TeqCO<sub>2</sub>/ha** sur une durée de révolution de 89 ans.

Rappel : le stock de carbone moyen correspond à l'aire sous la courbe verte divisé par la durée de révolution.



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= **9 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



Moyenne de l'effet total de substitution = **95 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **1.08 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

### b. Modélisation théorique d'allongement de la durée de révolution du pin d'Alep

Pour le pin d'Alep, l'allongement de la durée de révolution engendre (cf. annexe II ci-dessous) :

- Une augmentation du stock de carbone moyen dans le peuplement passant de 140 à 150 puis 162 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour 89, 99 et 109 ans de sylviculture respectivement. L'allongement de la révolution présente donc un intérêt vis-à-vis du gain carbone.
- Presque aucune variation du stock de carbone dans les produits bois avec une moyenne de 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour 89 ans et 99 ans et 10 TeqCO<sub>2</sub>/ha stocké pour 109 ans de sylviculture.

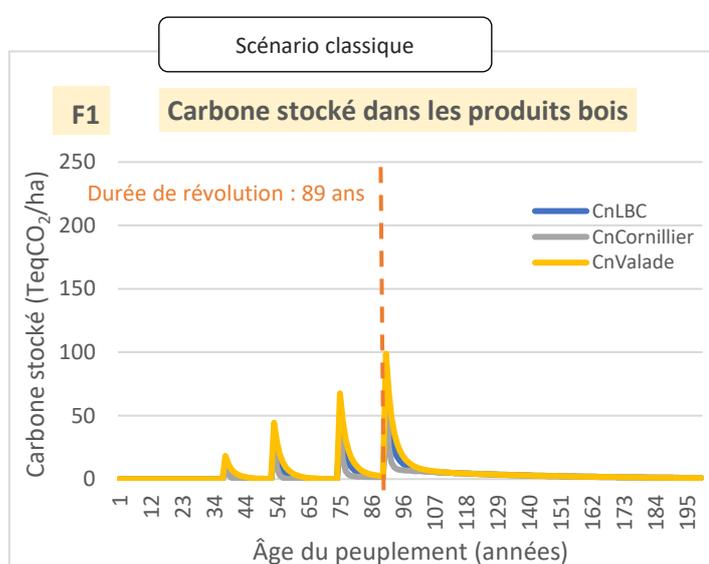
- Une légère augmentation de l'effet de substitution passant de 1.08 à 1.12 TeqCO<sub>2</sub>/ha évités annuellement pour 20 ans supplémentaires de sylviculture.

c. Du bois d'industrie panneau en pin d'Alep

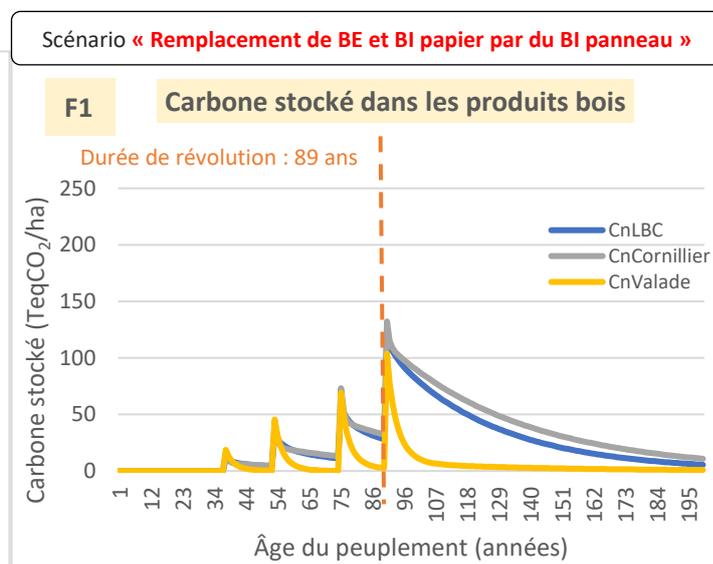
Fiche devenir produit bois : pin d'Alep – densité 1 100 plants/ha				
Fertilité 1				
Age de coupe	36	52	74	89
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	28	69	108	158
Diamètre (cm)	14	19	29	38
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	5
	BI panneau	0	0	0
	BI papier	40	40	40
	Bois énergie	60	60	55

Fertilité 1 – Scénario « Remplacement d'une part de BE et BI papier par du BI panneau »				
Age de coupe	36	52	74	89
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	28	69	108	158
Diamètre (cm)	14	19	29	38
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	10
	BI panneau	30	30	35
	BI papier	25	25	10
	Bois énergie	45	45	40



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha



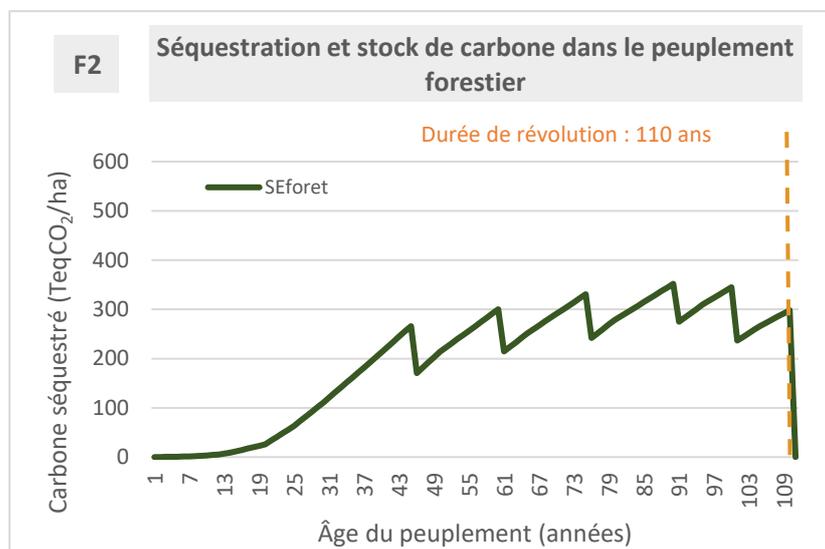
Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 45 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Réorienter une partie de la filière du pin d'Alep vers de la production de BI panneau permet une augmentation très significative de stock de carbone dans les produits bois à l'échelle de l'itinéraire sylvicole : 45 TeqCO<sub>2</sub>/ha en 89 ans au lieu de 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha (soit 400% d'augmentation).

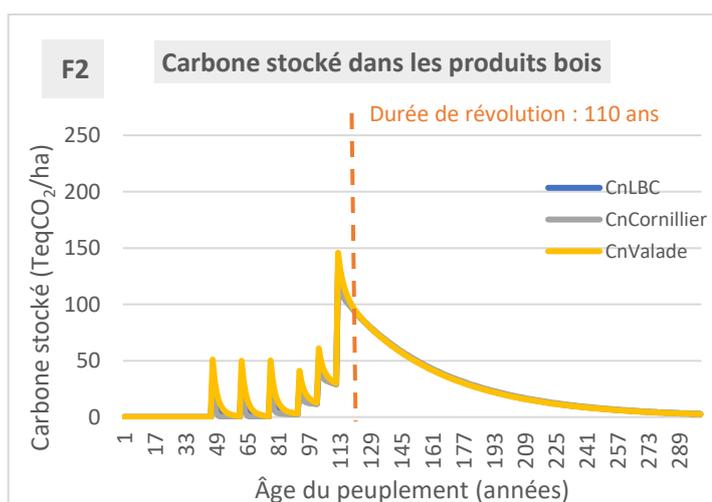
Ce résultat se répercute sur l'effet de substitution : produire du BI panneau comme décrit dans la fiche devenir produit bois ci-dessus permet de doubler l'effet de substitution. 1.1 TeqCO<sub>2</sub>/ha supplémentaire est évitée chaque année.

## 2. Effet carbone du pin noir en F2

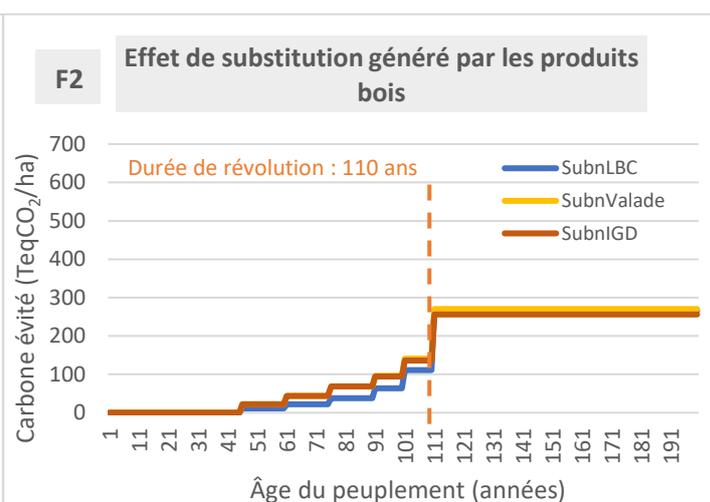
### a. Effet carbone global : séquestration dans le peuplement, stockage dans les produits bois et effet de substitution



Le stock de carbone moyen dans un peuplement de pin noir en F2, est de **197 TeqCO<sub>2</sub>/ha** sur une durée de révolution de 110 ans.



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= **59 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



Moyenne de l'effet total de substitution = **264 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

### b. Allonger la durée de révolution du pin noir

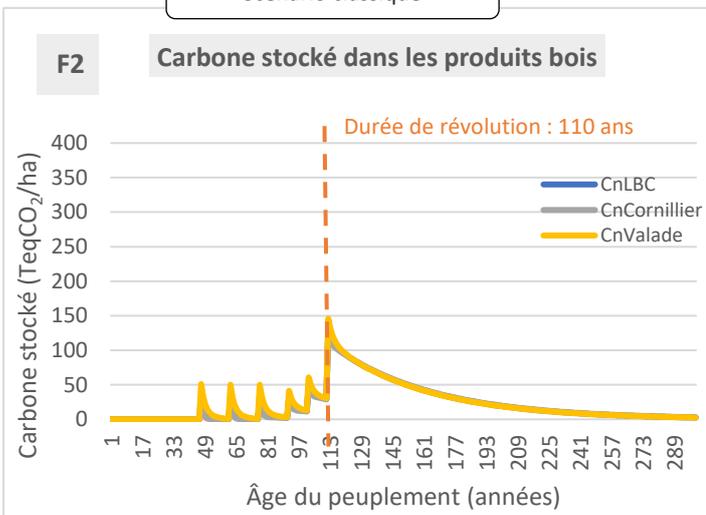
Pour le pin noir, l'allongement de la durée de révolution engendre (cf. annexe II ci-dessous) :

- Une augmentation du stock de carbone moyen dans le peuplement passant de 197 à 207 puis 222 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour 110, 120 et 130 ans de sylviculture respectivement. Comme pour le pin d'Alep, l'allongement de la révolution présente un intérêt en termes de séquestration carbone moyenne sur la durée de vie du peuplement.
- Une légère augmentation du stock de carbone dans les produits bois de 2 et 3 TeqCO<sub>2</sub>/ha supplémentaire à 120 et 130 ans de sylviculture respectivement.
- Aucune variation d'effet de substitution annuel avec une constante de 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha évité chaque année pour les trois itinéraires.

c. Du bois d'industrie panneau en pin noir

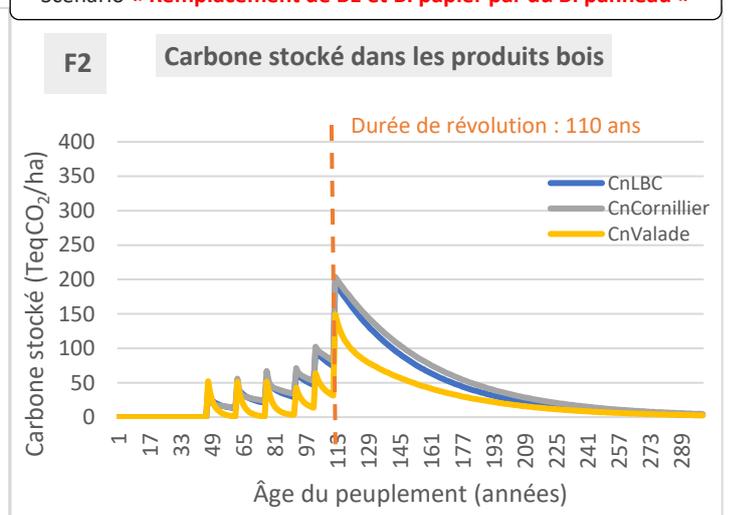
Fiche devenir produit bois : pin noir – densité 1 100 plants/ha							
Fertilité 2							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	10	40	60	80
	BI panneau	0	0	0	0	0	0
	BI papier	40	40	35	25	15	10
	Bois Energie	60	60	55	35	25	10
Fertilité 2 - Scénario « Remplacement d'une part de BE et BI papier par du BI panneau »							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	10	40	60	80
	BI panneau	30	30	30	35	30	20
	BI papier	25	25	20	10	5	0
	Bois Energie	45	45	40	15	5	0

Scénario classique



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Scénario « Remplacement de BE et BI papier par du BI panneau »



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 94 TeqCO<sub>2</sub>/ha

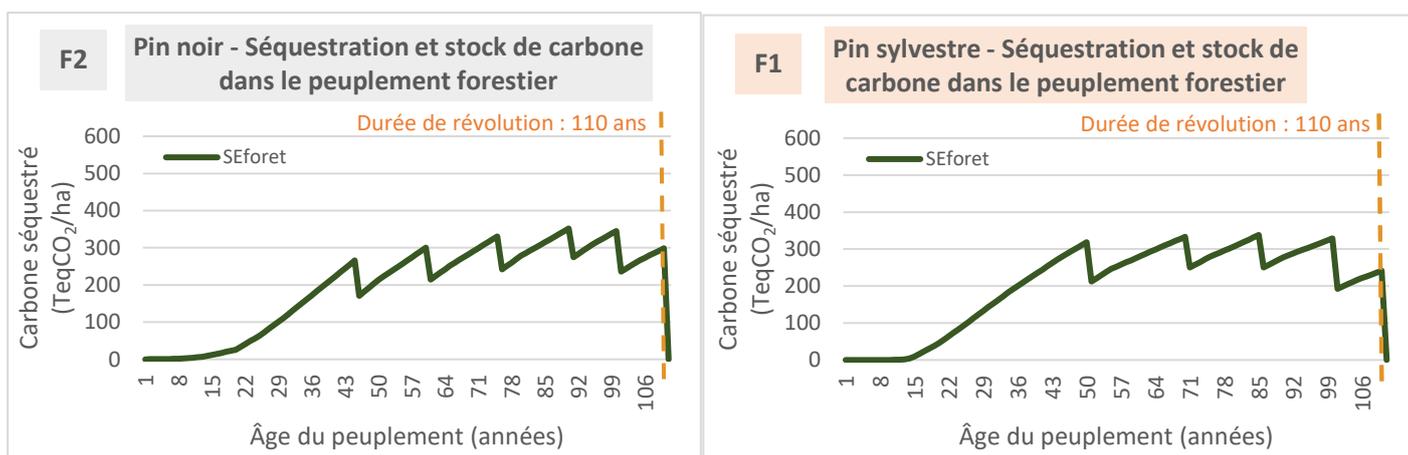
Réorienter une partie de la filière du pin noir vers de la production de BI panneau permet une augmentation de 60% de stock de carbone dans les produits bois à l'échelle de l'itinéraire sylvicole : 94 TeqCO<sub>2</sub>/ha en 110 ans au lieu de 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha.

Ce résultat se répercute sur l'effet de substitution : produire du BI panneau comme décrit dans la fiche devenir produit bois ci-dessus permet d'éviter 0.9 TeqCO<sub>2</sub>/ha supplémentaire chaque année.

### 3. Des différences de séquestration selon l'essence : comparaison du pin noir F2 avec du pin sylvestre F1

Le pin noir F2 et le pin sylvestre F1 sont deux essences capables de croître dans les mêmes conditions autécologiques. De ce fait, leur comparaison a un intérêt pour évaluer l'effet du facteur « essence » sur le stockage dans les produits bois et la différence d'effet de substitution engendré.

#### a. Variation de séquestration carbone selon l'essence



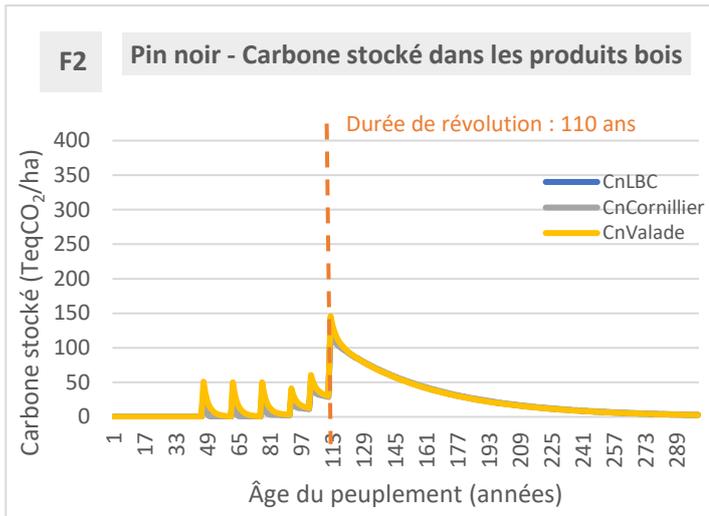
Stock de carbone moyen dans le peuplement forestier  
= 197 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Stock de carbone moyen dans le peuplement forestier  
= 204 TeqCO<sub>2</sub>/ha

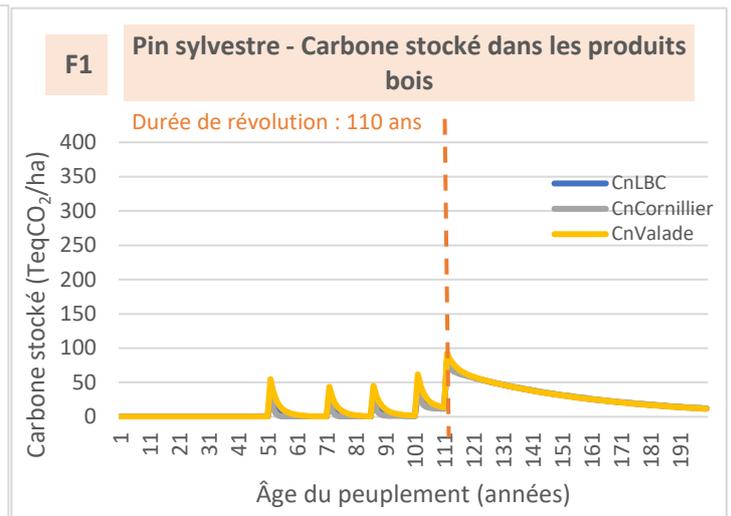
Le stock de carbone dans le peuplement de pin noir sur pied est légèrement inférieur à celui du pin sylvestre (197 TeqCO<sub>2</sub>/ha et 204 TeqCO<sub>2</sub>/ha respectivement).

#### b. Un stockage carbone moyen différent dans les produits bois

Fiche devenir produit bois : pin noir, 1100 tiges/ha							
Fertilité 2							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m <sup>3</sup> /ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre moyen (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	10	40	60	80
	BI panneau	0	0	0	0	0	0
	BI papier	40	40	35	25	15	10
	Bois énergie	60	60	55	35	25	10
Fiche devenir produit bois : pin sylvestre, 1100 tiges/ha							
Fertilité 1							
Age de coupe		50	70	85	100	110	
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m <sup>3</sup> /ha)		88	70	73	111	186	
Diamètre moyen (cm)		20	25	31	39	49	
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	30	80	
	BI panneau	0	0	0	0	0	
	BI papier	40	40	40	25	10	
	Bois énergie	60	60	55	45	10	



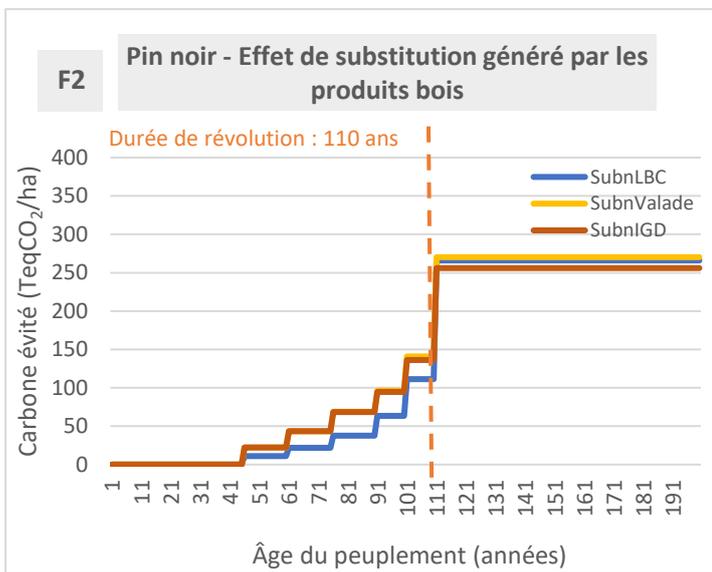
Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 31 TeqCO<sub>2</sub>/ha

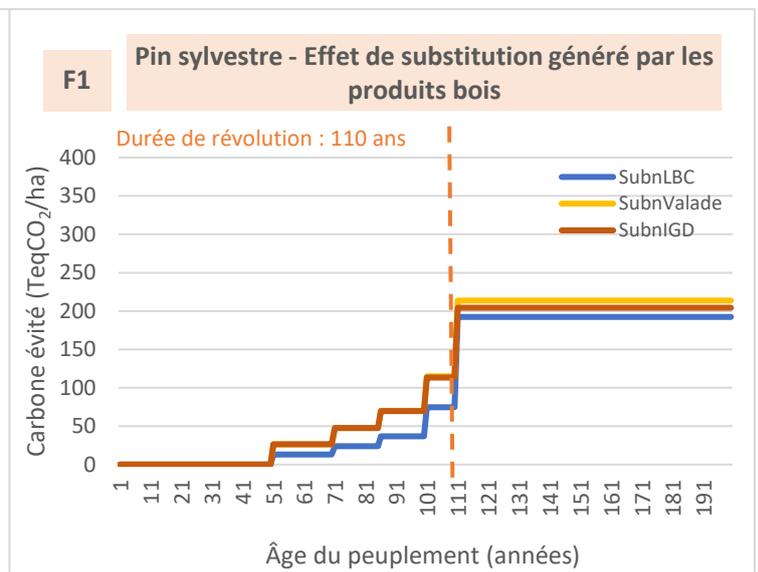
La quantité de pin sylvestre valorisée en BO est moins importante que pour le pin noir. Par conséquent, le stock moyen de carbone dans les produits bois est également plus bas, s'établissant à près de la moitié par rapport au pin noir, soit 31 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour le pin sylvestre et 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour le pin noir.

c. Des différences significatives d'effet de substitution



Moyenne de l'effet total de substitution = 264 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet de substitution/an = 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Moyenne de l'effet total de substitution = 203 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet de substitution/an = 1.8 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Idem pour l'effet de substitution : le pin noir permet d'éviter 0.6 TeqCO<sub>2</sub>/ha de plus que le pin sylvestre chaque année.

