

Paris,
Février 2022

Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale Bas-Carbone 2

Auteurs : Julia **Grimault** | Clothilde **Tronquet** | Valentin **Bellassen** |
Thomas **Bonvillain** | Claudine **Foucherot**

Soutenu par



.....

L'Institut de l'économie pour le climat (**I4CE** – Institute for climate economics) est une association experte de l'économie et de la finance dont la mission est de faire avancer l'action contre les changements climatiques. Grâce à ses recherches appliquées, l'Institut contribue au débat sur les politiques liées au climat. Il rend aussi publiques des analyses pour appuyer la réflexion des institutions financières, des entreprises ou encore des territoires et les aider à intégrer concrètement les enjeux climatiques dans leurs activités.



I4CE est une association d'intérêt général, à but non lucratif, fondée par la Caisse des Dépôts et l'Agence Française de Développement.

www.i4ce.org

.....

REMERCIEMENTS

Les auteurs.ices tiennent à remercier pour leur contributions :

Miriam Buitrago (ADEME), Antoine Colin (IGN), Gaëtan Du Bus de Warnaffe, Alba Departe (ADEME), Michel Duhalde (Ministère de la Transition Ecologique), Thomas Eglin (ADEME), Aïcha El Khamlichi (Ademe), Pauline Favre (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation), Joseph Hajjar (Ministère de la Transition Ecologique), Patricia Larbouret (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation), Etienne Mathias (CITEPA), Elisabeth Pagnac-Farbiaz (Ministère de la Transition Ecologique), Gwenaël Podesta (Ministère de la Transition Ecologique), Colas Robert (CITEPA), Bertrand Schmidt (INRAE), Aude Valade (CIRAD), Estelle Vial (FCBA).

.....

Table des matières

Introduction	2
 Synthèse	3
 Forêt-bois	9
 Agriculture	37
 Captage et Stockage géologique de CO₂	57
Annexes	71
Annexes Forêt-Bois	72
Annexes Agriculture	82

INTRODUCTION

Pour atteindre ses engagements climatiques, la France s'est dotée d'une feuille de route nationale, la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC). Cette stratégie détermine les trajectoires et orientations à suivre pour chaque secteur de l'économie, de manière à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, en cohérence avec les objectifs de l'Accord de Paris et avec les recommandations du GIEC. Ainsi, d'ici 30 ans, la France devra absorber autant de gaz à effet de serre (GES) qu'elle n'en émet, c'est-à-dire près de 80 MtCO₂. Cet objectif correspond en fait à un doublement du volume des absorptions de CO₂, ou puits de carbone, d'ici 2050. Pour atteindre cet objectif, la SNBC fixe ainsi des objectifs chiffrés pour les différents secteurs associés au puits de carbone : la forêt et le bois ; l'agriculture ; les technologies de captage et stockage géologique de CO₂. Les projections de ces compartiments et les hypothèses techniques sous-jacentes ont été décryptées et confrontées à la littérature existante dans une analyse approfondie, avec l'objectif d'éclaircir les enjeux et les conditions de cette augmentation massive de la séquestration du carbone. Il en ressort que les transformations attendues des secteurs sont profondes et que certaines orientations du secteur forêt-bois risquent de ne pas être réalisables.

Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale
Bas-Carbone 2

| Synthèse

Auteurs :

Valentin **Bellassen** (INRAE)

Thomas **Bonvillain** (I4CE)

Claudine **Foucherot** (I4CE)

Julia **Grimault** (I4CE)

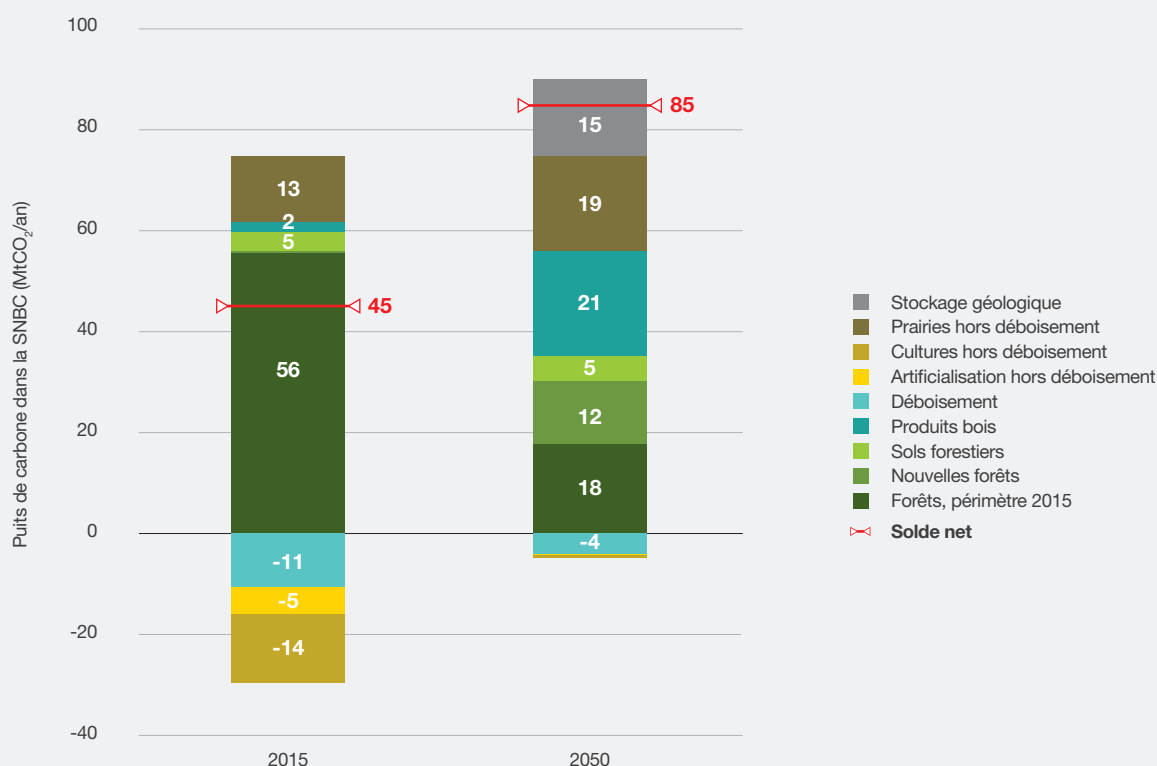
Clothilde **Tronquet** (I4CE)

1. Les grandes orientations : de nouveaux secteurs contributeurs et une transformation profonde du puits forêt-bois

Il est de notoriété publique que la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) prévoit de doubler le puits de carbone entre 2015 et 2050. Qu'en est-il de la composition de ce puits ? Comment est-elle censée évoluer ? Notre analyse approfondie de la SNBC montre qu'elle remanie profondément la composition du puits de carbone français (Figure 1) :

le stockage en forêt (périmètre 1995), qui représentait 115 % du solde net en 2015 perd 70 % de sa valeur, alors que le stockage dans les produits du bois et dans les couches géologiques, quasi inexistantes en 2015, prennent une importance considérable.

FIGURE 1. PUIITS DE CARBONE DANS LA STRATÉGIE NATIONALE BAS-CARBONE (SNBC)



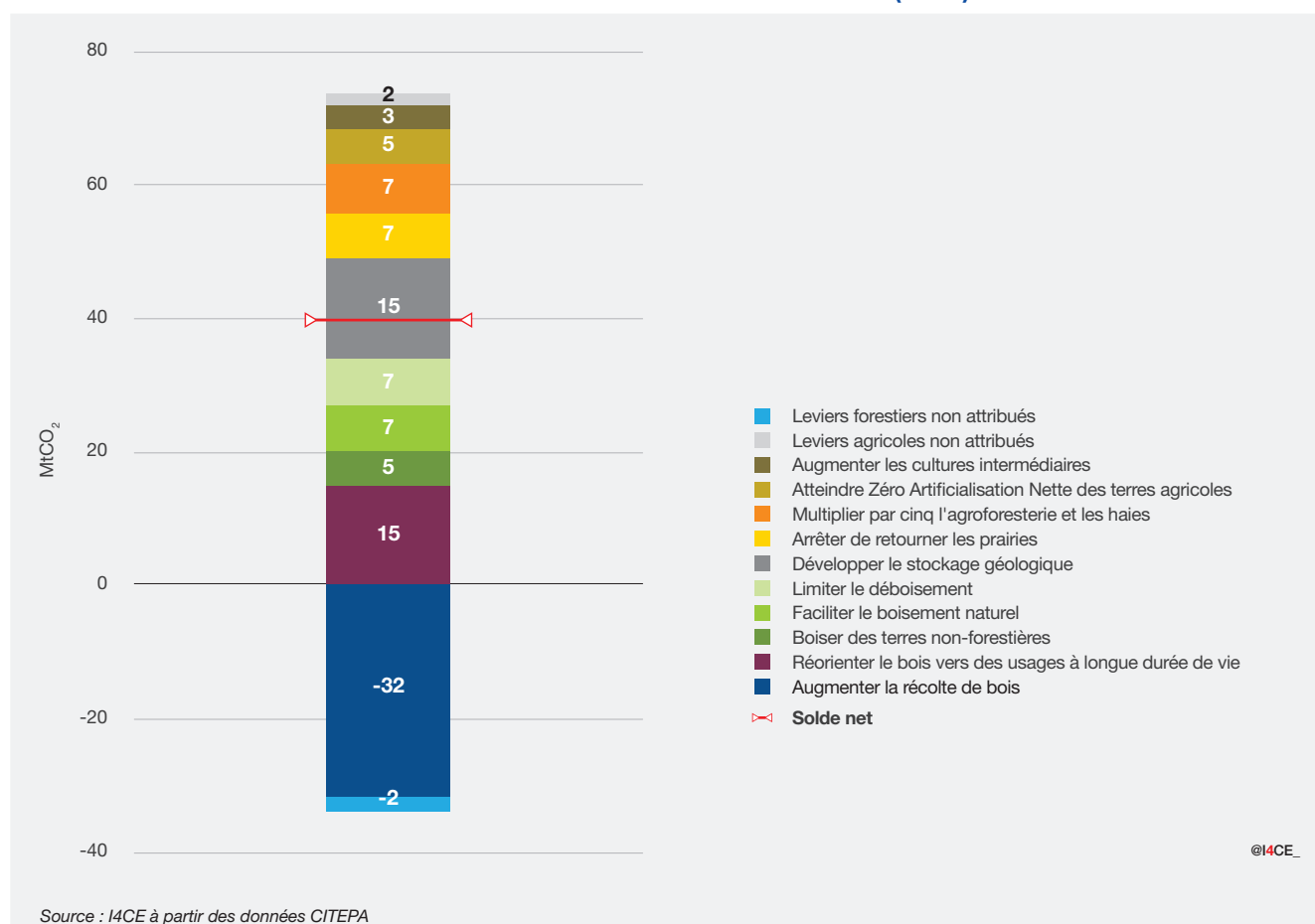
Source : I4CE à partir des données CITEPA

Les sous-secteurs sont remaniés par rapport aux données publiées dans la SNBC, tout en préservant les valeurs originelles pour le solde net et le total de la filière bois. Les valeurs pour le déboisement sont tirées du calculateur forestier du ministère de la Transition Ecologique et celles des catégories « hors déboisement » sont obtenues en retranchant leur part de déboisement, au prorata de la valeur de cette part en 2015. Nous avons tenté de reproduire la péréquation originale entre ce calculateur et les graphiques publiés dans la SNBC, créant un léger décalage avec les valeurs indiquées dans la section « forêt » de ce rapport. Les soldes nets affichés sont supérieurs de 5 MtCO₂ à ceux de la SNBC, probablement du fait de l'ajout des sols forestiers qui ne sont pas comptabilisés dans l'inventaire national et ont donc probablement été ôtés du graphique publié dans la SNBC.

Ces changements résultent de l'action de dix leviers majeurs (Figure 2). Dans la filière forêt-bois, la SNBC parie sur l'augmentation de la récolte, quitte à dégrader le puits national de 32 MtCO₂/an dans les forêts en place, une dégradation à moitié compensée en réorientant le bois récolté vers des usages à plus longue durée de vie. De nouvelles plantations sur des prairies considérées comme peu productives, le prolongement des boisements par accrus naturels et la réduction de la déforestation permettent également de stocker 17 MtCO₂/an, aboutissant à une quasi-stabilité du puits de la filière prise dans son ensemble autour de 50 MtCO₂/an.

L'augmentation nette du puits d'une quarantaine de MtCO₂/an résulte donc principalement du Captage et Stockage géologique de CO₂ (CSC) (+15 MtCO₂/an), de la plantation de haies (+7 MtCO₂/an), de l'arrêt du retournement des prairies (+7 MtCO₂/an) et de la diminution de l'artificialisation des terres (+5 MtCO₂/an). Notons que quelques leviers n'ont pas été attribués, du fait d'interaction entre leviers et du manque de documentation sur certains points dans le document officiel et les documents annexes fournis par les ministères et le CITEPA.

FIGURE 2. LEVIERS DE STOCKAGE DE LA STRATÉGIE NATIONALE BAS CARBONE (SNBC)



Les valeurs attribuées à chaque levier ne sont pas directement fournies par la SNBC. Elles sont déduites du texte, des calculateurs fournis par le ministère en charge de l'environnement et des entretiens conduits pour l'étude. Au final, les ordres de grandeurs sont vraisemblables et le solde net des leviers ajouté au solde net en 2015 correspond approximativement au solde net projeté par la SNBC en 2050 (85 MtCO₂/an).

2. Ambitieuse sur tous les fronts, la stratégie franchit probablement les frontières du réalisme sur les produits bois

Pour évaluer le degré de réalisme de la Stratégie Nationale Bas Carbone pour le secteur des terres, nous la comparons aux études de référence en termes de potentiel de stockage de carbone à l'échelle nationale. Ces comparaisons montrent que la Stratégie Nationale Bas-Carbone est ambitieuse sur la plupart des volets, ce qui n'est pas surprenant : après tout, l'objectif global de la Stratégie, à savoir la neutralité carbone de la France, est lui-même ambitieux et requiert des changements majeurs dans toutes les filières.

Toutefois, en ce qui concerne la réorientation massive du bois vers des usages à plus longue durée de vie, les frontières du réalisme sont probablement dépassées :

- D'un point de vue technique : la part des sciages dans la récolte totale passe de 10 % à 20 %, alors que cette part, essentiellement liée à la qualité des bois existants, semble difficile à modifier substantiellement d'ici à 2050. De plus, les sciages étant un débouché à forte valeur ajoutée, on peut supposer que l'on est déjà proche du potentiel maximum.
- Du point de vue du marché : l'augmentation de la production de panneaux prévue par la SNBC (+244 % entre 2015 et 2050) ne pourra pas être absorbée par la demande domestique et devra donc reposer sur des exportations massives. Même le scénario de demande le plus optimiste dans le secteur de la construction n'augmente la consommation de panneaux que de 80 %. D'autres secteurs pourraient absorber une partie du surplus, comme l'ameublement par exemple, mais on semble loin des augmentations nécessaires. Néanmoins, l'intégration à cette catégorie des isolants à base de bois, et notamment de la laine de bois, pourrait également permettre de développer les débouchés.
- Ce pari de diminuer le puits dans les écosystèmes au profit de celui dans les produits-bois dépend du succès de la réorientation massive des usages du bois vers les produits à longue durée de vie. Le réalisme de cette réorientation est donc d'autant plus crucial : si l'on parvient à augmenter la récolte sans réussir la réorientation massive des usages, alors l'augmentation de la récolte sera nettement plus dommageable sur la valeur du puits en 2050 et l'impact de la stratégie sur le puits forêt et bois sera négatif.

Les autres principaux leviers se heurtent également à des obstacles importants, mais sont moins éloignés des hypothèses prises dans la littérature récente :

- l'augmentation de la récolte de bois est techniquement possible, même si elle requiert un changement profond de l'appareil productif : sans changements drastiques dans

la structure de la filière et sans investissements massifs dans les usines de transformations, le niveau de récolte de la SNBC ne peut pas être atteint, même avec des subventions très élevées.

- le Captage et Stockage géologique de CO₂ à hauteur de 15 MtCO₂/an est techniquement compatible avec les évaluations existantes et ce pour un coût inférieur en moyenne à 100 euros par tCO₂. Mais là aussi, ce stockage requiert un développement massif (le niveau mondial actuel est à peine de 23 MtCO₂/an). Par ailleurs, le stockage de carbone d'origine biologique (BECSC) représente deux tiers du total et sa mise en œuvre nécessite possiblement des centrales à biomasse environ 8 fois plus grandes que la taille moyenne actuelle pour le bois chaleur. Une telle massification comporte des risques en termes d'approvisionnements et d'acceptabilité sociale et environnementale, interrogeant la pertinence de ces technologies.
- l'arrêt du retournement des prairies et de l'artificialisation des terres agricoles sont techniquement possibles mais requièrent des politiques plus efficaces : l'arrêt du retournement des prairies est en effet l'objectif des politiques agricoles depuis 30 ans sans impact probant sur le nombre de conversions nettes et l'arrêt de l'artificialisation, quoi que plus récent comme objectif politique, n'est pas plus suivi d'effets ;
- la multiplication par cinq des surfaces d'agroforesterie et des haies requiert elle aussi un changement de braquet des politiques publiques, mais le potentiel de stockage est cohérent par rapport aux maxima techniques évalués par INRAE ;
- la plantation de 15-20 kha/an de forêts en substitution des surfaces d'accrus naturels sur prairie, couplée une expansion naturelle de la forêt d'ampleur comparable, est cohérente avec les surfaces historiques d'accrus de 50 kha/an sur les 30 dernières années, et compatible avec la réduction du cheptel prévue par la SNBC ;

Enfin, pour deux leviers majeurs de stockage dans les sols, à savoir la généralisation des cultures intermédiaires et le remplacement du maïs fourrage par des prairies temporaires, la SNBC table sur des stockages deux et dix fois inférieurs respectivement au potentiel évalué par INRAE pour un coût de 250 €/tCO₂eq. Ces leviers sont donc réalistes techniquement mais devront reposer sur des changements de pratiques majeurs et rapides.

3. Recommandations

Recommandations sectorielles

1. Les leviers forestiers semblent les plus difficilement réalisables au regard de la littérature existante. Toutefois, la réorientation des usages du bois est une piste importante, sans regrets et insuffisamment abordée par la littérature académique. En conséquence, nous recommandons de :

- Mettre en priorité l'accent sur la réorientation des usages du bois plutôt que sur l'augmentation de la récolte dans les politiques publiques.
- Caractériser plus précisément les trajectoires des produits bois (types de produits à développer, filières de transformation, débouchés) pour atteindre 50 % de la récolte dédiée aux produits à longue durée de vie en 2050.
- Revoir à la baisse l'ambition globale sur le puits dans les produits, en fonction des possibilités effectives et souhaitables de récolte, et d'un développement des usages longs du bois cohérents avec les débouchés possibles.

Ces recommandations ont pour but d'assurer que la stratégie d'un fort puits forestier ex situ soit effectivement réalisée, afin d'éviter un impact carbone global négatif dû à une récolte importante et non redirigée vers des produits à longue durée de vie.

2. Les leviers de stockage agricoles qui sont envisagés dans la SNBC et les ordres de grandeur associés sont possibles au vu des potentiels techniques et économiques identifiés dans la littérature. Néanmoins, l'inversion de la tendance historique au déstockage dans les écosystèmes agricoles exige des efforts très importants, notamment sur le plan économique pour le maintien des prairies et le développement de l'agroforesterie.

3. Enfin, même si le développement des technologies CSC proposé dans la SNBC est cohérent avec les simulations projetées dans la littérature, les défis technique et économique de la massification de ces technologies restent importants. Par ailleurs, le besoin pour la BECSC d'installations de grande taille et d'approvisionnements massifs en biomasse énergie peuvent être difficiles à concilier avec les obligations de durabilité.

Recommandations sur le processus d'élaboration de la SNBC 3 et son opérationnalisation

Enfin, pour permettre à l'ensemble des parties prenantes de s'approprier pleinement les enjeux qui les concernent, nous recommandons de :

- **Rendre les hypothèses et les scénarios sous-jacents accessibles de manière transparente aux parties prenantes pour faciliter leur appropriation.** Nous notons en effet que cette analyse détaillée a été grandement facilitée pour la partie forestière par la mise à disposition du tableur développé par le ministère en charge de l'environnement. Pour faciliter l'appropriation par toutes les parties prenantes du document central que constitue la SNBC, nous recommandons pour les prochaines éditions que de tels tableurs soient mis à disposition du public pour toutes les composantes de la SNBC.
- **Scénariser plus précisément les trajectoires par secteur** dès la construction de la SNBC, c'est-à-dire en ne s'arrêtant pas à des scénarios biophysiques mais en explicitant les transformations des différents secteurs économiques que cela implique. Cette recommandation est particulièrement importante pour la réorientation des usages du bois.

Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale
Bas-Carbone 2

| Forêt-Bois

Auteurs :

Julia **Grimault** (I4CE)

Clothilde **Tronquet** (I4CE)

Valentin **Bellassen** (INRAE)

Sommaire

Forêt-bois

INTRODUCTION	11		
1. ÉTAT DES LIEUX DE LA SNBC POUR LE VOLET FORÊT-BOIS	12		
1.1. Les puits et stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers	12	Un puits à long terme toujours positif, mais qui varie fortement en fonction du niveau de prélèvements	26
1.1.1. Améliorer la pompe à carbone et diminuer les risques	13	Un puits impacté par les effets du changement climatique	27
1.1.2. Développer le boisement	14	2.4.2. Où se situe la SNBC ?	27
1.1.3. Réduire les défrichements	15	Un puits dans les écosystèmes limité, qui s'apparente au puits des scénarios intensifs sous climat dégradé	27
1.2. Le stockage de carbone dans les produits bois	16	2.5. Répartition de la récolte entre les différents usages	28
1.2.1. Récolter davantage de bois	16	2.5.1. Synthèse de la littérature	28
1.2.2. Privilégier les usages du bois ayant une plus longue durée de vie et un potentiel de substitution élevé	17	Une répartition de la récolte qui varie peu au cours du temps, avec une prépondérance du bois-énergie	28
1.2.3. Développer la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique des produits-bois en fin de vie	19	Des volumes de BO qui augmentent de 70 % à 150 % dans les scénarios intensifs	28
1.3. Synthèse	20	Bois-industrie : une multiplication par plus de 2 dans les études	28
2. EVALUER L'AMBITION ET LE RÉALISME DE LA SNBC : COMPARAISON À LA LITTÉRATURE RECENTE	22	2.5.2. Où se situe la SNBC ?	28
2.1. Evolution des surfaces forestières : boisements et défrichements	23	Une part du bois énergie qui diminue mais des volumes maintenus, qui permettent de répondre aux objectifs énergétiques	28
2.1.1. Un accroissement des nouvelles surfaces forestières bien inférieur à la tendance historique	23	Bois d'œuvre : une augmentation des sciages globalement supérieure à la littérature	29
2.1.2. Des objectifs de limitation des défrichements qui nécessiteraient d'inverser les tendances actuelles	23	Une augmentation de la part de la récolte dédiée aux sciages probablement difficile à réaliser	29
2.2. Production biologique et mortalité	24	Bois industrie : un développement des panneaux sans précédent, deux à trois fois supérieur à ce qui est prévu dans la littérature	29
2.2.1. Une littérature contrastée témoignant de nombreuses incertitudes	24	2.6. Faisabilité et adéquation avec la demande	30
Pas de consensus sur l'évolution de la production biologique, en lien avec des différences de modélisation...	24	2.6.1. Synthèse de la littérature	30
... mais aussi à cause de la difficile prise en compte du changement climatique	24	Une forte croissance de la demande en bois d'œuvre dans le scénario de neutralité carbone mais une évolution des panneaux très limitée	30
2.2.2. La SNBC tient une position équilibrée par rapport à la littérature	25	Une inadéquation entre le bois demandé et la ressource existante dès 2035	30
Une production biologique stable dans le temps, représentant un compromis entre les différentes tendances	25	2.6.2. Où se situe la SNBC ?	30
Une mortalité optimiste ?	25	Une augmentation des volumes de bois produits biens supérieurs à la demande nationale	30
2.3. Prélèvements et récolte	25	Un volume de sciages cohérent avec la demande en 2035 mais supérieur à la demande en 2050	31
2.3.1. Synthèse de la littérature	25	Une offre de bois feuillus disponible face à une demande en résineux	31
Des scénarios de gestion contrastés qui font varier les niveaux de prélèvements	25	Des volumes de panneaux très supérieurs dans la SNBC forêt-bois aux volumes requis dans la construction selon un scénario de neutralité carbone ambitieux	31
La faisabilité des scénarios de prélèvements intensifs discutée sur le plan économique	25	2.7. Le puits lié aux produits-bois	31
2.3.2. Où se situe la SNBC ?	26	2.7.1. Synthèse de la littérature	31
2.4. Le puits de carbone dans les écosystèmes	26	Des stocks importants mais un puits annuel qui reste faible	31
2.4.1. Synthèse de la littérature	26	Un puits dans les produits qui augmente faiblement dans les scénarios intensifs	32
Un puits historique cohérent entre les études et avec la SNBC	26	2.7.2. Où se situe la SNBC ?	32
Des divergences dans la prise en compte du puits de carbone dans les sols	26	Un puits dans les produits-bois 3 à 4 fois supérieur aux scénarios les plus intensifs de la littérature	32
		2.8. Tableau de synthèse	32
		BIBLIOGRAPHIE	35

Introduction

La forêt et le bois jouent un rôle important en termes d'absorptions de carbone dans la SNBC, aujourd'hui comme en 2050. Cependant, la SNBC 2 prévoit un changement drastique de la composition de ce puits dans les 30 ans à venir :

- **La part des forêts, sols et produits bois se réduit légèrement**, en lien avec la contribution accrue des sols agricoles et l'introduction des BECSC : aujourd'hui, les forêts et les sols forestiers représentent 86 % du puits de carbone (le reste provenant des prairies), contre seulement 70 % en 2050.
- **La part de la forêt se réduit drastiquement au profit du bois** : aujourd'hui, le puits est principalement lié à la croissance de la biomasse sur pied dans les forêts et la part des produits-bois est très faible.