La croissance légèrement plus dynamique (volume bois fort exporté plus important) et des produits plus qualitatifs (plus de BO produits) de pin noir conduisent à une sylviculture plus active que le pin sylvestre (fréquence de récolte du bois plus importante). Cela engendre un stock de carbone plus important dans les produits bois et un effet de substitution consécutivement plus fort pour le pin noir.

Le facteur essence a donc un impact directement visible sur le stock de carbone et l'effet de substitution.

## C. Synthèse générale sur l'effet carbone de tous les itinéraires sylvicoles étudiés

La synthèse générale des résultats obtenus est présentée sous la forme de tableaux (n° 3, 4, 5, 6 et 7) : elle permet un aperçu global de la séquestration carbone dans les peuplements forestiers, du stockage carbone dans les produits bois issus de leur sylviculture et des effets de substitution des 14 couples essences/fertilités étudiés ici.

Par ailleurs, les graphiques relatifs à tous les itinéraires étudiés dans cette étude sont présentés dans les fiches synthèses rassemblées en annexe II ci-dessous.

### 1. Séquestration carbone dans le peuplement forestier

Le tableau 3 présente la synthèse des résultats obtenus concernant le stock de carbone dans les peuplements forestiers des itinéraires étudiés dans le cadre de cette étude.

Tableau 3 : Synthèse sur le stockage de carbone dans le peuplement forestier pour les itinéraires sylvicoles étudiés

Essences	Fertilité	Densité (nb de tiges /ha)	Durée de révolution	Stock de C moyen dans le peuplement forestier (TeqCO <sub>2</sub> /ha) calculé sur la durée de révolution
Sapin pectiné	1	1600	120	231
	2	1600	170	213
Pin sylvestre	1	1100	110	204
	2	1100	115	131
Pin noir	1	1100	105	274
	2	1100	110	197
10+	2	1100	120	207 ↑
20+	2	1100	130	222 ↑
Pin d'Alep	1	1100	89	140
	2	1100	95	134
10+	1	1100	99	150 ↑
20+	1	1100	109	162 ↑
Cèdre de l'Atlas	2	1100	101	249
	2	1600	105	272
	3	1100	109	216
	3	1600	131	256
	4	1100	144	189
	4	1600	165	215

Synthèse : Stock de carbone dans le peuplement forestier et effet de l’allongement de la durée de révolution :

- Pour une même essence : plus la fertilité est meilleure (F1 meilleure que F2), plus le stock de carbone moyen dans le peuplement est élevé :

$$C_{peupl}(F1) \geq C_{peupl}(F2) \geq C_{peupl}(F3) \geq C_{peupl}(F4)$$

- Le stock de carbone moyen du pin noir est plus élevé que pour les autres essences. En revanche, celui du pin d’Alep est le plus faible.
- L’augmentation de la densité de plantation du cèdre de l’Atlas augmente le stock de carbone moyen du peuplement sur pied.
- Allonger la durée de révolution a un effet positif sur la séquestration et le stock de carbone dans le peuplement : pour le pin d’Alep et le pin noir, le stock de carbone moyen augmente (cf. III.B. ci-dessus).

## 2. Stockage de carbone dans les produits bois

Le tableau 4 présente la synthèse des résultats obtenus concernant le stock de carbone dans les produits bois des itinéraires étudiés dans le cadre de cette étude. La comparaison des stocks de carbone moyen renseigne sur l’effet « stockage produits » des différentes essences.

Tableau 4 : Synthèse sur le stockage de carbone dans les produits bois pour les itinéraires sylvicoles étudiés

Essences	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Stock de C moyen dans les produits bois (TegCO <sub>2</sub> /ha) calculé sur la durée de révolution			
				LBC V2	Cornillier et al.	Valade et al.	Moyenne
Sapin pectiné	1	1600	120	34	39	41	38
	2	1600	170	4	7	9	7
Pin sylvestre	1	1100	110	30	30	33	31
	2	1100	115	8	7	11	9
Pin noir	1	1100	105	77	76	81	78
	2	1100	110	58	58	61	59
Pin d'Alep	1	1100	89	8	7	12	9
	2	1100	95	6	5	10	7
Cèdre de l'Atlas	2	1100	101	101	106	105	104
	2	1600	105	94	100	100	98
	3	1100	109	67	70	70	69
	3	1600	131	60	64	65	63
	4	1100	144	23	25	26	24
	4	1600	165	21	24	25	23

Synthèse : Stock de carbone dans les produits bois

- Pour la grande majorité des itinéraires sylvicoles choisis en région Sud, le scénario du LBC est celui qui évalue le plus faible stock de carbone dans les produits. Vient en suivant le

scénario se basant sur les données de *Cornillier et al.*, puis celui de *Valade et al.* qui donne le stock de carbone dans les produits bois le plus élevé.

- Pour une même essence : plus la fertilité est meilleure, plus le stock de carbone moyen dans les produits bois est élevé :

$$C_{prodbois}(F1) \geq C_{prodbois}(F2) \geq C_{prodbois}(F3) \geq C_{prodbois}(F4)$$

- Le stock de carbone des produits bois issus de la sylviculture du cèdre de l'Atlas est sensiblement plus élevé que pour les autres essences. Les produits du pin noir se placent en 2<sup>ème</sup> position puis viennent ceux du sapin pectiné et du pin sylvestre. Le stock de carbone dans les produits bois du pin d'Alep est plutôt faible traduisant des usages longs aujourd'hui très marginaux.

Le tableau 5 ci-dessous présente la synthèse des résultats sur le stockage carbone dans les produits pour les modélisations évaluant l'effet de l'allongement de la durée de révolution et celles évaluant la diversification des usages des bois via le BI panneau (cf. partie III. B. ci-dessus).

Tableau 5 : Mesure de l'effet d'allongement de durée de révolution et utilisation de BI panneau sur le stockage de carbone dans les produits bois du pin noir et du pin d'Alep

ITK pin d'Alep	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Stock de C moyen dans les produits bois (TeqCO <sub>2</sub> /ha)			
				LBC V2	Cornillier et al.	Valade et al.	Moyenne
Classique	1	1100	89	8	7	12	9
10+	1	1100	89	8	7	13	9
20+	1	1100	89	9	7	13	10 ↑
→ BI panneau	1	1100	89	55	67	14	45 ↑

ITK pin noir	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Stock de C moyen dans les produits bois (TeqCO <sub>2</sub> /ha)			
				LBC V2	LBC V2	LBC V2	LBC V2
Classique	2	1100	110	58	58	61	59
10+	2	1100	110	60	60	63	61 ↑
20+	2	1100	110	61	61	64	62 ↑
→ BI panneau	2	1100	110	102	116	63	94 ↑

Synthèse : Effet de l'allongement de la durée de révolution et de l'utilisation en BI panneau sur le stock dans les produits bois du pin d'Alep et du pin noir :

- Allonger la durée de révolution de 10 ou de 20 ans n'augmente pas ou très peu le stock de carbone dans les produits bois des deux essences.

- Allonger la durée de révolution peut s'envisager à condition d'anticiper des risques limités (dépérissements, incendies, tempêtes) et de maintenir un équilibre global des classes d'âge de la forêt.
- Changer une partie de l'usage des bois du pin d'Alep et du pin noir pour produire du BI panneau plutôt que du BE ou BI papier a un effet carbone positif sur le stock dans les produits bois : **augmentation respective de 400% et 60% du stock de C (passage de 9 à 45 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour le pin d'Alep et de 59 à 94 TeqCO<sub>2</sub>/ha pour le pin noir)**

### 3. Effet de substitution des produits bois

Le tableau 6 présente la synthèse des résultats obtenus concernant l'effet de substitution des itinéraires étudiés dans le cadre de cette étude.

Tableau 6 : Synthèse de l'effet de substitution des produits bois pour les itinéraires sylvicoles considérés

Essences	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Effet de substitution moyen (TeqCO <sub>2</sub> évité/ha/an)			
				LBC V2	Valade et al.	IGD	Moyenne
Sapin pectiné	1	1600	120	3.23	4.49	4.38	4.03
	2	1600	170	1.41	2.54	2.52	2.16
Pin sylvestre	1	1100	110	1.75	1.94	1.86	1.85
	2	1100	115	0.67	1.01	0.99	0.89
Pin noir	1	1100	105	3.20	3.26	3.09	3.18
	2	1100	110	2.42	2.46	2.33	2.40
Pin d'Alep	1	1100	89	0.74	1.25	1.24	1.08
	2	1100	95	0.61	1.05	1.04	0.90
Cèdre de l'Atlas	2	1100	101	6.26	6.48	6.16	6.30
	2	1600	105	6.31	6.97	6.66	6.65
	3	1100	109	4.28	4.57	4.36	4.40
	3	1600	131	4.26	4.89	4.69	4.61
	4	1100	144	1.91	2.43	2.36	2.23
	4	1600	165	1.94	2.57	2.50	2.34

L'effet de substitution total de chaque itinéraire est à retrouver dans leur fiche synthèse respective.

#### Synthèse : Effet de substitution des itinéraires étudiés

- Pour tous les itinéraires sylvicoles choisis en région Sud, le scénario reposant sur les données de *Valade et al* est le plus optimiste vis-à-vis de l'effet de substitution.
- Pour une même essence : plus la fertilité est bonne, plus l'effet de substitution est prononcé :

$$Sub_{F1} \geq Sub_{F2} \geq Sub_{F3} \geq Sub_{F4}$$

- Le cèdre de l'Atlas a un effet de substitution plus important que les autres essences (en lien avec sa meilleure valeur ajoutée en termes d'usages). Le sapin pectiné se place en 2<sup>ème</sup> position puis vient le pin noir. Le pin sylvestre et le pin d'Alep témoignent d'effets de substitution relativement plus faibles, en lien avec le stock de C dans leurs produits bois plus réduit.
- Pour le cèdre de l'Atlas, à fertilité égale, une densité supérieure de plantation associée à une révolution plus longue sont des facteurs jouant favorablement sur l'effet de substitution.

Le tableau 7 présente la synthèse des résultats obtenus pour les modélisations évaluant l'effet de l'allongement de la durée de révolution, et la diversification des usages des bois du pin noir et d'Alep en termes d'effet de substitution (cf. partie III.B ci-dessus).

Tableau 7 : Mesure de l'effet d'allongement de durée de révolution et utilisation de BI sur l'effet de substitution dans les produits bois du pin noir et du pin d'Alep

ITK pin d'Alep	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Effet moyen de substitution (TeqCO <sub>2</sub> évité/ha/an)			
				LBC V2	Cornillier et al.	Valade et al.	Moyenne
Classique	1	1100	89	0.74	1.25	1.24	1.08
10+	1	1100	89	0.76	1.28	1.27	1.10 ↑
20+	1	1100	89	0.78	1.30	1.28	1.12 ↑
→ BI panneau	1	1100	89	1.92	1.78	2.81	2.17 ↑

ITK pin noir	Fertilité	Densité de plantation (tiges/ha)	Durée de révolution (année)	Effet moyen de substitution (TeqCO <sub>2</sub> évité/ha/an)			
				LBC V2	Cornillier et al.	Valade et al.	Moyenne
Classique	2	1100	110	2.42	2.46	2.33	2.40
10+	2	1100	110	2.48	2.47	2.34	2.43 ↑
20+	2	1100	110	2.52	2.48	2.34	2.44 ↑
→ BI panneau	2	1100	110	3.38	2.85	3.58	3.27 ↑

Synthèse : Effet de l'allongement de la durée de révolution et de l'utilisation en BI panneau pour le pin d'Alep en F1 et le pin noir en F2 :

- Allonger la durée de révolution sur des peuplements de pin noir et d'Alep augmente légèrement l'effet de substitution (ces différences ne sont pas forcément significatives).
- Changer une partie de l'usage des bois de pin noir et d'Alep pour produire du BI panneau plutôt que du BE et du BI papier améliore l'effet de substitution : **1.09 (pin d'Alep) et 0.8 TeqCO<sub>2</sub> (pin noir) supplémentaires par ha sont évités chaque année.**

## 4. Prise de recul sur les résultats : étude comparative avec le douglas

Un nouvel itinéraire a été ajouté aux calculs pour nous permettre d'évaluer la robustesse de notre calculatrice carbone : le sapin douglas, en F2, avec une densité de plantation de 1 600 plants/ha, s'appuyant sur le guide de sylviculture national.

Le stock de carbone dans les produits bois et l'effet de substitution ont été calculés pour cet itinéraire via notre calculatrice carbone et comparés aux résultats d'une autre étude – bilan carbone « avec recyclage » réalisé par Salomé Fournier (ONF, sur la base des données Gesfor) – ayant établi des calculs similaires mais avec une meilleure précision dans le schéma de filière : billonnage des produits bois plus important, ajout des processus de recyclage et de ré-usage, simulation de l'effet carbone dans le peuplement et dans les produits bois en « séquences infinies » c'est-à-dire en répétant les modélisations sur plusieurs cycles de vie successifs de peuplement ...etc.

Les résultats graphiques sont présentés en annexe II. Le tableau 8 en fait une synthèse :

Tableau 8 : Comparaison des résultats de notre calculatrice carbone avec le bilan carbone « avec recyclage » réalisé par Salomé Fournier (ONF, sur la base des données Gesfor) - exemple sur le sapin douglas en fertilité 2

Méthode étudiée ici					Bilan carbone "avec recyclage"
	LBC V2	Cornillier et al.	Valade et al.	Moyenne	Moyenne
Stock de C moyen dans les produits bois (TeqCO <sub>2</sub> /ha)	271	306	110	229	334
Effet moyen de substitution (TeqCO <sub>2</sub> évité/ha/an)	9.64	7.01	11.17	9.28	7.83

Les résultats montrent que :

- Le stockage de carbone dans les produits bois du douglas est sous-évalué par notre calculatrice carbone par rapport à l'étude qui intègre les aspects recyclage, quel que soit le scénario ici utilisé. Le scénario de *Cornillier et al.* donne la valeur (306 TeqCO<sub>2</sub>/ha) la plus proche de celle issue de l'étude intégrant un schéma de filière plus complet (334 TeqCO<sub>2</sub>/ha) ;
- A contrario, par rapport à l'étude « avec recyclage », l'effet de substitution du douglas calculé par notre calculatrice est globalement surestimé ; seul le scénario de *Valade et al.* sous-estime légèrement l'effet de substitution du douglas.

Ces conclusions permettent de resituer les résultats issus de la méthodologie utilisée ici pour les itinéraires sylvicoles de la région Sud – vis-à-vis de ses lacunes relatives à la prise en considération du recyclage, réemploi et des incertitudes sur les valeurs de durées de vie moyenne et de coefficients de substitution.

## IV. Recommandations pour conserver et améliorer la fonction carbone des forêts régionales

Les crises et accidents plus fréquents et plus forts en intensité (tempêtes, incendies, dépérissement) depuis quelques années viennent fragiliser le puits forestier français. D'après l'IGN, on observe une diminution du puits de 36% en comparant les périodes 2005-2013 et 2013-2021 (cf. Figure 3). Il existe ainsi un fort enjeu aujourd'hui à préserver les stocks forestiers en place. Ils sont des éléments de réponse aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone 2050 (SNBC 2050). Pour cela, le sylviculteur peut jouer sur **le stock et le flux de carbone dans le peuplement forestier**. Mais optimiser le stock et le flux en même temps, sur un même peuplement, relève de l'impossible. Il s'agit de faire un **compromis** entre plusieurs facteurs : essence, âge, santé du peuplement, contexte pédoclimatique, risque incendie, ...etc.

Les forêts méditerranéennes présentent actuellement les stocks les plus bas comparés aux stocks des forêts alpines, continentales ou océaniques (EFESE, MTES, 2019). Toutefois, il sera difficile de voir évoluer spécifiquement ces stocks car les peuplements méditerranéens sont globalement âgés (Christine Deleuze, ONF). Aussi, considérant les risques liés au changement climatique, l'optimisation du flux de séquestration de carbone dans le seul peuplement ne peut constituer la seule stratégie.

La principale marge de manœuvre pour optimiser l'effet carbone des peuplements forestiers en région méditerranéenne se situe au niveau de la valorisation des produits bois.

### A. Protéger les stocks – Adapter la durée de révolution des peuplements selon le contexte

Allonger la durée de révolution d'un peuplement a pour effet de maintenir le stock de carbone sur pied et de produire des bois plus gros. C'est l'un des effets recherchés pour répondre aux objectifs de la SNBC 2050. Cette option n'est envisageable que lorsque l'aléa incendie est faible et plutôt sur des peuplements en bonne santé pour lesquels le diagnostic conduit à écarter un risque de dépérissement au regard des seuls aléas climatiques.

Par ailleurs, il est démontré qu'un jeune peuplement a une capacité de séquestration carbone plus rapide qu'un peuplement en fin de cycle sylvicole. Cet avantage des itinéraires plus courts optimise le flux et non le stock de carbone du peuplement forestier. Cette stratégie est plutôt à adopter lorsque le risque incendie est élevé et que la valorisation des produits bois n'exige pas un diamètre important de la grume.

Enfin, si la qualité des bois est médiocre au-delà d'un certain âge, il est préférable de s'orienter vers des itinéraires courts pour favoriser le flux de carbone avec une bonne efficacité carbone des produits bois générés.

Le tableau 9 récapitule les avantages et inconvénients des itinéraires plus courts et plus longs.

Tableau 9 : Synthèse des avantages et inconvénients carbone pour des itinéraires courts ou longs

	ITINERAIRES PLUS COURTS	ITINERAIRES PLUS LONGS
<b>AVANTAGES</b>	Augmente la production de bois Croissance plus rapide Plus faible exposition aux risques	Augmente le stock de carbone Produits bois plus gros
<b>INCONVENIENTS</b>	Produits de plus petite taille Moins de stock de carbone	Augmente la sensibilité aux sécheresses Augmente l'exposition aux risques Production moyenne plus faible

A titre d'exemple, cette étude montre que l'allongement de la durée de révolution sur un peuplement de pin d'Alep diminue légèrement le stock de carbone moyen dans le peuplement alors que l'on observe l'effet inverse pour le pin noir. De plus, dans le contexte actuel de transformation, l'effet induit par un rallongement de la révolution sur le stock des produits bois et de carbone évité n'est pas suffisant pour envisager ce type de choix pour les deux essences.

## B. Maximiser les flux

### 1. Favoriser les filières des produits bois à plus longue durée de vie

Privilégier les usages de bois à longue durée de vie est indispensable : d'une part le bois d'œuvre augmente la permanence du carbone ligneux et d'autre part il permet d'éviter l'utilisation de matériaux à haute empreinte énergétique tels que le béton ou l'acier. L'effet de substitution du bois d'œuvre est considérablement plus élevé que celui du papier, du carton ou encore du bois de chauffage.

Certes, l'augmentation de la durée de vie d'un produit n'a qu'un effet temporaire dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais l'effet de substitution engendré lui, est permanent et cumulatif. La substitution est un effet indirect mais définitif de réduction d'empreinte écologique. Pour s'exprimer pleinement au bénéfice des politiques d'atténuation, la substitution bois va de pair avec une inflexion très forte des politiques industrielles et la promotion de l'usage du bois auprès de tous les maillons des chaînes de valeur.

Le bois d'œuvre n'est pas le seul produit intéressant pour sa durée de vie. Le développement d'entreprises de transformation du bois en panneau ira aussi dans le sens d'une amélioration significative du stockage carbone issu des bois de la région Sud. Transformer en panneau plutôt qu'en énergie ou en papier rallonge la durée de vie moyenne du produit bois et du carbone stocké. D'ailleurs, le scénario de substitution du BE et BI papier par du BI panneau pour le pin noir et d'Alep testé dans cette étude montre bien une augmentation considérable du stock de carbone dans les produits bois. L'usage en BE est à privilégier au stade du recyclage, de panneaux par exemple (c'est d'ailleurs cela qu'on appelle usage en cascade).

Ce type de résultat peut venir en appui aux politiques de développement économique et de planification écologique promues par la région.

Enfin, il est essentiel de prendre en compte ces considérations à l'échelle locale afin de diminuer l'empreinte carbone liée à l'exportation du bois provenant des forêts. L'industrie du transport est l'une

des principales sources d'émissions de carbone, ce qui rend d'autant plus intéressant de privilégier le circuit-court pour réduire les distances parcourues par le bois. Des approvisionnements plus proches contribuent efficacement à limiter l'impact environnemental de cette activité, en jouant comme pour la substitution sur du carbone évité.

Quelques actions à favoriser :

- **Augmenter et privilégier la valorisation de bois d'œuvre** pour tous les nouveaux peuplements y compris provenant de peuplements feuillus ;
- **Valoriser une plus grande part de bois d'industrie**, notamment sous forme de **panneau** : process peu technique, fort potentiel d'utilisations, utilisation locale possible et dans des usages à durée de vie plus longs ;
- **Limiter les importations** et favoriser la production locale.

## 2. Encourager le ré-usage et le recyclage des matériaux bois

Allonger le temps de résidence d'un produit bois dans l'environnement favorise la longévité du stockage carbone. Dans une stratégie d'atténuation des émissions carbone, inciter au réemploi et au recyclage des produits bois existants en accompagnant le développement d'entreprises spécialisées dans ces domaines est impératif pour réduire l'impact carbone de l'activité humaine.

Des subventions existent aujourd'hui pour encourager la filière bois en ce sens et le recours aux matériaux biosourcés. Par exemple, le Fonds Bois et Eco-Matériaux s'adresse à l'ensemble des PME / ETI de la filière bois (transformation du bois et des matériaux biosourcés) à l'exception de l'amont forestier pour accompagner des acteurs structurants dans leurs projets de développement.

Outre l'investissement direct dans des entreprises d'écoconception ou de réutilisation du bois, l'axe de la communication sur le réemploi n'est pas à négliger. Favoriser le dialogue entre les différents acteurs de la filière forêt-bois sera favorable à une meilleure valorisation des coproduits et un recyclage/ré-usage optimisé des produits bois.

## Conclusion

Optimiser sa stratégie carbone en vue d'une atténuation des émissions de gaz à effet de serre repose sur deux leviers principaux pour la forêt et le bois :

1. Protéger les stocks de carbone des forêts régionales en optimisant la dynamique des itinéraires sylvicoles selon la sensibilité des peuplements au changement climatique, la qualité des bois et le niveau de risques du milieu. Cette gestion doit se réfléchir en pensant un équilibre global de la forêt. Pour répondre à cet objectif, l'ONF travaille avec le soutien de la région Sud à la mise en place d'un comparateur de gestions forestières (projet de Philippe Dreyfus, pôle RDI).

2. Maximiser le flux carbone vers les produits bois en maximisant leur durée de vie. De nombreuses solutions innovantes existent en France et à l'étranger (I4CE, 2022). Les connexes issus de la transformation du BO (ex : chutes de sciage) ou les bois de plus faible qualité et diamètre sont orientés vers du BE ou du BI papier mais pourraient être valorisés vers des usages à plus longue durée de vie : dans le secteur du bâtiment comme isolants, panneaux pour les murs et les planchers par exemple, dans l'ameublement comme éléments de bureaux ou cuisines. On observe notamment peu de contraintes techniques au développement de la filière de production de panneaux et isolants, ce qui rend ce secteur industriel très prometteur.

Les politiques publiques ont le pouvoir d'élargir les débouchés de tels produits en mettant en place les bonnes incitations économiques et contractuelles. Pour la région Sud, plusieurs primes d'action sont possibles :

- Dans le cadre de la planification écologique dont la forêt constitue l'une des priorités opérationnelles de la région Sud ;
- Via l'orientation des sylvicultures et la priorisation des usages du bois à plus longue durée de vie ;
- Via la valorisation de l'aménagement pour dynamiser l'offre en produits semi finis (panneaux, produits d'ingénierie à base de feuillus par exemple) ;
- Via le soutien aux nouvelles entreprises de transformation (panneaux de construction et isolants en bois) pour améliorer la compétitivité de ces produits bois relativement aux produits de construction concurrents (béton, plâtre, laine de verre ...).

En plus, peuvent être cités des travaux de recherche en cours qui devraient venir préciser la participation des peuplements forestiers et des produits bois dans les stratégies d'atténuation :

- Projet d'un simulateur multicritère de scénarios de gestion sylvicole d'une forêt (porté par le pôle RDI - Philippe Dreyfus). Début : 2022. Durée : 4 ans.
- Projet BACCFIRE : Développement de schémas de filières génériques pour calculer la contribution du secteur forestier à l'atténuation. Début : 2022. Durée : 3 ans.
- Projet CASTOR (porté par le pôle RDI) : évaluation de l'impact des pratiques mécanisées du sol sur le stock de carbone. Début en juin 2023. Durée : 3 ans.

## Table des figures et des tableaux

Figure 1 : Emissions nettes des gaz à effet de serre par continent (source : GIEC, 2022) .....	1
Figure 2 : Répartition de la production biologique de toutes les forêts françaises en Mm3, avec les chablis de Klaus. Nathalie Derrière (source : © IGN 2023) .....	2
Figure 3 : Principales composantes du puits forestier par région, en 2021 (en MTCO2eq) (source : Observatoire des forêts française 2023) .....	2
Figure 4 : Illustration de la séquestration, du stockage et de la substitution carbone appliqués à l'écosystème forestier .....	3
Figure 5 : Récolte et usage du bois (source : ADEME, 2021).....	5
Figure 6 : Ajout du stock de carbone séquestré pendant la phase juvénile du peuplement. Exemple sur le sapin pectiné en F1.....	9
Tableau 1 : Récapitulatif des temps de demi-vie et durées de vie moyennes choisies pour tous les itinéraires de cette étude .....	11
Tableau 2 : Récapitulatif des coefficients de substitution choisis pour tous les itinéraires de cette étude .....	13
Tableau 3 : Synthèse sur le stockage de carbone dans le peuplement forestier pour les itinéraires sylvicoles étudiés.....	22
Tableau 4 : Synthèse sur le stockage de carbone dans les produits bois pour les itinéraires sylvicoles étudiés.....	23
Tableau 5 : Mesure de l'effet d'allongement de durée de révolution et utilisation de BI panneau sur le stockage de carbone dans les produits bois du pin noir et du pin d'Alep .....	24
Tableau 6 : Synthèse de l'effet de substitution des produits bois pour les itinéraires sylvicoles considérés.....	25
Tableau 7 : Mesure de l'effet d'allongement de durée de révolution et utilisation de BI sur l'effet de substitution dans les produits bois du pin noir et du pin d'Alep .....	26
Tableau 8 : Comparaison des résultats de notre calculatrice carbone avec le bilan carbone « avec recyclage » réalisé par Salomé Fournier (ONF, sur la base des données Gesfor) - exemple sur le sapin douglas en fertilité 2.....	27
Tableau 9 : Synthèse des avantages et inconvénients carbone pour des itinéraires courts ou longs..	29

## Glossaire

ADEME : l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

BE : bois énergie

BI : bois industrie

BO : bois d'œuvre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

LBC : Label Bas Carbone

ONF : Office National des Forêts

RDI : Recherche Développement et Innovation

SNBC 2050 : Stratégie Nationale Bas Carbone 2050

## Bibliographie

- ADEME. Cornillier *et al.* 2017. *Bilan environnemental des systèmes forestiers vis à vis du changement climatique et des autres enjeux : Pour une optimisation des pratiques sylvicoles et des politiques territoriales*. Rapport final. 79 pages.
- ADEME, 2021. Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique. 40p. Disponible sur : [https://www.ofme.org/documents/Chgmt-clim/2021\\_ADEME\\_usagebois\\_CC.pdf](https://www.ofme.org/documents/Chgmt-clim/2021_ADEME_usagebois_CC.pdf).
- EFSE, 2019. La séquestration du carbone par les écosystèmes français. <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/00000000016a4ec72f5b1ccb117ebd87>
- Fournier *et al.* Annals of Forest Science (2022) Dendrometric data from the silvicultural scenarios developed by Office National des Forêts (ONF) in France: a tool for applied research and carbon storage estimates 79:48. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01171-7>.
- GIEC, 2022. *Climate change 2022 – Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.* [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf)
- I4CE, 2022. Le Pierrès, O. *et al.*. *Réorienter les usages du bois pour améliorer le puits de carbone. Sur quels produits miser en priorité ?*
- IGD, 2020. Antoine Colin de l'IGN. *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises. 1.4 Contribution de la forêt à l'atténuation de l'effet de serre (bilan carbone).* <https://foret.ign.fr/IGD/fr/indicateurs/1.4>.
- © IGN 2023. Inventaire forestier national – Mémento édition 2023. [https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento\\_2023.pdf](https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2023.pdf)
- INRAE. Fournier *et al.* Annals of Forest Science (2022). *Dendrometric data from the silvicultural scenarios developed by Office National des Forêts (ONF) in France : a tool for applied research and carbon storage estimates*. 11 pages. 79:48. <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01171-7>
- Label Bas Carbone, 2020. Version 2 - Méthode boisement. 42p.
- Observatoire des forêts françaises, 2023. *Atténuation de l'effet de serre – Comment les écosystèmes forestiers et l'usage des produits bois contribuent-ils à atténuer l'effet de serre ?* <https://foret.ign.fr/themes/attenuation-effet-de-serre>
- ONF, 2022. *Éléments techniques et outils pratiques pour le développement des projets forestiers de compensation des émissions carbone*, Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 38p + annexes.
- Pingoud K., Wagner F., 2006. *Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products : the first order decay revisited*. 20p.
- Valade A., *et al.* 2017, *Bilan carbone de la ressource forestière française. Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants*. Rapport final. Mars 2017, Paris. ADEME/1260C0056. Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque).

## Annexes

### ANNEXE I : DESCRIPTIF DES VARIABLES UTILISEES DANS LE LIVRABLE 2022 POUR LA CONSTRUCTION DU TABLEUR DE CALCUL DE SEQUESTRATION CARBONE DANS LES PEUPELEMENTS (ONF, 2022)

#### 1. Description de l'itinéraire

Pour chaque itinéraire il est précisé l'essence, la fertilité, l'origine des graines (plantation ou régénération naturelle), la densité et le guide sylvicole utilisé.

Dans les fiches synthétiques ces informations sont indiquées dans l'en-tête.

#### 2. Variables dendrométriques

Les variables dendrométriques décrivent l'évolution du peuplement au cours de sa croissance et au fur et en réaction aux différentes éclaircies. Toutes les abréviations des variables de ce type débutent par « stand » sur la table complète.

Les variables suivantes sont décrites :

- L'âge de la graine (stand\_age) en année.

- Le peuplement avant ou après éclaircie (stand\_cut) avec des valeurs de « 1 » pour avant et de « 2 » pour après la coupe. L'âge du peuplement alors reste identique.

- La hauteur dominante (stand\_hdom) en mètres.

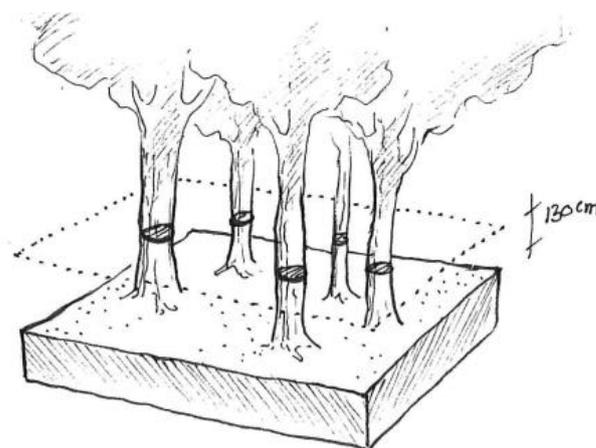
- La densité (stand\_n) en N.ha<sup>-1</sup>, c'est-à-dire en nombre de tiges par hectare.

- La surface terrière (stand\_ba) en m<sup>2</sup>. ha<sup>-1</sup>.

La surface terrière d'un arbre correspond à la surface transversale du tronc à 1,30 mètre (hauteur de poitrine) Pour un peuplement elle correspond à la surface de toutes les sections transversales des troncs, à 1,30 m de hauteur, des arbres présents sur un hectare de forêt

#### *Illustration surface terrière*

*(source : Alain et François Freytet)*



- Le diamètre quadratique moyen (stand\_dbh\_mean) en cm.

- Le diamètre dominant (stand\_dbh\_dom) en cm.

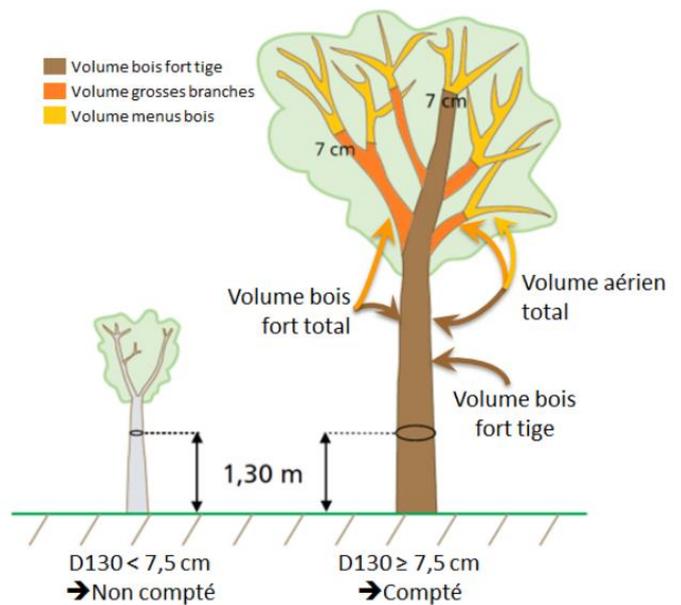
Illustration

- Le volume bois fort tige ( $\text{stand\_tige\_vstem\_c7}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , il s'agit du volume sur écorce du fût, avec un diamètre fin bout supérieur à 7 cm.

- Le volume bois fort ( $\text{stand\_vtot\_c7}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , il s'agit du volume sur écorce du fût et des branches avec un diamètre fin bout supérieur à 7 cm.

- Le volume total ( $\text{stand\_vtot\_c0}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , il s'agit du volume sur écorce de la souche, du fût et des branches sans diamètre fin bout fixé.

**Illustration volumes bois fort tige / bois fort et total (source IGN)**



Sur les fiches synthétiques ce sont les valeurs en volume total qui sont indiquées.

- La production totale en surface terrière ( $\text{stand\_prod\_ba}$ ) en  $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ ,

- L'accroissement moyen en surface terrière ( $\text{stand\_mai\_ba}$ ) en  $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- L'accroissement courant en surface terrière ( $\text{stand\_cai\_ba}$ ) en  $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- La production totale en volume bois fort tige ( $\text{stand\_prod\_vstem\_c7}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ .

- L'accroissement moyen en volume bois fort tige ( $\text{stand\_mai\_vstem\_c7}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- L'accroissement courant en volume bois fort tige ( $\text{stand\_cai\_vstem\_c7}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- La production total en volume total ( $\text{stand\_prod\_vtot\_c0}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ .

- L'accroissement moyen en volume total ( $\text{stand\_mai\_vtot\_c0}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

- L'accroissement courant en volume total ( $\text{stand\_cai\_vtot\_c0}$ ) en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ .

L'accroissement correspond à la production rapportée à une durée.

L'accroissement courant en volume est la différence de volume entre deux années successives ; alors que l'accroissement moyen en volume est réalisé sur plusieurs années, depuis l'origine du peuplement.

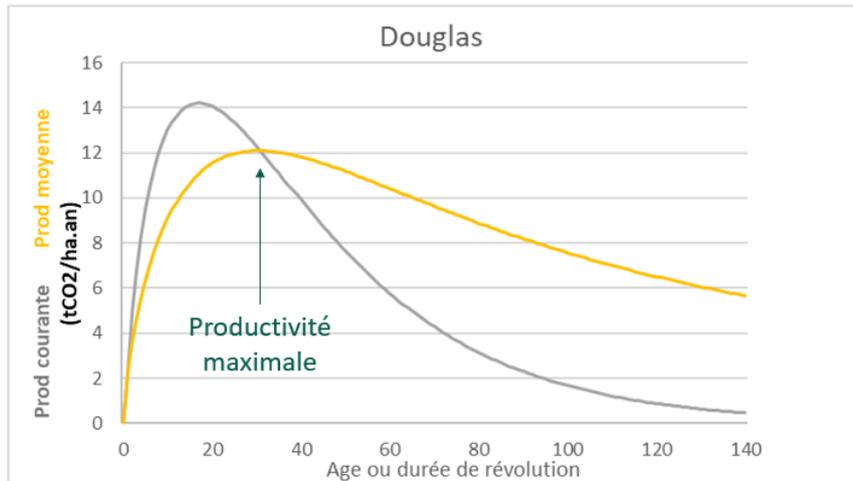


Illustration des productivités courantes et moyenne (source réseau RDI)

### 3. Variables d'éclaircies

Les variables d'éclaircies correspondent aux données concernant les coupes réalisées selon l'itinéraire. Ces données sont indiquées de la même manière que pour les variables dendrométriques. Les explications ci-dessus sont applicables de la même façon. Toutes les abréviations des variables de ce type débutent par « harv » sur la table complète.

Les variables suivantes sont décrites :

- La densité récoltée (harv\_n) en N. ha<sup>-1</sup> c'est-à-dire en nombre de tiges par hectare.
- La surface terrière récoltée (harv\_ba) en m<sup>2</sup>. ha<sup>-1</sup>.
- Le diamètre quadratique moyen des tiges récoltées (harv\_dbh) en cm.
- Le volume bois fort tige récolté (harv\_vstem\_c7) en m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>.
- Le volume total récolté (harv\_vtot\_c0) en m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>.
- Le volume bois fort tige unitaire moyen de la coupe (harv\_vstem\_c7\_unit) en m<sup>3</sup>. stem<sup>-1</sup>

Dans les fiches synthétiques seul le volume total récolté est indiqué.

En l'ajoutant au volume total, on obtient la production totale du peuplement.

### 4. Variables de comptabilité carbone.

Les variables de comptabilité carbone convertissent les données de volumes en tonne de carbone (tCO<sub>2</sub>) d'après l'infradensité de l'essence et la connaissance du taux de carbone dans la matière sèche. Toutes les abréviations des variables de ce type débutent par « carb » sur la table complète.

- L'infradensité de l'essence selon la base de Dupouey (biom\_dens\_Dupouey) correspond au coefficient utilisé pour convertir les mètres cube en tonnes de matière sèche. Il faut multiplier la biomasse totale aérienne par l'infradensité, qui est le ratio entre une masse de bois déshydratée et son volume de bois frais.
- Le stock de carbone dans la biomasse aérienne (carb\_aer) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup>, correspond au stock de carbone dans le bois des arbres avec écorce, de la souche, du fût et des branches.

- Le stock de carbone dans la biomasse racinaire (carb\_root) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup>.
- Le stock de carbone dans la biomasse vivante (carb\_stor) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup> qui correspond à la somme des deux stocks précédents, de la biomasse aérienne et racinaire.
- Le carbone récolté de la biomasse vivante (harv\_carb\_aer) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup> correspond au transfert de carbone lors des coupes.
- Le stock de carbone moyen sur la révolution (carb\_stor\_mean) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup>, correspond au stock moyen du peuplement en place pendant toute la durée de sa vie, de son installation à sa coupe définitive.
- Le flux annuel de carbone séquestré dans la biomasse (carb\_cai) en tCO<sub>2</sub>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. C'est la correspondance de l'accroissement courant en carbone, avec la différence de stock de carbone entre deux années successives.

Dans les fiches synthétiques, l'ensemble de ces variables sont incluses, sauf l'infradensité qui sert uniquement au calcul et le stock de carbone racinaire qui peut aisément se retrouver par soustraction des stocks de carbone de la biomasse aérienne et totale (vivante).

## ANNEXE II : FICHES SYNTHÈSES SUR L'EFFET CARBONE DES ITINÉRAIRES SYLVICOLES REGIONAUX

### Quelques éléments de compréhension préalables :

L'évaluation de la séquestration, du stock de carbone dans le peuplement forestier et ses produits bois et de l'effet de substitution s'appuie sur les modélisations de sylvicultures du pôle RDI de l'ONF. Elles sont en cohérence avec le guide de sylviculture Montagne des Alpes du Sud et le mémento sylvicole Pinède de pin d'Alep. Seules les références pour le cèdre de l'Atlas sont issues du guide de sylviculture national.

Le dire d'expert des spécialistes ONF sur le classement des bois et l'historique des ventes sont utilisés ici pour estimer le pourcentage en type de produits pour chaque itinéraire et chaque coupe. Des « fiches devenir produit bois » sont renseignées par ces experts afin de cibler l'usage des produits bois en région Sud pour chaque itinéraire concerné par notre étude.

La part de carbone stockée relativement par les BO, BI et BE ne se distingue pas sur l'ensemble des représentations graphiques ci-après.

Pour couvrir l'intervalle d'incertitudes liées aux (i) durées de vie moyennes des produits bois et aux (ii) coefficients de substitution – pour lesquels les références restent très variables – plusieurs littératures sont prises en compte.

Les données choisies pour les durées de vie moyennes des produits bois sont issues :

- De la version 2 de la méthode reboisement du Label Bas Carbone (LBC, 2020), courbe **bleue** nommée « CnLBC ».
- De Cornillier *et al.* (2017, projet GESFOR), courbe **grise** nommée « CnCornillier ».
- De Valade *et al.* (2017, projet BICAFF), courbe **jaune** nommée « CnValade ».

Les données choisies pour les coefficients de substitution sont issues :

- De la version 2 de la méthode reboisement du Label Bas Carbone (LBC, 2020), courbe **bleue** nommée « SubnLBC ».
- De Valade *et al.* (2017, projet BICAFF), courbe **jaune** nommée « SubnValade ».
- Des Indicateurs de Gestion Durable (IGD) de 2020, courbe **orange** nommée « SubnIGD ».

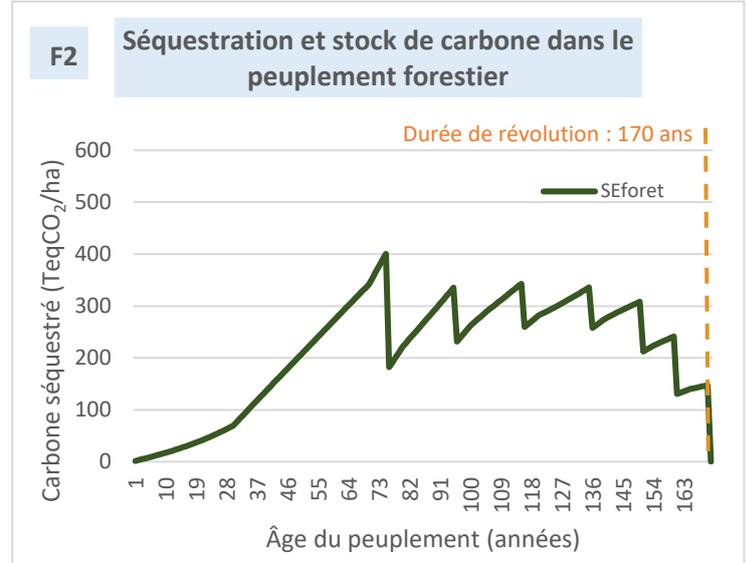
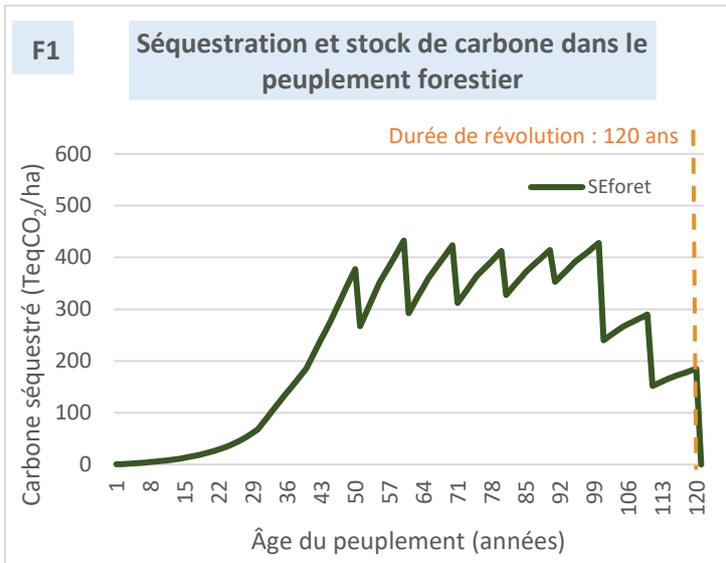
Par ailleurs, un nouvel itinéraire a été ajouté aux calculs pour nous permettre d'évaluer la robustesse de notre calculatrice carbone : le sapin douglas, en fertilité 2, avec une densité de plantation de 1 600 plants/ha, s'appuyant sur le guide de sylviculture national.

Le stock de carbone dans les produits bois et l'effet de substitution ont été calculés pour cet itinéraire via notre calculatrice carbone et comparés aux résultats d'une autre étude – bilan carbone « avec recyclage » réalisée par Salomé Fournier (ONF, sur la base des données Gesfor) – ayant établi des calculs similaires mais avec une meilleure précision dans le schéma de filière : billonnage des produits bois plus important, ajout des processus de recyclage et de ré-usage, simulation de l'effet carbone dans le peuplement et dans les produits bois en « séquences infinies » c'est-à-dire en répétant les modélisations sur plusieurs cycles de vie successifs de peuplement ...etc. Sa représentation graphique en dernière fiche synthèse est une courbe **vert clair** nommée « avec recyclage ».