On note ici que cette étude ne se focalise que sur les puits de carbone, c'est-à-dire les leviers qui permettent des absorptions supplémentaires de CO₂. L'utilisation du bois

dans les secteurs du bâtiment ou de l'énergie, et par extension les effets de substitution induits par l'usage du bois, ne sont ici pas considérés directement. Ces effets de substitution sont néanmoins inclus mécaniquement dans les trajectoires de décarbonation des autres secteurs de l'économie, également traités dans la SNBC 2, mais ils n'apparaissent pas en tant que tels dans le bilan forêt-bois. On note enfin que certaines actions prévues pour améliorer le stockage du carbone dans les produits bois par exemple peuvent également permettre de déclencher des effets de substitution, même si leur impact en termes de CO₂ n'est pas quantifié.

Cette section forêt-bois se divise en deux parties :

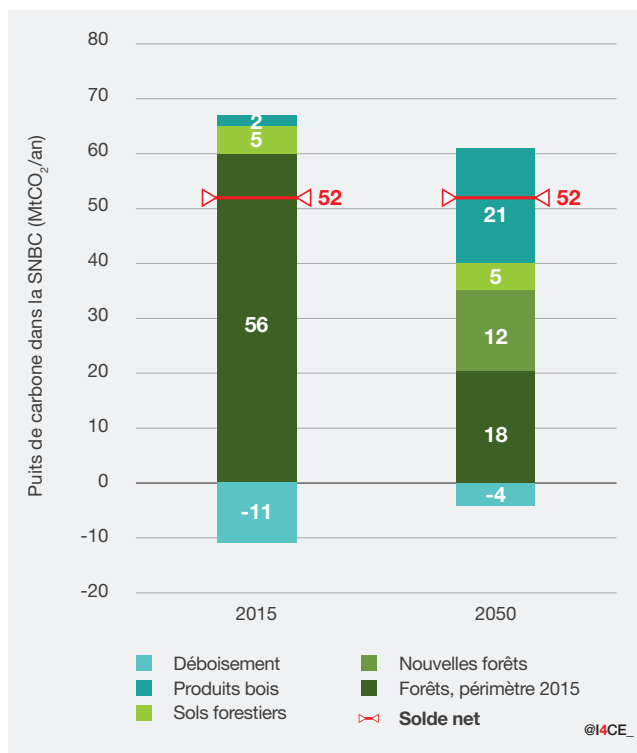
- 1) Un décryptage factuel de ce que prévoit la SNBC 2 pour la forêt et le bois, afin d'illustrer les différentes hypothèses sur lesquelles la SNBC s'appuie
- 2) Une analyse critique de ces différentes hypothèses au regard de la littérature, afin d'en évaluer la cohérence et le réalisme.

1. État des lieux de la SNBC pour le volet forêt-bois

D'après la SNBC 2, les principales évolutions du puits lié à la filière forêt-bois d'ici à 2050 sont les suivantes :

- Une **réduction importante du puits forestier in situ**, qui diminue de plus de 50 % et passe de 59 MtCO₂/an en 2015 à 31 MtCO₂/an¹ en 2050, suite à une augmentation importante de la récolte de bois.
- Une **augmentation très importante du stockage de carbone dans les produits-bois**, permis grâce à l'augmentation de la récolte mais aussi grâce à un changement d'usage des produits-bois pour s'orienter massivement vers des produits-bois à longue durée de vie et favoriser le recyclage matière. Le développement des panneaux est particulièrement important. Le puits dans les produits-bois est estimé à 1,9 MtCO₂/an en 2015², et atteint 20 MtCO₂/an en 2050, soit une multiplication par plus de 10. Le flux annuel entrant de produits bois est quant à lui multiplié par plus 3.
- Dans une moindre mesure, une **augmentation des surfaces forestières**, via une augmentation des boisements et une diminution des défrichements.

FIGURE 1 : EVOLUTION DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DU PUIFS FORESTIER ENTRE 2015 ET EN 2050 DANS LA SNBC



Le principal déterminant du puits à l'horizon 2050 repose ainsi sur le changement de la filière forêt-bois. Si la forêt et le bois sont responsables de près de 70 % du puits en 2050, contre 100 % aujourd'hui, l'enjeu réside dans le fait de passer d'un puits important dans les forêts à un puits massif dans les produits-bois. L'atteinte de cet objectif reposera partiellement sur la capacité de la filière à récolter plus de bois, mais surtout sur l'évolution du marché pour utiliser plus de bois dans les usages à longue durée de vie, et notamment dans la construction. Si les forêts restent les principales contributrices au puits de carbone en 2050 (plus de 40 %), l'enjeu clé résulte dans la production et l'usage accru des produits-bois à longue durée de vie.

Enfin, on note que les efforts prévus sur les 2 éléments permettant d'atteindre le puits dans les produits-bois ne sont pas prévus au même moment :

- le gros des efforts prévus sur l'augmentation de la récolte a lieu avant 2035, et le rythme d'augmentation ralentit ensuite jusqu'en 2050 ;
- à l'inverse, l'augmentation de la part de bois dédiée aux usages à longue durée de vie augmente assez peu jusqu'en 2030, et plus fortement en 2030 et 2050.

1.1. Les puits et stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers

Le compartiment forestier (autrement dit le carbone séquestré dans la biomasse sur pied et les sols) est la principale composante du puits en 2050 : avec un puits brut de près de 35 MtCO₂/an (hors déboisements), elle devance le carbone additionnel stocké dans les produits-bois (20 MtCO₂/an en 2050), les absorptions technologiques que sont le CCS et le CCU (près de 15 MtCO₂/an) ainsi que les autres terres (10 MtCO₂/an).

Par ailleurs, ce compartiment forestier est également celui qui subit la plus forte évolution entre aujourd'hui et 2050, puisqu'il se réduit en fait drastiquement :

- le puits des forêts restant forêts est presque divisé par 3, en passant de 56 MtCO₂/an aujourd'hui à seulement 18 MtCO₂/an en 2050 ;
- le puits lié aux boisements augmente quant à lui pour atteindre 12 MtCO₂/an en 2050 ;
- les émissions liées aux déboisements sont divisées par 2 entre 2015 et 2050 ;
- le puits lié au carbone des sols forestiers se maintient autour de 5 MtCO₂/an jusqu'en 2050.

¹ En incluant les changements d'usages des terres (boisements et défrichements).

² Inventaire Nationale de GES, CITEPA.

Au total, le puits lié au compartiment forestier (écosystème) se réduit de 46 % entre 2015 et 2050, principalement en lien avec la baisse de puits des forêts restant forêts, qui subissent une hausse importante des prélèvements (voir partie produits-bois).

Au sein de la première orientation dédiée au renforcement des puits de carbone et à la résilience des forêts, la SNBC propose trois grands objectifs, ou orientations : 1) Améliorer la pompe à carbone et diminuer les risques, 2) Développer le boisement 3) Réduire les défrichements.

1.1.1. Améliorer la pompe à carbone et diminuer les risques

Cette orientation vise avant tout à maintenir la capacité d'absorption des forêts qui restent forêts, en assurant notamment leur résilience et en appuyant leur adaptation au changement climatique. L'enjeu ici n'est donc pas tant d'améliorer le puits de carbone in situ que de s'assurer de son maintien au cours des décennies à venir et ce, malgré l'impact du changement climatique.

La fonction de puits de carbone des forêts repose sur 5 paramètres :

- **La production biologique brute**, qui correspond à l'accroissement annuel du volume de bois lié à la croissance des arbres. La SNBC fait ici l'hypothèse que la production biologique de la forêt va rester stable au cours des 30 prochaines années, à 150 MtCO₂/an³. Cela implique notamment que la croissance des arbres ne sera pas ralentie par le changement climatique. D'après la SNBC, la gestion dynamique de la forêt et l'amélioration des peuplements expliquent cette production stable, et contrebalancent les impacts potentiels du changement climatique et le vieillissement des forêts qui pourraient induire une réduction de la production biologique brute⁴.
- **La mortalité des arbres**, qui de la même manière représente une part toujours plus faible du stock de carbone sur pied (de 0.43 % à 0.35 %), même si en volume cette mortalité augmente légèrement, en lien avec un stock de carbone sur pied qui croît de près de 30 % sur la période. Cette diminution du poids de la mortalité est justifiée dans la SNBC par une dynamisation de la gestion sylvicole.

► **Le carbone additionnel séquestré dans les sols forestiers** est réputé constant au cours du temps, à 5 MtCO₂/an.

► **Le carbone additionnel séquestré dans le bois mort**, qui diminue de près de 80 % entre 2015 et 2050, pour atteindre 2 MtCO₂ en 2050. L'augmentation du stock de bois mort dépend de l'accroissement de la forêt, du taux de mortalité naturelle et des pertes d'exploitations liées aux prélèvements. Le stock additionnel a fortement augmenté par le passé en lien avec les tempêtes de 1999 et 2009. Il diminue sur la période pour retrouver un point d'équilibre, et est également marginalement impacté par une diminution des pertes d'exploitation liées aux prélèvements.

► **La récolte**, autrement dit les volumes de bois prélevés annuellement, affecte aussi la fonction de puits de carbone, mais sera traitée dans la partie « récolter davantage de bois ».

Le maintien de l'accroissement biologique et la diminution de la part de la mortalité sont ainsi les hypothèses clés qui seront mises en regard des études clés par la suite.

3 La production biologique sera actualisée en cohérence avec les dernières données de l'inventaire : une baisse de 12 MtCO₂ est anticipée.

4 A l'inverse, le scénario 'Avec Mesures Existantes' prévoyait une production en baisse au fil des années, en lien avec des forêts vieillissantes.

AUGMENTER LA POMPE À CARBONE

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC				
Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
Augmenter la récolte de bois	Le puits diminue avec l'augmentation de la récolte. Par ailleurs, certaines pratiques de gestion peuvent contribuer au déstockage du carbone des sols (récolte accrue des rémanents, mise en exploitation de peuplements anciens, travail du sol lors de la plantation, mécanisation...).	Forêt	Conflit potentiel	D'après la SNBC, une récolte accrue et une gestion plus dynamique permettraient de limiter la mortalité et de ne pas ralentir la croissance des arbres.
Condition de réalisation/points d'attention				
<ul style="list-style-type: none"> Le maintien de l'accroissement biologique dans le temps. La baisse de la part de la mortalité. Ces deux hypothèses seront discutées en lien avec l'impact anticipé du changement climatique sur l'accroissement et la mortalité des peuplements forestiers.				
Eléments de mise en œuvre				
Afin d'assurer le maintien de la pompe à carbone (production biologique nette), la SNBC prévoit un certain nombre de mesures, qui reposent notamment sur : <ul style="list-style-type: none"> Une mobilisation plus forte des propriétaires forestiers pour renforcer la gestion forestière, et qui passe notamment par une incitation au regroupement de la gestion forestière et de la mobilisation du bois. Une dynamisation de la gestion sylvicole, de manière à améliorer les peuplements en place. Cela passe par la mise en œuvre systématique d'une sylviculture d'amélioration des peuplements pauvres ou en impasse sylvicole, autrement dits des peuplements déperissant ou peu productifs, ainsi que du renforcement des dispositifs permettant de régénérer les forêts après une coupe ou une perturbation naturelle, tout en préservant le carbone du sol. Une meilleure gestion des aléas qui peuvent toucher les peuplements forestiers, en renforçant notamment la lutte contre les ravageurs et les incendies, mais aussi en parvenant collectivement à atteindre localement un équilibre forêt-gibier. Le renforcement des pratiques permettant de maintenir les stocks de carbone dans les sols forestiers et d'éviter le déstockage (limitation du travail du sol, évitement de la mise à nue des sols...). La mise en place d'outils permettant de valoriser économiquement les actions sylvicoles pertinentes pour le climat, comme par exemple la reconstitution de peuplements dégradés ou la conversion de taillis en futaie, comme le Label Bas Carbone. 				

@i4ce_

1.1.2. Développer le boisement

Au-delà de l'amélioration de la capacité d'absorption des terres forestière gérées, la SNBC vise également l'augmentation des surfaces forestières. Cette augmentation des surfaces s'appuierait sur 2 phénomènes complémentaires :

- **Un boisement naturel des terres en déprise agricole et friches** par des accrus, évalué à 50 000 ha/an supplémentaire en 2015 et qui diminue fortement jusqu'à atteindre +15 000 ha/an en 2050, en lien avec la diminution des surfaces en déprise agricole.
- **Un programme de boisement volontaire** mis en œuvre à partir de 2020, avec des essences productives. Ces plantations couvriraient +20 000 ha/an en 2030 et +15 000 ha/an en 2050.

En 2015, les objectifs supplémentaires en termes de boisement (accrus comme plantations) représentent donc une augmentation des surfaces forestières de 0.3 % des terres forestières actuelles (16.5 Mha). Le rythme de boisement diminue au fil du temps et ne représente plus que 0.27 % des terres forestières (17 Mha) en 2030 et 0.17 % en 2050 (17.7 Mha). Ce rythme contraste avec la tendance

des 30 années passées, où l'on constatait une progression des surfaces forestières d'en moyenne 0.7 %/an à l'échelle nationale (IGN, 2019). Cette diminution de la part des terres boisées s'explique par la raréfaction des terres disponibles en lien avec la baisse de la déprise agricole.

Si le puits de carbone généré par les boisements ne contribue que légèrement au puits forestier en 2015 (moins de 6 MtCO₂ sur 78 MtCO₂⁵), il représente en revanche une part non négligeable du puits forestier brut total en 2050 : 19 MtCO₂ sur 42 MtCO₂, soit 46 % du puits forestier in situ et 22 % du puits total du secteur des terres. À noter que les boisements sur les terres en déprise représentent plus de 60 % du puits de carbone cumulé sur la période 2015-2050.

Au total, ce sont près d'un million d'hectares de terres en déprise qui seront colonisées par les accrus et plus de 600 000 ha de forêts plantées. Ainsi, ces boisements se font principalement au détriment des surfaces agricoles (cultures et prairies) et des autres terres, qui diminuent sur la période. Cependant, la SNBC précise que cet objectif de boisement n'entre pas réellement en compétition avec les terres agricoles et les objectifs de production alimentaire. En effet, la priorité est d'enrichir les boisements qui se produisent naturellement

5 Puits brut hors déboisements.

sur des terres agricoles déjà délaissées, et non de boiser directement des terres agricoles en production. En ce qui concerne le programme de plantations, il vise en priorité les terres dégradées, ou encore les friches industrielles, les

terrains vagues, mais peuvent aussi être mis en œuvre sur des terres agricoles, et notamment sur les prairies permanentes à faible productivité.

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC				
Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
Le maintien des prairies	Le développement des accrus forestiers se fait sur des prairies délaissées, et les boisements peuvent avoir lieu sur des prairies peu productives.	Agriculture	Conflit potentiel	
Les objectifs de production agricole et de sécurité alimentaire	Les prairies sont notamment concernées (<i>voir ci-dessus</i>).	Agriculture	Conflit potentiel	Les accrus se développent sur des terres déjà délaissées et les plantations ont lieu en priorité sur des terres non agricoles, et au plus dans des prairies peu productives. Le scénario AMS utilise par ailleurs l'outil Climagri, qui inclut une représentation complète des surfaces de SAU, et assure une stabilité de la production agricole en valeur.
Les surfaces dédiées à la biomasse énergie	On note ici que les taillis à courte rotation ne font pas partie des objectifs SNBC.	Agriculture	Conflit potentiel	Peu de surfaces sont exclusivement dédiées à l'énergie (CIVE principalement).
La réduction de l'artificialisation des terres	La réduction de l'artificialisation permettrait de maintenir les terres agricoles et dans une moindre mesure forestières.	Terres	Alignement	
Condition de réalisation/points d'attention				
<ul style="list-style-type: none"> La poursuite de la déprise agricole (60 % du potentiel cumulé repose sur la colonisation par les accrus). La disponibilité des surfaces pour la plantation. La capacité financière des acteurs à boiser de nouvelles surfaces. La réduction de l'artificialisation des terres. La structure du foncier et l'accès au foncier. 				
Éléments de mise en œuvre				
<p>La mise en œuvre de cet objectif de boisement sera soutenue par les éléments suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> Le déploiement du Label Bas-Carbone, qui permettra de favoriser l'investissement privé en faveur du boisement. L'accompagnement et l'amélioration des boisements spontanés sur les terres agricoles. L'identification des espaces abandonnés ou dégradés sur le territoire, comme les terrains vagues, friches industrielles ou carrières non exploitées, et la mise en œuvre au cas par cas de mesures de restauration préalable à des boisements. La mise en place d'incitations pour favoriser les usages de l'arbre et des forêts en ville et dans les zones péri-urbaines 				

@i4ce_

1.1.3. Réduire les défrichements

Afin d'améliorer le potentiel d'atténuation lié aux forêts, la SNBC prévoit également la réduction des défrichements, c'est-à-dire des terres forestières converties pour d'autres usages, notamment pour l'agriculture et pour l'urbanisation. Les défrichements représentaient en 2015 des émissions de 10.7 MtCO₂/an, et plus de 35 000 ha⁶ forestiers convertis.

Il est important de distinguer ici les surfaces qui subissent des défrichements et les émissions que ces défrichements génèrent. En effet, la conversion de forêts en terres agricoles émet moins de GES que la conversion en terres artificialisées. Ainsi, en termes de surfaces, ce sont les terres agricoles qui

grignotent historiquement le plus les surfaces forestières à l'échelle nationale : en 2015, l'expansion des terres agricoles compte pour les deux tiers des surfaces déboisées, mais ne représente que 50 % des émissions liées aux défrichements.

Les volumes et types de surfaces forestières défrichées diffèrent également selon que l'on se trouve en métropole ou en Outre-Mer (Guyane notamment). Près des deux tiers des émissions ont eu lieu en métropole, conséquence de l'urbanisation et l'extension des terres agricoles à part égales. Le reste des défrichements a principalement lieu en Guyane, en lien avec le développement des terres agricoles, l'orpaillage illégal et dans une moindre mesure le développement

6 Selon l'inventaire national de GES du CITEPA

d'infrastructures. On note ici que la Guyane ne représente que 10 % des surfaces défrichées en 2015, mais un tiers des émissions malgré une même part des défrichements liées aux terres agricoles et artificialisées qu'en métropole. Cela peut s'expliquer par la faible part de surfaces converties en prairies en Guyane (à peine 14 % des terres agricoles), par rapport à la métropole où la grande majorité des conversions se fait au bénéfice des prairies (72 %) et non des cultures.

D'ici à 2050, la SNBC prévoit de réduire de 80 % les émissions métropolitaines liées aux défrichements, en luttant

notamment contre l'artificialisation des sols. En Guyane, l'objectif de baisse des émissions est plus modéré, (à peine 20 %), en lien avec la tendance démographique et les besoins de développement du territoire (urbain et agricole). En 2050, la Guyane représente ainsi à elle seule 90 % des défrichements restants.

Au total, les émissions liées aux défrichements devraient baisser de 62 % sur l'ensemble de la période, pour ne représenter que 4.1 MtCO₂ en 2050.

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC				
Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
La réduction de l'artificialisation des terres	La limite de l'artificialisation est la principale mesure prévue pour réduire les défrichements, en Métropole notamment. La concurrence avec le secteur agricole devrait être amenée à se réduire, dans la mesure où on anticipe une baisse des terres cultivées et des prairies au cours de la période.	Terres	Alignement	
Condition de réalisation/points d'attention				
<ul style="list-style-type: none"> Atteinte des objectifs de réduction de l'artificialisation Absence d'augmentation des surfaces agricoles Limitation de la consommation d'espaces forestiers par les énergies renouvelables 				
Eléments de mise en œuvre				
La mise en œuvre de la stratégie s'appuie notamment sur les éléments suivants : <ul style="list-style-type: none"> La préservation des zones à haut stocks de carbone (HCS) ou à haute valeur de conservation (HCV). La préservation des forêts anciennes et le renforcement de la vigilance dans les espaces naturels sous protection (Natura 2000). La lutte contre le mitage forestier, en déployant notamment les sanctions contre les constructions illégales et les décharges sauvages. 				

@i4ce_

1.2. Le stockage de carbone dans les produits bois⁷

1.2.1. Récolter davantage de bois

L'augmentation de la récolte de bois est le levier phare de la SNBC en matière de forêt. Ce levier joue en effet un rôle déterminant dans l'évolution du puits de carbone forestier d'une part, et dans l'évolution du stock de carbone dans les produits-bois d'autre part.

L'augmentation de la récolte suit le rythme prévu par le Programme National de la Forêt et du Bois (PNFB) jusqu'en 2026, à savoir une augmentation progressive atteignant les +12 Mm³ de bois récoltés en 2026. Cette tendance est poursuivie jusqu'en 2035, puis se ralentit pour atteindre +0,8 Mm³/an à partir de 2036. Elaborée en cohérence avec une étude de l'IGN et du FCBA sur la disponibilité de la ressource forestière⁸, l'augmentation

importante mais progressive jusqu'en 2036 doit à la fois permettre aux industries de transformation de s'adapter progressivement mais également d'éviter la « perte brutale d'aménités sociales ou environnementales à grande échelle ».

Estimée à 48 Mm³ en 2015, elle augmente de plus de 70 % sur la période 2015-2050. En termes de CO₂, les émissions liées à la récolte et aux pertes d'exploitations associées, représentent 73 MtCO₂ en 2015 et jusqu'à 115 MtCO₂ en 2050. A noter que ces émissions ne sont pas visibles en tant que telle dans la SNBC, mais apparaissent indirectement via la baisse du puits in situ. Si la récolte augmente de manière continue, la part de pertes d'exploitations, qui alimentent le puits de carbone du bois mort, diminue néanmoins sur la période de près de 6 points.

La part croissance de la récolte représente ainsi un poste d'émissions dans la SNBC⁹, en lien avec le relargage d'une partie du carbone stocké dans l'écosystème forestier et un manque à gagner de séquestration à court terme lié à l'arrêt

⁷ Les mesures visant à augmenter le stockage de carbone dans les produits bois contribuent également à améliorer les effets de substitution matériau, c'est-à-dire l'usage du bois en lieu et place de matériaux d'origine fossile.

⁸ *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*, IGN-FCBA, 2016.

⁹ Les émissions liées aux prélèvements sont visibles dans l'inventaire national via l'impact qu'elles ont sur le puits de carbone forestier. Pour éviter un double-compte, elles ne sont pas comptabilisées dans le volet 'émissions' de la SNBC avec les autres secteurs économiques.

de la croissance de ces arbres. Le scénario de la SNBC contrebalance ces émissions par une forte augmentation du

stockage de carbone dans les produits-bois ainsi que par la séquestration par les nouvelles forêts.

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC				
Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
Améliorer la pompe à carbone/le puits forestier	L'augmentation de la récolte oriente le puits forestier à la baisse, même si cela contribue à renouveler les peuplements et maintenir une pompe à carbone sur le long terme.	Forêt-bois	Conflit potentiel	Le puits forestier baisse à court terme. A moyen et long terme, la baisse sera limitée par le renouvellement des peuplements.
Augmentation du puits de carbone dans les produits bois	L'augmentation de la récolte est une condition directe d'une partie de l'augmentation du stockage de carbone dans les produits-bois, associé à un changement des usages du bois visant des produits à plus longue durée de vie et au recyclage matière.	Forêt-bois	Alignement	Afin de maximiser le puits dans les produits, l'augmentation de la récolte est associée à une orientation d'une part plus importante de la récolte vers les produits à longue durée de vie.