# Fiche synthèse | Sapin pectiné

Sapin pectiné (*Abies alba*), en plantation sur une station en fertilité 1, et en fertilité 2, avec une densité initiale de 1 600 plants/ha, en cohérence avec le Guide de Sylviculture de Montagne (GSM) des Alpes du Sud

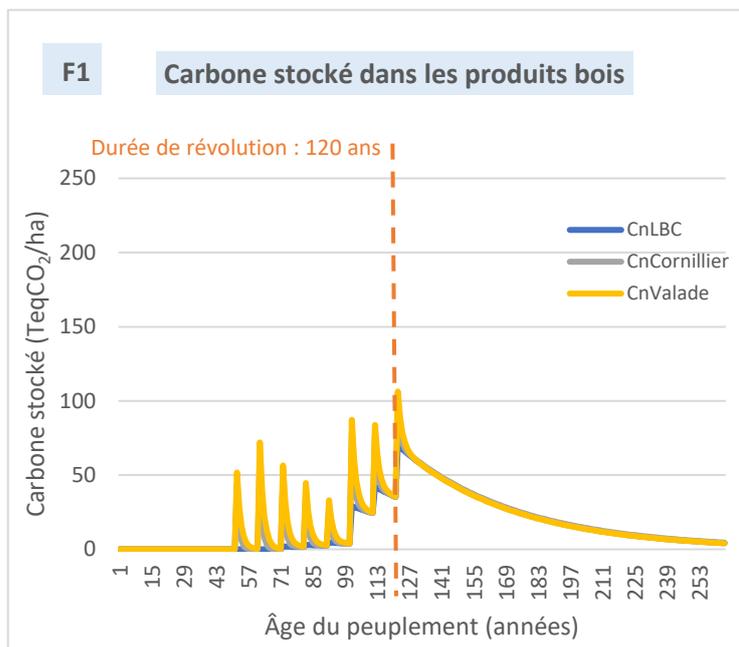
## → Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier



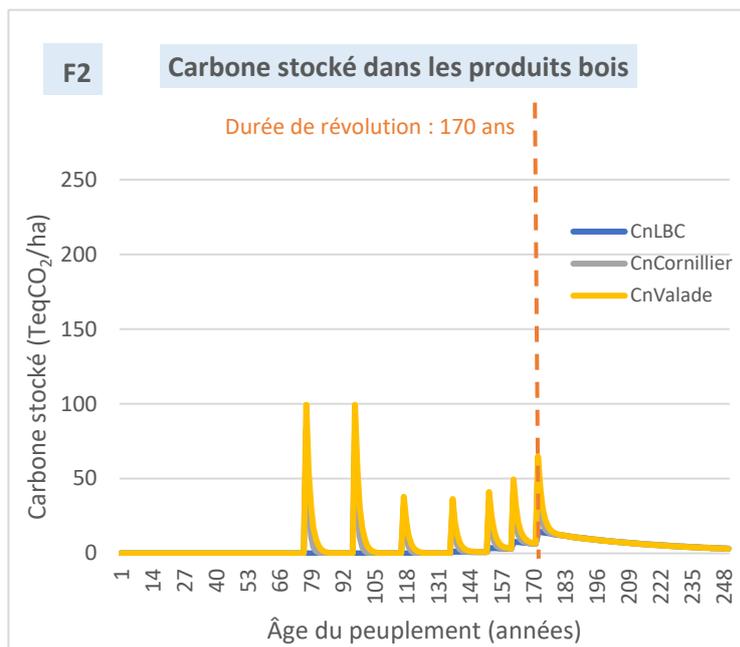
## → Devenir des produits bois

Fiche devenir produit bois : Sapin pectiné									
Fertilité 1									
Age de coupe		50	60	70	80	90	100	110	120
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		103	143	114	87	63	193	139	180
Diamètre moyen (cm)		16	28	33	35	39	47	47	55
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	5	10	40	40	60
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0	0
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	100	95	95	90	60	60	40
Fertilité 2									
Age de coupe		75	95	115	135	150	160	170	
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		198	198	75	70	83	97	125	
Diamètre moyen (cm)		16	23	30	37	38	45	50	
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	0	5	10	15	20	
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0	
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0	
	Bois énergie	100	100	100	95	90	85	80	

→ **Carbone stocké dans les produits bois**

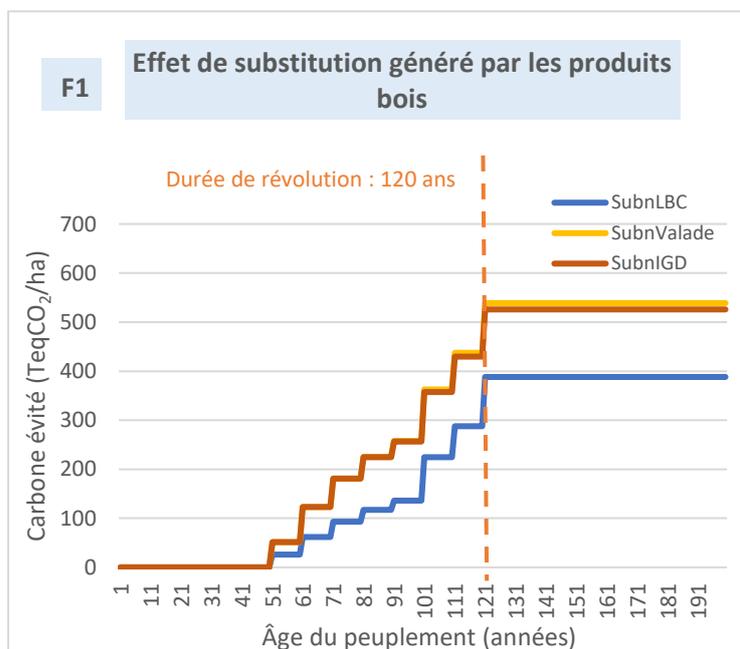


**Stock de carbone moyen = 38 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



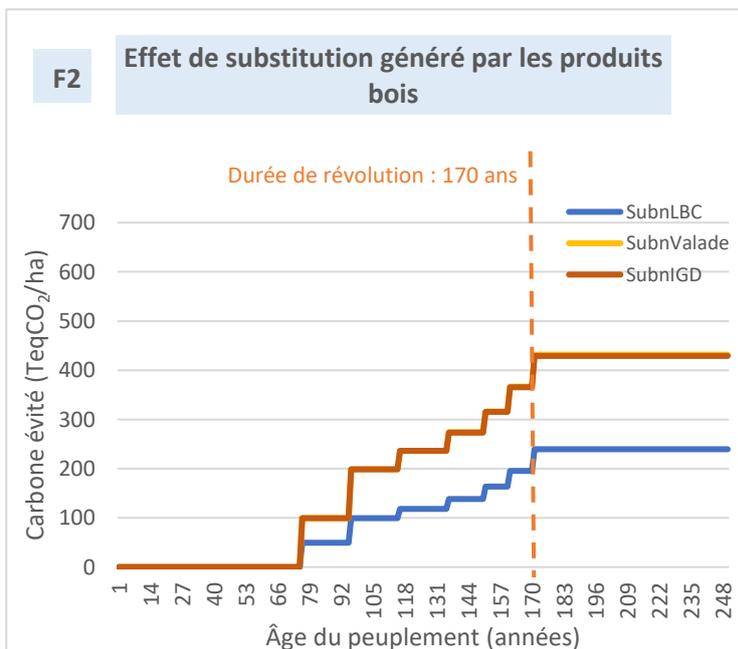
**Stock de carbone moyen = 7 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

→ **Effet de substitution**



**Moyenne de l'effet total de substitution = 484 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

**Effet moyen de substitution/an = 4.03 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



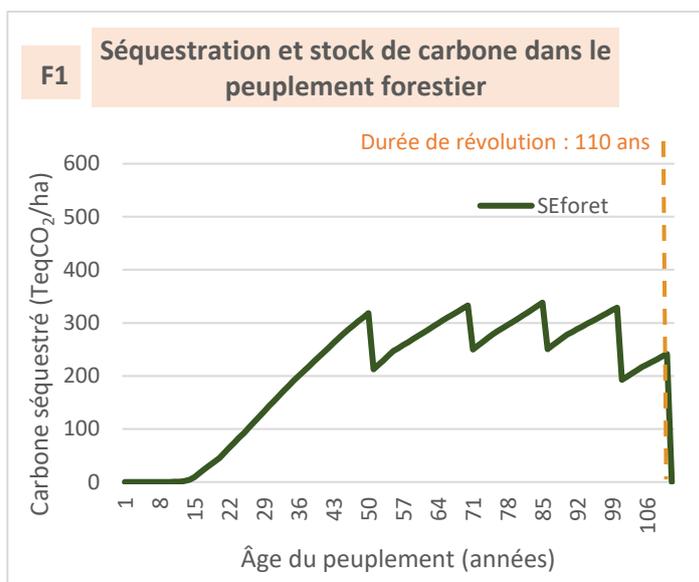
**Moyenne de l'effet total de substitution = 366 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

**Effet moyen de substitution/an = 2.16 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

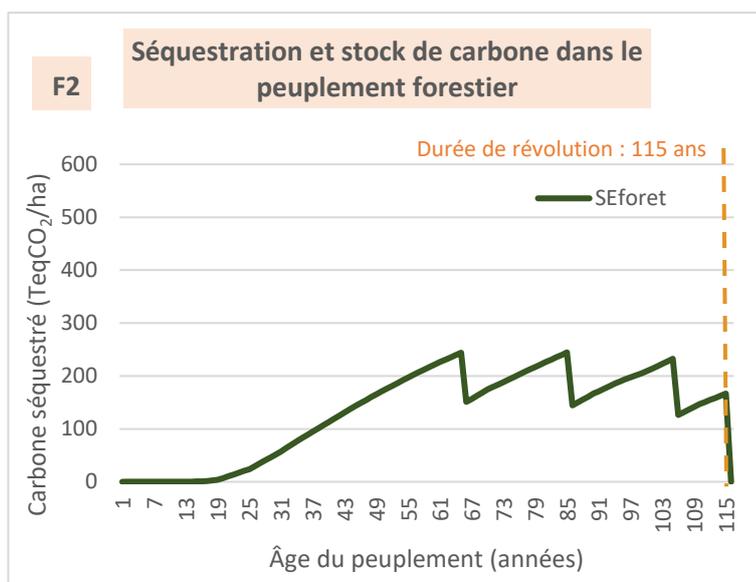
## Fiche synthèse | Pin sylvestre

Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), en plantation sur une station en fertilité 1, et en fertilité 2, avec une densité initiale de 1 100 plants/ha, en cohérence avec le Guide de Sylviculture de Montagne (GSM) des Alpes du Sud

→ **Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier**



Stock de carbone moyen = 204 TeqCO<sub>2</sub>/ha

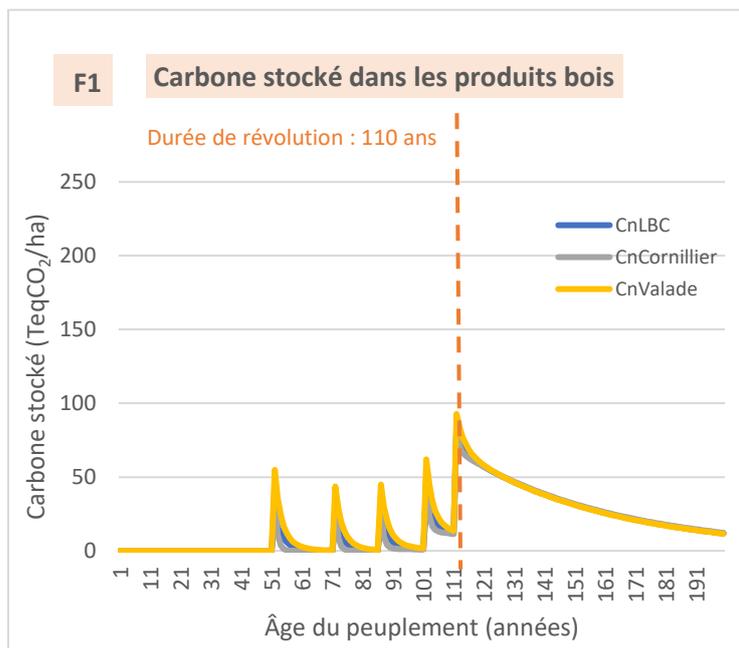


Stock de carbone moyen = 131 TeqCO<sub>2</sub>/ha

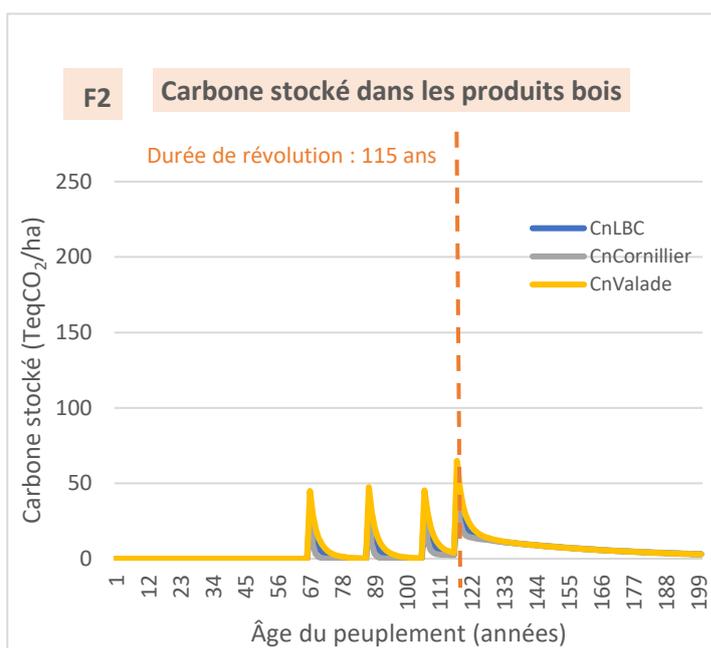
→ **Devenir des produits bois**

Fiche devenir produit bois : Pin sylvestre						
Fertilité 1						
Age de coupe		50	70	85	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		88	70	73	111	186
Diamètre moyen (cm)		20	25	31	39	49
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	30	80
	BI panneau	0	0	0	0	0
	BI papier	40	40	40	25	10
	Bois énergie	60	60	55	45	10
Fertilité 2						
Age de coupe		65	85	105	115	
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		72	76	76	112	
Diamètre moyen (cm)		18	26	37	44	
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	10	30	
	BI panneau	0	0	0	0	
	BI papier	40	40	35	25	
	Bois énergie	60	60	55	45	

→ **Carbone stocké dans les produits bois**

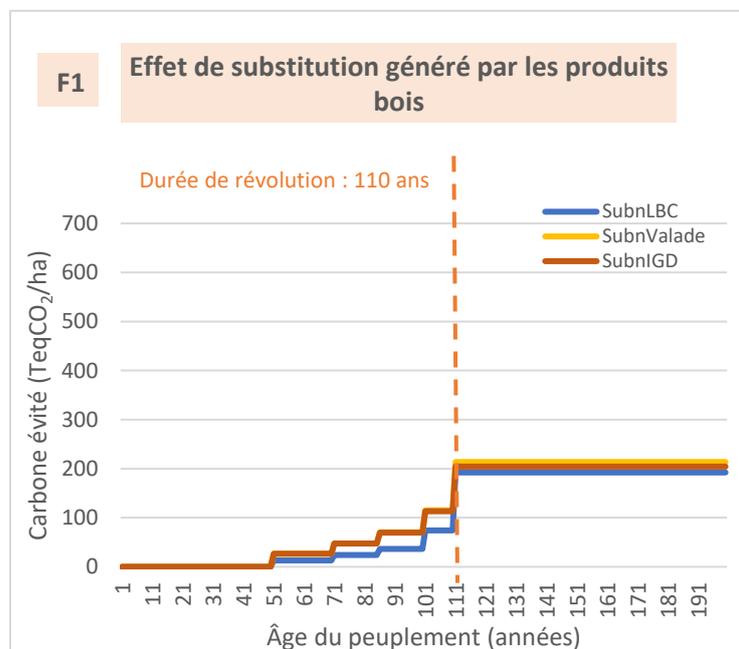


Stock de carbone moyen = 31 TeqCO<sub>2</sub>/ha



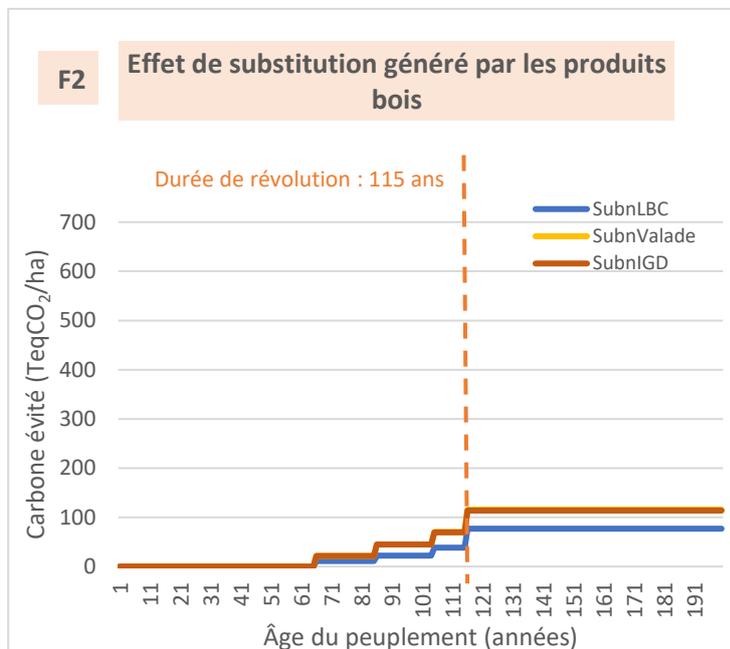
Stock de carbone moyen = 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



Moyenne de l'effet total de substitution = 203 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 1.85 TeqCO<sub>2</sub>/ha



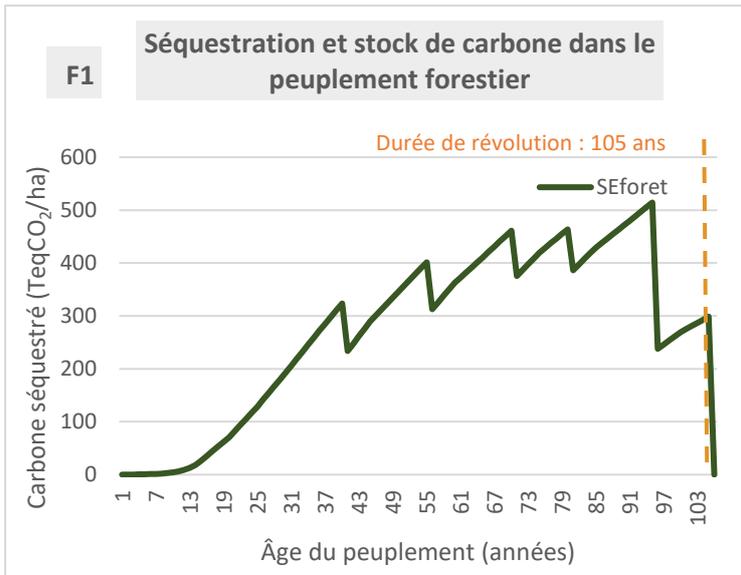
Moyenne de l'effet total de substitution = 102 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 0.89 TeqCO<sub>2</sub>/ha

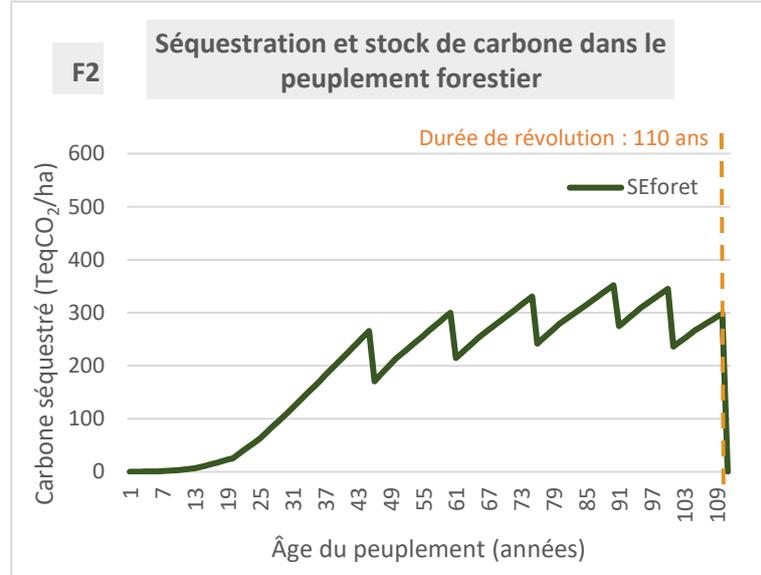
## Fiche synthèse | Pin noir

Pin noir (*Pinus nigra nigra*), en plantation sur une station en fertilité 1, et en fertilité 2, avec une densité initiale de 1 100 plants/ha, en cohérence avec le Guide de Sylviculture de Montagne (GSM) des Alpes du Sud

### → Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier



Stock de carbone moyen = 274 TeqCO<sub>2</sub>/ha

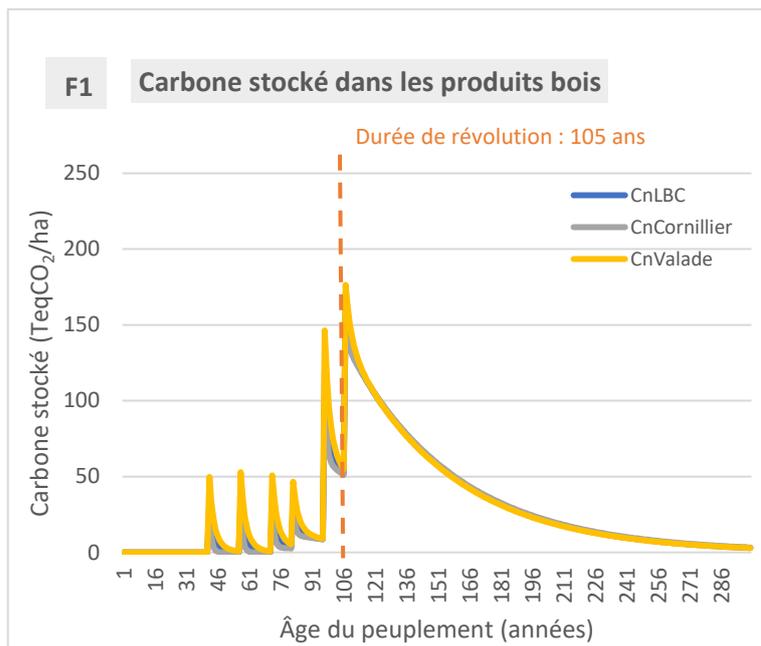


Stock de carbone moyen = 197 TeqCO<sub>2</sub>/ha

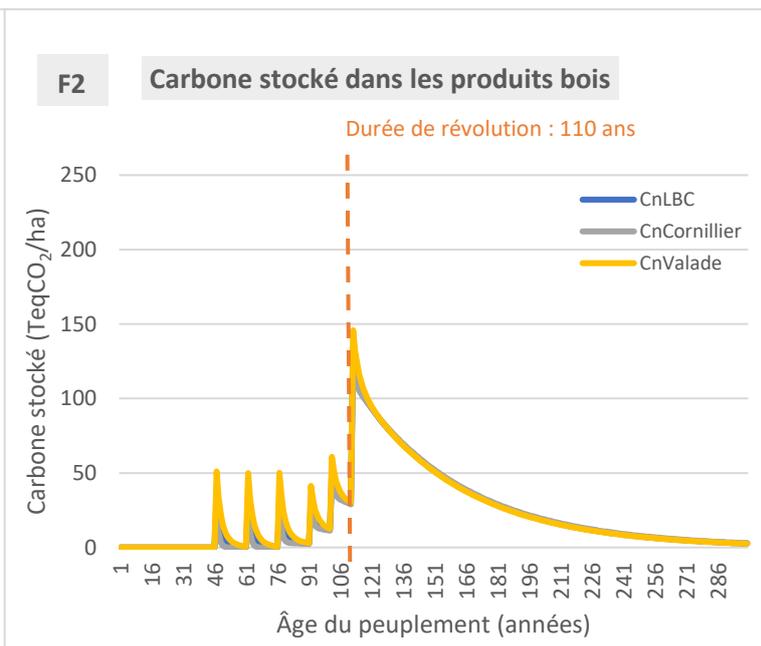
### → Devenir des produits bois

Fiche devenir produit bois : Pin noir							
Fertilité 1							
Age de coupe		40	55	70	80	95	105
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m <sup>3</sup> /ha)		72	75	75	68	247	258
Diamètre moyen (cm)		18	23	28	31	39	47
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	10	30	50	80
	Bl panneau	0	0	0	0	0	0
	Bl papier	40	40	40	30	20	10
	Bois énergie	60	60	50	40	30	10
Fertilité 2							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m <sup>3</sup> /ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre moyen (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	10	40	60	80
	Bl panneau	0	0	0	0	0	0
	Bl papier	40	40	35	25	15	10
	Bois énergie	60	60	55	35	25	10