Condition de réalisation/points d'attention

Cette hypothèse fait partie des hypothèses forte de la SNBC. Elle pourra se réaliser aux conditions suivantes :

- **Disponibilité de la ressource forestière française** : dans cette étude, les besoins seront confrontés aux dernières études sur la mobilisation de la ressource forestière des dernières années.
- **Capacité de la filière à mobiliser le bois** : en lien avec les différentes mesures mentionnées par la SNBC pour inciter la mobilisation du bois, notamment en forêt privée, et au regroupement de la gestion. Le succès de cette orientation dépendra donc de la capacité des propriétaires forestiers de mobiliser massivement plus de bois d'une façon durable, d'ici à 2035 notamment.
- **Evolution de la demande en matériau bois** : les coupes étant déclenchées pour le bois d'œuvre, le succès de la mobilisation dépendra également de la demande finale et de l'adéquation des marchés et de la ressource. Cela implique donc deux transformations majeures : 1) une augmentation forte des volumes de bois (notamment issus de la récolte nationale) utilisés, dans la construction notamment 2) un développement et une massification des débouchés à long durée de vie pour le bois feuillu, qui constitue la majeure partie de la ressource française.

Éléments de mise en œuvre

L'augmentation massive de la récolte repose sur la mise en œuvre des éléments suivants :

- La stimulation de la demande, c'est-à-dire de l'usage du bois, notamment dans la construction. La levée des freins réglementaires et économiques actuels et la mise en place des bonnes incitations pour donner un avantage au bois issu de la récolte nationale (notamment feuillus) par rapport aux matériaux d'origine fossile seront nécessaires.
- La stimulation de l'offre, via la dynamisation de la gestion et de la mobilisation du bois :
 - le renforcement des démarches de contractualisation pour la commercialisation du bois ;
 - la facilitation de l'exploitation, via l'amélioration de la gestion des dessertes notamment ;
 - l'amélioration des dispositifs économiques et fiscaux encourageant la dynamisation et le regroupement de la gestion : DEFI, CIFA... ;
 - la modernisation et le développement du tissu industriel permettant la transformation du bois.

@i4ce_

1.2.2. Privilégier les usages du bois ayant une plus longue durée de vie et un potentiel de substitution élevé

L'utilisation de produits-bois permet d'activer deux leviers complémentaires en termes de lutte contre le changement climatique : 1) le stockage du carbone dans les produits-bois, et notamment ceux à longue durée de vie qui vont prolonger le stockage du carbone plus longtemps 2) les effets de substitution, c'est-à-dire l'utilisation de bois en lieu et place d'autres matériaux ou énergies d'origine fossile.

Les produits-bois à longue durée de vie, et notamment ceux utilisés dans la construction, permettent de maximiser les effets de ces deux leviers : ils prolongent le stockage du carbone pendant plusieurs décennies, et permettent d'importantes économies de CO₂ fossile en se substituant à des matériaux plus énergivores, comme par exemple le béton ou l'acier dans la construction. Ainsi, le bois matériau est le

type d'usage qui présente le coefficient de substitution le plus important : pour 1 m³ de bois intégré dans les produits finis à la place de 1 m³ d'un autre produit plus énergivore, on peut éviter en moyenne l'émission de 1,6 tCO₂ d'origine fossile (INRAE-IGN, 2018). On note cependant que ce coefficient peut varier très fortement en fonction des usages du bois et des produits de référence remplacés.

La SNBC prévoit ainsi une augmentation massive du carbone stocké dans les produits-bois à l'horizon 2050 : si la variation de stock dans les produits-bois représente un puits de 1,9 MtCO₂ en 2015, elle doit atteindre un puits de 20 MtCO₂ en 2050, soit une multiplication par plus de 10.

Ce stockage du carbone dans les produits repose notamment sur les sciages et les panneaux, l'usage du papier étant maintenu constant et ne générant pas de puits. Ce sont les panneaux qui contribuent le plus au puits de carbone dans les produits-bois à l'horizon 2050, avec un flux brut de 22 MtCO₂ contre seulement 15 MtCO₂ pour les sciages.

1. ÉTAT DES LIEUX DE LA SNBC POUR LE VOLET FORÊT-BOIS

En tenant compte des durées de demie-vie¹⁰, qui viennent impacter le bilan à la baisse, les gains nets en termes de CO₂ ne représentent plus que 12 MtCO₂ pour les panneaux et 7 MtCO₂ pour les sciages. Les deux témoignent néanmoins d'une forte croissance des flux entrants annuels, multipliés par 3.5 pour atteindre en 2050 15 MtCO₂ pour les sciages et 22 MtCO₂ pour les panneaux. Le ratio sciages/panneaux reste constant au cours de la période.

Cette augmentation du stock de carbone dans les produits-bois est liée à deux facteurs qui se combinent :

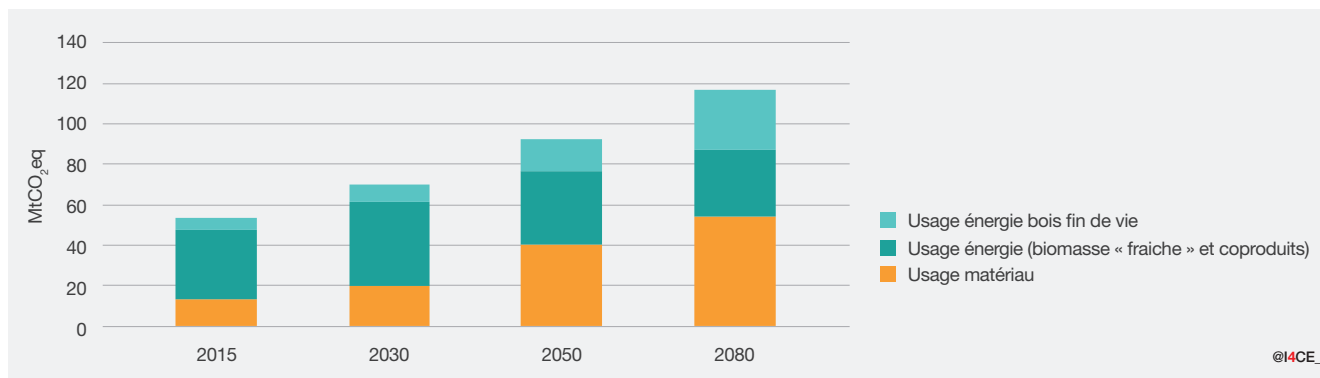
- l'augmentation de la récolte ;
- l'augmentation de la part de la récolte dédiée aux usages matériaux de longue durée, par opposition aux usages énergie, qui double d'ici 2050. En effet, si cette part dédiée aux usages à longue durée de vie est évaluée à 25 %

en 2015, elle doit atteindre 30 % en 2030 et 50 % en 2050.

Entre ces deux leviers, c'est en fait l'augmentation du ratio sur la part de bois dédiée aux usages matériaux qui a l'impact le plus important sur le puits de carbone : il explique 60 % de l'augmentation du puits des produits bois, sans contrepartie sur le puits forestier. Cette augmentation de la part de la récolte dédiée aux produits à longue durée de vie est particulièrement cohérente avec l'objectif d'amélioration de l'efficacité carbone des produits-bois, qui passe également par une allocation la plus optimale possible de la récolte.

Enfin, on note que si la part de la récolte dédiée aux usages longs du bois augmente fortement, la SNBC ne prévoit pas de forte baisse de volumes pour le papier et l'énergie : le papier reste stable et le bois énergie augmente très légèrement, en lien avec des volumes récoltés en augmentation.

FIGURE 2 : EVOLUTION DES USAGES DU BOIS DANS LA SNBC 2



Source : tableur forêt-bois de la SNBC 2, Ministère de la Transition Ecologique.

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC				
Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
Développement de la biomasse énergie	Une augmentation de la part de la récolte dédiée aux matériaux à longue durée de vie signifie que la part liée au bois-énergie doit diminuer, générant potentiellement un conflit pour la ressource.	Energie	Conflit potentiel	Grâce à l'augmentation de la récolte, les volumes disponibles pour l'énergie continuent d'augmenter avec l'augmentation de la récolte jusqu'en 2030, avant de redescendre entre 2040 et 2050, où ils atteignent un niveau très légèrement supérieur à celui de 2015.
Augmentation de la récolte	L'augmentation de la récolte permet de développer les produits bois à longue durée de vie sans faire baisser les volumes pour les autres usages (papier, énergie...).	Energie, industrie	Alignement	
Développement de la réutilisation, du recyclage et de la valorisation énergétique des produits-bois en fin de vie	L'augmentation de la part des produits bois recyclés ou des produits en fin de vie valorisés énergétiquement permet d'augmenter la ressource totale disponible.	Forêt-bois, déchets	Alignement	
Augmentation de la part du bois dans la construction	Le développement de la demande pour des produits bois à longue durée de vie, notamment dans le secteur de la construction, sera clé pour atteindre cet objectif. De nouveaux débouchés devront être créés pour valoriser la ressource nationale, notamment feuillue.	Bâtiment	Alignement	

@i4ce

¹⁰ 25 ans pour les panneaux et 35 ans pour les sciages, en cohérence avec le Règlement 841 sur le secteur UTCATF

Condition de réalisation/points d'attention

De la même manière que pour l'objectif d'augmentation de la récolte, cette orientation dépendra notamment :

- **De la capacité de la filière à mobiliser et transformer massivement le bois**, et notamment d'orienter davantage la transformation vers des produits-bois à longue durée de vie. La valorisation matière des connexes de scieries et le développement de débouchés pour des produits à longue durée de vie issus de connexes sera également clé.
- **Du développement de la demande**, notamment dans le secteur de construction, pour les matériaux biosourcés (dont bois), en cohérence avec la ressource française.

Éléments de mise en œuvre

L'atteinte de ces objectifs sur les produits-bois à longue durée de vie repose notamment sur :

- La promotion des itinéraires techniques permettant la production de ces matériaux.
- L'amélioration de la compétitivité des entreprises de la filière et le soutien à l'innovation.
- La promotion de la réparation et de la réutilisation des produits, afin de prolonger leur durée de vie, ainsi que le recyclage matière.
- La mutation des modèles économiques et des process dans le secteur du bâtiment.
- La formation aux spécificités du bois pour tous les acteurs de la construction.
- La levée de points normatifs et réglementaires en vue de la massification des produits bois issus de la ressource nationale dans la construction, notamment en grande hauteur, pour les feuillus et pour les bois déclassés.

@i4ce_

1.2.3. Développer la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique des produits-bois en fin de vie

Une meilleure valorisation des produits-bois en fin de vie permet, dans une logique d'économie circulaire, de prolonger le stockage du carbone dans les matériaux ou de produire directement de l'énergie. Afin de maximiser les gains en termes de matière et en termes de CO₂, la valorisation des déchets bois doit suivre le principe de l'usage en cascade : la valorisation matière est prioritaire sur la valorisation énergétique, qui n'intervient qu'en bout de chaîne.

La SNBC prévoit que la part de déchets bois valorisés en énergie augmente fortement au cours du temps, en venant progressivement se substituer à l'enfouissement. En 2015, seuls 35 % des déchets bois sont valorisés en énergie d'après la SNBC, contre un objectif de valorisation de 80 % en 2050.

Le volume de bois valorisé en énergie représente un flux de 6 MtCO₂ en 2015, soit 6.67 Mm³, qui atteint 16 MtCO₂ (17.7 Mm³) en 2050. Ces émissions évitées seront visibles dans le secteur de l'énergie, qui diminuera ainsi son recours aux énergies fossiles.

Interaction avec les autres objectifs de la SNBC

Objectifs	Détail	Secteur concerné	Interaction	Gestion des interactions
Développement de la biomasse énergie	Cette orientation doit être mise en cohérence avec les objectifs du secteur énergétique, concernant notamment le recours à la biomasse. Il faudra ainsi que la demande en biomasse d'une part et les installations capables de valoriser les déchets bois d'autre part, soient cohérentes avec cette ressource supplémentaire.	Energie	Alignement	
Augmentation de la part du bois dans la construction	Les objectifs de recours aux matériaux de réemploi dans le bâtiment pourront affecter à la baisse la quantité de ressource bois disponible pour l'énergie, suivant la logique de priorisation de la valorisation matière.	Bâtiment	Conflit potentiel	

Condition de réalisation/points d'attention

La réussite de cette orientation dépendra notamment :

- Du développement de la capacité de collecte des produits-bois en fin de vie, ainsi que de la capacité de traitement et valorisation des bois ayant subi une contamination chimique.
- De la capacité de valorisation des déchets bois, y compris la levée d'éventuel freins techniques (catégories de déchets bois, structuration de la filière réemploi, unités biomasse adaptées...)

Éléments de mise en œuvre

D'après la SNBC, la mise en œuvre de cette orientation nécessitera notamment :

- Le renforcement et la pérennisation de la collecte et valorisation des déchets bois en fin de vie, via des installations de production énergétique à haute valeur environnementale.
- Le renforcement et la pérennisation du Fonds Chaleur de l'ADEME, pour poursuivre le développement de la chaleur renouvelable à base de biomasse.

@i4ce_

1.3. Synthèse

La SNBC repose ainsi sur différents leviers, qui font évoluer les différents compartiments du puits de carbone. Les tableaux ci-dessous résument les différentes composantes du puits et orientations prévues dans le cadre de la SNBC.

Orientation stratégique de la SNBC	Leviers	Principales hypothèses	Impact carbone en 2050	Evolution carbone sur la période	Conditions de réalisation
«Assurer dans le temps la conservation et le renforcement des puits et des stocks de carbone du secteur forêt-bois, ainsi que leur résilience aux stress climatiques».	Forêts globales	<ul style="list-style-type: none"> Forêts au périmètre actuel. Nouvelles forêts. Sols forestiers. Déboisements. 	Puits de 38 MtCO ₂ , soit 45 % du puits total.	-29 MtCO ₂ , soit -44 %.	
	Améliorer la pompe à carbone et diminuer les risques	<ul style="list-style-type: none"> Production biologique brute constante. Mortalité qui diminue en proportion du stock. Puits de carbone des sols constant. Augmentation de la récolte (voir plus bas). 	Forêts actuelles : puits de 16 MtCO ₂ , soit 19 % du puits total.	Forêts actuelles : puits divisé par 3 (- 43 MtCO ₂ , soit -73 %).	<ul style="list-style-type: none"> Impact du climat sur la croissance des arbres et la mortalité. Récolte accrue permise sans dégrader le puits de carbone du sol.
	Développer le boisement	<ul style="list-style-type: none"> Plantations sur des accrus sur les terres en déprises. Plantations sur des terres non forestières. Essences productives. 	Puits de 19 MtCO ₂ , soit 22 % du puits total.	+14 MtCO ₂ , soit +245 %.	<ul style="list-style-type: none"> Surfaces disponibles sans conflits d'usage. Essences adaptées. Réussite des boisements. Mobilisation de l'amont forestier.
	Réduire les défrichements	<ul style="list-style-type: none"> Liés à l'urbanisation. Liés à l'expansion des terres agricoles. 	Emissions de 10.7 MtCO ₂ , soit 5 % du puits total.	Baisse des émissions de 7 MtCO ₂ , soit -62 %.	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de l'artificialisation des terres. Limite de l'expansion des terres agricoles, en lien avec la déprise.

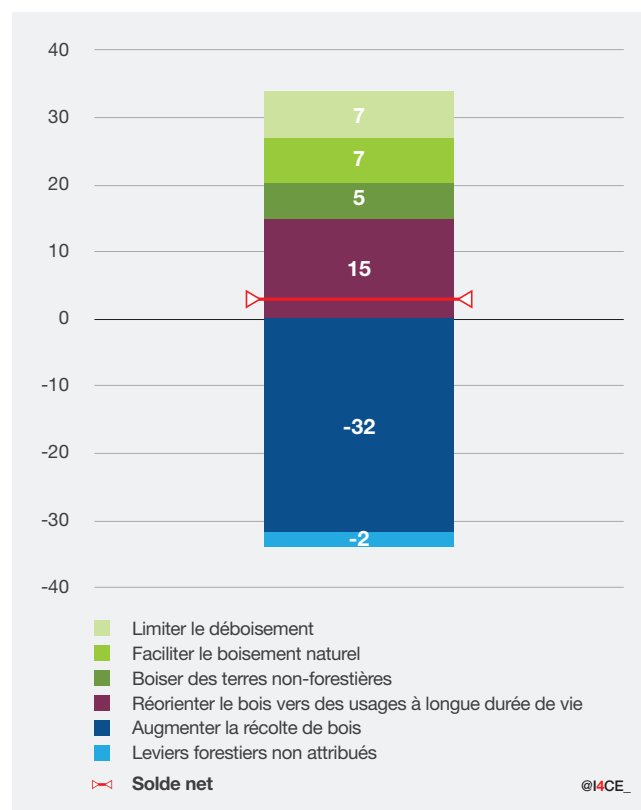
Orientation stratégique de la SNBC	Orientation spécifique	Principales hypothèses chiffrées	Impact carbone en 2050	Evolution carbone sur la période	Conditions de réalisation (en cours)
«Maximiser les effets de substitution et le stockage de carbone dans les produits bois en jouant sur l'offre et la demande».	Volume de carbone dans les produits-bois	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la récolte. Augmentation de la part de la récolte dédiée aux usages matériaux de longue durée. 	Puits de 20 MtCO ₂ /an, soit 25 % du puits total.	+18 MtCO ₂ , soit une multiplication par 10	
	Récolter davantage de bois.	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des prélèvements au rythme du PNFB jusqu'en 2035, puis ralentissement. Réduction des pertes d'exploitation. 		Estimation de l'impact sur l'évolution du puits total : -32 MtCO ₂ , soit une division par 2 du puits forêt-bois initial. Estimation de l'impact sur l'évolution des produits bois : +7 MtCO ₂ .	<ul style="list-style-type: none"> Maintien de la ressource : croissance et résilience des peuplements. Adéquation ressource/demande. Mobilisation de la filière pour mise en gestion.
	Privilégier les usages du bois ayant une plus longue durée de vie et un potentiel de substitution élevé.	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la part de la récolte dédiée à l'usage matériau de 25 % à 50 %. Demande des secteurs finaux en bois matériau (volumes, qualité). Proportions sciage-panneaux maintenues constantes (mais augmente en volume, du fait de la hausse de la récolte et de la part utilisée en matériau). 		+11 MtCO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Maintien de la ressource : croissance et résilience des peuplements. Adéquation ressource/demande. Développement fort de la demande en matériaux biosourcés.

Orientation stratégique de la SNBC	Orientation spécifique	Principales hypothèses chiffrées	Impact carbone en 2050	Evolution carbone sur la période	Conditions de réalisation (en cours)
	Développer la réutilisation, le recyclage et la valorisation énergétique des produits bois en fin de vie.	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la part des déchets bois valorisés énergétiquement pour satisfaire la demande supplémentaire en bois-énergie de 35 à 95 %. La durée de demi-vie s'allonge modérément, grâce à un meilleur réemploi et recyclage des matériaux. 	<ul style="list-style-type: none"> Valorisation énergétique : impact carbone non évalué. Allongement de la durée de demi-vie : impact modeste sur le puits de carbone en 2050 (moins d'1 MtCO₂). 	Non pris en compte dans le volet produits-bois.	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des systèmes de collecte. Levée des freins techniques pour la valorisation.

@i4ce_

L'évolution du puits dans le secteur forêt-bois repose ainsi sur différents leviers, qui supposent pour la majorité des modifications substantielles par rapport à la tendance. Ces leviers et leur poids respectifs sont représentés dans la figure ci-dessous.

FIGURE 3 : LES PRINCIPAUX LEVIERS DU PUIITS DE CARBONE FORÊT-BOIS EN 2050



Sources : I4CE, à partir des données SNBC et CITEPA.

Quatre leviers compensent la réduction du puits générée par l'augmentation de la récolte. Le principal levier qui permet d'améliorer le puits est la réorientation des usages du bois, c'est-à-dire le fait de consacrer 50 % de la récolte aux produits bois à longue durée de vie. Ce levier contrebalance à lui seul la moitié de l'impact de l'augmentation de récolte. La limitation des défrichements vient ensuite, suivie du boisement de nouvelles surfaces.

2. Evaluer l'ambition et le réalisme de la SNBC : comparaison à la littérature récente

L'objectif de ce travail est de comparer les hypothèses prises par la SNBC à la littérature existante, de manière à mieux appréhender l'ambition proposée par la SNBC.

Trois travaux récents de portée nationale proposent des projections de stratégies de gestion forestière pour les prochaines décennies, et dressent leur bilan carbone :

- *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050, 2017 et Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique- Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie.* A. Roux, A. Colin, J.-F. Dhôte, B. Schmitt, coord., 2019. – Expertise scientifique collective, dénommé ci-après « INRAE-IGN »
- *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, Valade et al., Ademe, 2017 – Projet de recherche dénommé ci-après « BiCaFF »
- *Gestion forestière et changement climatique, une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation, Du Bus de Warnaffe, Angerand, Fern, Fern-Canopée, 2020 - Expertise dénommé ci-après « Fern-Canopée ».*

Les trois études ont en commun de proposer des scénarios concernant l'évolution des principaux compartiments et leviers d'atténuation de la filière forêt-bois (séquestration en forêt, stockage dans les produits-bois, substitution) jusqu'en 2050. Ces scénarios font notamment varier le niveau de prélèvements (de scénarios « extensifs » misant sur le puits dans les écosystèmes à des scénarios « intensifs » augmentant les leviers de substitution et le stockage dans les produits bois), mais ne font pas ou peu évoluer la structure de la filière forêt-bois. Par ailleurs, le fonctionnement des modèles varie légèrement (Valade, Bellassen, 2020), de même que les hypothèses quant au stockage dans les différents compartiments du puits.

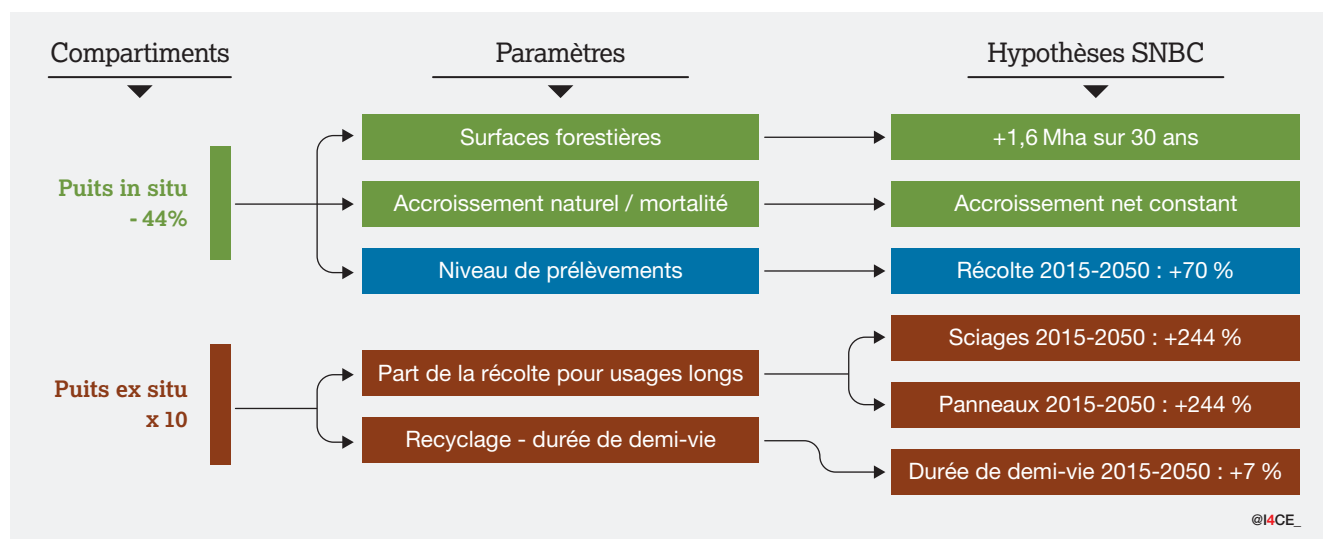
Deux autres études confrontent l'offre disponible en forêt française selon le type de gestion à différents scénarios de demande, caractérisant les décalages quantitatifs et qualitatifs entre la ressource disponible et les débouchés possibles du bois :

- *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, IGN-FCBA, 2016 - Etude dénommé ci-après « IGN-FCBA », et sa mise à jour en 2019 « Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre des essences feuillues et conifères en France »*
- *Étude prospective : évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments, BIPE-FCBA, 2019 - Etude dénommé ci-après « BIPE-FCBA ».*

L'évolution des différents compartiments du puits prévue par la SNBC et les hypothèses sous-jacentes sont ici comparées à la littérature, en termes de chiffrage global et plus précisément selon certains paramètres spécifiques.