→ **Carbone stocké dans les produits bois**

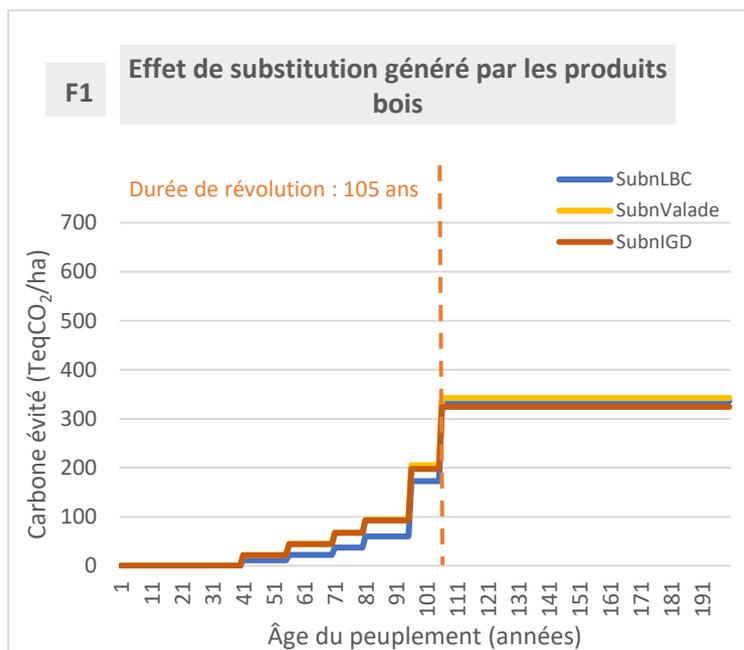


**Stock de carbone moyen = 78 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



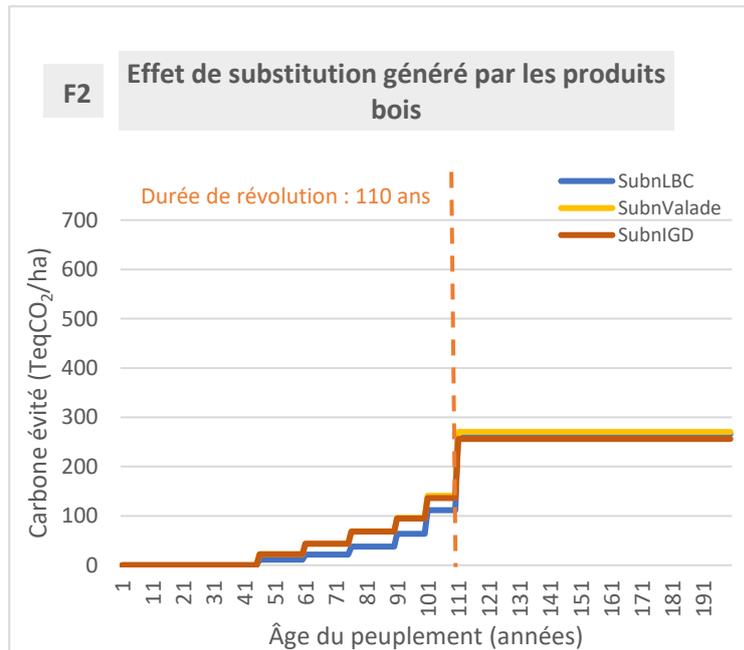
**Stock de carbone moyen = 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

→ **Effet de substitution**



**Moyenne de l'effet total de substitution = 334 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

**Effet moyen de substitution/an = 3.18 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



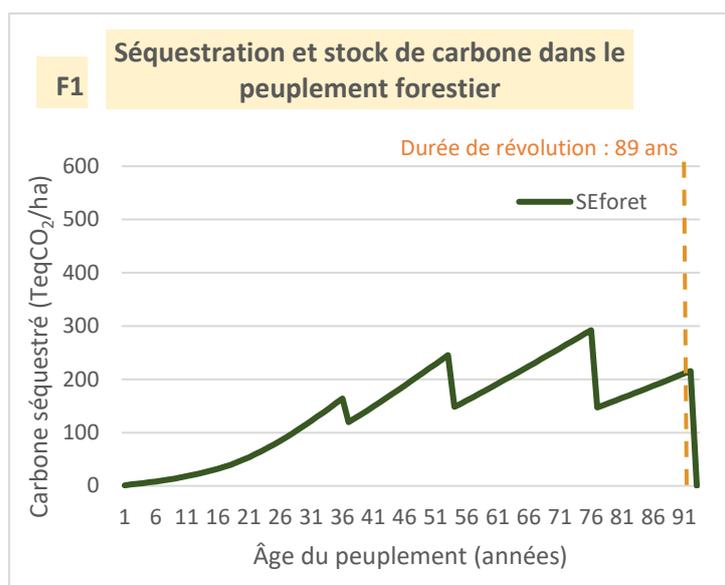
**Moyenne de l'effet total de substitution = 264 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

**Effet moyen de substitution/an = 2.40 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

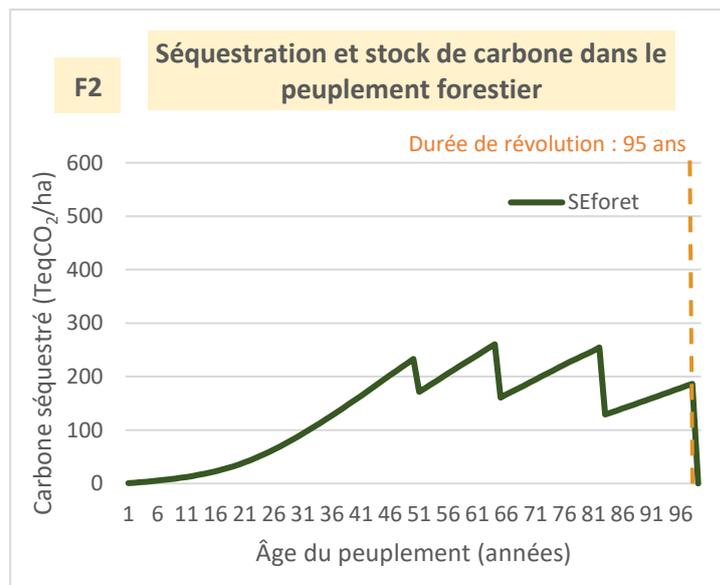
## Fiche synthèse | Pin d'Alep

Pin d'Alep (*Pinus halepensis*), en plantation sur une station en fertilité 1, et en fertilité 2, avec une densité initiale de 1 100 plants/ha, en cohérence avec le mémento sylvicole Pinède de Pin d'Alep

→ **Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier**



Stock de carbone moyen = 140 TeqCO<sub>2</sub>/ha

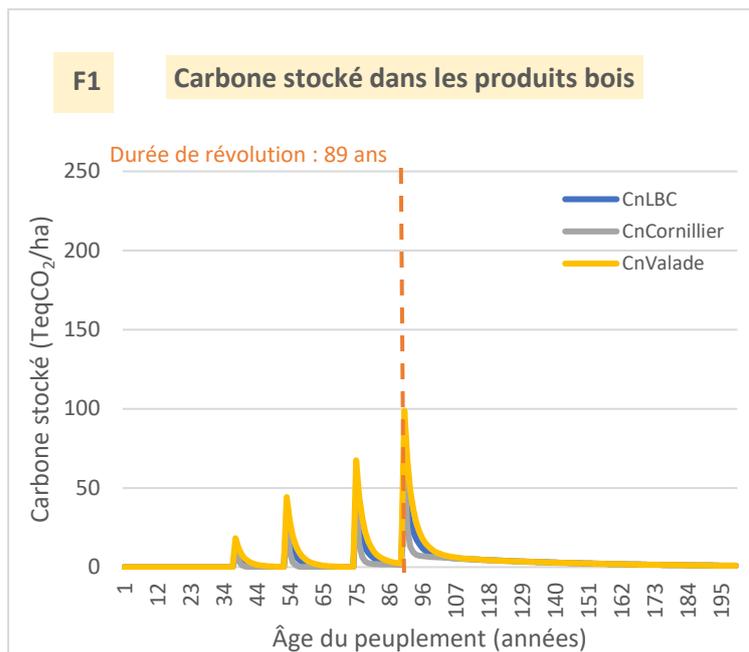


Stock de carbone moyen = 134 TeqCO<sub>2</sub>/ha

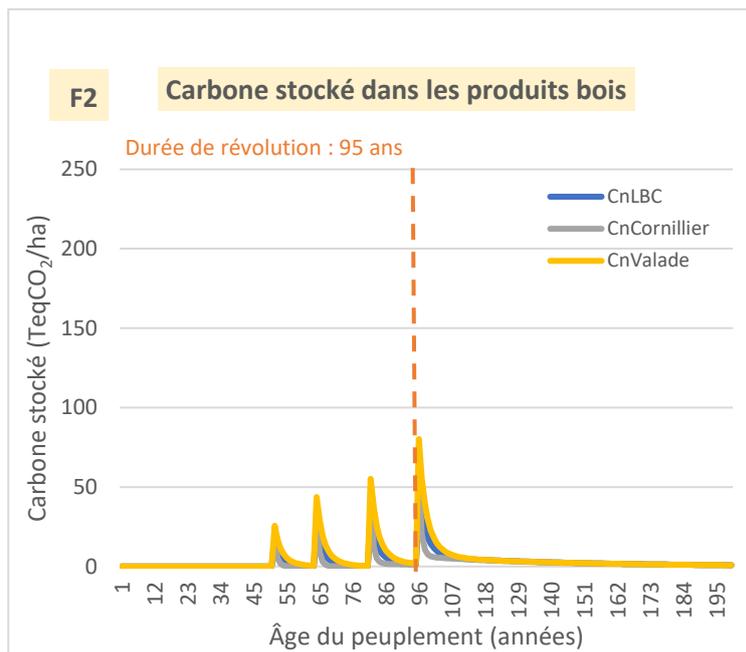
→ **Devenir des produits bois**

Fiche devenir produit bois : Pin d'Alep					
<b>Fertilité 1</b>					
Age de coupe		36	52	74	89
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		28	69	108	158
Diamètre moyen (cm)		14	19	29	38
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	10
	BI panneau	0	0	0	0
	BI papier	40	40	40	40
	Bois énergie	60	60	55	50
<b>Fertilité 2</b>					
Age de coupe		50	63	80	95
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		40	68	88	128
Diamètre moyen (cm)		16	21	29	38
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	10
	BI panneau	0	0	0	0
	BI papier	40	40	40	40
	Bois énergie	60	60	55	50

→ **Carbone stocké dans les produits bois**

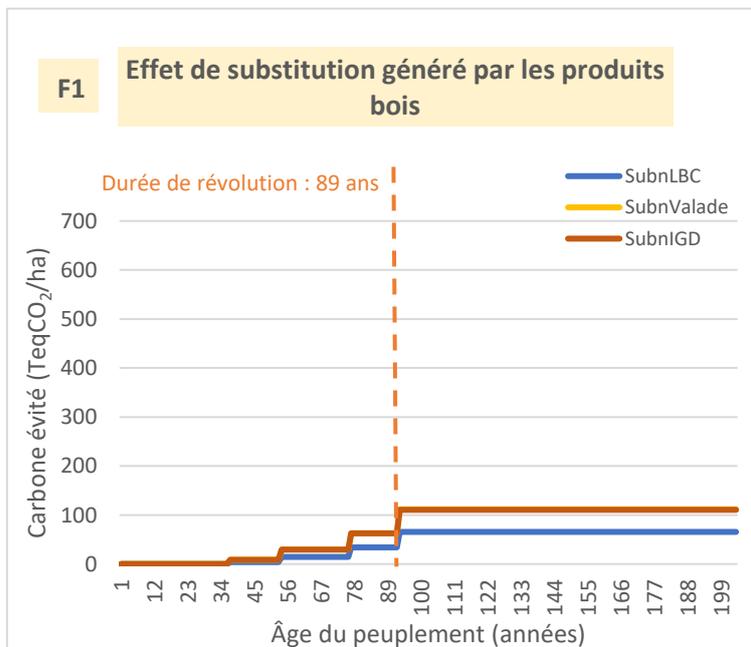


Stock de carbone moyen = 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha



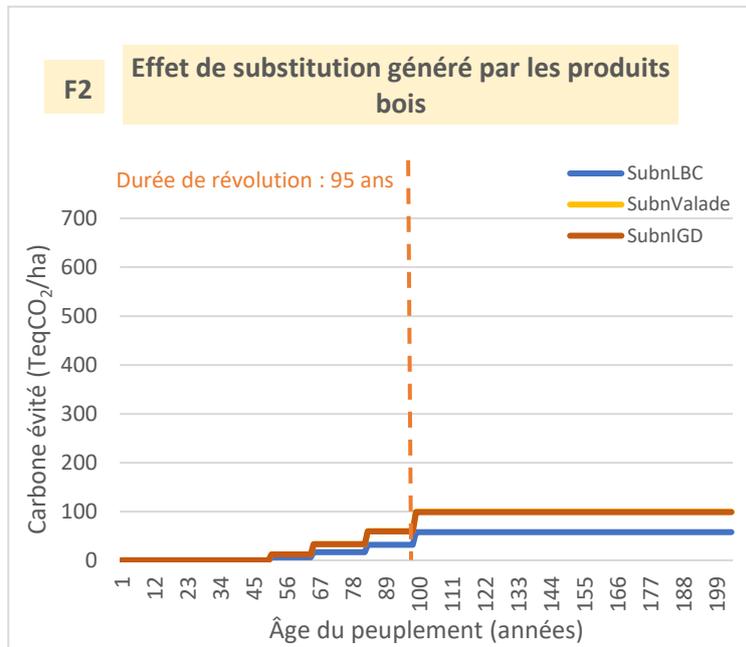
Stock de carbone moyen = 7 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



Moyenne de l'effet total de substitution = 95 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 1.08 TeqCO<sub>2</sub>/ha



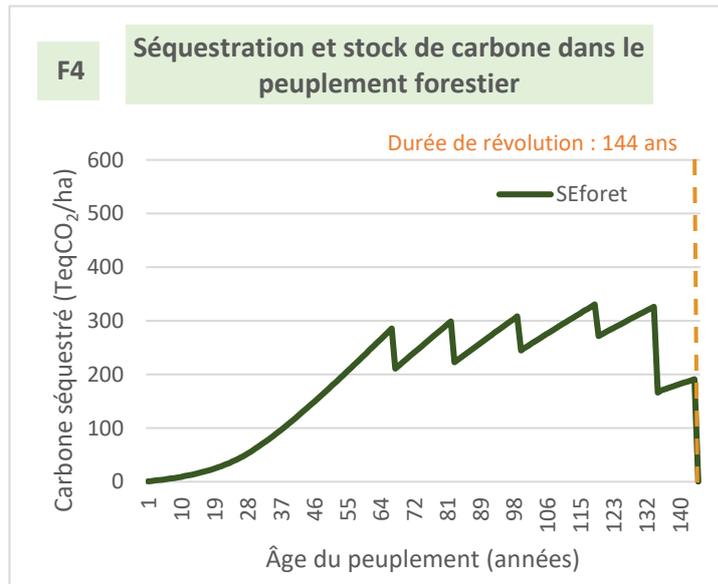
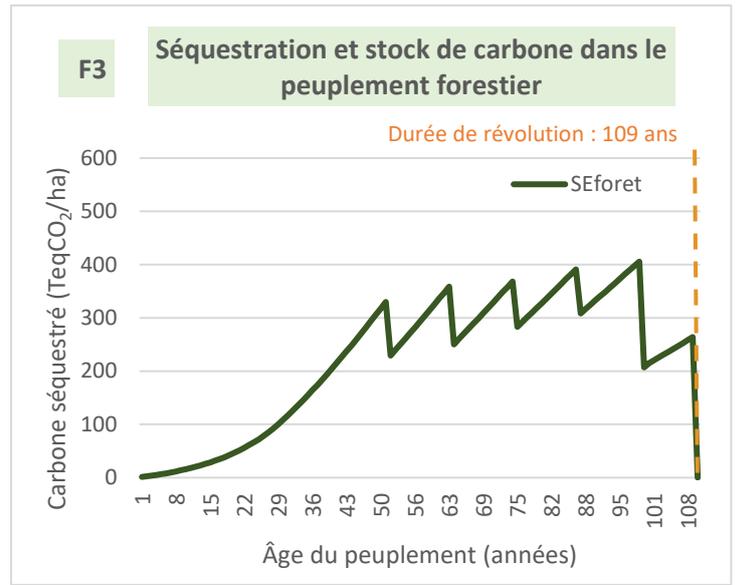
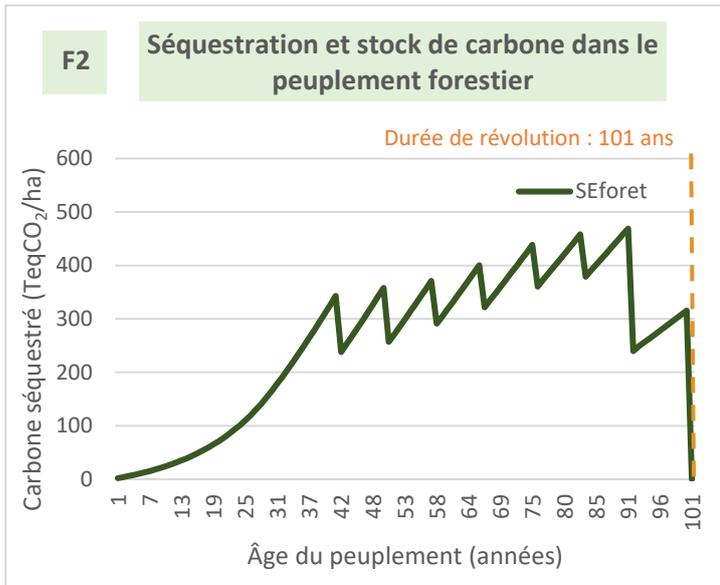
Moyenne de l'effet total de substitution = 85 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 0.9 TeqCO<sub>2</sub>/ha

# Fiche synthèse | Cèdre de l'Atlas – 1 100 plants/ha

Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), en plantation sur une station en fertilité 1, en fertilité 2, et en fertilité 3, avec une densité initiale de 1 100 plants/ha, suivant l'itinéraire de sylviculture national

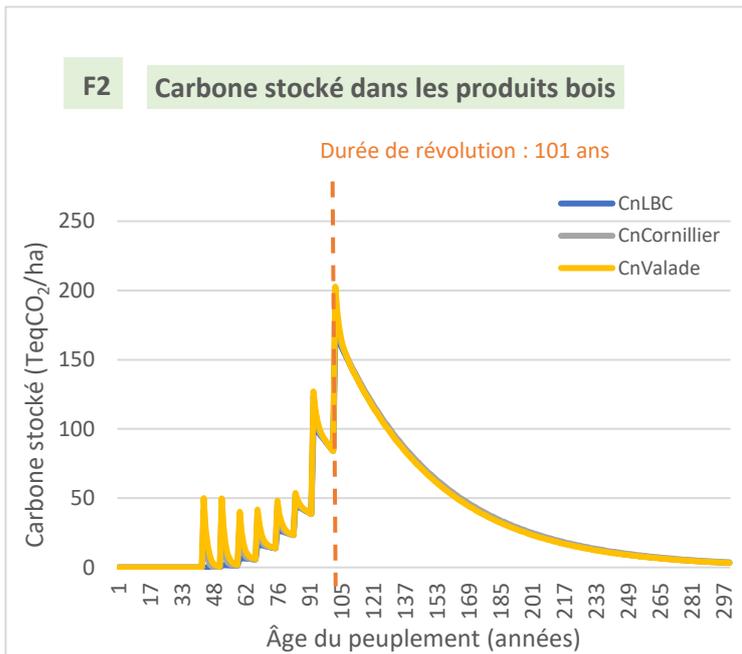
→ **Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier**



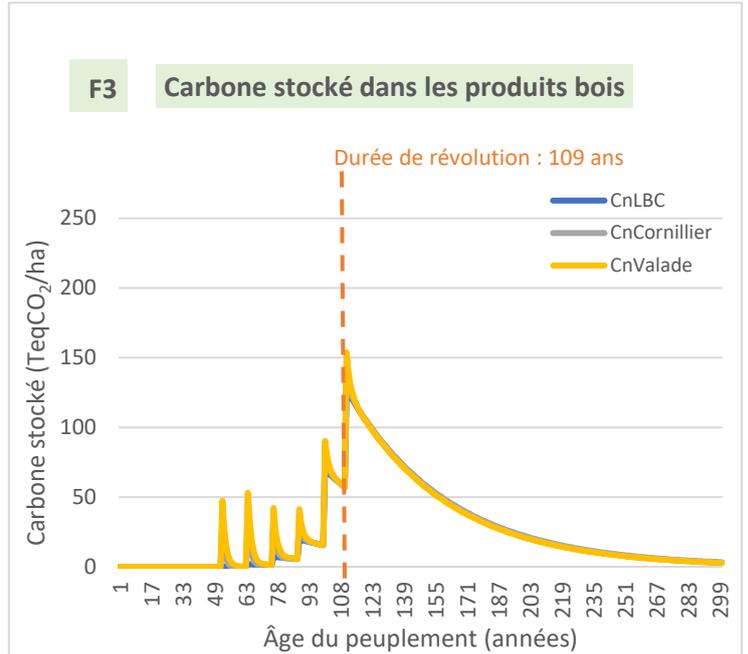
→ *Devenir des produits bois*

Fiche devenir produit bois : Cèdre de l'Atlas – densité 1 100 plants/ha									
<b>Fertilité 2</b>									
Age de coupe		42	50	58	66	75	83	91	101
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		105	106	87	87	87	90	260	351
Diamètre moyen (cm)		22	29	34	39	44	50	58	65
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	5	20	40	50	80	80	80
	Bl panneau	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bl papier	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	95	80	60	50	20	20	20
<b>Fertilité 3</b>									
Age de coupe		51	63	75	87	99	109		
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		99	113	92	91	219	285		
Diamètre moyen (cm)		21	29	34	40	48	53		
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	5	20	50	80	80		
	Bl panneau	0	0	0	0	0	0		
	Bl papier	0	0	0	0	0	0		
	Bois énergie	100	95	80	50	20	20		
<b>Fertilité 4</b>									
Age de coupe		67	82	99	119	134	144		
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		73	79	67	64	172	201		
Diamètre moyen (cm)		19	27	31	36	41	44		
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	5	10	30	50	50		
	Bl panneau	0	0	0	0	0	0		
	Bl papier	0	0	0	0	0	0		
	Bois énergie	100	95	90	70	50	50		

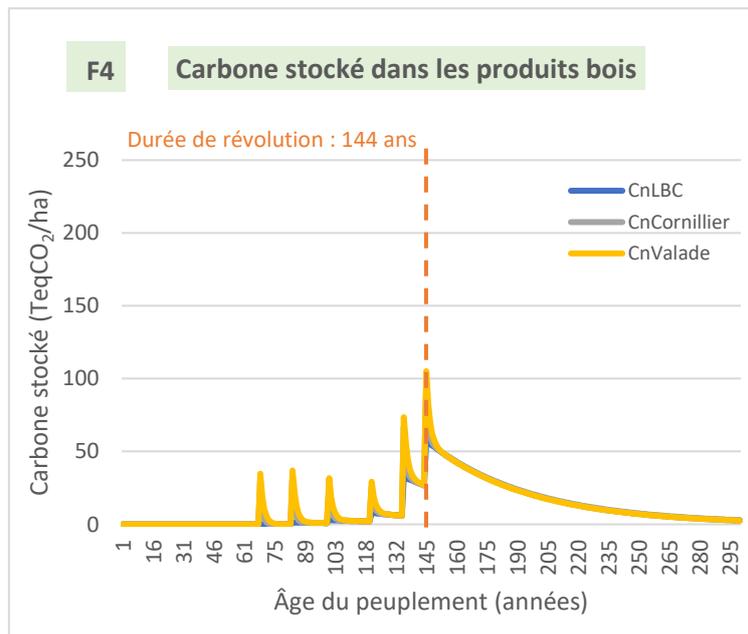
→ **Carbone stocké dans les produits bois**



Stock de carbone moyen = 104 TeqCO<sub>2</sub>/ha

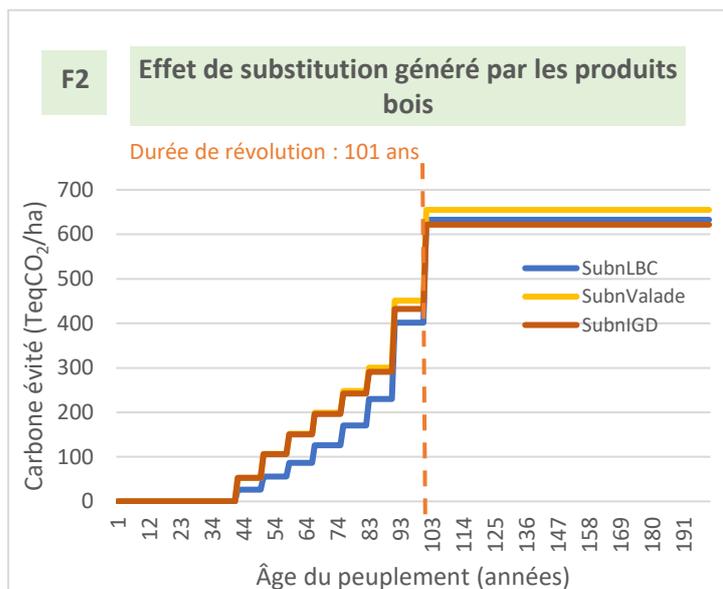


Stock de carbone moyen = 69 TeqCO<sub>2</sub>/ha



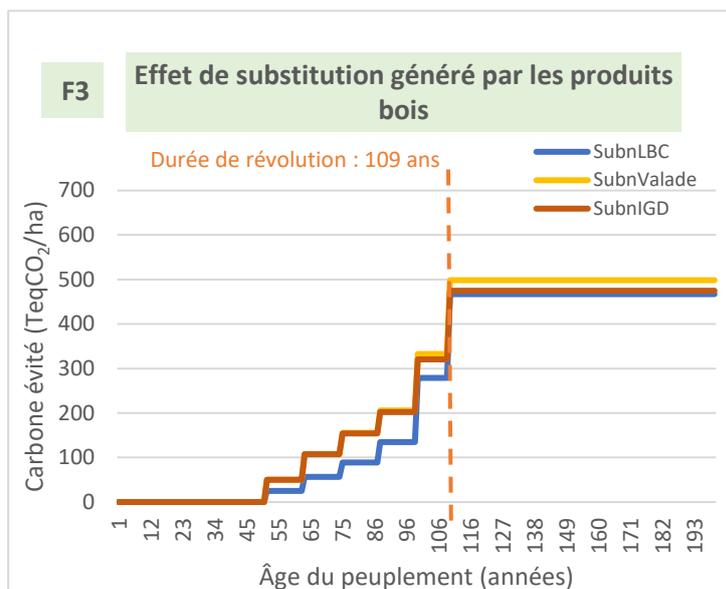
Stock de carbone moyen = 24 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



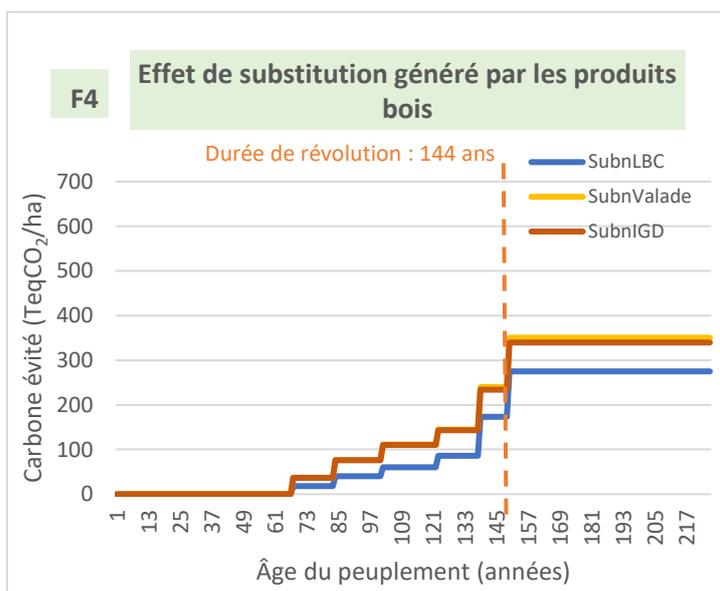
Moyenne de l'effet total de substitution = **636 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **6.3 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



Moyenne de l'effet total de substitution = **480 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **4.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



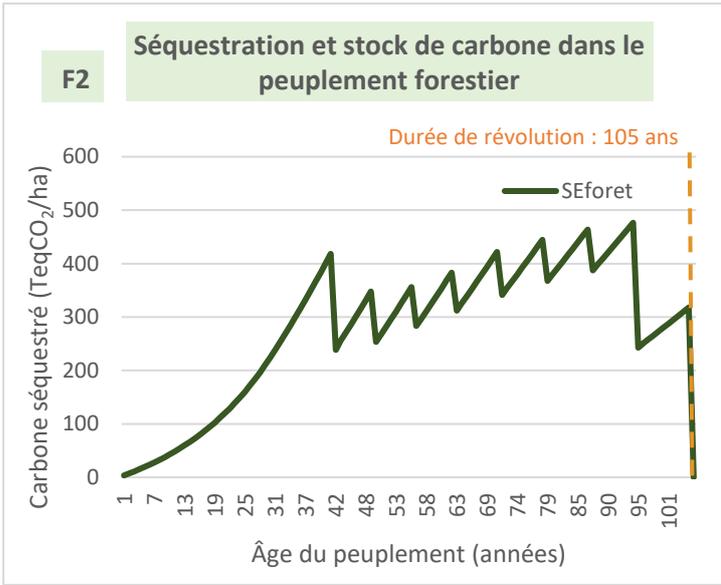
Moyenne de l'effet total de substitution = **321 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **2.23 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

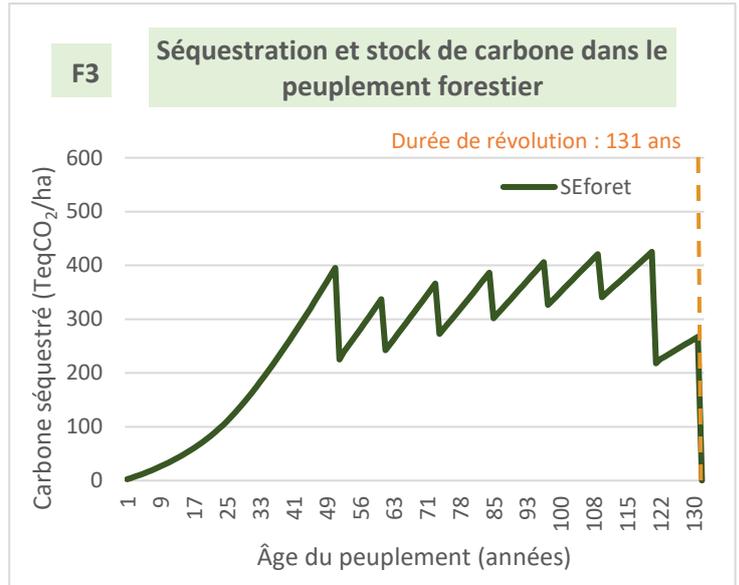
# Fiche synthèse | Cèdre de l'Atlas – 1 600 plants / ha

Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), en plantation sur une station en fertilité 1, en fertilité 2, et en fertilité 3, avec une densité initiale de 1 600 plants/ha, suivant l'itinéraire de sylviculture national

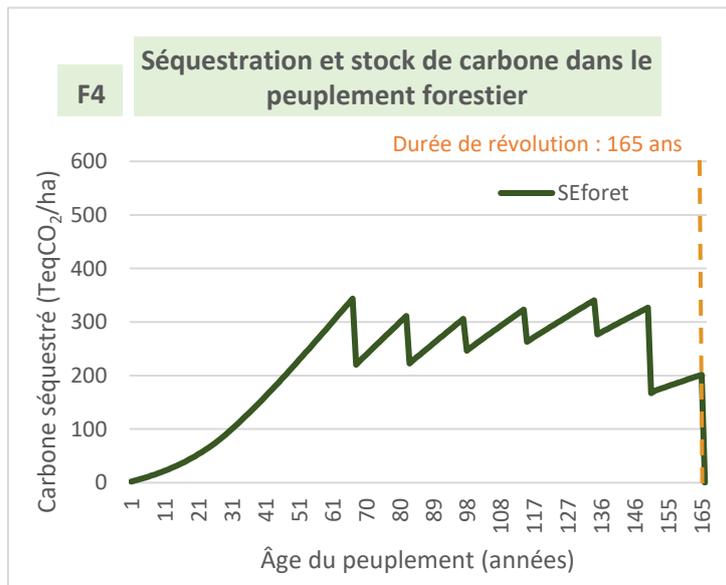
→ **Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier**



Stock de carbone moyen = 272 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Stock de carbone moyen = 256 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Stock de carbone moyen = 215 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ *Devenir des produits bois*

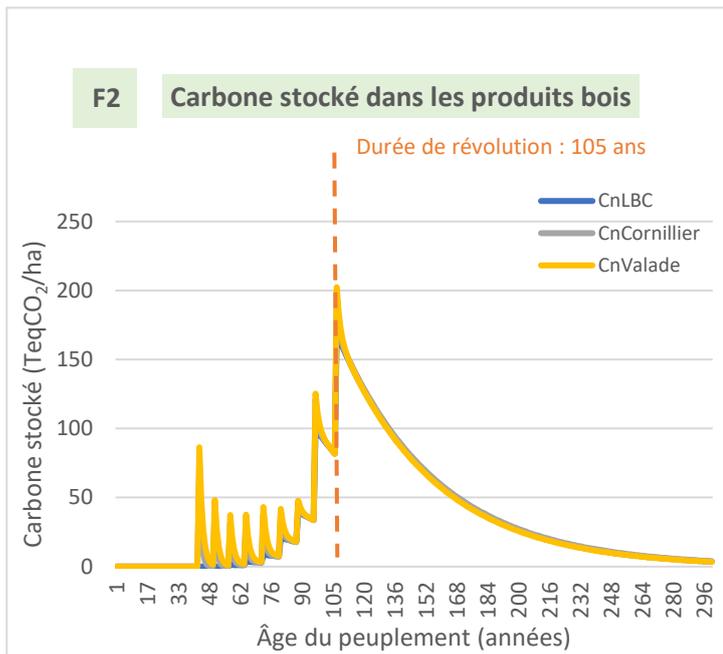
**Fiche devenir produit bois : Cèdre de l'Atlas – densité 1 600 plants/ha**

Fertilité 2									
Age de coupe	42	49	56	63	71	79	87	95	105
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	182	100	79	79	90	87	88	268	356
Diamètre moyen (cm)	22	24	28	32	36	44	49	57	64
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	10	20	50	80	80
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0	0
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	100	95	90	80	50	20	20

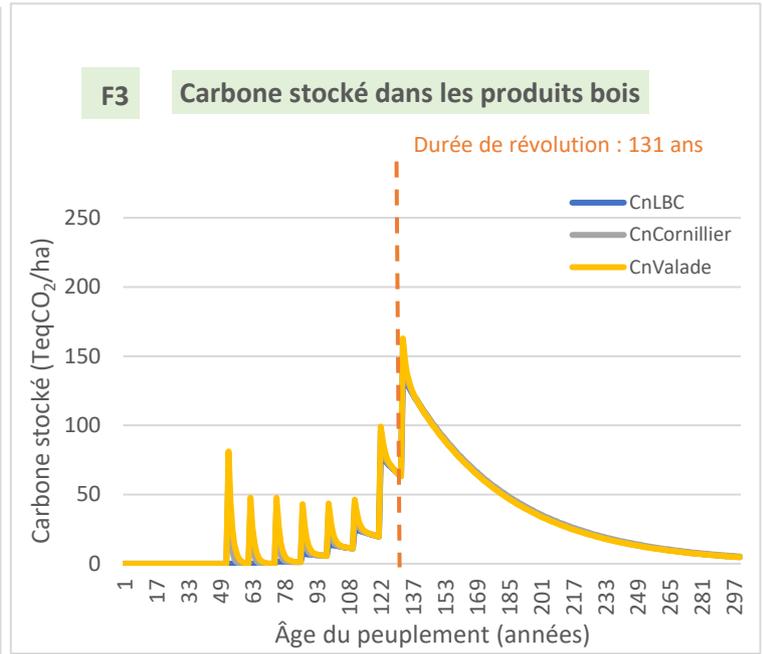
Fertilité 3								
Age de coupe	51	61	73	85	97	109	121	131
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	171	100	102	94	89	91	233	294
Diamètre moyen (cm)	22	25	29	33	37	43	51	56
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	20	30	50	80
	BI panneau	0	0	0	0	0	0	0
	BI papier	0	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	100	95	80	70	50	20

Fertilité 4							
Age de coupe	67	82	98	115	135	150	165
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)	122	92	63	65	70	173	214
Diamètre moyen (cm)	18	25	28	31	35	40	43
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	5	15	40	50
	BI panneau	0	0	0	0	0	0
	BI papier	0	0	0	0	0	0
	Bois énergie	100	100	95	85	60	50

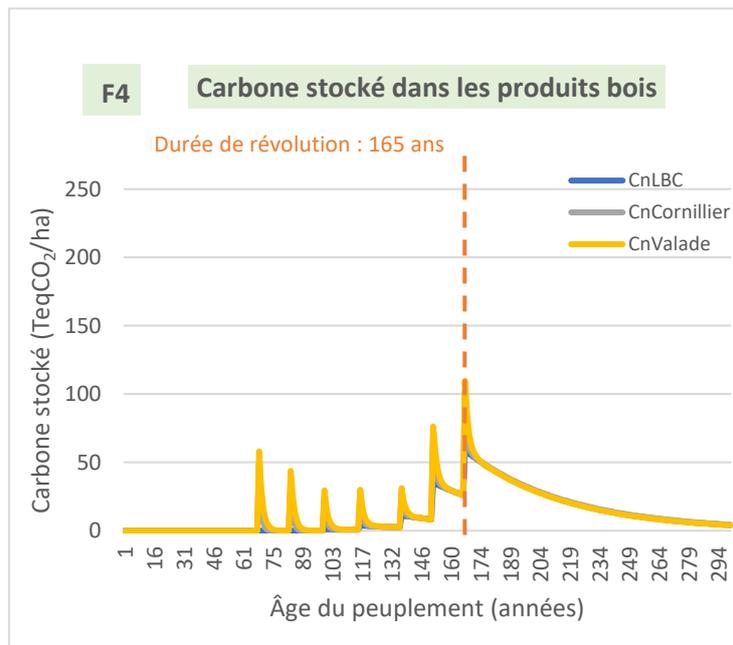
→ **Carbone stocké dans les produits bois**



Stock de carbone moyen = 98 TeqCO<sub>2</sub>/ha

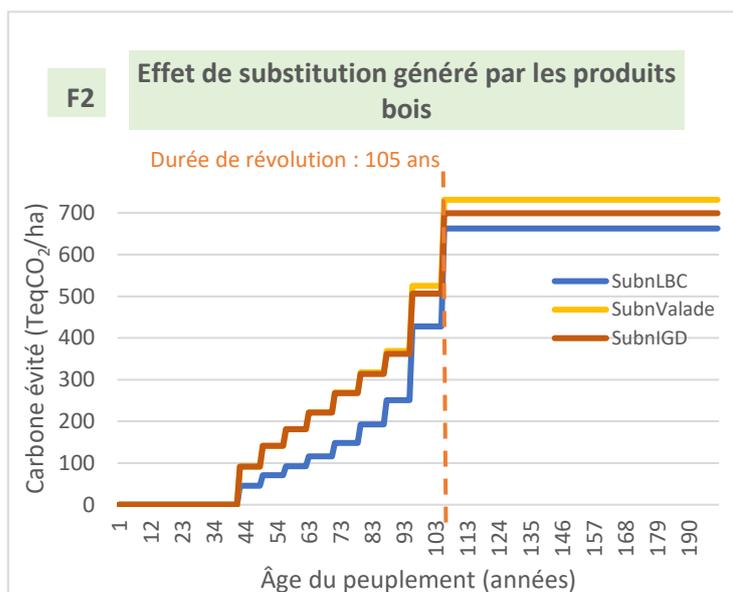


Stock de carbone moyen = 63 TeqCO<sub>2</sub>/ha



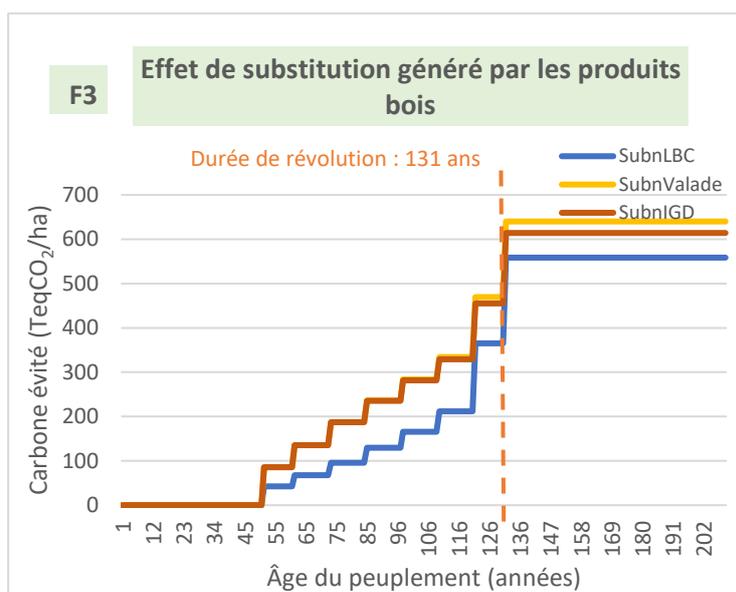
Stock de carbone moyen = 23 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



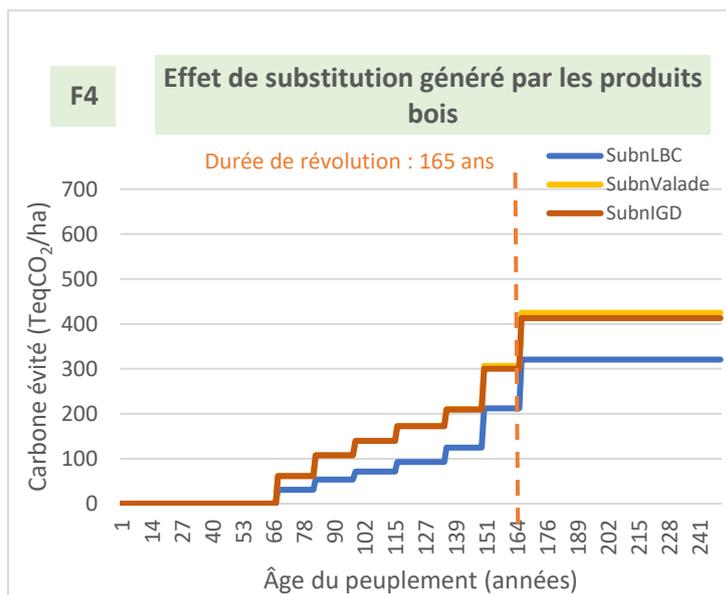
Moyenne de l'effet total de substitution = 697 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 6.65 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Moyenne de l'effet total de substitution = 604 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 4.61 TeqCO<sub>2</sub>/ha



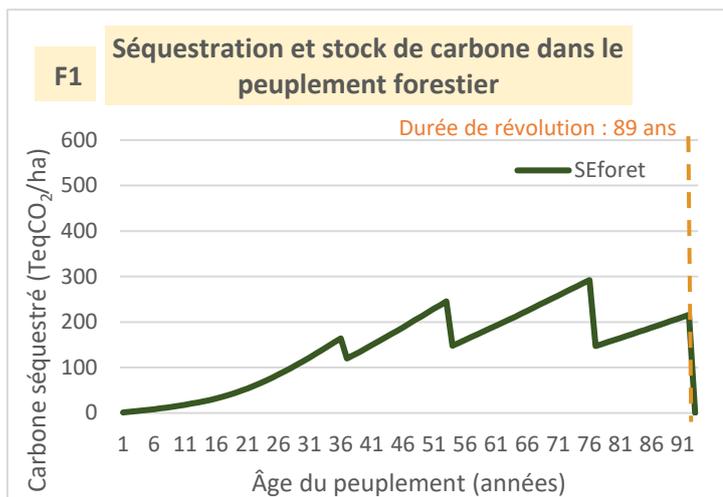
Moyenne de l'effet total de substitution = 385 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 2.34 TeqCO<sub>2</sub>/ha

## Fiche synthèse | Pin d'Alep – Scénario « Allongement de la durée de révolution »

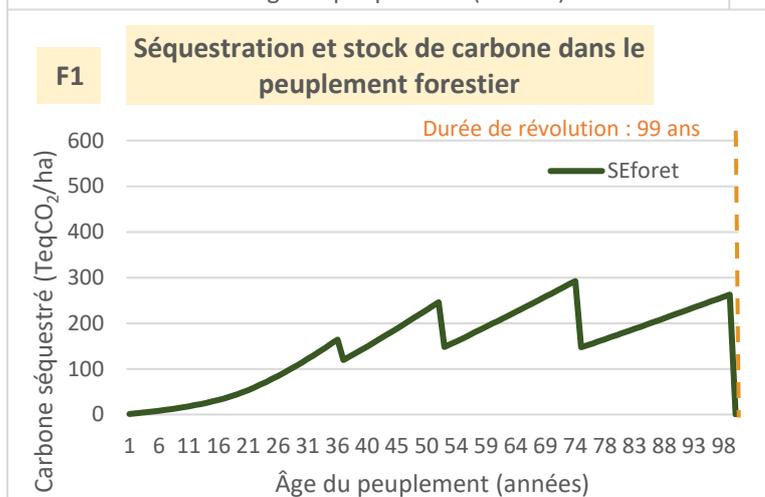
Allongement de la durée de révolution de 10 ans et de 20 ans sur une sylviculture en futaie régulière de pin d'Alep, densité 1 100 plants/ha, fertilité 1, en ajournant la dernière coupe du peuplement. Regard sur l'effet carbone engendré.