- Evolutions générale des compartiments suivants en termes de volumes :
 - Puits de carbone in situ ;
 - Puits de carbone dans les produits bois ;
- Evaluation de quatre paramètres spécifiques, considérés comme les principaux déterminants du puits de carbone (voir partie I) :
 - la production biologique et la mortalité, influant directement sur le puits forestier ;
 - le niveau de prélèvement, influant sur le puits forestier et le puits dans les produits-bois ;
 - la répartition de la récolte entre les différents usages et son évolution ;
 - la faisabilité des usages matériaux et l'adéquation avec la demande.

FIGURE 4 : PRINCIPALES HYPOTHÈSES DE LA SNBC 2 POUR L'ÉVOLUTION DU PUIT FORÊT-BOIS



Les principaux paramètres et hypothèses présentés dans ces différentes études de référence sont résumés en Annexes Forêt (page 72).

2.1. Evolution des surfaces forestières : boisements et défrichements ¹¹

2.1.1. Un accroissement des nouvelles surfaces forestières bien inférieur à la tendance historique

Au cours des 40 dernières années, la forêt française a gagné près de 3 Mha de surface dont 2 Mha au cours des 20 dernières années, conséquence de la déprise agricole notamment (IGN, 2021 ¹²). L'accroissement annuel en surfaces est particulièrement élevé sur la période 2006-2017, avec près de +90 000 ha/an.

Les prévisions de nouvelles surfaces forestières prévues dans la SNBC contrastent avec cette tendance passée en anticipant un ralentissement du rythme de boisement, via la colonisation par les accrus comme via la plantation. En effet, la SNBC prévoit un accroissement des surfaces de +60 kha/an en 2020, qui redescend à +30 kha/an en 2050, ce qui près de trois fois inférieur à l'accroissement annuel constaté au cours des 15 dernières années. Néanmoins, cet accroissement des surfaces boisées est cohérent en moyenne avec l'extension des surfaces prévue dans les 3 scénarios de l'étude INRAE-IGN : +40 000 ha/an.

Si cette expansion forestière des années passées est principalement due à la colonisation par la forêt des espaces délaissés par l'agriculture (IGN, 2021), la part relative des

accrus diminuent progressivement dans la SNBC : 68 % des nouvelles surfaces forestières sont liées aux boisements naturels en 2020, mais cette part tombe à 50 % en 2050, l'autre moitié étant le résultat du programme de boisement volontaire. Ainsi, en 2050, les prévisions sont de +15 kha/an pour la plantation comme pour la colonisation par les accrus.

En termes de surfaces cumulées, les projections de la SNBC sont également largement inférieures à l'historique : +2 Mha de forêts au cours des 20 dernières années, contre seulement +1,6 Mha au cours des 30 prochaines. Cette diminution des surfaces de nouvelles forêts s'explique néanmoins par la diminution de la déprise agricole et est cohérente avec les objectifs agricoles de maintien des prairies.

Une attention peut néanmoins être portée aux surfaces destinées aux plantations, qui doivent se faire en priorité sur des friches industrielles ou terrains vagues. Or, en 2020, on estime les surfaces de friches industrielles entre 90 kha et 150 kha : c'est largement suffisant pour l'objectif 2020 de plantation, mais très inférieur au total des surfaces à planter jusqu'en 2050 (près de 600 kha), d'autant qu'il peut y avoir une forte compétition pour l'accès à ce foncier (équipement, logement...). Il faut bien sûr noter que d'autres terrains pourraient se libérer d'ici là, mais cela montre que d'autres types de terres, et notamment les terres agricoles, devront contribuer significativement à l'atteinte de l'objectif de plantations.

2.1.2. Des objectifs de limitation des défrichements qui nécessiteraient d'inverser les tendances actuelles

La SNBC parie également sur une forte baisse des défrichements sur la période, notamment en métropole (-80 % en métropole), en misant notamment sur la baisse

¹¹ Le changement d'usage des sols variant peu dans les études de référence (hormis INRAE-IGN), nous avons principalement comparé la SNBC aux tendances historiques, à partir de données de l'IGN et du CITEPA.

¹² Indicateurs de gestion durable 2020, IGN, 2021 : <https://foret.ign.fr/api/upload/print/IGD-2020-c255.pdf>

de l'artificialisation des sols (50 % des émissions et 1/3 des surfaces déboisées aujourd'hui). Cependant, l'atteinte de cet objectif reviendrait à inverser complètement la tendance historique, qui est à la hausse depuis des décennies en métropole : +45 % de surfaces forestières converties en terres artificialisées entre 1990 et 2019. On note ici que la métropole représente la majorité des surfaces converties pour l'urbanisation : près de 90 % contre seulement 10 % en Guyane. À l'inverse, la conversion de forêts en terres agricoles a baissé en métropole de 8 % depuis 1990, en lien avec la déprise agricole notamment, tandis qu'elle a augmenté de 18 % en Guyane.

Au global, les défrichements totaux ont augmenté de 6 % en termes de surfaces et de 4 % en termes d'émissions de GES depuis 1990. C'est la Guyane qui montre la plus grosse évolution en termes d'émissions (+30 %), tandis qu'elles ont diminué de 6 % en métropole, même si l'évolution en termes de surface est plus défavorable en métropole (+8 % de terres défrichées contre -2 % en Guyane).

Ainsi, les objectifs de -80 % et -40 % d'émissions liées aux défrichements respectivement en Guyane et en métropole sont pour l'instant très éloignés des tendances actuelles qui restent globalement à la hausse.

2.2. Production biologique et mortalité

2.2.1. Une littérature contrastée témoignant de nombreuses incertitudes

Pas de consensus sur l'évolution de la production biologique, en lien avec des différences de modélisation...

Selon les études, la production biologique brute des scénarios maintenant les pratiques de gestion courante, est décroissante (-6 % sur la période dans BICAFF) ou croissante (INRAE-IGN), hors impacts du climat. Une étude comparative entre BICAFF et INRAE-IGN indique que ces divergences mènent à un écart de production biologique brute de près de 30 Mm³ en Bft en 2030 (Valade, Bellassen, 2020). L'article note également que ces tendances contradictoires ont été observées également entre une étude du Joint Research Center en 2016 (Pilli et al., 2016) simulant une tendance baissière, alors que le modèle utilisé dans les projections réalisées par l'IGN projetait une hausse dans le temps. L'étude comparative de 2020 note que ces tendances contradictoires n'ont pas encore été expliquées.

On note cependant que le choix méthodologique¹³ par l'étude INRAE-IGN de prendre en compte la densité dépendance, c'est-à-dire les conséquences sur la production et la mortalité de la densité des peuplements,

en lien avec une compétition accrue entre les arbres pour les ressources. Avec la prise en compte de cet effet, la production biologique continue de croître, mais moins vite, dans le scénario Extensification, et elle plafonne dans le scénario *Dynamiques Territoriales*.

Hors impact du climat, le scénario d'extensification permet de générer la production biologique nette maximale, jusqu'à 130 Mm³/an (et 100 Mm³/avec densité-dépendance), contre 99 Mm³/an dans le scénario d'intensification sans reboisement. Avec des scénarios de gestion active, la production biologique brute est d'abord freinée par les coupes, mais augmente après coupes en raison de la croissance accrue des jeunes peuplements (BICAFF, INRAE-IGN).

... mais aussi à cause de la difficile prise en compte du changement climatique

Le changement climatique peut impacter la forêt de deux manières : en modifiant la croissance des arbres (donc la production biologique brute), d'une part, et la mortalité d'autre part. Si la production biologique brute est stable ou augmente sous climat actuel en fonction des études et des scénarios, l'intégration des impacts du changement climatique change la donne même si ses effets sont difficiles à simuler. L'étude BiCaFF n'a pas pris en compte l'impact du climat, mais Fern-Canopée et INRAE-IGN ont tenté de l'intégrer. Ainsi, les modélisations de l'étude INRAE-IGN conduisent à une production biologique brute stable lorsque l'on tient compte des effets du climat. Cette stabilité est la conséquence de la poursuite de l'expansion démographique d'une part, et des conditions climatiques plus défavorables d'autre part. Pour Fern-Canopée, la production biologique brute est également considérée comme stable, hors situations d'impasse, pour deux principales raisons : 1) le résultat d'une compensation entre l'effet dopant de la fertilisation par le CO₂ et l'effet négatif de la hausse des températures, 2) sur le fait que les scénarios climatiques du GIEC ne varient pas significativement entre 2020 et 2050.

Enfin, ces deux études introduisent également l'effet d'une mortalité accrue (qui reste constante pour BiCaFF). INRAE-IGN simule enfin l'effet d'un climat aggravé (RCP 8.5), qui entraîne un accroissement de la mortalité (0,13 % pour les feuillus et 0,76 % pour les résineux) ainsi qu'un ralentissement de la production nette, qui plafonne pour les feuillus et progresse légèrement pour les résineux. En 2050, la production nette sous climat aggravé est inférieure à celle sous climat actuel, une différence de l'ordre de 20 % dans un scénario d'intensification avec reboisement et 23 % dans un scénario d'extensification (INRAE-IGN). L'étude Fern-Canopée intègre quant à elle deux hypothèses de mortalité pouvant correspondre à des scénarios climatiques différents.

¹³ La prise en compte de la densité dépendance est considérée comme une amélioration méthodologique du Modèle Margot de l'IGN, permettant d'améliorer les simulations au-delà du court ou moyen terme (vingt ans) et/ou de considérer une large gamme de stratégies de gestion/mobilisation.

2.2.2. La SNBC tient une position équilibrée par rapport à la littérature

Une production biologique stable dans le temps, représentant un compromis entre les différentes tendances

Le choix du maintien du niveau de production biologique brute dans la SNBC apparaît comme une tendance intermédiaire entre l'option haussière de INRAE-IGN sous climat actuel et l'option baissière de BICAFF. Elle est par ailleurs cohérente avec l'option de globale stabilité choisie par Fern-Canopée (hors impasse) et estimée dans INRAE-IGN dans les scénarios qui tiennent compte des effets du changement climatique sur la croissance des arbres.

Une mortalité optimiste ?

D'après la SNBC, une récolte accrue et une gestion plus dynamique permettraient de limiter la mortalité¹⁴ et de ne pas ralentir la croissance des arbres, ce qui explique le choix d'un accroissement net quasi constant, même dans un contexte de changement climatique. Cette hypothèse reste fragile scientifiquement : jusqu'à aujourd'hui, le changement climatique a augmenté l'accroissement net des forêts françaises, mais son effet à l'avenir reste une grande inconnue (Valade et al., 2017b). Ainsi, INRAE-IGN simule un accroissement de la mortalité lié au changement climatique, et Fern-Canopée fait également le choix d'intégrer les effets de deux niveaux de mortalité représentant des scénarios climatiques différents. Une révision de cette hypothèse au fil de l'eau et au fur et à mesure de l'avancée de la connaissance sera nécessaire.

2.3. Prélèvements et récolte

2.3.1. Synthèse de la littérature

Des scénarios de gestion contrastés qui font varier les niveaux de prélèvements

Les études présentent toutes différents scénarios de gestion plus ou moins intensive, qui font varier le niveau de prélèvement jusqu'en 2050. A l'horizon 2040-2050, les projections de récolte (prélèvements auxquels on a retiré les pertes d'exploitation) vont du maintien de l'existant avec environ 50 Mm³ de bois récolté par an, jusqu'à un doublement de la récolte annuelle en 2050 (soit près de 100 Mm³ récoltés).

Les scénarios les plus extensifs reposent sur un maintien du niveau absolu de récolte, soit environ 50 Mm³ en 2050 (volume aérien total), ou sur un maintien des pratiques de gestion, c'est-à-dire d'un taux de prélèvements de près de 50 % de l'accroissement naturel, augmentant mécaniquement la récolte avec l'accroissement des forêts, jusqu'à 70 Mm³ en 2050. Seul le scénario ECOS de Fern-Canopée envisage

une réduction du volume de récolte en passant de 60 Mm³ en 2015 à 40 Mm³ en 2050.

Les options de gestion plus intensives permettent d'atteindre un taux de prélèvement approchant le niveau de production biologique nette dans les décennies à venir, avec des récoltes de l'ordre de 89 Mm³/an dans INRAE-IGN, 95 Mm³/an dans Fern-Canopée et 117 Mm³/an dans BICAFF¹⁵. Les options les plus intensives permettent ainsi un doublement de la récolte annuelle sur la période, voire un triplement dans le cas de BICAFF. Dans l'étude INRAE-IGN, la mobilisation supplémentaire à horizon 2050 dans les scénarios de gestion intensive représente une évolution de +28 % pour le scénario *Dynamiques territoriales*, et de +71 % pour le scénario d'*Intensification*.

L'augmentation des prélèvements recouvre toutefois des trajectoires différentes dans le temps : les études INRAE-IGN et Fern-Canopée font le choix d'une augmentation progressive du taux de prélèvement et de la récolte jusqu'en 2050, alors que tous les scénarios de l'étude BICAFF atteignent une récolte maximale en 2030, qui se réduit ensuite drastiquement, l'effort d'intensification ne pouvant être que transitoire, car basé sur la mobilisation du stock sur pied. Ainsi, dans BICAFF, en 2050, la récolte dans les scénarios de gestion intensive rejoint plus ou moins les volumes prélevés dans le scénario de référence.

La faisabilité des scénarios de prélèvements intensifs discutée sur le plan économique

Plusieurs facteurs socio-économiques sont susceptibles de limiter les prélèvements. L'étude INRAE-IGN identifie par exemple parmi les barrières à la réalisation des scénarios *Dynamiques territoriales* et *Intensification* : le prix bas des bois et les coûts de mobilisation élevés ; la structure foncière morcelée et le manque de gestion par les propriétaires ; des surfaces difficilement exploitables à cause d'un manque de desserte par exemple.

Par ailleurs, le modèle économique FFSM ne permet pas de simuler des niveaux de prélèvement aussi importants que ceux du scénario *Intensification*, et ce, malgré l'introduction de variables d'ajustement. En effet, pour simuler le scénario *Intensification*, l'étude INRAE-IGN a fait varier plusieurs paramètres de FFSM tels que i) une sensibilité accrue des gestionnaires forestiers aux marchés (meilleure anticipation et moindre aversion au risque) ii) une offre de bois dépendant positivement de l'évolution du stock forestier. En plus de ces paramètres, des politiques publiques visant à soutenir la filière ont été introduites : des « subventions directes à la consommation et à la production de produits bois » et des « mesures « structurelles » visant à réduire les coûts de la transformation, du transport ou de l'investissement en forêt ».

En dépit des leviers mobilisés et de l'apport massif de subventions (6kM€ à l'horizon 2050, dont 40 % orientés vers la consommation, 30 % sur l'offre forestière et 26 %

¹⁴ La mortalité reste à peu près constante à 12 %-13 % de l'accroissement.

¹⁵ Il s'agit là du maximum de récolte simulé dans BICAFF. Il est atteint en 2030 et diminue substantiellement par la suite pour redescendre sous les 70 Mm³/an en 2050, même dans le scénario le plus intensif.

sur la transformation), FFSM n'a obtenu au maximum que des niveaux de prélèvements proches de ceux du scénario *Dynamiques territoriales*, soit une récolte d'environ 70 Mm³). Le scénario *Dynamiques territoriales* nécessite ainsi déjà des évolutions majeures dans la structure de l'offre et de la demande de la filière (coûts d'exploitation du secteur forestier, tissu industriel, technologies de transformation, développement des usages bois matériau), ou à défaut, un haut niveau d'aides publiques.

Au-delà de 80 Mm³/an, des blocages sont apparus, s'expliquant en partie par l'impossibilité de prendre en compte les importantes modifications structurelles de production, de transformation et de consommation qui seraient nécessaires pour mettre en œuvre le scénario *Intensification* (à savoir les investissements dans les structures industrielles de la filière, le développement de nouveaux usages du bois et nouveaux produits-bois (à fort coefficient de substitution) et la réorientation des habitudes de consommation et préférences des consommateurs). Ce résultat témoigne à la fois des limites du modèle FFSM mais aussi de l'ampleur des transformations qui seraient nécessaires au sein de la filière pour atteindre ces hauts niveaux de prélèvements. Ainsi, il apparaît que les 100 Mm³ de récolte souhaités à horizon 2050 dans le scénario *Intensification* seront difficiles à atteindre sans imposer des niveaux de subventions non réalistes, et que cela pourra poser des questions locales de soutenabilité de la gestion forestière.

2.3.2. Où se situe la SNBC ?

La SNBC se rapproche des scénarios de récolte les plus intensifs : dans la SNBC, la récolte annuelle est estimée à 48 Mm³¹⁶ en 2015 et augmente de près de 70 % sur la période, pour atteindre 83 Mm³ en 2050. Cette augmentation est cohérente avec l'évolution prévue par les scénarios les plus intensifs de la littérature, dans lesquels les niveaux de récolte en bois total atteignent des niveaux similaires voire légèrement supérieurs : 89 Mm³/an pour le scénario intensification avec boisement de INRAE, 95 Mm³/an pour Fern-Canopée et 117 Mm³/an pour le scénario combinant tous les leviers de BICAFF en 2030.

La SNBC prévoit une augmentation progressive de la récolte dans le temps, correspondant au choix de trajectoire des études INRAE-IGN et Fern-Canopée, et se distinguant de la trajectoire de BICAFF dans laquelle la récolte diminue après 2030. Cependant, la récolte n'augmente pas de manière linéaire : elle augmente assez fortement jusqu'en 2035, au rythme du PNFB (+1,2 Mm³/an), puis augmente moins fortement entre 2030 et 2035 (+0,8 Mm³/an).

Le niveau de récolte prévu est ainsi cohérent avec les valeurs hautes de la littérature, mais est par conséquent très supérieur aux scénarios moyens de INRAE-IGN et Fern-Canopée qui visent quant à eux entre 60 et 70 Mm³ en 2050. Or, ces scénarios intermédiaires reposent déjà sur

des transformations importantes en termes de production, transformation et consommation du bois, qui seraient très fortement renforcées pour les scénarios les plus intensifs. La faisabilité de ces scénarios de prélèvements intensifs et donc de la SNBC reposera donc sur la mise en œuvre de ces transformations très importantes de la filière, et semble difficile à atteindre en l'état actuel.

2.4. Le puits de carbone dans les écosystèmes

2.4.1. Synthèse de la littérature

Un puits historique cohérent entre les études et avec la SNBC

Le puits de carbone in situ évalué dans la SNBC est de 66 MtCO₂/an en 2015¹⁷. Les études de référence prennent des points de départ proches : l'étude INRAE-IGN établit une moyenne de stockage additionnel dans les écosystèmes situés selon les scénarios entre 70 et 80 MtCO₂/an pour la période 2015 et 2020 ; l'étude IGN-FCBA de 2016 utilise des valeurs entre 70 et 73 MtCO₂/an pour la période 2016 et 2020 (hors peupleraies) ; et l'étude Fern-Canopée se base sur un puits de 84 MtCO₂/an en 2020.

Des divergences dans la prise en compte du puits de carbone dans les sols

Le puits de carbone forestier est réparti en différents compartiments : la biomasse aérienne et souterraine, le bois mort, la litière et les sols. Or, le flux de carbone dans les sols reste difficile à évaluer : il est inclus dans l'étude INRAE-IGN comme un flux constant de l'ordre de 6 MtCO₂/an, il est exclu de BICAFF. Fern-Canopée évalue le stockage annuel net moyen dans les sols à 1,28 tCO₂/ha. Proche de l'étude INRAE-IGN, la SNBC prévoit un flux constant de 5 MtCO₂/an.

Un puits à long terme toujours positif, mais qui varie fortement en fonction du niveau de prélèvements

Le puits dans les écosystèmes reste positif sur toute la période pour tous les scénarios, avec une prépondérance de la biomasse aérienne des feuillus (un peu moins de 70 % du puits), mais l'intensité des absorptions diminue avec l'augmentation du niveau de prélèvements :

- **Les scénarios d'extensification** permettent une augmentation importante du puits sur l'ensemble de la période, grâce à la capitalisation du stock sur pied : le scénario Extensification de l'INRAE-IGN mène à une augmentation du puits de 80 à 130 MtCO₂/an entre 2015 et 2050, soit +62 %, qui se réduit à 100 MtCO₂/an en 20250 avec l'effet densité-dépendance (+25 %) ; le scénario ECOS de Fern-Canopée permet d'augmenter le puits de 84 MtCO₂/an en 2020 à 98 MtCO₂/an en 2050

¹⁶ Volume aérien total bois fort, hors menus bois.

¹⁷ A noter que des ajustements de l'inventaire relatifs à la production biologique ont évolué depuis 2017 entraînant une révision légèrement à la baisse du puits par rapport aux calculs précédents.

(+17 %). La tendance est la même en considérant le stockage in situ présenté dans l'étude BICAFF, le stock du scénario de référence triple sur la période, de 60 MtC en 2015 à plus de 200 MtC en 2040.

- **Les scénarios intermédiaires** permettent globalement de maintenir l'intensité du puits. Avec une récolte en hausse, le scénario *Dynamiques territoriales* de INRAE-IGN permet de poursuivre l'augmentation du puits annuel approchant les 100 MtCO₂/an en 2050 dans le scénario initial, mais cet effet est réduit lorsque l'on prend en compte la densité-dépendance, qui fait plafonner le puits autour de 80MtCO₂/an. Le scénario R60 de Fern-Canopée maintient globalement le puits dans le temps autour de 80 MtCO₂.
- **Les scénarios d'intensification** ralentissent le rythme de la séquestration carbone dans les écosystèmes et divisent le puits par deux à l'horizon 2050. Le scénario *Intensification* de l'étude INRAE-IGN entraîne une diminution de plus de la moitié du puits en 2050 par rapport au puits 2050 du scénario *Extensification*, avec un puits de 62 MtCO₂/an en 2050 (52 MtCO₂/an avec densité-dépendance), une valeur inférieure au puits de 2015. Le scénario INRAE-IGN avec reboisement fait notamment apparaître une baisse du puits légèrement plus marquée entre 2025 et 2030, en raison des coupes rases qui précèdent les boisements. Dans le scénario de récolte maximale de Fern-Canopée, le puits diminue de 40 % sur la période, passant de 84 MtCO₂/an en 2020 à 53 MtCO₂/an en 2050. Dans BICAFF, la mobilisation accrue des scénarios intensifs ralentit l'augmentation du stockage in situ dans les premières années et conduit même à une réduction temporaire de ce stockage. Lorsque les peuplements coupés repoussent et que le niveau de récolte commence à diminuer, l'accélération du stockage de carbone est importante, sans pour autant atteindre les niveaux de séquestration des scénarios plus extensifs à l'horizon 2040. Les émissions liées à la diminution du volume de bois sur pied ne sont compensées que dans le scénario qui raccourcit les durées de révolution des forêts activement gérées, via l'augmentation de la production biologique en forêt cumulée à l'augmentation de la production de produits bois et aux effets de substitution.

Enfin, on note que dans le cas de l'étude INRAE-IGN, la prise en compte de la densité-dépendance amène une réduction des écarts entre les scénarios, même si la hiérarchie reste inchangée.

Un puits impacté par les effets du changement climatique

Dans l'étude INRAE-IGN, la simulation des impacts d'un scénario RCP 8.5 (hors événements extrêmes) sur la croissance et la mortalité montre une forte réduction des vitesses de stockage, près de 40 % inférieures à celles en climat actuel à l'horizon 2050. Le puits dans les

écosystèmes est d'autant plus affecté en volumes par les effets du changement climatique que le scénario est extensif, en raison de l'important volume sur pied exposé aux aléas. Cependant, en proportion du puits total, ce sont les scénarios intensifs qui se voient le plus impactés : la simulation d'effets aggravés du changement climatique réduit le stockage cumulé en forêt sur la période 2016-2050 de 27 % dans les scénarios *Extensification* et *Dynamiques Territoriales* et de 33 % dans le scénario *Intensification*. Pour autant, le stockage dans les écosystèmes du scénario extensif, même diminué des effets climatiques, reste le plus important de tous les scénarios. Dans l'étude Fern-Canopée, la simulation d'une mortalité accrue (M2) réduit également le puits dans les écosystèmes par hectare et par an.

Enfin, l'étude INRAE-IGN simule également l'effet de crises sanitaires de grande ampleur qui pourraient toucher les forêts françaises d'ici 2050. Les effets de trois types de crises ont été simulés : un incendie de grande ampleur ; une tempête de grande envergure s'accompagnant de pullulations de scolytes sur les résineux et d'épisodes incendiaires conséquents ; des invasions biologiques dévastant soit les pins, soit les chênes. Toutes baissent le niveau du stockage annuel dans l'écosystème forestier, de manière plus ou moins importante¹⁸.

2.4.2. Où se situe la SNBC ?

Un puits dans les écosystèmes limité, qui s'apparente au puits des scénarios intensifs sous climat dégradé

En projetant un puits de 42 MtCO₂/an¹⁹ en 2050, la SNBC propose un puits inférieur au puits projeté dans les scénarios les plus intensifs, dont la SNBC se rapproche pourtant en termes de prélèvements. Le puits du scénario *Intensification* avec reboisement INRAE-IGN projetée en effet un puits de l'ordre de 52 MtCO₂ à climat actuel, et ce, malgré des prélèvements supérieurs. Cette différence peut s'expliquer en partie par des surfaces forestières en croissance (+40 000ha/an) dans l'étude INRAE-IGN et par l'accroissement qui tend à augmenter dans l'étude et est réputé constant dans la SNBC.

Ce puits est en revanche proche en valeur du puits INRAE-IGN du scénario intensif sous climat aggravé, qui se réduit à 37 MtCO₂. Le puits de la SNBC est donc proche de l'estimation la plus pessimiste du scénario intensif de INRAE-IGN²⁰.

Le puits dans les écosystèmes projeté dans la SNBC apparaît comme d'autant plus faible s'il est comparé au puits projeté dans les scénarios intermédiaires ou extensifs. Dans l'étude INRAE-IGN, le puits intermédiaire du scénario *Dynamiques territoriales* est de 96 MtCO₂ hors changement climatique, trois fois plus que celui de la SNBC ; et celui du scénario *Extensification* est encore supérieur avec 132 MtCO₂ en 2050 hors changement climatique.

18 Les résultats détaillés des effets des crises sur le stockage de carbone en forêt et dans les produits bois, ainsi que sur les effets de substitution sont disponibles dans Roux et al. (2017, annexe 13).

19 Hors déboisements

20 A noter cependant que ce scénario n'intègre pas les événements extrêmes (tempêtes, attaques sanitaires...).

2.5. Répartition de la récolte entre les différents usages

2.5.1. Synthèse de la littérature

Une répartition de la récolte qui varie peu au cours du temps, avec une prépondérance du bois-énergie

L'affectation de la récolte aux différents usages est similaire entre les études INRAE-IGN et BICAFF, et, dans l'une comme dans l'autre, cette répartition évolue peu au cours du temps²¹.

Le bois énergie reste la première utilisation du bois (autoconsommation comprise) : 38 % de la récolte en moyenne dans INRAE-IGN, et 46 % dans BICAFF. Il est suivi par le bois d'œuvre (34 % dans INRAE-IGN et 32 % dans BICAFF), et enfin par le bois industrie (28 % dans INRAE-IGN et 18 % dans BICAFF). Dans ces deux études, le volume de la récolte est le principal déterminant de l'évolution des volumes de bois disponibles pour chaque usage.

Dans l'étude Fern-Canopée, le schéma actuel de la filière est globalement maintenu, mais l'affectation de la récolte entre les usages évolue selon les scénarios et la mortalité (chiffres 2050) :

- ECOS : 50 % BO ; 50 % BIBE ;
- R60 : 43 % BO ; 57 % BIBE ;
- R95 : 36 % BO ; 64 % BIBE.

Bien que la part de BO diminue avec l'intensification des prélèvements, les volumes totaux de BO sont plus importants dans les scénarios intensifs.

Il n'est peu surprenant que dans les scénarios ne modifiant pas ou peu les niveaux de productions, l'affectation vers les différents usages ne varie qu'à la marge, dans la mesure où cela reste cohérent avec l'état actuel des filières. Néanmoins, ce maintien en moyenne des affectations apparaît avant tout comme un choix méthodologique associé aux capacités des modèles que comme une décision de scénarisation. On pourrait donc imaginer que la répartition des débouchés puisse évoluer à l'avenir si cela faisait l'objet d'une politique dédiée.

La récolte supplémentaire étant principalement feuillue, elle suit cette répartition et reste majoritairement orientée vers le BIBE. L'étude FCBA 2016 précise également que 80 % de la disponibilité supplémentaire identifiée en 2035 à sylviculture constante concerne des feuillus, dont la majorité est classée en BIBE. La croissance potentielle des résineux est limitée en sylviculture constante ; en sylviculture dynamique, elle permettrait de mobiliser 4 Mm³/an en fin de période, essentiellement en BO.

Des volumes de BO qui augmentent de 70 % à 150 % dans les scénarios intensifs

Les scénarios les plus intensifs vont varier les volumes de BO avec l'évolution de la récolte : le scénario *Intensification*

INRAE-IGN atteint 27 Mm³ de BO en 2050, le scénario R95 de Fern-Canopée 34 Mm³ en 2050 et le scénario maximum de BICAFF 37 Mm³ en 2030. Ces scénarios représentent des augmentations de la récolte de bois d'œuvre de respectivement 90 %, 70 % et 150 % par rapport à aujourd'hui. En fonction des études, cette augmentation sera linéaire (INRAE-IGN) ou non (pic en 2030 pour BiCaFF), suivant l'évolution de la récolte.

Dans l'étude IGN-FCBA de 2019, le BO potentiel augmente avec une sylviculture dynamique (+15 % environ), atteignant 26 Mm³ de disponibilités technico-économiques (18 Mm³ de résineux et 8 Mm³ de feuillus). Dans cette dernière évaluation, les usages réels de BO restent inférieurs au BO potentiel (-16%), une partie de la ressource étant utilisée pour la trituration ou l'énergie. En effet, des verrous technologiques et économiques empêchent l'utilisation d'une part plus importante de la ressource feuillue en tant que BO. L'étude INRAE-IGN met ainsi en avant les bois qui ont un potentiel de valorisation BO, même si cela reposerait notamment sur le développement de nouveaux procédés pour valoriser les feuillus. Par ailleurs, pour tous les scénarios INRAE-IGN, les résineux continuent de représenter environ 70 % de l'usage bois matériau en 2050.

Bois-industrie : une multiplication par plus de 2 dans les études

Le BI représente entre 10 Mm³ et 12 Mm³ dans les études BiCaFF et INRAE-IGN en 2015, et dépasse les 20 Mm³ en 2050 dans les scénarios les plus intensifs, ce qui représente une augmentation comprise entre +90 % et +100 %. Dans l'étude BiCaFF, les volumes de BI atteignent jusqu'à 26 Mm³ en 2030, soit +150 %, en lien avec le pic de la récolte à cette date.

2.5.2. Où se situe la SNBC ?

Une part du bois énergie qui diminue mais des volumes maintenus, qui permettent de répondre aux objectifs énergétiques

Comme dans les études de référence, la majorité de la récolte reste dédiée au bois énergie. Dans la SNBC, le BE représente 47 % de la récolte en 2050, ce qui est notamment proche des chiffres de BiCaFF. Cependant, la part de bois dédiée à l'énergie sur la récolte totale diminue fortement entre 2015 et 2050 : représentant plus de 70 % de la récolte en 2015 (autoconsommation comprise), le bois-énergie ne représente plus que 47 % en 2050. Cela s'explique par une volonté de la SNBC de dédier une part croissante de la récolte aux usages matériau, au détriment des usages énergies, au cours de la période.

On note cependant que si la part du bois-énergie diminue, ses volumes continuent à augmenter sur la période, afin de répondre aux objectifs énergétiques. Cette progression des volumes de BE n'est pas linéaire dans la SNBC : les

21 Ces paramètres sont externes aux simulations, et basés dans les deux études sur les mêmes statistiques publiques.

volumes augmentent de 21 % entre 2015 et 2020 où ils atteignent leur niveau maximum, pour redescendre jusqu'en 2050. Entre 2015 et 2050, les volumes de BE auront augmenté de 6 % seulement (contre 244 % pour les sciages et les panneaux).

Cette baisse du poids du bois énergie reste néanmoins cohérente avec les objectifs énergétiques fixés par la SNBC. En effet, le volet énergétique de la SNBC estime le potentiel total de production en ressources en biomasse en 2050 à 430 TWH PCS. La ressource bois (bois récolté, connexes, déchets bois) représente plus de 35 % du potentiel de production total. Le bois récolté représente 17 %, les connexes 7 % et les déchets bois 12 %. Ainsi, près de 56 Mm³ de bois devront être mobilisés pour répondre à cet objectif : 37 Mm³ de bois mobilisé (récolte + connexes) et 19 Mm³ de bois issus de déchets bois.

Du côté forêt-bois, la SNBC prévoit près de 46 Mm³ dédiée à l'énergie et 2030 et 40 Mm³ en 2050, hors déchets bois. Ainsi, ces chiffres sont cohérents avec les objectifs du secteur énergétique en termes de bois récolté, si l'on parvient à valoriser suffisamment de déchets bois.

A noter enfin que ces chiffres sont cohérents mais légèrement inférieurs à ceux de la Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse, qui elle prévoit des besoins en bois énergie de l'ordre de 50 à 52 Mm³ en 2030.

Bois d'œuvre : une augmentation des sciages globalement supérieure à la littérature

Dans la SNBC, les volumes de sciages augmentent de 244 % sur la période, pour atteindre 16.5 Mm³/an en 2050. Cette augmentation est deux à trois fois supérieure à celle prévue dans les études BiCaFF et INRAE-IGN (90 % à 150 % en fonction des scénarios²²).

On note cependant que lorsqu'on regarde les volumes, le BO récolté total prévu par la SNBC devrait se situer dans la borne supérieure de la récolte maximale affectée au BO dans les scénarios les plus intensifs : autour de 33 Mm³/an pour la SNBC, contre 37 Mm³ dans BiCaFF en 2030, 34 Mm³ dans Fern-Canopée, 27 Mm³/an dans INRAE-IGN. Cette différence s'explique par des chiffres de départ différents en 2015 entre la SNBC et la littérature. La réconciliation des différents chiffres étant difficile à réaliser dans le cadre de ce travail, nous considérons les volumes comme un indicateur secondaire.

Au-delà des volumes, le poids relatif des sciages en proportion de la récolte augmente également fortement au cours du temps dans la SNBC, reflétant la volonté de développer les usages longs au détriment des usages courts. Considérant que les sciages représentent 50 % environ du BO, le BO total de la SNBC représenterait 20 % de la récolte en 2015 et près de 40 % en 2050. Cela reste supérieur à ce que prévoit la littérature (autour de 30 % de BO en 2050), qui ne fait globalement pas varier la répartition des usages au cours du temps.

Enfin, en termes de ressource disponible, la SNBC reste cohérente avec l'étude FCBA-IGN, qui prévoit une disponibilité technico-économique de BO potentiel à 50 % de la récolte commercialisée dans les deux scénarios de sylviculture (avec 34 Mm³/an avec sylviculture dynamique et 29 Mm³ avec sylviculture constante) sur la période 2031-2035. On rappelle cependant ici la différence entre le BO-potentiel et les usages réels de BO, qui témoignent de la difficulté à valoriser la ressource feuillue notamment. Or, les études FCBA-IGN et BIPE-FCBA soulèvent la question de l'adéquation de l'offre en résineux : s'il semble possible de récolter suffisamment de BO feuillu pour répondre à la demande, la disponibilité de BO résineux supplémentaire, évaluée à 3 Mm³/an pour une sylviculture dynamique en 2050, reste de moitié inférieure à la demande en BO résineux du scénario « objectif neutralité carbone », lui-même moins ambitieux que la SNBC en termes de volumes de produits-bois à usage matériau. Le développement des débouchés pour les feuillus sera ainsi nécessaire.

Une augmentation de la part de la récolte dédiée aux sciages probablement difficile à réaliser

Le doublement de la part de la récolte valorisée en sciages peut être questionnée. En effet, les prix des sciages étant significativement plus élevés que ceux du bois industrie (multipliés par 3) et énergie, on peut penser que la part de sciages dans la récolte est déjà proche de son potentiel maximum et que son augmentation ne peut être opérée simplement. Dans l'étude INRAE-IGN, la projection de BO du scénario intermédiaire *Dynamiques territoriales* n'induit pas de changement massif dans la filière forêt bois, mais introduit tout de même l'hypothèse de nouveaux processus de valorisation des feuillus, on peut donc supposer que les transformations du tissu industriel devraient encore aller bien au-delà pour accomplir le volume de BO projeté dans la SNBC. En effet, le prix et les processus de transformation actuels rendent difficile la valorisation des feuillus, qui sera pourtant nécessaire pour maximiser la part de BO dans la récolte. On note ici que des travaux sont en cours pour développer par exemple sur le lamellé collé de hêtre ou encore le CLT en chêne.

Bois industrie : un développement des panneaux sans précédent, deux à trois fois supérieur à ce qui est prévu dans la littérature

Le bois industrie, qui correspond à la production de panneaux et de papier, subit également une croissance très supérieure à celle prévue dans la littérature : +244 % entre 2015 et 2050, soit deux à trois fois plus que ce qui est prévu dans les études. Cette augmentation est uniquement due au développement des panneaux, dans la mesure où les volumes dédiés au papier restent stables sur la période.

En termes de valeur, la SNBC prévoit des volumes de panneaux/papier de près de 28 Mm³ en 2050, dont 24 Mm³ de panneaux. En tenant compte des pertes de transformation

22 +90 % dans le scénario intensif INRAE-IGN à +150 % (pic 2030 qui chute par la suite) dans le scénario de BiCaFF le plus ambitieux.

pour passer du bois industrie aux panneaux²³, cela pourrait correspondre à un volume de BI total d'environ 41 Mm³, ce qui est presque deux fois supérieur aux volumes simulés par le scénario *Intensification* de l'étude INRAE-IGN, qui permet d'atteindre un maximum de 22 Mm³ de BI, tandis que le scénario *Dynamiques territoriales* n'en prévoit que 16 Mm³. Dans BICAFF, tant le scénario de référence que les scénarios d'intensification moyenne, ne permettent pas de dépasser les 10 Mm³ de BI. Seul le scénario combinant tous les leviers permet d'atteindre un maximum de 21 Mm³ en 2030, avant de redescendre à 12 Mm³ en 2040.

Cette augmentation de la part de la récolte dédiée au bois industrie, et notamment aux panneaux, s'explique par l'augmentation souhaitée de la part de la récolte dédiée aux usages longs du bois. Elle pose néanmoins la question de la faisabilité technique et économique d'une telle augmentation de la production de panneaux. Il faudra sans doute compter sur d'autres produits, comme les isolants à base de bois par exemple, pour atteindre des volumes de cette ampleur.

2.6. Faisabilité et adéquation avec la demande

2.6.1. Synthèse de la littérature

Une forte croissance de la demande en bois d'œuvre dans le scénario de neutralité carbone mais une évolution des panneaux très limitée

L'étude BIPE-FCBA de 2019 permet de simuler la demande industrielle de bois construction jusqu'à 2050, selon différents scénarios. Seuls les produits bois du secteur de la construction et une partie de l'ameublement sont considérés. La demande de bois augmente dans tous les scénarios, principalement entre 2020 et 2035, à l'exception du scénario tendanciel qui reste stable. Le scénario le plus ambitieux s'intitule 'Objectif Neutralité Carbone' (ONC), et s'appuie notamment sur les projections OMS de la SNBC sur les surfaces de bâtiments. Il prévoit une multiplication par plus de 2,5 du volume de bois intégré dans les produits finis, atteignant 10 Mm³/an en 2050, ce qui correspondrait à une récolte BOBI d'environ 30 Mm³. L'évolution des parts de marché est responsable d'une grande part de cette croissance. Dans ce scénario le plus ambitieux, le BO consommé représente jusqu'à 75 % de la des volumes de bois dans les produits en 2035 et 2050, et ce, en raison de l'augmentation des parts de marchés du bois dans les charpentes, tandis que la part dans les cuisines, secteur consommateur de panneaux, est déjà estimée à 100 %. Ainsi, les tendances jusqu'en 2050 sont très différentes pour les différents produits :

- La demande de produits issus de sciages, considérée comme stable sur toute la période pour le scénario tendanciel (autour de 3 Mm³/an), croît dans le scénario d'objectif neutralité carbone jusqu'à atteindre un volume de 6 Mm³/an en 2035, soit un doublement sur la période, et 7,4 Mm³ en 2050. Les scénarios intermédiaires, qui représentent déjà des changements significatifs pour la filière, envisagent quant à eux des volumes de sciages de 4 Mm³/an pour le scénario alternatif et 4,7 Mm³/an pour le scénario volontariste.
- La demande en panneaux est considérée comme stable sur toute la période pour le scénario tendanciel, autour d'1,5 Mm³/an. Elle n'augmente que très légèrement sur la période dans le scénario ONC, pour atteindre près de 2.7 Mm³/an en 2050.

Une inadéquation entre le bois demandé et la ressource existante dès 2035

L'étude BIPE-FCBA confronte également l'offre et la demande de BO et de BI à horizon 2035. Ainsi, l'offre de BO feuillus pourrait largement satisfaire les 4 scénarios de demande à horizon 2035 dans le cas du scénario de sylviculture dynamique. Dans ce scénario, la disponibilité supplémentaire de BO feuillus est supérieure de 0.7 Mm³/an en 2035 par rapport à celui de sylviculture constante. L'offre supplémentaire pourrait atteindre 2,6 Mm³/an supplémentaires en 2035, soit le double de la demande supplémentaire du scénario ONC. En revanche, même avec une sylviculture dynamique, l'offre de BO résineux resterait inférieure à la demande des scénarios volontariste et de neutralité carbone. En effet, les sciages résineux représentent 75 % du volume sciages utilisés en construction. La disponibilité supplémentaire en ayant recours à une sylviculture dynamique pourrait atteindre 3 Mm³/an, alors que la demande du scénario de demande neutralité carbone approche quant à elle les 7 Mm³/an en 2035.

On note par ailleurs que sans faire évoluer les parts de marché françaises par rapport aux importations, le stock dans les produits bois en 2050 serait composé en moyenne de 44 % d'importations : en particulier pour les aménagements intérieurs pour tous les scénarios ; et sur les systèmes constructifs et charpentes, spécialement en ONC. Ces données sont susceptibles d'évoluer si l'augmentation de la demande tire l'offre française vers le haut.

2.6.2. Où se situe la SNBC ?

Une augmentation des volumes de bois produits biens supérieurs à la demande nationale

Au global, l'étude BIPE-FCBA prévoit un volume total (bois + panneaux) intégré dans les produits-finis en 2050 de +4 Mm³ dans le scénario tendanciel et de +10 Mm³ dans le scénario

²³ Hypothèse d'un coefficient de 60 % du BI transformé en panneaux, estimée à partir des données du Memento FCBA 2020 et de la FAO (coefficients m³ eq. bois rond / m³ panneaux * production du panneaux correspondant / total panneaux produits en 2019).

ONC, soit respectivement environ +6 Mm³ et +15 Mm³ de produits intermédiaires (sciages et panneaux). Au-delà de la répartition sciages/panneaux, ce chiffre est très inférieur aux volumes prévus dans la SNBC, qui atteignent plus de 40 Mm³ de produits intermédiaires en 2050. L'évolution des produits-bois dans leur ensemble est également très différente : +138 % d'usage des produits dans la construction entre 2015 et 2050 selon l'étude BIPE-FCBA, contre +244 % pour les volumes de panneaux et sciages dans la SNBC forêt-bois.

Il faut cependant noter que les volumes anticipés dans la construction ne prennent pas en compte tous les débouchés du bois. Ainsi, l'emballage, le papier, les bois de coffrage et une partie de l'ameublement (meubles) ne sont pas inclus. L'inclusion des meubles notamment pourrait permettre de réduire l'écart, mais dans des proportions qui resteraient limitées.

Un volume de sciages cohérent avec la demande en 2035 mais supérieur à la demande en 2050

L'étude BIPE-FCBA permet de comparer l'usage des sciages dans la SNBC avec les niveaux de demande hypothétiques selon les évolutions et incitations du marché : en 2035, le volume de sciages produits dans la SNBC est de l'ordre de 10 Mm³ alors que le volume de sciages demandé dans le scénario de demande tendanciel BIPE-FCBA est de 4,5 Mm³, et de 9 Mm³ dans le scénario neutralité carbone²⁴. Dans ce cas, les volumes de sciages utilisés dans la SNBC en 2035 seraient donc cohérents avec la demande du secteur du bâtiment projetée pour tendre vers la neutralité carbone. Cette trajectoire correspond à plus qu'un doublement du volume de sciages entre 2015 et 2035.

A l'horizon 2050 en revanche, l'écart se creuse entre l'approche demande et l'approche offre de produits-bois. Le scénario de demande ONC prévoit l'utilisation de 7,4 Mm³ de bois massif, qui représenteraient environ 11 Mm³ de sciages (produits intermédiaires). Ce chiffre reste inférieur aux volumes de sciages prévus dans la SNBC, qui atteignent 17 Mm³ en 2050. En termes d'évolution des volumes de sciages supplémentaires entre 2015 et 2050, la SNBC est également plus ambitieuse : +244 % de sciages dans la SNBC forêt-bois contre seulement une augmentation de 170 % dans le secteur de la construction. On note cependant que l'ensemble des débouchés ne sont pas inclus dans l'étude BIPE-FCBA²⁵.

Une offre de bois feuillus disponible face à une demande en résineux

Pour que les volumes destinés aux sciages dans la SNBC puissent répondre à la demande évaluée dans le scénario BIPE-FCBA, l'offre doit correspondre aux qualités de bois demandées. Dans l'étude BIPE-FCBA, la demande du scénario Objectif neutralité carbone en 2035 se répartit entre

une large majorité de résineux : 6,5 Mm³ de résineux (81 %) et seulement 1,5 Mm³ de feuillus (19 %). Or, ce scénario de demande pour les résineux est bien supérieur à la ressource disponible (IGN-FCBA, 2018). Ainsi, si la SNBC ne fait pas de distinction forêt/résineux dans ses objectifs, son succès va fortement reposer sur la capacité à produire davantage de BO à partir de feuillus.

Des volumes de panneaux très supérieurs dans la SNBC forêt-bois aux volumes requis dans la construction selon un scénario de neutralité carbone ambitieux

Si l'évolution du volume de panneaux prévu par la SNBC est très supérieure à ce qui est proposé par la littérature forestière, elle est également très ambitieuse par rapport aux scénarios de demande : +80 % pour les panneaux dans le scénario de demande ONC et +244 % de panneaux dans le scénario SNBC forêt-bois. En termes de volumes, le scénario ONC ne permet ainsi d'atteindre que +2.7 Mm³/an de produits finis à base de panneaux en 2050, soit près de 4 Mm³ de bois à usage panneaux. Ces chiffres restent très éloignés de l'objectif d'utilisation de panneaux en 2035 de la SNBC, qui atteint 24 Mm³/an en 2050. La demande en panneaux, venant pourtant d'un scénario très ambitieux pour le bâtiment, est ainsi bien inférieure aux volumes prévus dans le scénario forêt-bois de la SNBC.

Cet écart s'explique par le fait que le scénario Objectif Neutralité Carbone a délibérément favorisé le bois plein (sciages) au détriment du panneau. Le bois plein représente en effet les trois quarts de la consommation en volume en 2035 et 2050. Ce choix est justifié par l'importante augmentation des parts de marchés du bois dans les charpentes, qui représente les plus gros volumes de bois plein, alors que la part de marché du bois dans les cuisines, le segment de plus consommateur de panneaux, «est déjà à prêt de 100 % ne peut représenter un important relais de croissance».

2.7. Le puits lié aux produits-bois

2.7.1. Synthèse de la littérature

Des stocks importants mais un puits annuel qui reste faible

L'étude INRAE-IGN fournit les données relatives au stockage dans les produits bois en stocks et en variation de stock :

- les stocks de produits bois sont évalués à 300 MtCO₂eq²⁶ pour le bois d'œuvre et 80 MtCO₂eq pour le bois industrie ;
- le stockage additionnel par an dans les produits bois demeure en revanche très faible. En 2015, la variation de stocks dans les produits bois est de l'ordre de 1 MtCO₂/an.

²⁴ Chiffres exprimés ici en produits intermédiaires et non en produits finis.

²⁵ L'emballage, le papier, les bois de coffrage et une partie de l'ameublement (meubles) ne sont pas inclus.

²⁶ Ce chiffre ne tient pas compte des flux historiques.

Un puits dans les produits qui augmente faiblement dans les scénarios intensifs

Dans les scénarios maintenant les pratiques courantes, le stockage annuel se maintient à des valeurs proches des valeurs actuelles (extensification dans INRAE-IGN) ou diminue (ECOS et R60 dans Fern-Canopée).