→ *Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier*



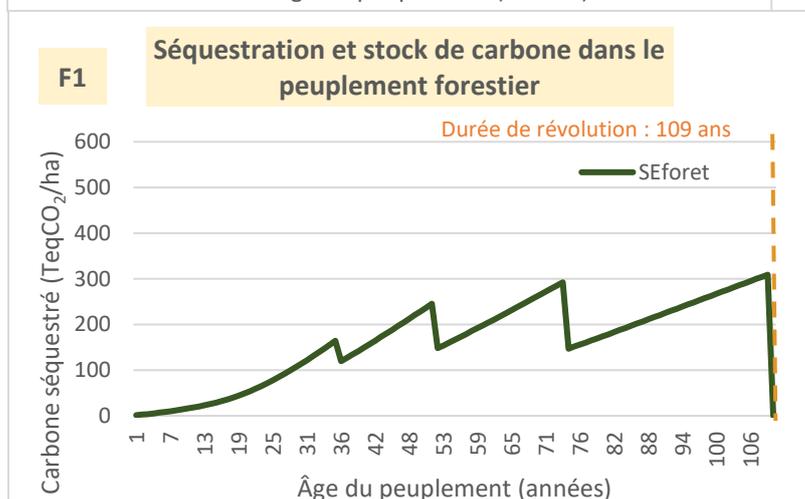
Durée de révolution : 89 ans

Stock de carbone moyen = 140 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 99 ans (+ 10 ans)

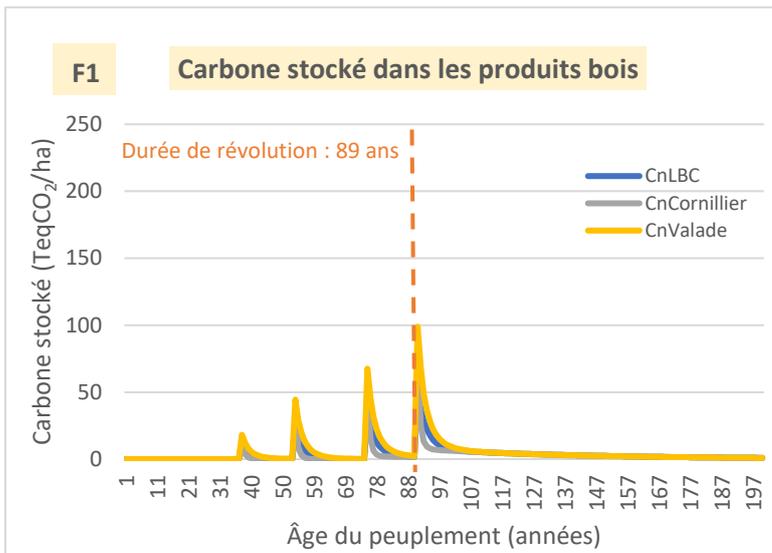
Stock de carbone moyen = 150 TeqCO<sub>2</sub>/ha



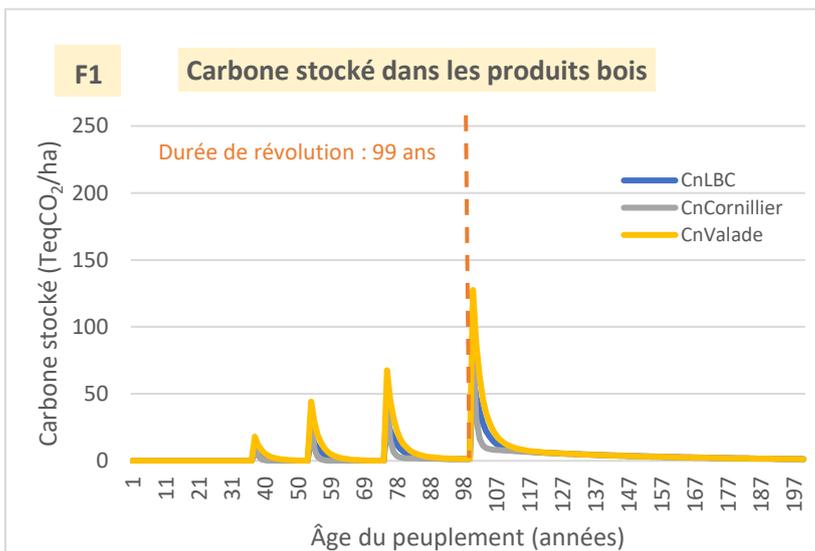
Durée de révolution : 109 ans (+ 20 ans)

Stock de carbone moyen = 162 TeqCO<sub>2</sub>/ha

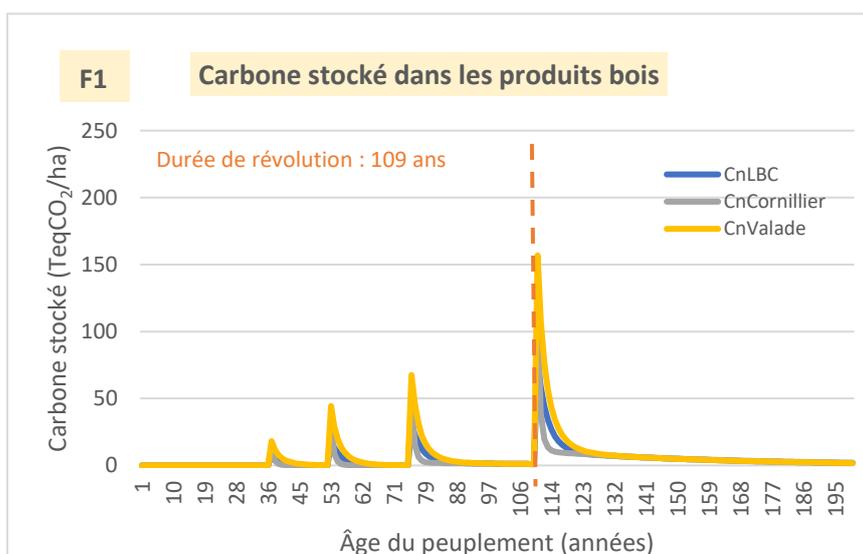
→ **Carbone stocké dans les produits bois**



Durée de révolution : 89 ans  
Stock de carbone moyen = 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha

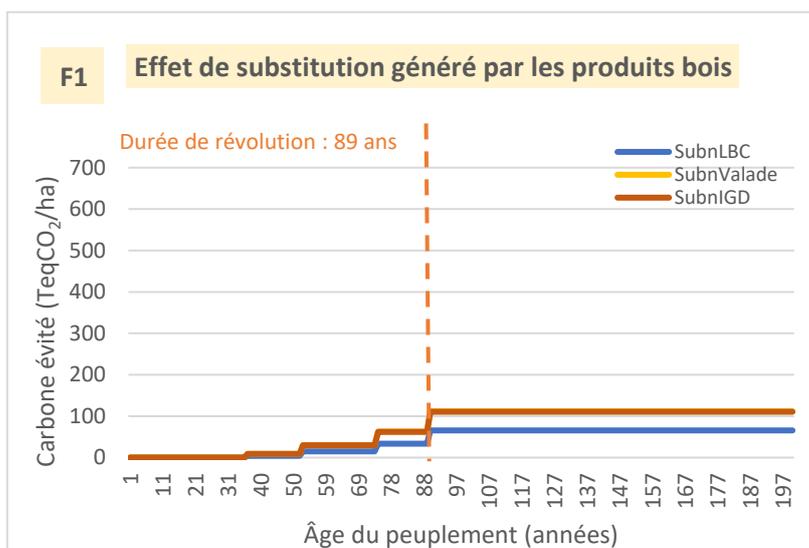


Durée de révolution : 99 ans (+ 10 ans)  
Stock de carbone moyen = 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 109 ans (+ 20 ans)  
Stock de carbone moyen = 10 TeqCO<sub>2</sub>/ha

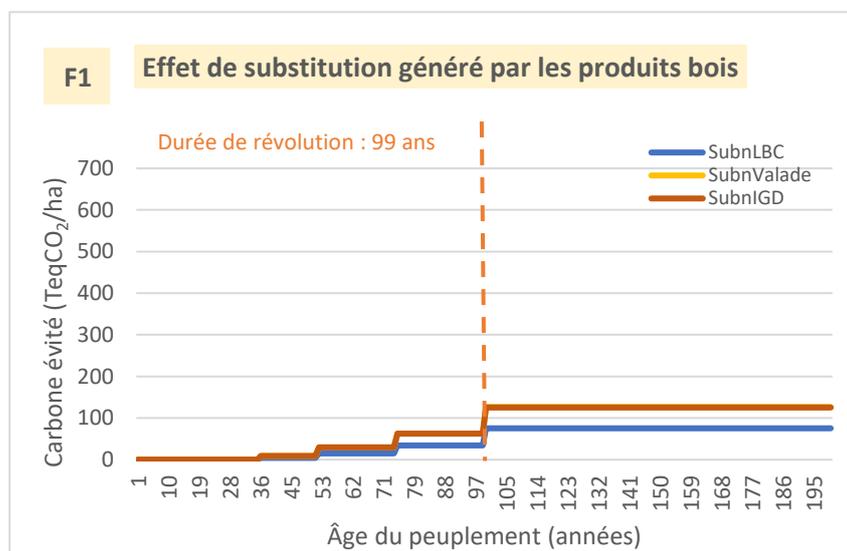
→ **Effet de substitution**



Durée de révolution : 89 ans

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 96 TeqCO<sub>2</sub>/ha

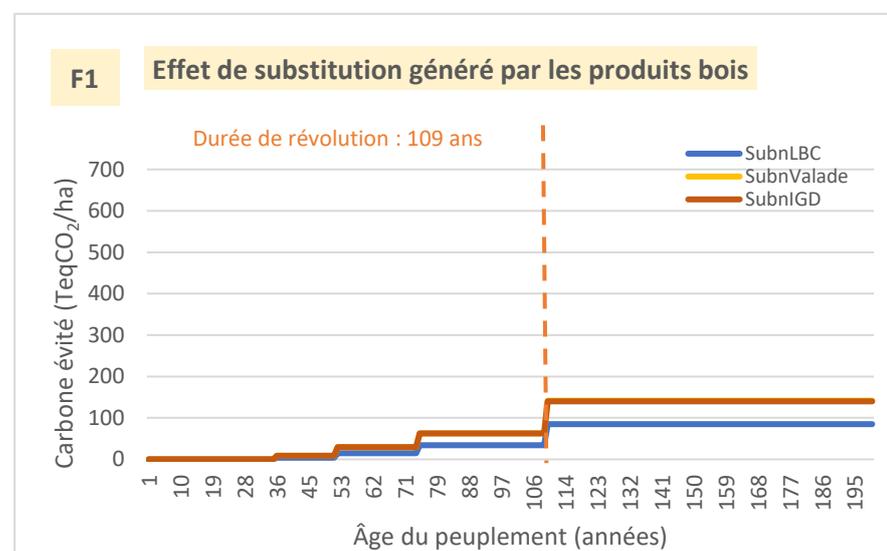
Effet moyen de substitution/an = 1.1 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 99 ans (+ 10 ans)

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 109 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 1.1 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 109 ans (+ 20 ans)

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 122 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 1.1 TeqCO<sub>2</sub>/ha

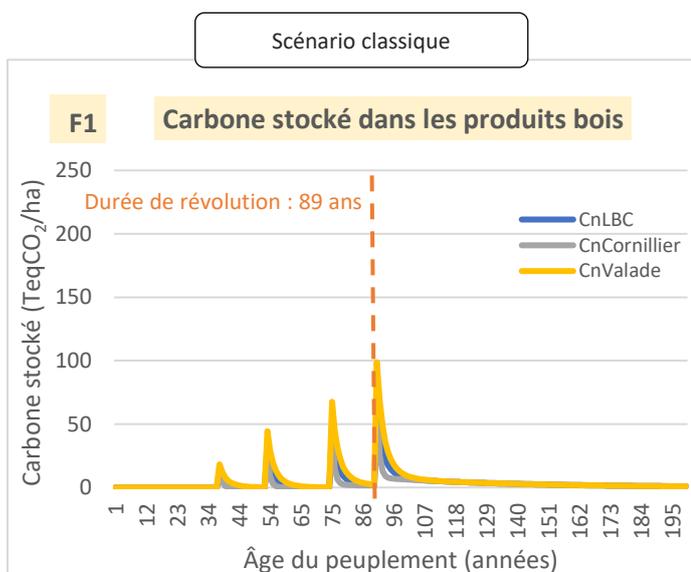
## Fiche synthèse | Pin d'Alep – Scénario alternatif « Remplacement de BE et BI papier par du BI panneau »

Mesure de l'effet carbone du bois d'industrie panneau en futaie régulière de pin d'Alep, densité 1 100 plants/ha, fertilité 1, en substituant une partie du BE et du BI papier en BI panneau.

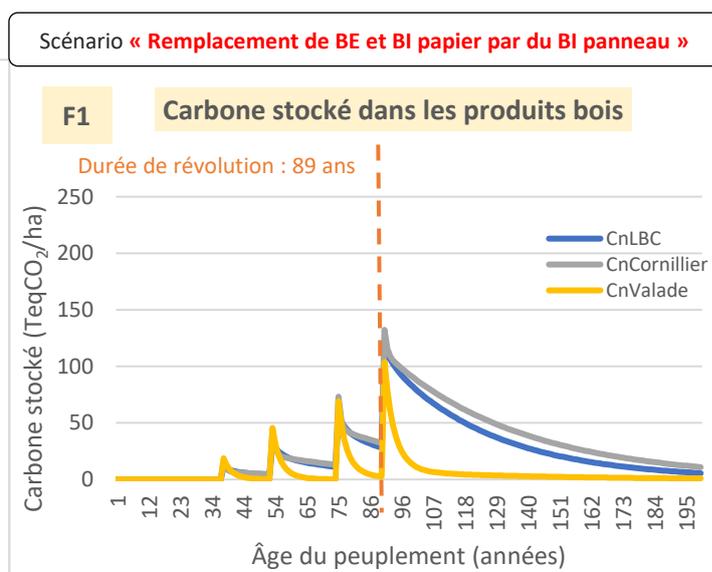
### → Devenir des produits bois

Fiche devenir produit bois : pin d'Alep – densité 1 100 plants/ha					
Fertilité 1					
Age de coupe		36	52	74	89
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		28	69	108	158
Diamètre (cm)		14	19	29	38
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	5	10
	BI panneau	0	0	0	0
	BI papier	40	40	40	40
	Bois énergie	60	60	55	50
Fertilité 1 – Scénario « Remplacement d'une part de BE et BI papier par du BI panneau »					
Age de coupe		36	52	74	89
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		28	69	108	158
Diamètre (cm)		14	19	29	38
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	5	10
	BI panneau	30	30	35	60
	BI papier	25	25	20	10
	Bois énergie	45	45	40	20

### → Carbone stocké dans les produits bois

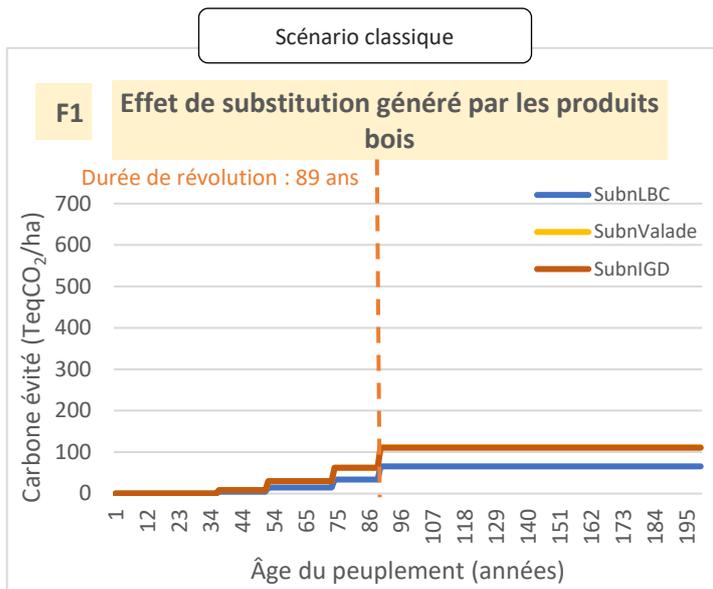


Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 9 TeqCO<sub>2</sub>/ha



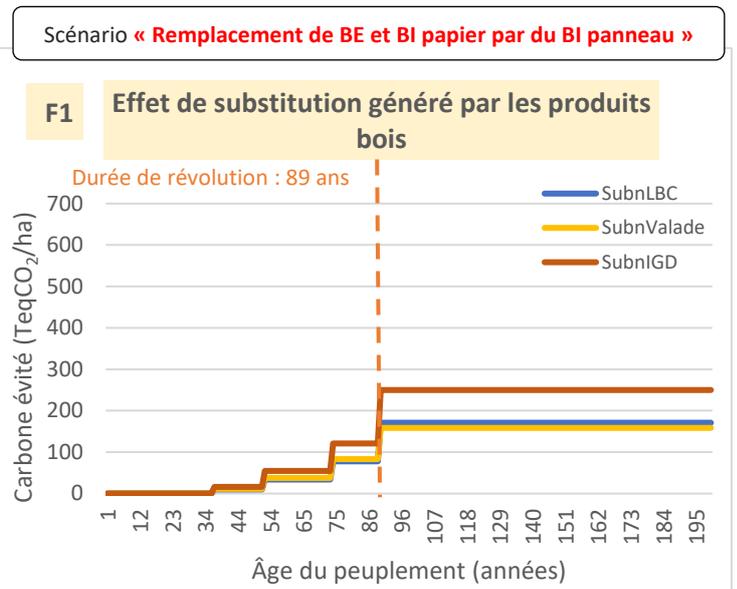
Stock de carbone moyen dans les produits bois  
= 45 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



Moyenne de l'effet total de substitution = **96 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **1.1 TeqCO<sub>2</sub>/ha**



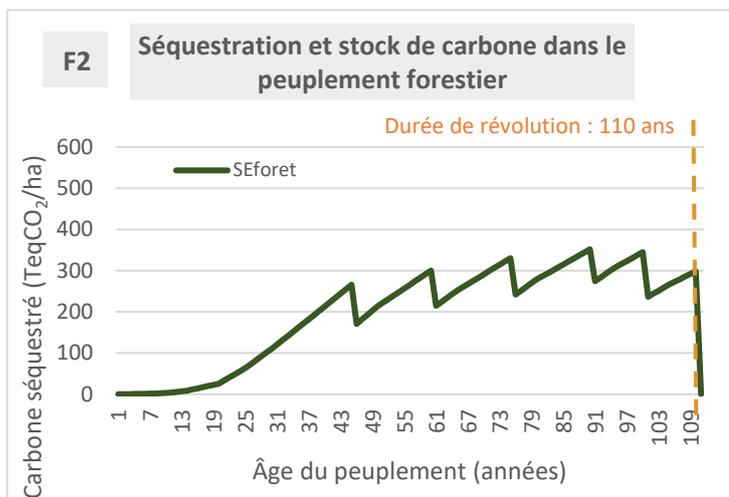
Moyenne de l'effet total de substitution = **193 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

Effet moyen de substitution/an = **2.2 TeqCO<sub>2</sub>/ha**

## Fiche synthèse | Pin noir – Scénario « Allongement de la durée de révolution »

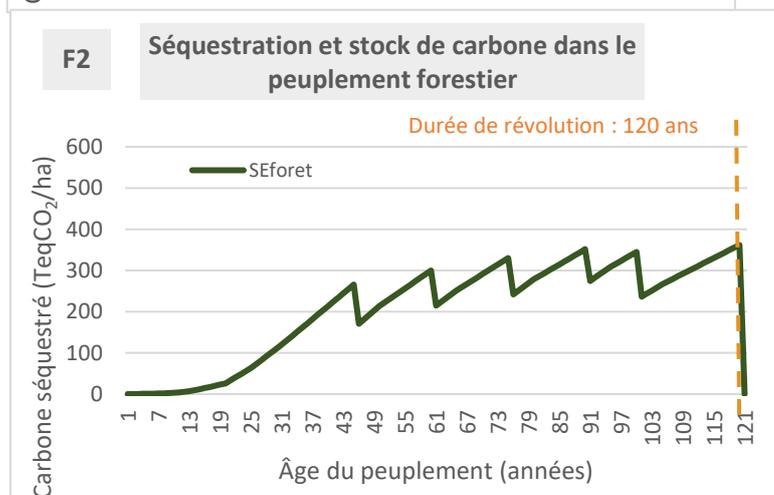
Allongement de la durée de révolution de 10 ans et de 20 ans sur une sylviculture en futaie régulière de pin noir, densité 1 100 plants/ha, fertilité 2, en ajournant la dernière coupe du peuplement. Regard sur l'effet carbone engendré.