Dans les scénarios intensifs, malgré l'augmentation des prélèvements et de leur utilisation en tant que matériaux, le stockage additionnel demeure faible : dans INRAE-IGN, +4 MtCO₂/an en 2050 dans le scénario *Dynamiques territoriales* et +7,3 MtCO₂/an dans le scénario *Intensification*, avec un pic dû à la valorisation des peuplements rasés pour le reboisement pour ce dernier. Dans BICAFF, les scénarios de gestion permettent une faible augmentation du stock dans les produits bois, autour de 2 MtCO₂/an. Les scénarios d'intensification de BICAFF projettent une augmentation progressive du stock jusqu'en 2030, suivie d'une stabilisation jusqu'en 2040.

2.7.2. Où se situe la SNBC ?

Un puits dans les produits-bois 3 à 4 fois supérieur aux scénarios les plus intensifs de la littérature

La SNBC simule un compartiment produits bois qui commence à 1,9 MtCO₂/an en 2015 et atteint 20 MtCO₂/an en 2050, soit un chiffre très supérieur aux estimations des scénarios les plus intensifs. Cela est d'autant plus marquant que la récolte prévue dans la SNBC reste légèrement inférieure à celle des scénarios intensifs de la littérature.

Un scénario permettant d'atteindre un stockage additionnel très important en 2050 est le scénario Intensification avec reboisement de INRAE-IGN, qui atteint +7,3 MtCO₂ en 2050 dans les produits-bois, avec un pic en 2030 à environ +12MtCO₂, dû à la valorisation des peuplements rasés pour le reboisement. En l'absence de reboisement, ce scénario projette un stockage dans les produits bois de +5,8 MtCO₂ en 2050. Le scénario maximal avec boisement projette donc un stockage additionnel dans les produits bois presque trois fois inférieur à ce qui est prévu dans la SNBC.

On note par ailleurs que le compartiment produits bois dans le scénario Intensification avec boisement constitue une exception : les autres scénarios INRAE-IGN restent en-dessous (4 MtCO₂) ou très en dessous (1 MtCO₂) de 5 MtCO₂ en 2050, et ne connaissent pas non plus de pic en 2030. Ainsi, la SNBC vise un objectif de puits dans les produits-bois plus de 5 fois supérieur à la plupart des scénarios.

Ce puits élevé s'explique notamment par le fait que l'objectif de +20 MtCO₂ en 2050 dans la SNBC repose non seulement sur une augmentation de la récolte, mais aussi et surtout sur une forte augmentation de la part de la récolte dédiée au bois matériau : 50 % en 2050, contre seulement 25 % en 2015. Ce changement des usages du bois est le déterminant principal de l'atteinte du puits visé dans la SNBC. Cependant, comme discuté plus haut, la faisabilité de cette réorientation massive des usages se heurte à différents obstacles : capacité à faire plus de sciages, demande finale et notamment en panneaux...

2.8. Tableau de synthèse

Le tableau ci-après tente d'évaluer le degré de faisabilité des différentes composantes du puits prévues dans la SNBC, sur la base de la comparaison avec la littérature. Il combine à la fois une évaluation de la cohérence avec la littérature (hypothèses de la SNBC présentes ou non dans les études), mais tient également compte de la faisabilité des différents scénarios tels que discutés dans la littérature.

L'évaluation est faite selon les catégories suivantes :

- **VERT** : levier cohérent avec la littérature et dont la faisabilité n'est pas remise en cause.
- **ORANGE** : levier cohérent avec certains scénarios étudiés dans la littérature mais dont la faisabilité technique ou économique est mise en doute.
- **ROUGE** : levier non-cohérent avec les scénarios étudiés dans la littérature et qui fait face à un obstacle technique ou économique difficile à surmonter.

2. EVALUER L'AMBITION ET LE RÉALISME DE LA SNBC : COMPARAISON À LA LITTÉRATURE RECENTE

Composante du puits	Valeur 2050	Cohérence avec la littérature	Comparaison à la littérature	Faisabilité technique	Faisabilité économique	Niveau d'ambition
Puits forestier global	45 % du puits total	Cohérent	Le volume du puits SNBC proche du puits des scénarios intensifs sous climat dégradé dans la littérature (hors événements extrêmes).	Faisable techniquement.	Réaliste	Réaliste
Accroissement brut	Constant -150 MtCO ₂ /an	Cohérent en tendance	Production brute cohérente avec la littérature. Le maintien du puits constant est une solution intermédiaire raisonnable pour tenir compte des tendances différentes dans les scénarios étudiés.	Faisable techniquement. Néanmoins, les impacts du climat sur la croissance devront être mieux intégrés au fur et à mesure de l'avancée de la connaissance.	Réaliste	Réaliste, sous réserve d'une prise en compte des impacts du climat
Mortalité	0.35 % du stock de carbone sur pied	Discutable si intégration du climat.	Le taux de mortalité en baisse semble ambitieux et peu cohérent avec les études qui intègrent l'impact du climat. Ce point reste à approfondir scientifiquement.	Faisable techniquement, mais contraste avec la tendance des dernières années. Les impacts du climat sur la mortalité devront être mieux intégrés au fur et à mesure de l'avancée de la connaissance.	Réaliste	Probablement sous-estimé mais beaucoup d'incertitudes
Récolte	83 Mm³/an	Cohérent	Récolte cohérente avec les scénarios de récolte intensifs, mais la faisabilité économique de ces scénarios est questionnée.	Techniquement possible	Économiquement peu réaliste (à structure industrielle inchangée et sans changement de comportement des acteurs) et socialement conflictuel.	Très élevé
Puits dans les produits-bois global	25 % du puits total	Peu cohérent	Puits 4 à 5 fois supérieur aux scénarios les plus intensifs de la littérature.	Techniquement difficile à atteindre. L'objectif dépend du succès de 1) la réorientation massive des usages du bois, 2) de l'augmentation de la récolte, pour lesquelles la faisabilité est également questionnée.	Freins économiques, à la fois pour la récolte (voir ci-dessus), la transformation de la filière et le développement des usages longs.	Extrêmement élevé
Objectif sciages	17 Mm³/an	Peu cohérent du point de vue de la production	L'augmentation de la production de sciages est 2 à 3 fois supérieure à ce qui est prévu dans les scénarios 'ressource' de la littérature. La part de BO dans la récolte augmente également, alors qu'elle reste stable dans les études, qui font peut varier la répartition des usages.	La possibilité technique d'augmenter massivement la part de sciages d'ici à 2050 reste à démontrer.	Peu réaliste. L'adéquation de la demande (résineuse) au type de ressource disponible (principalement feuillue), constitue aussi un frein. Un fort développement des capacités de valorisation des feuillus serait aussi nécessaire.	Extrêmement élevé d'un point de vue production.

@i4ce_

Composante du puits	Valeur 2050	Cohérence avec la littérature	Comparaison à la littérature	Faisabilité technique	Faisabilité économique	Niveau d'ambition
Objectif panneaux	24 Mm³/an	Peu cohérent du point de vue de la demande	<p>Le développement des panneaux est plus de deux fois supérieur à ce qui est prévu dans les scénarios 'ressources' les plus intensifs des études ressources, qui font peut varier la répartition des usages.</p> <p>En termes de demande, les volumes de panneau SNBC sont également très supérieurs à ceux requis dans le scénario le plus ambitieux de la construction, dans la mesure où la part de marchés des panneaux est jugée proche de son maximum.</p>	Faisable techniquement	<p>Economiquement peu réaliste si on regarde les panneaux seuls, dans la mesure où la demande nationale sera très inférieure à la production. De nouveaux débouchés pour les panneaux pourraient cependant émerger, et d'autres matériaux produits à partir d'une ressource BIBE pourraient se développer, comme les isolants à base de bois. Enfin, une augmentation des exportations pourrait contribuer à l'absorption d'une partie des volumes supplémentaires.</p>	Extrêmement élevé du point de vue du marché.

@i4ce_

Bibliographie

Colin A, Thivolles-Cazat A, 2016. *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. IGN FBCA pour le compte de l'ADEME.

Colin A, Cuny H, Monchaux P, Thivolles-Cazat A., 2019. *Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'oeuvre des essences feuillues et conifères en France*. IGN et FCBA pour le compte de France Bois-Forêt et du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Donadieu de Lavit P., Leridon N., Levet A-L., Thivolles-Cazat A., Radzimiski R., Vial E., 2019. *Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments. Rapport pour le compte de l'ADEME, CODIFAB, France Bois-Forêt, initiée par le Comité Stratégique de Filière et réalisée par le BIPE et le FCBA*.

Du Bus de Warnaffe G., Angerand S., 2020. *Gestion forestière et changement climatique, une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation*. Amis de la Terre France, Canopée, Fern.

Roux A. (coord.), Colin A. (coord.), Dhôte J.-F. (coord.), Schmitt B. (coord.), Bailly A., Bastien J.-C., Bastick C., Berthelot A. Bréda N., Cauria S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Meredieu C., Pâques L., Rigolot E., Saint-André L., Guehl J.-M., 2020. *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie*. Versailles, éditions Quæ, 170 p.

Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A., Bastien J.-C., Berthelot A., Bréda N., Cauria S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Meredieu C., Marçais B., Martel S., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. (2017). *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050*. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN, 101 p. + 230 p.

Ministère de la Transition Ecologique, 2020. *Stratégie Nationale Bas Carbone*.

Institut Géographique National, 2020. *Etat et évolution des forêts françaises métropolitaines. Indicateurs de gestion durable 2020*.

Valade A., Luyssaert S., Bellassen V., Vallet P., Njakou Djomo S., 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.

Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale
Bas-Carbone 2

| Agriculture

Auteurs :

Clothilde **Tronquet** (I4CE)

Claudine **Foucherot** (I4CE)

Valentin **Bellassen** (INRAE)

Sommaire

Agriculture

1. UNE ESTIMATION INDICATIVE DU PUIT AGRICOLE	39
1.1. L'harmonisation des leviers agricoles grâce au diagnostic Climagri et à l'inventaire de gaz à effet de serre	39
1.2. La comptabilité complexe du maintien des terres agricoles et des pratiques stockantes	40
2. UN PUIT GLOBALEMENT TRÈS AMBITIEUX MAIS CONCEVABLE, VOIRE ENCORE AUGMENTABLE	41
2.1. L'inversion du déstockage des écosystèmes agricoles, au prix d'efforts massifs	41
2.1.1. Les tendances par catégorie d'inventaire : minimiser les émissions « Cultures » et doubler le stockage « Prairies »	43
2.1.2. Les leviers de stockage majeurs : développement de l'agroforesterie et maintien des prairies	43
2.2. Un stockage pas complètement poussé au maximum de son potentiel	44
3. LA MOBILISATION DES LEVIERS, GLOBALEMENT CONFORME À DES SCÉNARIOS DE TRANSITION VOLONTARISTES	45
3.1. Endiguer le déstockage de carbone lié à la perte des terres agricoles et à la conversion de prairies en cultures, à contre-courant des pratiques actuelles	45
3.1.1. Freiner fortement l'artificialisation des terres agricoles, en cohérence avec des scénarios de transition	45
3.1.2. Préserver les prairies permanentes, en cohérence avec des scénarios de transition	46
3.2. Développement massif de l'agroforesterie et des haies, un levier à redimensionner	47
3.3. Mieux prendre en compte les pratiques stockantes dans la SNBC permettrait de renforcer le puits agricole	49
3.3.1. Augmenter les restitutions de matière au sol, un levier qui peut être davantage développé	49
3.3.2. Développer les pratiques culturelles favorables à la séquestration de carbone, suivant des modalités comptables restant à affiner	50
CONCLUSION ET TABLEAU DE SYNTHÈSE	54
BIBLIOGRAPHIE	55

1. Une estimation indicative du puits agricole

1.1. L'harmonisation des leviers agricoles grâce au diagnostic Climagri et à l'inventaire de gaz à effet de serre

Bien que, selon la SNBC, 60 % des émissions nationales résiduelles en 2050 seront des émissions agricoles (N_2O et CH_4), l'agriculture contribue à l'objectif de neutralité carbone de deux autres façons, outre la réduction de ses propres émissions :

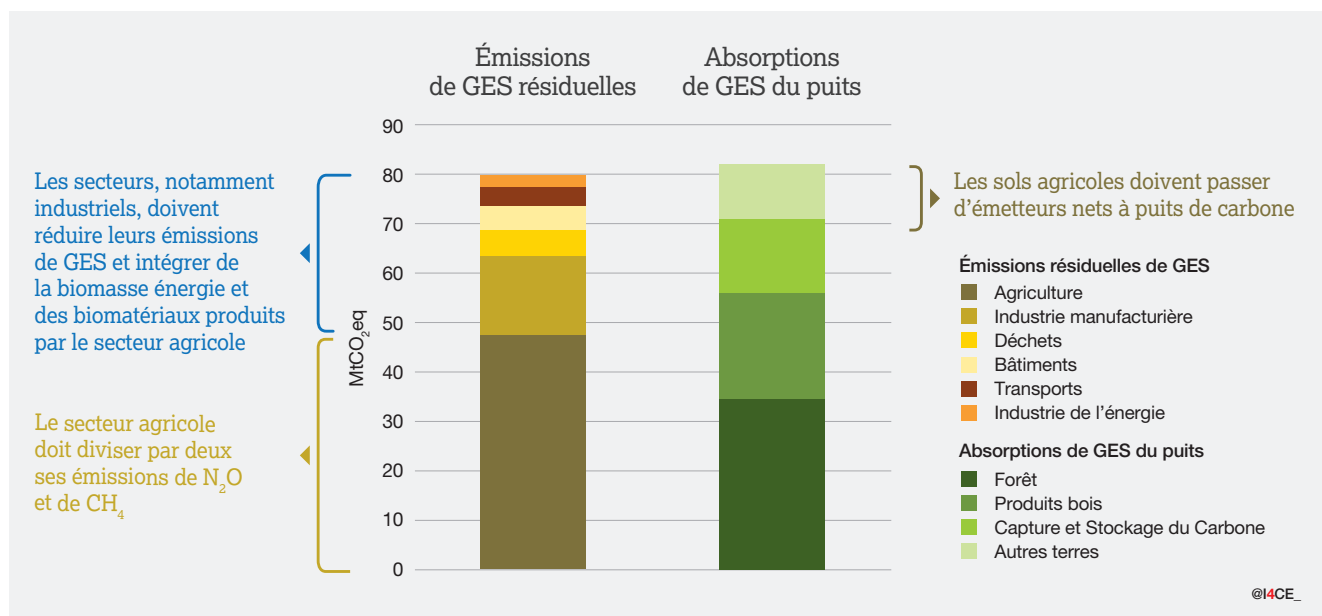
- la production de biomasse énergie et de biomatériaux contribuant à réduire les émissions d'autres secteurs ;
- le stockage carbone via deux mécanismes :
 - le maintien du stockage existant sur les terres agricoles, à travers l'optimisation de l'usage des terres avec le maintien des prairies permanentes, la limitation de l'urbanisation ou le développement de forêts sur des terres dégradées ;
 - l'augmentation du stockage par la mise en œuvre de pratiques stockantes, par exemple le développement de l'agroforesterie ou des cultures intermédiaires.

Les objectifs de stockage carbone assignés au secteur agricole apparaissent dans la catégorie « autres terres » de la Figure 1 et c'est ce volet qui va être analysé dans ce chapitre.

Lors de l'élaboration de la SNBC un bouclage via l'outil Climagri a été réalisé pour s'assurer que les hypothèses d'évolution des surfaces agricoles par type de production, d'évolution du cheptel et des pratiques agricoles étaient compatibles avec notamment les enjeux d'alimentation et les besoins de bioénergie et biomatériaux. Ainsi, les hypothèses sous-jacentes du puits du secteur agricole n'ont pas été proposées de façon isolée et sont cohérentes avec les deux autres volets dans lesquels le secteur agricole apparaît, à savoir les émissions agricoles résiduelles de méthane et de protoxyde d'azote et la décarbonation des autres secteurs via la production de biomasse énergie (Figure 1).

En revanche, si l'outil Climagri a permis de s'assurer de la cohérence des hypothèses, il n'a pas été utilisé pour évaluer le potentiel de stockage de l'agriculture dans le cadre de la SNBC. En effet les projections présentées dans le texte de la SNBC s'appuient sur la méthode de l'inventaire national, pour pouvoir être comparées au puits historique, et ont été réalisées par le CITEPA (Annexes Agriculture). Ainsi, la catégorie « autres terres » de la Figure 1 regroupe les catégories d'inventaire : « cultures », « prairies », « terres artificielles » et « zones humides ».

FIGURE 1 : OBJECTIFS D'ÉMISSIONS DE GES ET DE PUIITS DE LA SNBC POUR 2050



1.2. La comptabilité complexe du maintien des terres agricoles et des pratiques stockantes

Les leviers proposés dans la SNBC pour augmenter le puits de carbone du secteur agricole peuvent être rangés en deux catégories : la protection des stocks de carbone existants et le développement de pratiques stockantes.

Les dynamiques de stockage du carbone dans le sol et la biomasse aérienne varient selon l'utilisation des terres et sa conversion. Par exemple, la conversion d'une forêt en culture, de prairie en culture ou encore de prairie à espace urbanisé entraîne un déstockage de carbone, et inversement. L'impact carbone de ces changements d'usage des sols est pris en compte dans l'inventaire national, et donc dans le chiffrage du puits carbone de la SNBC (**Annexes Agriculture**).

Outre les changements d'utilisation des terres, des flux de stockage ou de déstockage de carbone peuvent intervenir

sur des terres agricoles dont l'utilisation n'est pas modifiée (par exemple une culture qui reste culture), et ce, en fonction des pratiques de gestion mises en œuvre sur ces terres. L'impact de la mise en place de pratiques stockantes n'est en revanche pas systématiquement pris en compte dans l'inventaire national, et par extension, dans la simulation de la SNBC qui se base largement sur l'inventaire. Plus précisément, seules la plantation de haies, l'introduction de cultures intermédiaires et les apports de matières organiques exogènes (ex. : boues de station d'épuration) sont intégrées à la comptabilité. Les autres pratiques ne sont pas visibles dans l'inventaire (**Annexes Agriculture**).

Notons enfin que l'inventaire ne comptabilise que des variations du stock de carbone dans le sol liées aux conversions des usages sur un pas de temps limité (vingt ans). Une fois cette période écoulée, le stock de carbone atteint un plateau et le flux net de stockage devient nul. Dans le cadre des projections SNBC, le puits agricole a été artificiellement prolongé jusqu'en 2050, afin d'éviter ce décrochage comptable.

TABEAU 1 : LEVIERS D'ACTION SUR LE PUIT AGRICOLE DANS LA SNBC

Maintien des flux de stockage existants des terres agricoles	Mise en œuvre de pratiques stockantes
<ul style="list-style-type: none"> • Limiter les pertes de prairies permanentes. • Zéro artificialisation nette. • Préserver les milieux agricoles humides. 	<ul style="list-style-type: none"> • Développer largement les haies et dans une moindre mesure l'agroforesterie. • Augmenter les restitutions au sol de résidus de cultures et de matières organiques de qualité. • Développer les pratiques culturales agro-écologiques favorables à la séquestration de carbone, combinant notamment la réduction du travail du sol et la couverture permanente et l'allongement des rotations de culture.

@i4ce_

2. Un puits globalement très ambitieux mais concevable, voire encore augmentable

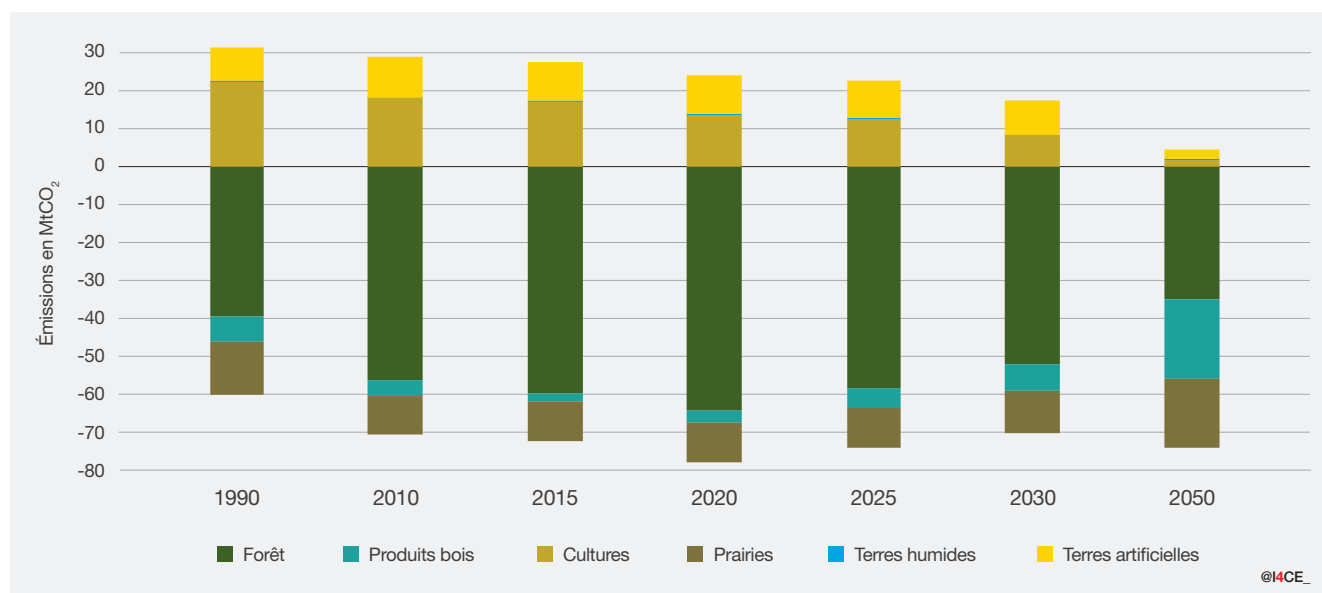
2.1. L'inversion du déstockage des écosystèmes agricoles, au prix d'efforts massifs

Les sols agricoles, historiquement émetteurs nets : le puits intitulé «Autres terres» dans la SNBC désigne les flux nets annuels de carbone séquestrés ou émis dans les écosystèmes autres que forestiers, il s'agit principalement des émissions liées aux systèmes agricoles ; et plus précisément aux changements d'utilisation des sols, que ceux-ci restent à vocation agricole (prairies retournées devenant des terres cultivées) ou changent complètement d'utilisation (terres agricoles artificialisées). En termes de volumes d'émissions, les surfaces agricoles (cultures et prairies) émettaient globalement 7 MtCO₂eq en 2015 (le stockage dans les prairies ne compense pas le déstockage dans les cultures) ; les surfaces artificialisées +10 MtCO₂eq ; les émissions des zones humides étaient marginales, avec 0,5 MtCO₂eq (voir Figure 2). L'essentiel de ces émissions inventoriées en 2015 sont liées à des changements d'utilisation des terres : 96 % des flux de GES associés à la catégorie «terres cultivées» sont des changements d'utilisation des terres (essentiellement des prairies devenant des terres cultivées); et 93 % des flux de GES associés à la catégorie «prairies» sont des changements d'utilisation des terres (essentiellement des terres cultivées devenant prairies). Enfin 55 % des émissions liées à l'artificialisation

des terres correspondent à d'anciennes terres agricoles, principalement des prairies. La part des émissions n'étant pas liées à des changements d'utilisation des sols correspond à des pratiques sur des surfaces dont l'usage ne change pas, à l'image des intercultures ou de la plantation de haies. L'impact de ces pratiques est cependant très mal pris en compte dans l'inventaire (Annexes Agriculture).

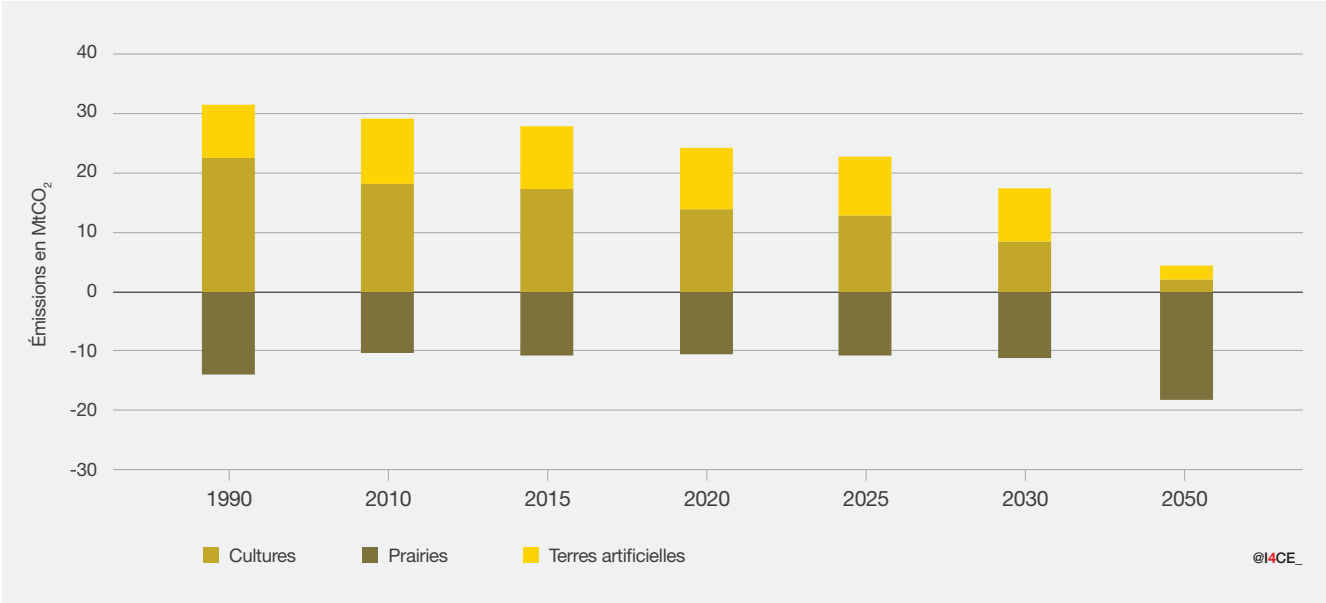
L'effort attendu sur le puits lié aux systèmes agricoles est important et comparable à celui attendu sur les réductions d'émissions de N₂O et CH₄ (engrais et fermentation entérique) : selon la SNBC, le puits «Autres terres» est projeté à -14 MtCO₂eq en 2050, soit un effort d'atténuation de plus de 30 MtCO₂eq par rapport à 2015. L'évolution lente de ces absorptions – en raison de la temporalité des processus biologiques à l'œuvre – ; leur caractère intrinsèquement limité – en raison de la saturation des capacités d'absorption – ; ainsi que les risques de non permanence, entre autres liés à des interventions humaines (retournement de prairies, arrachage de haies, etc.), rendent d'autant plus importants et délicats les efforts à fournir pour que ce poste passe d'émetteur de GES en 2015, à absorbeur net en 2050, et contribue ainsi à l'atteinte de la neutralité carbone. Cet objectif d'environ 30 MtCO₂eq est comparable aux réductions d'émissions attendues pour les émissions de N₂O et CH₄ du secteur agricole (-30 MtCO₂eq dont -15 MtCO₂eq liées à une moindre utilisation d'engrais et -15 MtCO₂eq liées à la baisse du cheptel de ruminants).

FIGURE 2-A. HISTORIQUE ET PROJECTION DE LA SNBC POUR L'ENSEMBLE DES PUITIS NATURELS



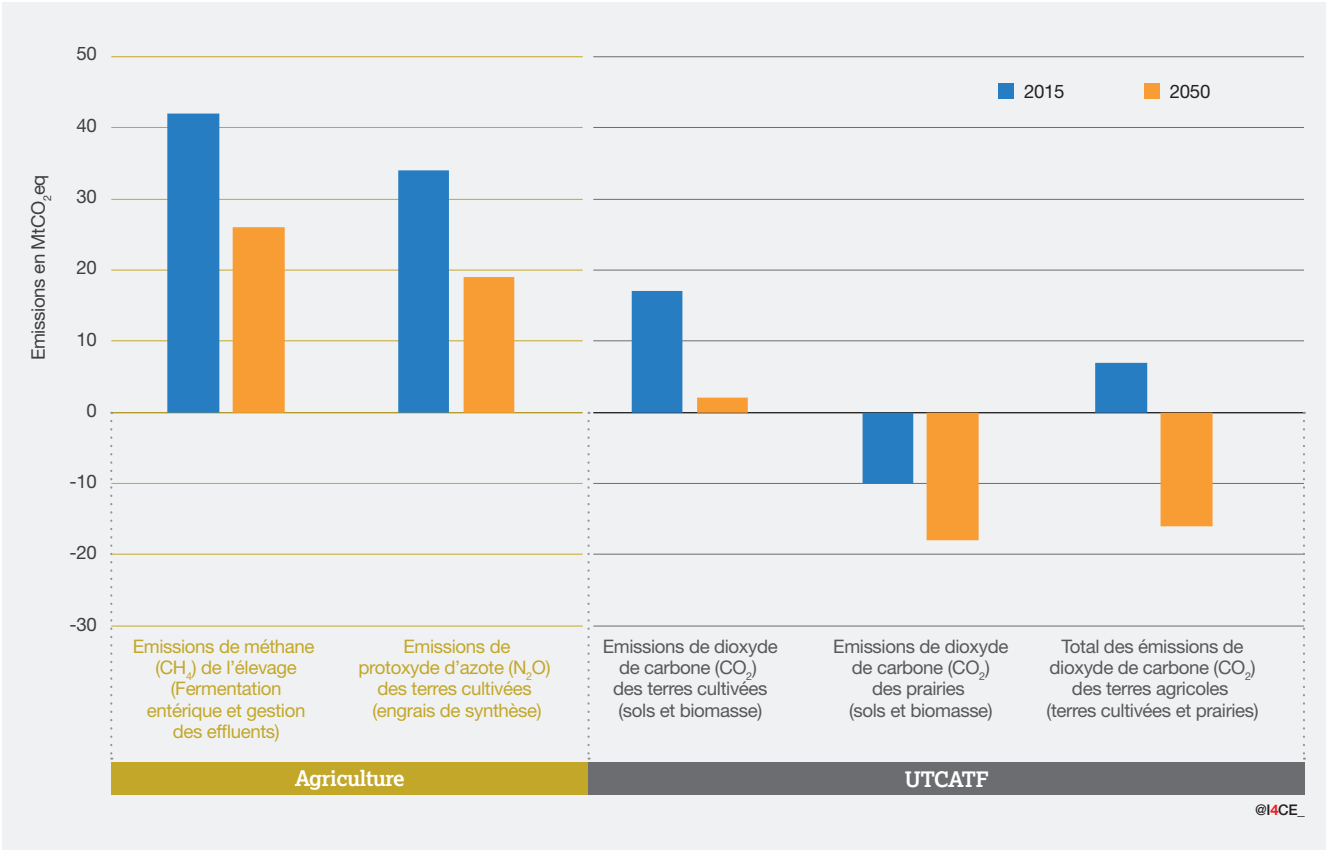
2. UN Puits GLOBALEMENT TRÈS AMBITIEUX MAIS CONCEVABLE, VOIRE ENCORE AUGMENTABLE

FIGURE 2-B. HISTORIQUE ET PROJECTION DE LA SNBC POUR LA CATÉGORIE «AUTRES TERRES» DE LA SNBC



Source : I4CE à partir des données CITEPA

FIGURE 3 : EMISSIONS DE L'AGRICULTURE ET DES TERRES AGRICOLES DANS LA SNBC



Source : I4CE à partir des données CITEPA

Note : Les données CITEPA sont issues de la SNBC 2, elle-même basée sur la version 2018 de l'inventaire SECTEN. Elles n'intègrent donc pas la révision méthodologique de l'inventaire de 2019. A titre illustratif, sur la Figure 2, la catégorie «autres terres» utilise la référence historique de la SNBC 2 et s'élevant à moins de 20 MtCO₂eq en 2015, tandis que la nouvelle version de l'inventaire indique des émissions de 24,5 MtCO₂eq en 2015.

2.1.1. Les tendances par catégorie d'inventaire : minimiser les émissions « Cultures » et doubler le stockage « Prairies »

Une réduction massive des émissions de la catégorie « Cultures » est attendue, grâce à un moindre retournement des prairies et au développement des intercultures. Suivant une tendance légèrement baissière depuis 1990, les émissions des cultures s'élevaient environ à 17 MtCO₂eq en 2015. Elles devraient être presque divisées par 10 pour atteindre moins de 2 MtCO₂eq en 2050, la baisse s'accroissant principalement à partir de 2025. Cette baisse d'émissions correspond principalement à la réduction à néant du déstockage dû à la conversion de prairies permanentes en cultures; et de manière plus marginale à la mise en place d'intercultures. Pour autant la surface des prairies permanentes continue de diminuer, bien que les pertes annuelles soient divisées par 4 sur la période, car une partie est convertie en forêt.

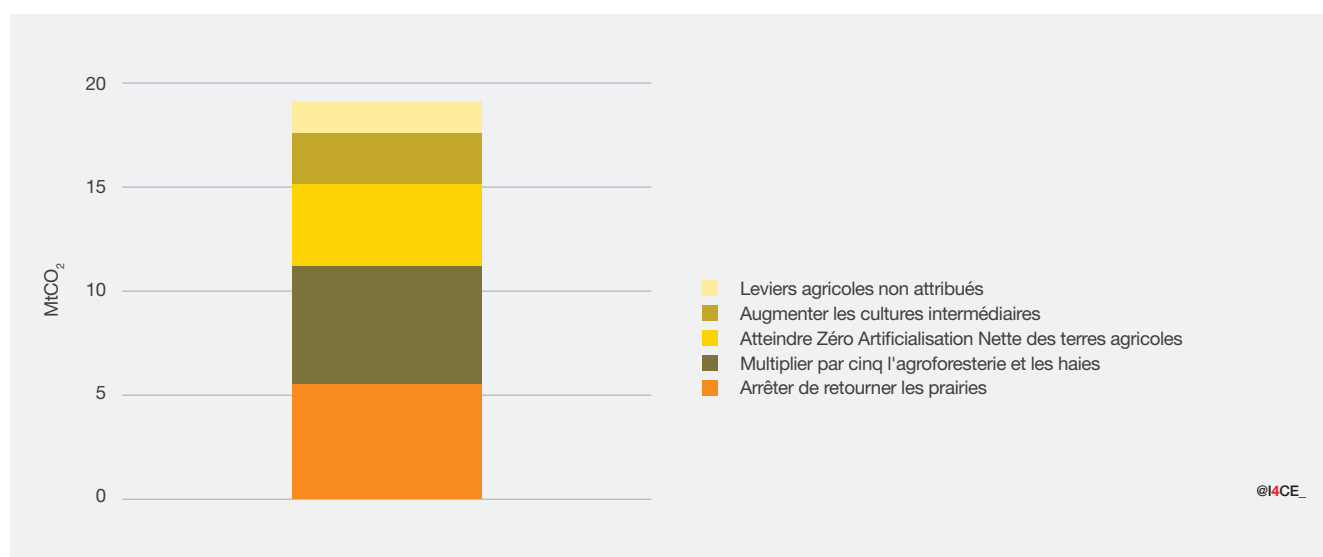
Un stockage deux fois plus élevé dans la catégorie « Prairies », principalement lié à l'inclusion des haies. A l'inverse de la tendance à la réduction du stockage observée ces dernières décennies, le puits des prairies se renforce dans la SNBC en passant d'environ -10 MtCO₂eq en 2015 à -18 MtCO₂eq en 2050. Ce doublement se concrétiserait à partir de 2030, après une période 2020-2030 où le stockage se maintiendrait à son niveau actuel. L'augmentation du stockage projeté dans la SNBC est quasiment intégralement due à l'objectif de plantation de haies, qui sont

systématiquement comptées dans la catégorie « Prairies », qu'elles soient plantées sur des surfaces cultivées ou sur des prairies (Annexes Agriculture).

2.1.2. Les leviers de stockage majeurs : développement de l'agroforesterie et maintien des prairies

Les leviers par ordre d'importance sont l'implantation de haies, le maintien des prairies, l'arrêt de l'artificialisation et les intercultures : L'importance relative des différents leviers du puits agricole a été reconstituée sur la base d'entretiens avec le CITEPA couplés aux hypothèses de déploiement des pratiques données par la SNBC. Trois grands leviers peuvent ainsi être distingués par ordre d'importance : la multiplication par cinq des haies et des arbres agroforestiers (7 MtCO₂eq), l'arrêt du retournement de prairies (7 MtCO₂eq) et la généralisation des intercultures (3 MtCO₂eq) (voir Figure 4) ; auxquels s'ajoute la division par vingt de l'artificialisation des terres agricoles par rapport à 2015 permettant de préserver des prairies (5 MtCO₂eq). En additionnant le potentiel de chaque levier, le total n'atteint pas exactement les 23 MtCO₂ d'évolution des deux catégories « cultures » et « prairies », attendu sur la période. Il y a en effet un écart de 2 MtCO₂ entre l'augmentation du puits du secteur en 2050 et l'effet des différents leviers tels qu'indiqués dans les différents documents internes en appui à la SNBC.

FIGURE 4 : LEVIERS DE STOCKAGE AGRICOLES DANS LA SNBC



Source : Données reconstituées à partir d'entretiens avec le CITEPA et des hypothèses SNBC

2.2. Un stockage pas complètement poussé au maximum de son potentiel

Le volume du puits projeté dans les sols agricoles en 2050 est inférieur au potentiel technique global. En additionnant les deux catégories d'inventaire « Cultures » et « Prairies », le puits doit passer de +7 MtCO₂eq en 2015 à -16 MtCO₂eq en 2050 dans la SNBC, soit une amplitude de 23 MtCO₂eq. Les méthodologies entre la SNBC et l'étude 4p1000, menée par l'INRAE, sont très différentes (**Annexes Agriculture**) mais, en totalisant différentes pratiques stockantes, l'étude 4p1000 identifie un potentiel gain carbone supplémentaire par rapport aux pratiques existantes de l'ordre de 30 MtCO₂eq/an rien que dans les sols agricoles. Ce chiffre est supérieur à celui de la SNBC alors que contrairement à ce dernier, l'étude 4p1000 ne comprend pas le carbone stocké dans la biomasse aérienne liée aux haies et à l'agroforesterie estimé à 12 MtCO₂eq/an dans Climagri.

Certaines pratiques stockantes comme les cultures intermédiaires pourraient être étendues à une échelle encore supérieure. Concrètement, pour atteindre le potentiel technique maximal identifié dans 4p1000, les surfaces où sont mises en œuvre des pratiques stockantes devraient augmenter ; et certaines autres pratiques devraient être incluses. Dans le cas des cultures intermédiaires, dont le potentiel de stockage additionnel est très important (6,6 MtCO₂/an), l'assiette technique maximale est de l'ordre du double des surfaces en cultures intermédiaires projetées dans la SNBC. En effet, selon l'étude 4p1000, ces couverts pourraient être généralisés à presque l'ensemble des grandes cultures, soit 16 Mha. D'autres pratiques évaluées dans l'étude 4p1000 ne sont pas introduites de manière explicite et/ou dimensionnées dans la SNBC, ce qui ouvre des possibilités d'amélioration du puits agricole : c'est le cas de l'allongement des prairies temporaires ; et de manière plus marginale de l'enherbement des vignobles ou encore de l'augmentation des apports en matière organique.

Des améliorations comptables sont nécessaires afin d'évaluer correctement le puits agricole. Plusieurs leviers de stockage ne sont comptabilisés que de manière approximative dans la SNBC, en particulier en raison des limites méthodologiques de l'inventaire ; mais aussi en raison de la littérature encore en construction au moment de la rédaction de la SNBC 2. L'inventaire ne valorise pas toutes les pratiques stockantes, comme l'allongement des prairies temporaires ; à l'inverse, il valorise le non-labour qui s'est révélé sans effet sur le stockage (**Annexes Agriculture**) ; et estime de manière peu précise le bénéfice d'autres pratiques comme les cultures intermédiaires qui sont comptabilisées différemment dans l'inventaire, dans Climagri et dans l'étude 4p1000. Enfin, le périmètre et le stockage permis par l'agroforesterie en particulier doit être revu afin d'en clarifier la métrique, ce levier étant particulièrement stockant, mais aussi impactant sur les systèmes techniques et économiques agricoles.

3. La mobilisation des leviers, globalement conforme à des scénarios de transition volontaristes

3.1. Endiguer le déstockage de carbone lié à la perte des terres agricoles et à la conversion de prairies en cultures, à contre-courant des pratiques actuelles

3.1.1. Freiner fortement l'artificialisation des terres agricoles, en cohérence avec des scénarios de transition

Décryptage de la SNBC

L'artificialisation porte principalement sur les surfaces agricoles. Sur les 30 dernières années, les émissions liées à l'artificialisation des terres se sont maintenues au-dessus de 10 MtCO₂eq/an, avec une légère augmentation sur la période 2005-2013. Dans la comptabilité de l'inventaire national de GES, en 2015, les terres artificialisées déstockant le plus de CO₂ étaient les prairies : 753 452 ha libérant 5 MtCO₂eq ; les forêts : 223 083 ha libérant 5 MtCO₂eq ; suivies de loin par les cultures : 722 909 ha libérant 0,5 MtCO₂eq. Ces émissions varient selon l'ampleur des surfaces artificialisées, mais aussi en fonction de l'intensité du stockage carbone sur chaque type de terres concerné. Ainsi, les émissions associées à l'artificialisation des terres agricoles représentaient 63 % des émissions liées à l'artificialisation dans l'inventaire, alors que les surfaces artificialisées portaient à 93 % sur de la Surface Agricole Utile (SAU) (environ à surfaces égales entre les prairies et les cultures).

La SNBC prévoit que les émissions liées à l'artificialisation soient divisées par cinq d'ici 2050, passant de près de +10.5 MtCO₂eq en 2015 à +2 MtCO₂eq en 2050. Cet objectif de réduction de l'artificialisation est logiquement attribué aux secteurs de l'urbanisme et de l'aménagement, qui sont responsables de la suppression des écosystèmes. Cependant, les puits de carbone touchés étant liés à l'agriculture et à la forêt, le maintien de ces deux activités est indissociable de la mise en œuvre de l'objectif de réduction de l'artificialisation. Au global, la SNBC projette pour 2050 un scénario correspondant à une perte de SAU de 4 % par rapport à 2015, contre 9 % de pertes dans un scénario tendanciel, ce qui implique une nette réduction de l'aggravation de la tendance à l'artificialisation des sols agricoles.

Les zones humides sont un enjeu clé mais mal connu.

L'enjeu que représente le maintien des terres agricoles est clairement identifié dans la SNBC. Dans le même sens, la SNBC souligne le rôle du maintien du carbone dans les sols des milieux humides agricoles et les tourbières, qui constituent d'importants stocks de carbone, sans toutefois en détailler les leviers de protection spécifiques. Le drainage et l'exploitation agricole des tourbières est également identifié comme un enjeu de taille par la Cour des Comptes Européenne, dans un rapport sur les dépenses de la PAC (European Court of Auditors, 2021) : il représenterait 20 % des émissions agricoles européennes.

La protection des zones humides reste donc à développer, à commencer par l'inventaire de ces émissions, encore insuffisamment documenté :

- les émissions dues à la conversion des zones humides ne sont pas comptabilisées dans l'inventaire national, mais des travaux en cours tendraient vers des émissions marginales ;
- les émissions du drainage des zones agricoles riches en matières organiques (histosols) sont estimées grossièrement à 3,3 MtCO₂ en 2015.

Pour répondre à ces enjeux, le rapportage des émissions des zones humides à l'aide de facteurs d'émissions plus précis deviendra obligatoire en 2026 dans les inventaires européens, ce qui devrait contribuer à une meilleure prise en compte des différents types de terres et des contextes variés.

Enfin, l'intensité du stockage carbone en forêt (environ 40 % des émissions de l'artificialisation pour 13 % des surfaces comptabilisées) conduit à recommander une attention spécifique au maintien des forêts dans la lutte contre l'artificialisation, comme cela est le cas pour les zones humides et les zones agricoles.

Comparaison à la littérature

Les projections de surfaces artificialisées de la SNBC sont cohérentes avec les exercices de simulation existants dans la littérature, à savoir un exercice de prospective sur le système alimentaire français : le scénario Afterres 2050, dans sa version de 2016 ; et le rapport de France Stratégie sur l'atteinte de l'objectif Zéro Artificialisation Nette, publié en 2019, lui-même basé sur les modélisations du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), publiées en 2019 également.

Les projections des scénarios tendanciel et volontariste de la SNBC sont équivalentes à celles adoptées dans le scénario Afterres 2050 (Solagro, 2016) : l'hypothèse prise par la SNBC

amène à 6,1 Mha artificialisées en 2050, contre 6,4 Mha dans le scénario Afterres 2050 (Tableau 2). Dans le scénario Afterres 2050, la réduction du rythme de l'artificialisation est permise par une division par deux de l'effet d'étalement, grâce à une surface par habitant qui ne progresse que de 14 %.

TABLEAU 2 : COMPARAISON DES SURFACES ARTIFICIALISÉES EN 2050 ENTRE LA SNBC ET LE SCÉNARIO AFTERRES

	Surfaces artificialisées en 2050 (Mha)	
	SNBC	Afterres 2050 (Solagro, 2016)
Scénario volontariste	6,1	6,4
Scénario tendanciel	7,2	7,2

@i4ce_

Dans le même ordre d'idées, le rapport de France Stratégie et la trajectoire modélisée par le CGDD sur l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) confirment que la consommation d'espaces naturels, agricoles ou forestiers (ENAF) pourrait être réduite drastiquement. Elle pourrait atteindre moins de 1 200 ha artificialisés par an (France Stratégie, 2019) ou 3 000ha/an (CGDD, 2019), selon les hypothèses.

Densité urbaine et renaturation comme conditions à l'atteinte du ZAN. Comme dans le scénario Afterres 2050, les projections CGDD, reprises par France Stratégie reposent sur une augmentation de la densité urbaine, en particulier via l'augmentation du taux de renouvellement (construction sur des terres déjà artificialisées). Le rapport France Stratégie conclut que la mise en œuvre simultanée d'autres leviers, comme le renchérissement du foncier non bâti, la limitation de la sous-occupation du parc immobilier actuel, pourrait même permettre d'atteindre cet objectif à partir de 2030, du moins en théorie. En complément à ces mesures, les simulations France Stratégie et CGDD projettent le développement de modalités de compensation de l'artificialisation résiduelle par la naturalisation d'autres surfaces.

3.1.2. Préserver les prairies permanentes, en cohérence avec des scénarios de transition

Décryptage de la SNBC

Les surfaces de prairies permanentes devraient continuer à baisser, notamment les moins productives. Les prairies permanentes couvrent 9,3 Mha en 2015, dont les trois quarts sont des prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans ; et un quart de surfaces toujours en herbe (STH) dites peu productives, correspondant à des parcours, des landes et des alpages. En 2050, la SNBC projette une baisse de 5,5 % de la surface de prairies permanentes par rapport à 2015, couvrant alors 8,8 Mha, soit environ 500 000 ha en moins.

Le rythme des retournements de prairies diminue, évitant un déstockage net de 7 MtCO₂. Le levier de préservation

des prairies consiste d'abord à arrêter la conversion de prairies en cultures, qui émettait 7 MtCO₂ en 2015. Toutefois, le boisement sur prairies peu productives (parcours, alpages, landes) continue de faire baisser la surface en prairie, mais sans effet sur le carbone du sol. Au final, entre 2015 et 2050, le pourcentage de perte annuel de prairies permanentes diminue : de -1 % sur les cinq premières années à -0,5 % sur les cinq dernières années.

Les conversions résiduelles de prairies deviennent des forêts. A partir de 2035, les conversions de prairies ne correspondent plus à des retournements pour devenir des cultures : 100 % des conversions de prairies sont transformées en forêt, de sorte que le changement d'occupation des sols permet une augmentation de la séquestration du carbone dans les écosystèmes. En termes comptables, les émissions dues aux conversions de prairies permanentes en un autre usage sont inscrites dans les catégories d'utilisation finale de ces terres (forêt, cultures), et non dans la catégorie «Prairies» (Annexes Agriculture). Par conséquent, la SNBC comptabilise le stockage permis par ces boisements dans le puits forestier. A noter qu'en 2050, les trois quarts de ces surfaces boisées sont des parcours, des landes, ou alpages ; et un quart des boisements ont lieu sur des zones plus productives. L'essentiel du boisement est ainsi réalisé sur des zones peu productives, voire peu accessibles, ce qui questionne les possibilités techniques d'une gestion active des boisements.

Le développement de l'alimentation en herbe des vaches laitières limite les pertes de prairies. La SNBC prévoit une réduction du cheptel de bovins de 30 %. Cette diminution risquerait logiquement d'entraîner une réduction importante des surfaces en prairies, mais l'impact sur les pâturages est en partie compensé par le passage en système herbager d'une part croissante de vaches laitières : près de la moitié des vaches laitières sera alimentée en herbe en 2050, contre seulement un quart en 2015.

Comparaison à la littérature

Les surfaces de prairies projetées en 2050 sont équivalentes à celles d'autres scénarios de transition. L'objectif de maintien des prairies est comparable aux projections faites par Solagro dans Afterres 2050¹ qui table sur 8,7 Mha de prairies permanentes en 2050.