→ **Séquestration et stock de carbone dans le peuplement forestier**



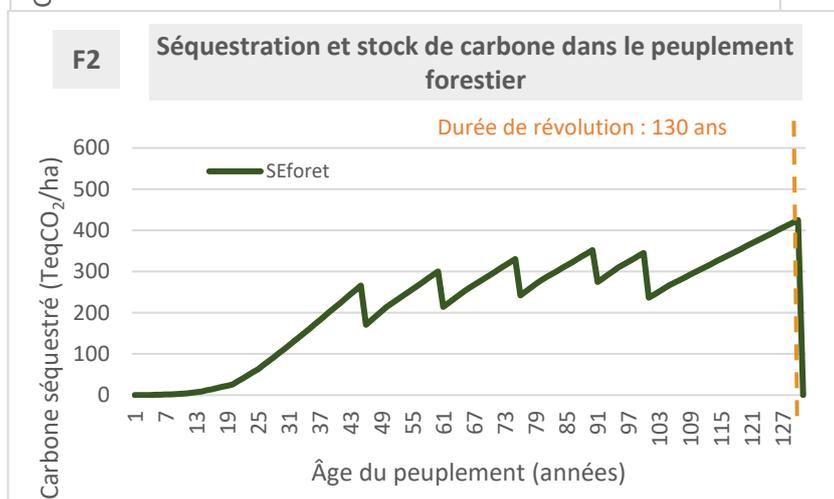
Durée de révolution : 110 ans

Stock de carbone moyen = 197 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 120 ans (+ 10 ans)

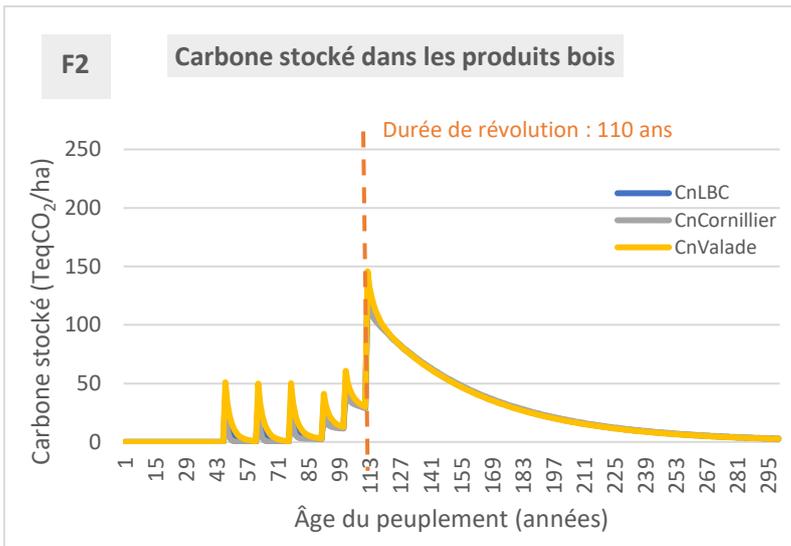
Stock de carbone moyen = 207 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 130 ans (+ 20 ans)

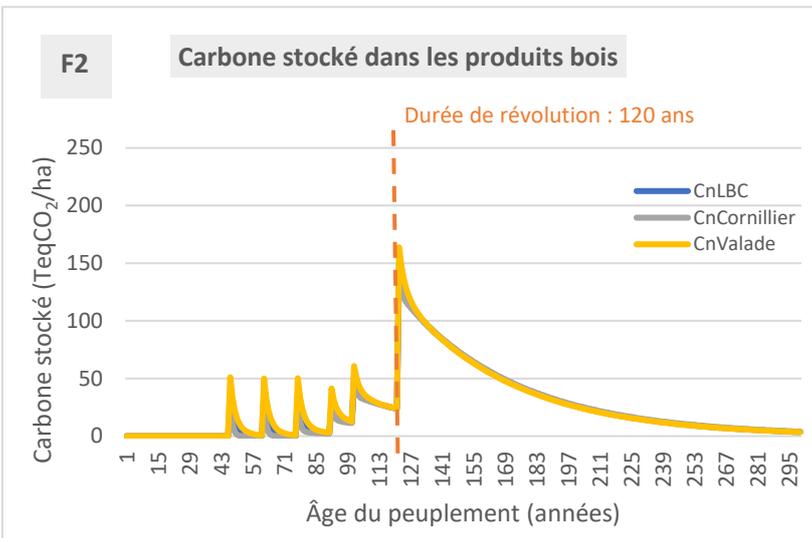
Stock de carbone moyen = 222 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Carbone stocké dans les produits bois**



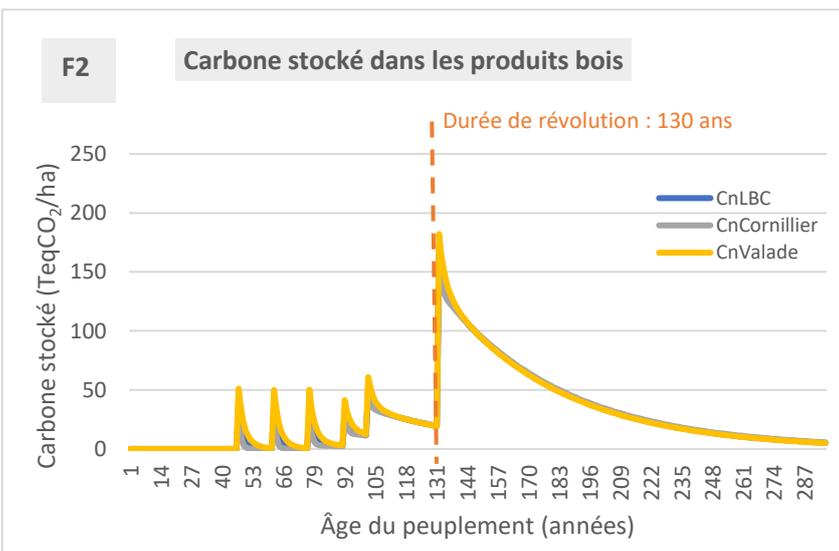
Durée de révolution : 110 ans

Stock de carbone moyen = 59 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 120 ans (+ 10 ans)

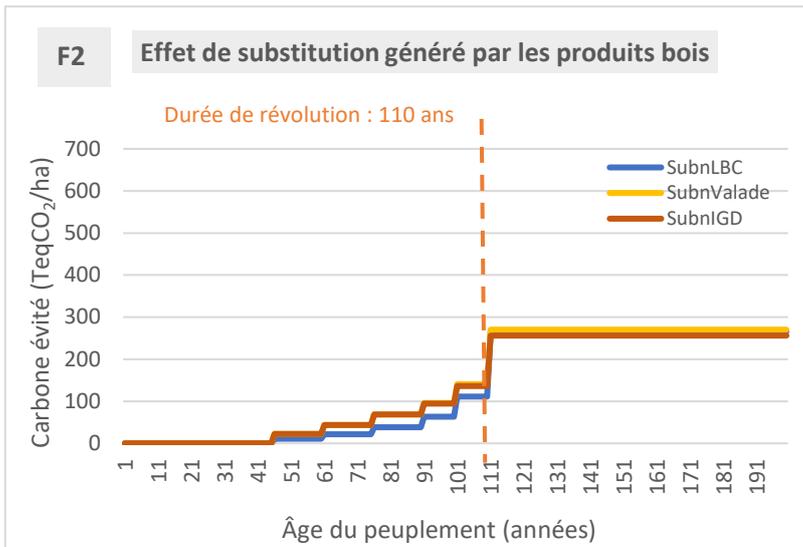
Stock de carbone moyen = 61 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 130 ans (+ 20 ans)

Stock de carbone moyen = 62 TeqCO<sub>2</sub>/ha

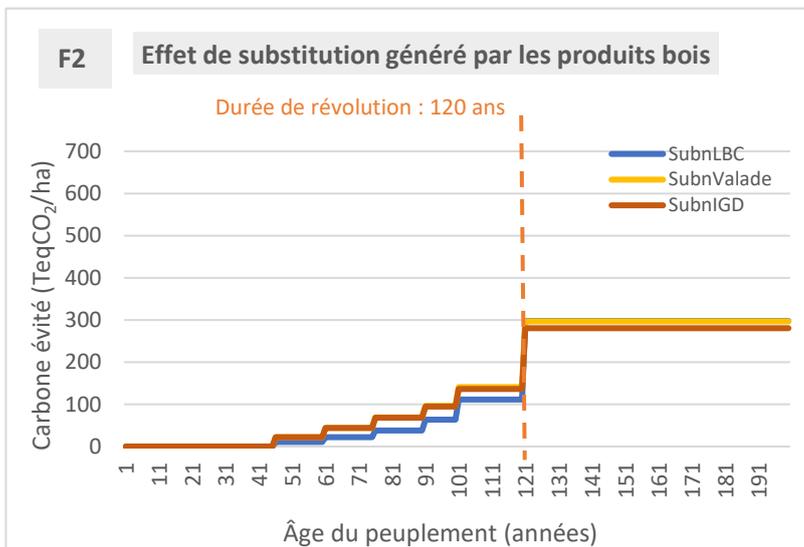
→ **Effet de substitution**



Durée de révolution : 110 ans

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 264 TeqCO<sub>2</sub>/ha

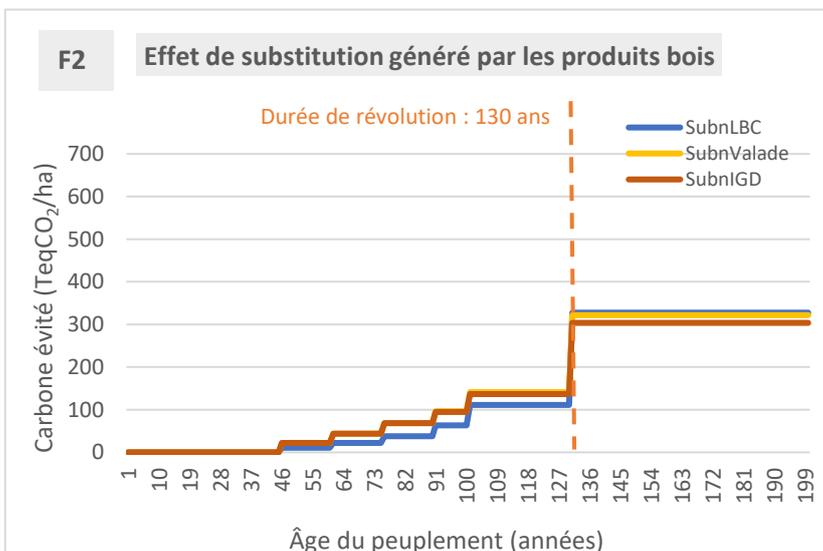
Effet moyen de substitution/an = 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 120 ans (+ 10 ans)

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 292 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Durée de révolution : 130 ans (+ 20 ans)

Moyenne de l'effet total de substitution  
= 318 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha

## Fiche synthèse | Pin noir – Scénario alternatif « Remplacement de BE et BI papier par du BI panneau »

Mesure de l'effet carbone du bois d'industrie panneau en futaie régulière de pin noir, densité 1 100 plants/ha, fertilité 2, en substituant une partie du BE et du BI papier en BI panneau.

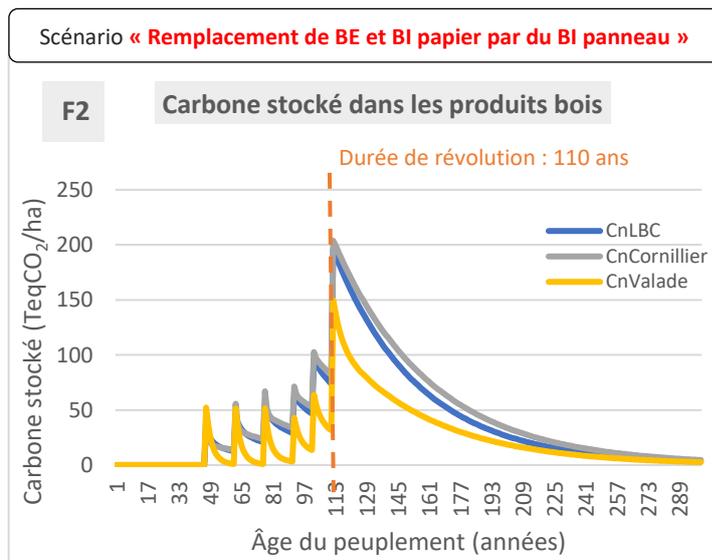
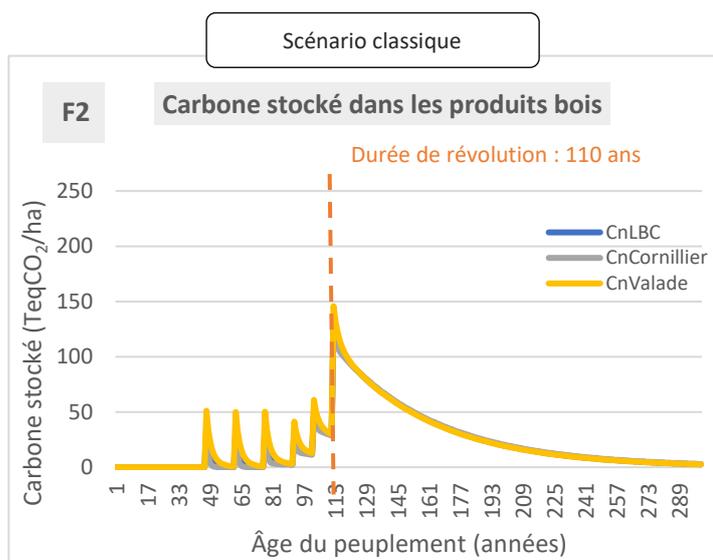
→ *Devenir des produits bois*

Fiche devenir produit bois : pin noir – densité 1 100 plants/ha							
Fertilité 2							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	10	40	60	80
	BI panneau	0	0	0	0	0	0
	BI papier	40	40	35	25	15	10
	Bois Energie	60	60	55	35	25	10

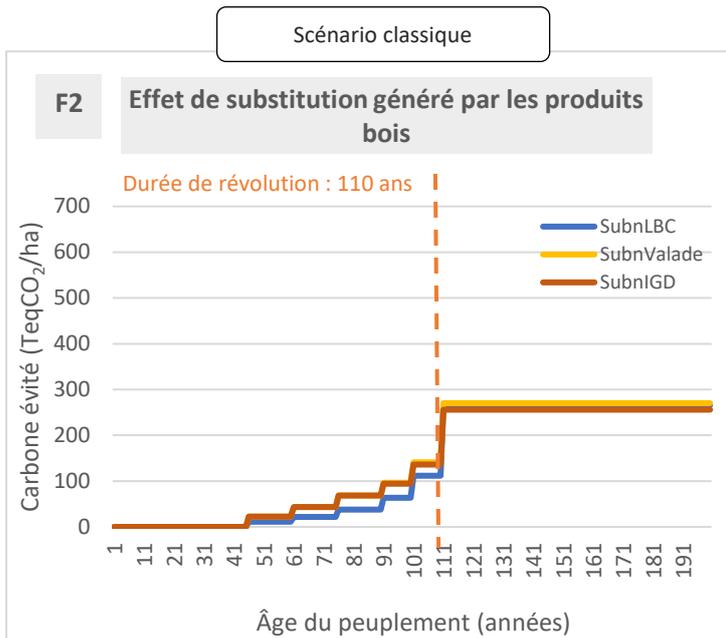
  

Fertilité 2 - Scénario « Remplacement de BE et BI papier par du BI panneau »							
Age de coupe		45	60	75	90	100	110
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		73	71	75	65	92	244
Diamètre (cm)		17	22	29	34	40	50
Proportions (%)	Bois de sciage	0	0	10	40	60	80
	BI panneau	30	30	30	35	30	20
	BI papier	25	25	20	10	5	0
	Bois Energie	45	45	40	15	5	0

→ *Carbone stocké dans les produits bois*

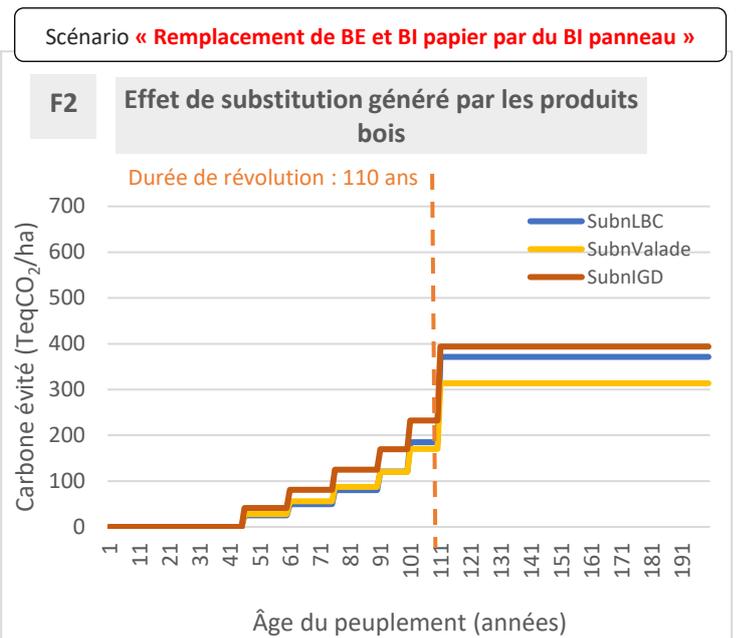


→ **Effet de substitution**



Moyenne de l'effet total de substitution = 264 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 2.4 TeqCO<sub>2</sub>/ha



Moyenne de l'effet total de substitution = 356 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet moyen de substitution/an = 3.3 TeqCO<sub>2</sub>/ha

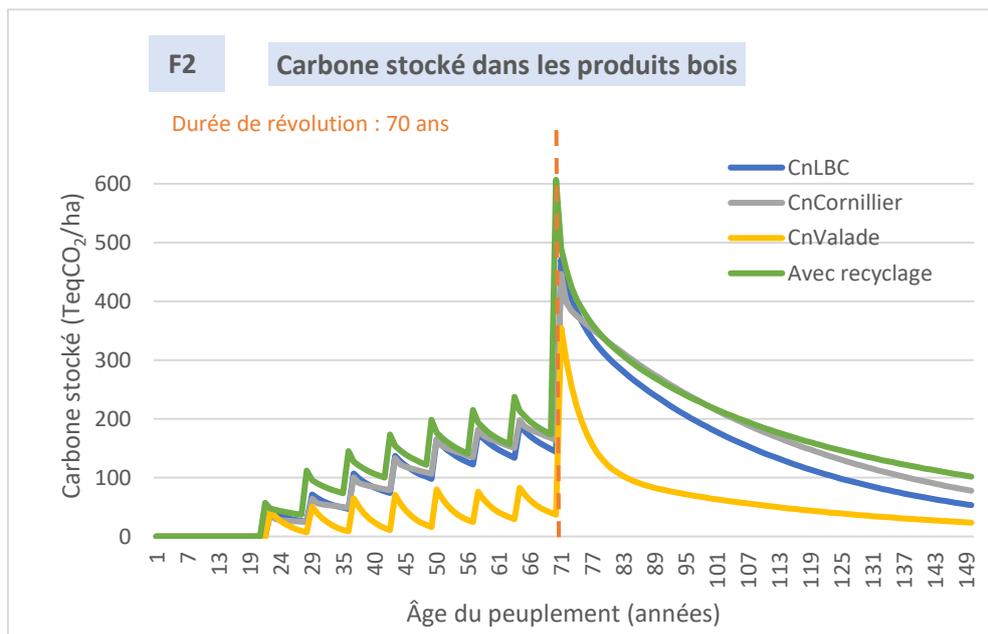
## Fiche synthèse | Sapin douglas – étude comparative

Mesure de la robustesse de notre calculatrice carbone en comparant ses résultats avec ceux d'une étude prenant en compte un schéma de filière plus détaillé pour le douglas : billonnage plus fin, recyclage, ré-usage, ... etc.

### → Devenir des produits bois

Fiche devenir produit bois : sapin douglas – densité 1 600 plants/ha									
Fertilité 2									
Age de coupe		21	28	35	42	49	56	63	70
Volume bois fort tige exporté lors des coupes (m3/ha)		65	68	87	100	113	95	99	586
Diamètre moyen (cm)		17	23	28	34	39	44	49	53
Proportions (%)	Bois d'œuvre	0	0	0	15	25	30	35	40
	BI panneau	60	65	68	55	50	45	40	35
	BI papier	40	35	33	30	25	25	25	25
	Bois énergie	0	0	0	0	0	0	0	0

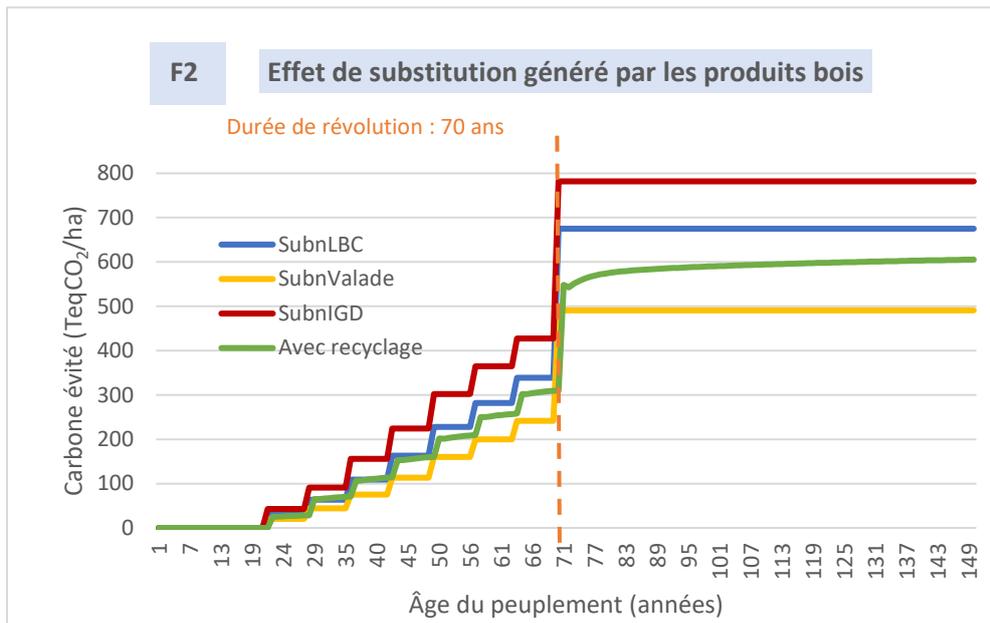
### → Carbone stocké dans les produits bois



Stock de carbone moyen des scenarii LBC, Cornillier et al., Valade et al. = 229 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Stock de carbone moyen de l'étude avec recyclage = 334 TeqCO<sub>2</sub>/ha

→ **Effet de substitution**



Moyenne de l'effet **total** de substitution des scenarii LBC, Valade et al., et IGD = 648 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet de substitution **total** de l'étude **avec recyclage** = 548TeqCO<sub>2</sub>/ha

Moyenne de l'effet de substitution **annuel** des scenarii LBC, Valade et al., et IGD = 9.3 TeqCO<sub>2</sub>/ha

Effet de substitution **annuel** de l'étude **avec recyclage** = 7.8 TeqCO<sub>2</sub>/ha