L'évolution des surfaces en prairies ne dit rien de la spécialisation agricole des régions. Les deux objectifs de la SNBC liés au maintien des prairies permanentes, là où elles sont déjà, et le développement de l'alimentation à l'herbe des bovins dans les régions d'élevage ne favorisent pas intrinsèquement la déspecialisation des régions. Or la SNBC indique comme point de vigilance d'envisager «la complémentarité polyculture-élevage à l'échelle de territoires», celle-ci favorisant une meilleure gestion de l'azote à l'échelle du territoire et la biodiversité. En ce sens, le scénario Ten Years For Agroecology (TYFA) construit par l'Iddri en 2018, poursuit un objectif de déspecialisation, qui passe par le redéploiement des prairies naturelles

¹ https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/solagro_afterres2050_version2016.pdf

dans les régions de cultures ; et à l'inverse le passage à des systèmes mixtes dans les régions d'élevage herbager avec l'exploitation d'une partie du potentiel agronomique de retour de cultures (Iddri, 2018). En 2021, l'Iddri a développé les conséquences socio-économiques (emploi, marges) de deux déclinaisons possibles de la SNBC : « France duale » et « Recompositions » (Iddri, 2021).

La réduction des prairies extensives correspond à un scénario priorisant l'objectif climatique. Le scénario TYFA considère que les options de réduction drastique du cheptel, permettant de libérer des surfaces en prairies qui seront par exemple boisées, correspondent à un scénario priorisant un objectif climatique, mais qui peut faire peser des risques sur la biodiversité, car réduisant les prairies extensives, qui accueillent une biodiversité spécifique pour les remplacer par des boisements souvent plus pauvres en biodiversité (Iddri, 2018). Ces paramètres correspondent en partie à la projection SNBC, où les surfaces en prairies diminuent, en particulier les moins productives comme les parcours, au profit des boisements. Pour autant, la diminution des surfaces dans la SNBC est limitée et se produit en parallèle d'une augmentation de l'alimentation en herbe du cheptel, préservant ainsi dans une certaine mesure les transferts de fertilité par l'azote. En s'appuyant sur des hypothèses multifonctionnelles différentes, mettant au même plan les ambitions climatiques, de biodiversité et en matière de nutrition, le scénario TYFA réalise des arbitrages qui permettraient le maintien des ruminants sur des prairies extensives. Pour préserver 58 Mha de prairies en Europe en 2050 (contre 60 Mha en 2010), le scénario TYFA suppose un maintien des ruminants avec l'augmentation du cheptel laitier notamment (dans un contexte de baisse globale du cheptel de ruminants), accompagné d'une extensification de l'élevage.

3.2. Développement massif de l'agroforesterie et des haies, un levier à redimensionner

Décryptage de la SNBC

Une multiplication par cinq des surfaces agroforestières, essentiellement des haies. Dans la SNBC, l'agroforesterie se développe suivant deux modalités : la plantation de haies en bordure de parcelles, qui représente l'essentiel des surfaces agroforestières ; et l'agroforesterie intra parcellaire, à savoir la plantation d'arbres au sein des parcelles, qui se maintient quant à elle à environ 3 % des surfaces agroforestières. Entre 2015 et 2050, la SNBC projette une augmentation des surfaces de haies de 0,4 Mha à 1,8 Mha, soit une multiplication par 5 et celles d'agroforesterie intra parcellaire passent de 11 500 ha à 66 966 ha, soit une multiplication par 5,8. Si la distinction entre la plantation d'arbres intra-parcellaires et de haies est réalisée dans la SNBC, la répartition de ces plantations entre cultures et prairies n'est en revanche pas précisée et ne peut être reconstituée. Sur le plan comptable, les projections de

plantation de haies sont comptées intégralement dans la catégorie « Prairies », ce qui ne signifie pas pour autant que ces plantations ont lieu sur des surfaces de prairies.

L'augmentation des surfaces agroforestières suppose déjà le maintien des surfaces en place. L'augmentation de la surface de haies correspond à une inversion de la tendance à la baisse, amorcée dans les années 1960 (Solagro, 2006) (Pointereau, 2002). En effet, à dire d'experts, les surfaces de haies arrachées seraient quatre fois supérieures aux surfaces plantées : 2 500 et 3 000 km de linéaires de haies plantés par an, pour 11 000 km arrachées (Sotteau, 2021). Pour autant, il faut noter qu'il n'existe pas à date d'estimation précise et récente de l'évolution du linéaire de haies en France, même si un suivi des haies par télédétection est en voie d'être finalisé par l'IGN et l'OFB (Office National de la Biodiversité) dans le cadre de l'Observatoire National du Bocage. Indépendamment de la précision des estimations, l'ordre de grandeur du ratio pertes/plantations indique que l'objectif de la SNBC est avant tout un objectif de maintien des surfaces de haies existantes, avant même d'être un objectif de plantation.

Les surfaces agroforestières atteindraient près de 7 % de la SAU en 2050. Au total, l'agroforesterie sera développée sur 1,9 Mha de surfaces agricoles. Il s'agit là strictement de l'emprise au sol des haies et des arbres et pas de la Surface Agricole Utile (SAU) sur laquelle sont implantées les arbres et haies. Globalement, sur une SAU totale (prairies et cultures) se situant autour de 28 Mha, les arbres et les haies représenteraient donc 6,9 % de la SAU en 2050, contre seulement 1,31 % en 2015. Cette proportion est d'autant plus élevée que sur la période, la SAU diminue légèrement.

Probable erreur de calcul des surfaces en haies dans la SNBC. Le point de départ 2015 et d'arrivée 2050 utilisés dans la SNBC pour les haies sont possiblement erronés en raison de confusions comptables.

- Le point de départ proposé dans la SNBC est de l'ordre de 0,4 Mha de haies, ce qui ne correspond pas au chiffrage de départ disponible dans le cadre des inventaires, qui s'élève quant à lui à 0,6 Mha. Ceci pourrait en partie être dû au fait que la catégorie haie dans l'inventaire ne recouvre pas celle de l'objectif SNBC : la première incluant par exemple des alignements d'arbres non-agricoles. Cette différence initiale a nécessité des aménagements comptables pour parvenir au point d'arrivée de 2 Mha de haies en 2050. Ainsi, suivant la catégorie inventaire, les surfaces en haies passent de 0,6 Mha à 2 Mha, soit une multiplication par trois des surfaces, et non par cinq comme l'intention en était donnée dans la SNBC.
- Le point d'arrivée de la SNBC porte la surface en haies à 1,8 Mha en 2050, soit 6,7 % de la SAU française projetée, une proportion qui s'avère extrêmement élevée. En effet, la modélisation de l'emprise des haies prend couramment comme hypothèse que les haies occupent entre 2 % et 3 % maximum de la SAU concernée, ce qui correspond à un maillage de bocage très dense (Inventaire CITEPA, INRAE 2013 et INRAE 2019). L'objectif SNBC conduirait ainsi à couvrir la SAU d'une surface en haies dont la densité serait trois fois supérieure aux modélisations actuelles, ce qui paraît irréaliste.

Le chiffrage SNBC est probablement le fruit d'une confusion entre les différentes unités utilisées pour mesurer des haies (km de linéaire, les ha de haies et les ha de SAU portant des haies), à laquelle s'ajoute la difficulté des catégories «haies»/«arbres» qui ne se recouvrent pas selon les cadres comptables (catégorie d'inventaire excluant les haies arbustives et incluant des alignements non-agricoles).

L'agroforesterie est un des principaux leviers de stockage dans les écosystèmes agricoles, avec environ 10 MtCO₂ stockées par an en 2050. Le résultat de la modélisation SNBC du CITEPA sur le stockage carbone lié à l'accroissement des surfaces en haies est de 9 MtCO₂eq par an avec la moitié dans le sol et l'autre moitié dans la biomasse aérienne. De son côté, l'outil Climagri utilisé par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation pour le bouclage des hypothèses agricoles a également permis de faire une estimation de l'impact GES de cette mesure. Le stockage annuel est estimé à 0,7 MtCO₂eq pour le compartiment sol et de 11,67 MtCO₂eq pour la biomasse aérienne en 2050 soit un total de 12,37 MtCO₂eq. En parallèle, une perte de rendement de 12 % est simulée avec la plantation d'arbres intra-parcellaire, alors que la plantation de haies, elle, est réputée ne pas induire de perte de rendement.

Les haies fournissent une quantité croissante de bois énergie. La simulation Climagri distingue une typologie de haies, associées à une production de biomasse. En 2050, les surfaces de haies plantées se partageraient entre : 815 233 ha de haie-taillis (44 %) ; 486 180 ha de haie-futaie (26 %) ; 491 113 ha de haie mixte (27 %) et 53 033 de haies arbustives productives (3 %). Il est estimé que 56 % de l'accroissement de l'ensemble de ces types de haies sera exploité en 2050, de sorte que les haies produiront 3,3 Mt de matière sèche et l'agroforesterie intra-parcellaire 369 419 Mt, dont le bois sera intégralement dirigé vers des usages industrie ou énergie, et 30 % des branches du houppier vers le bois énergie. La production de chaleur à partir de l'agroforesterie serait alors multipliée par trois : de 6,7 TWh en 2015 à 18,8 TWh en 2050. Ces chiffres n'ont pas forcément été repris tels quels dans la modélisation énergie de la SNBC.

Comparaison avec la littérature

L'estimation en tonnes de CO₂ du levier de stockage lié aux haies dans la SNBC est proche du potentiel estimé dans l'étude 4p1000. Les périmètres et les méthodes employées ne permettent pas de comparaison exacte entre l'étude 4p1000 de l'INRAE de 2019 et la SNBC, mais les ordres de grandeur de stockage peuvent être mis en parallèle. Le potentiel de stockage supplémentaire maximal dans les sols, évalué dans l'étude 4p1000, se rapproche de l'estimation du levier de stockage des haies dans la SNBC, réalisée dans le cadre de cette étude. Dans les deux cas, les haies permettent un stockage d'environ 10 MtCO₂/an à un horizon de moyen terme : 8 MtCO₂ dans l'étude 4p1000 et 7 MtCO₂ dans la SNBC.

La SNBC projette des surfaces en agroforesterie supérieures aux assiettes considérées dans la littérature, probablement en raison d'une erreur de calcul. L'étude

INRAE de 2013 et l'étude 4p1000 de l'INRAE en 2019 étudient les deux leviers de plantation de haies et d'arbres intra-parcellaires, considérés dans la SNBC. Bien que les systèmes de référence et les méthodes employées ne permettent pas de comparaison directe et complète avec la SNBC, les surfaces projetées en agroforesterie peuvent être mises en regard.

Les deux études INRAE projettent des surfaces de SAU de plus de 10 Mha où peuvent être implantées arbres et haies. L'étude INRAE 2013 estime que les pratiques d'agroforesterie peuvent être mises en œuvre sur une assiette maximale technique de 11,5 Mha de terres cultivées, dont 3,9 Mha pour les arbres intra-parcellaires et 7,6 Mha pour les haies (INRAE, 2013). Cette assiette correspond à l'ensemble des grandes cultures où la profondeur du sol et la taille des parcelles sont suffisantes pour l'implantation de ces pratiques. En raison des difficultés de mise en œuvre de l'agroforesterie, les scénarios projetés dans l'étude INRAE de 2013 ne portent au maximum que sur 10 % et 20 % de l'assiette technique pour la plantation d'arbres intra-parcellaires et de haies. L'étude 4p1000 se concentre sur les pratiques d'agroforesterie sur les terres cultivées et en modifiant les critères liés à l'assiette technique par rapport à l'étude de 2013 (taille des parcelles, etc.), elle aboutit à une assiette maximale technique de 14,13 Mha (dont 5,3 Mha pour les arbres intra-parcellaires et 8,83 Mha pour les haies) (INRAE, 2019).

En convertissant les surfaces de SAU portant des haies en surfaces de haies afin de permettre une comparaison avec la SNBC, les surfaces de haies des études INRAE se révèlent au moins quatre fois inférieures à la projection SNBC. Ce résultat ne reflète pas forcément que l'ambition de la SNBC, mais plutôt une confusion méthodologique sur la métrique des haies, comme indiqué précédemment.

L'objectif de multiplication des surfaces s'inscrit dans un contexte favorable, mais insuffisant pour développer l'agroforesterie. La baisse constatée des surfaces en haies se passe dans un contexte réglementaire qui a pourtant tenté de préserver et replanter des haies, sans succès, tant au niveau européen (Contrats territoriaux, Contrats d'agriculture durable, Mesures agro-environnementales territorialisées et Mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC)), qu'au niveau français (Programme de développement rural hexagonal, trames verte et bleue, loi Grenelle 1 et 2) (Sotteau, 2021). Les obstacles à la mise en œuvre de l'agroforesterie sont soulignés dans l'évaluation du Plan pour le Développement de l'Agroforesterie : freins juridiques, réglementaires et financiers, manque d'accompagnement technique,... (Sotteau, 2021). Néanmoins, le rapport témoigne également des avancées en matière d'information, et d'accès facilité à des outils juridiques.

Dans ce contexte de régression des surfaces en haies, d'échec des politiques d'incitations à préserver et planter de haies, et de difficultés de mise en œuvre, l'objectif de la SNBC de multiplier les surfaces en agroforesterie par 5 est d'autant plus ambitieux.

3.3. Mieux prendre en compte les pratiques stockantes dans la SNBC permettrait de renforcer le puits agricole

Les autres leviers envisagés dans la SNBC sont :

- l'augmentation des restitutions au sol de résidus de cultures et de matières organiques de qualité ;
- le développement des pratiques culturales agro-écologiques favorables à la séquestration de carbone, combinant notamment la réduction du travail du sol, sa couverture permanente et l'allongement des rotations de culture, ainsi que le développement des bandes enherbées.

3.3.1. Augmenter les restitutions de matière au sol, un levier qui peut être davantage développé

Décryptage

Pour augmenter le stockage dans les sols, la SNBC recourt à l'augmentation des restitutions au sol de résidus de cultures, issus de cultures intermédiaires², et de matières organiques de qualité.

Une augmentation massive des cultures intermédiaires.

Les surfaces de cultures intermédiaires (CI) passent globalement de 1,4 Mha en 2015 à 8,6 Ma en 2050 dans la SNBC. Dans un contexte de réduction de la surface en grandes cultures (-15 % sur la période), les CI couvrent ainsi 70 % des surfaces en grandes cultures en 2050. Les surfaces en CI recouvrent deux modalités différentes :

- les Cultures Intermédiaires Piège à Nitrates (CIPAN), lesquelles sont intégralement laissées au sol, triplent de 1,4 Mha en 2015 à 4,3 Mha en 2050 ;
- les Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE), dont la partie aérienne est intégralement récoltée, se développent massivement de 0 à 4,3 Mha en 2050.

Le triplement des CIPAN permet un stockage important de près de 5 MtCO₂/an en 2050. L'outil Climagri et l'inventaire CITEPA évaluent un gain carbone conséquent grâce à l'insertion des intercultures, de l'ordre de 5 MtCO₂/an en 2050 : 3,8 MtCO₂/an dans Climagri et 5 MtCO₂/an dans l'inventaire grâce au levier «insertion d'intercultures» (une catégorie plus large que les CIPAN). Avec l'agroforesterie, c'est donc le levier mobilisé permettant le plus de stockage supplémentaire dans les écosystèmes. Malgré leur augmentation massive, l'impact des CIVE sur le stockage carbone est pour le moment considéré comme nul, car la biomasse est exportée pour produire de l'énergie. La répartition des nouvelles cultures intermédiaires correspond donc à des arbitrages entre stockage carbone et production d'énergies bas carbone. Par ailleurs, le scénario SNBC tel que modélisé dans Climagri envisage une récolte plus importante des résidus de cultures des céréales à paille, les cannes de

maïs et les oléagineux que dans un scénario tendanciel, «au fil de l'eau». Cette perte est probablement compensée par l'introduction des CIPAN. De manière générale, l'impact des résidus de cultures (hors CIPAN) laissés ou retirés du sol n'est pas quantifié dans la SNBC.

La contribution des apports de matières organiques n'est que partiellement comptabilisée dans la SNBC. L'apport de matière organique exogène tels que les déchets des cantines ou des agro-industries est mentionné dans le texte de la SNBC, mais n'a pas été quantifié, de sorte que l'impact des MATières Fertilisantes d'Origine Résiduelles (MAFOR) et digestat sur le stockage du carbone dans les sols n'est par exemple pas comptabilisé. A noter que certains apports organiques diminuent par ailleurs dans la SNBC, du fait d'une moindre production de déjections liée à la diminution du cheptel ; et de la moindre restitution de résidus de culture évoquée ci-dessus.

Comparaison avec la littérature

L'étude 4p1000 analyse d'une part les pratiques d'insertion et d'allongement des cultures intermédiaires, en particulier les CIPAN ; et d'autre part la mobilisation et l'apport au sol de matières organiques exogènes supplémentaires.

Les surfaces de cultures intermédiaires de la SNBC sont cohérentes avec l'assiette technique potentielle.

L'étude 4p1000 propose une assiette technique maximale de 16 Mha (93 % des GC) sur lesquels il est possible d'introduire de nouvelles CI ou de prolonger les CI déjà en place, dans un contexte de SAU stable. La SNBC simule quant à elle 8,6 Mha de CI, dont 4,3 Mha en CIPAN et 4,3 Mha de CIVE, cette fois dans un contexte de baisse de la SAU. Les surfaces en CI de la SNBC sont donc cohérentes avec la littérature, et sur le plan technique, elles pourraient même être encore augmentées. Sur la base d'une assiette maximale de 93 % des grandes cultures établie dans 4p1000, les surfaces en CI pourraient encore augmenter de 2,5 Mha dans la SNBC pour atteindre 11 Mha.

D'autres cultures intermédiaires que les CIPAN pourraient être introduites.

L'étude 4p1000 considère un panel plus large de CI stockantes que les CIPAN, les CI courts ou longs, avec des implantations aux différentes saisons, alors que la SNBC est centrée sur l'utilisation de CIPAN, en général semées à l'automne. Les cultures intermédiaires pourraient donc possiblement être diversifiées, afin de maximiser ce levier de stockage. En outre, un rapport gouvernemental pointe la mise en œuvre variable de l'obligation d'implanter des CIPAN, notamment en raison des niveaux de biomasse insuffisants pour les rendre efficaces contre les nitrates (CGEDD, CGAER, 2020), et par extension permettant un moindre stockage du carbone, ce qui plaide en faveur d'un meilleur développement des CIPAN et pour la mise en œuvre d'autres types de CI.

² A noter que l'augmentation des résidus recouvre en partie le levier cité dans la partie suivante, relative à la couverture permanente des sols, puisque ce sont les cultures intermédiaires qui fournissent la plus grande part de résidus, et servent également à couvrir les sols. Nous choisissons de traiter le levier des cultures intermédiaires dans cette partie initiale.

La SNBC surévalue possiblement le stockage carbone à l'hectare des CI. Dans l'étude 4p1000, avec une assiette technique maximale de 16 Mha, le potentiel technique de stockage additionnel pour l'insertion et le prolongement des CI s'élève au total à 7,4 MtCO₂/an sur 30 ans, soit 0,4 tCO₂/ha/an. Or, en ramenant à l'hectare le stockage permis par les cultures intermédiaires dans la SNBC, on obtient plus de 1 tCO₂/ha/an, soit une intensité de stockage à l'hectare 3 fois supérieure, que les différences méthodologiques ne suffisent possiblement pas à expliquer (périmètre différent du levier selon que l'allongement des CI est inclus ou non ; distinction entre stockage et stockage additionnel). Cette différence d'intensité peut également être observée du point de vue du stockage global : la SNBC comptabilise un stockage d'environ 5 MtCO₂/an sur 4,3 Mha de CI, alors que 4p1000 modélise un gain de stockage supplémentaire à peine plus élevé : 7,4 MtCO₂, pour une surface presque quatre fois supérieure. La SNBC 2 n'a pas pu s'inspirer de l'étude 4p1000, qui n'était pas disponible au moment de sa construction, mais au-delà des questions de surfaces, l'intensité de stockage des CI gagnerait à être affinée dans l'inventaire national de GES et dans sa déclinaison utilisée pour la SNBC.

Les apports de matière organique peuvent marginalement renforcer le stockage. A occupation des sols constante, l'étude 4p1000 constate que les retours au sol sont déjà très élevés dans le scénario de référence. L'étude identifie toutefois un potentiel de ressources supplémentaires, bien que limité, principalement constitué de déchets alimentaires et de déchets verts nouvellement collectés, puis compostés ou méthanisés. L'étude 4p1000 évalue leur potentiel de stockage additionnel à moins de 1 MtCO₂eq/an sur une assiette maximale technique de 4,21 Mha. La SNBC mentionne l'intérêt de ces apports et un possible recours aux déchets verts et digestats, sans toutefois les dimensionner en termes de ressources et de stockage.

En conclusion, le levier consistant à augmenter les restitutions au sol de la SNBC porte essentiellement sur le développement des cultures intermédiaires, qui est légèrement sous-exploité dans la SNBC.

3.3.2. Développer les pratiques culturales favorables à la séquestration de carbone, suivant des modalités comptables restant à affiner

Décryptage

Un ensemble de pratiques stockantes complémentaires à mettre en œuvre. La SNBC prévoit de mobiliser conjointement plusieurs pratiques agro-écologiques comme la réduction du travail du sol, sa couverture permanente et l'allongement des rotations de culture, ainsi que le développement des bandes enherbées. Le scénario de référence souligne l'intérêt d'une approche systémique pour assurer la cohérence de ces leviers.

La SNBC adopte une comptabilité globalement conservatrice sur les pratiques stockantes. Les mesures agroécologiques stockantes ne sont que très partiellement prises en compte dans le chiffrage du puits SNBC et ses

projections. En effet, en raison du haut niveau d'incertitude, l'inventaire comptabilise de manière limitée et conservatrice les pratiques culturales (**Annexes Agriculture**). Pour les cultures restant cultures, des estimations de la matière organique des sols sont réalisées à l'aide d'indicateurs que sont le travail du sol et la fertilisation en utilisant une approche simple, utilisant un facteur d'émission (tier 1).

Si les projections de la SNBC ne captent que partiellement le potentiel de stockage de ces pratiques, des simulations ont été faites via l'outil Climagri à partir des hypothèses de surfaces, qui peuvent nous renseigner sur les gains carbone attendus :

- le semis direct continu augmente : il passe de 2 % à 30 % des surfaces en grandes cultures et le labour occasionnel tous les cinq ans passe de 1 % à 30 % des surfaces en grandes cultures entre 2015 et 2050. Chacune de ces pratiques devrait ainsi être mise en œuvre sur 4 Mha en 2050. Le stockage de carbone permis par le semis direct est estimé à 2,3 MtCO₂eq/an sur les 30 premiers centimètres sur 20 ans tandis que l'impact du labour occasionnel est estimé à 0,5 MtCO₂eq/an ;
- la couverture permanente, avec les cultures intermédiaires, et les cultures intercalaires en vigne et vergers.
 - les CI sont traitées dans la partie précédente Augmenter les restitutions au sol ;
 - les surfaces de cultures intercalaires en vignes et vergers atteignent respectivement 82 kha et 17 kha en 2050 représentant un stockage de 0,1 MtCO₂eq/an ;
- l'allongement de la durée des prairies temporaires est mobilisé : les surfaces de prairies temporaires avec une durée de vie de 5 ans sont généralisées, passant de 10 % en 2015 à 85 % en 2050, soit 935 000 ha en 2050. L'allongement des prairies temporaires devrait permettre un stockage de 0,5 MtCO₂eq/an.

Au total, l'ensemble de ces pratiques, hors CIPAN qui a été compté dans la partie précédente, représenterait un potentiel de stockage de 3,4 MtCO₂eq selon les simulations faites sur Climagri et n'ont pas été prises en compte dans les projections SNBC utilisant la méthode inventaire à l'exception de l'arrêt de labour, pourtant remis en cause dans la littérature scientifique (voir ci-dessous).

Comparaison avec la littérature

Les pratiques reprises dans la SNBC sont issues de la littérature scientifique disponible au moment de sa construction. Les pratiques agro-écologiques mentionnées dans la SNBC sont directement inspirées de l'étude INRAE de 2013, dont le périmètre couvre dix pratiques d'atténuation de l'agriculture, dépassant le seul stockage dans les écosystèmes. L'étude 4p1000, publiée a posteriori de la SNBC, en 2018, évalue un périmètre d'activités légèrement différent de celui de l'étude de 2013 et donc de la SNBC. Ainsi l'état de la science le plus avancé aujourd'hui n'a pas pu être inclus dans la SNBC.

Le gain carbone associé à la réduction du travail du sol, avec le passage au semis direct n'est plus justifié.

La SNBC propose des pratiques de semi-direct et de non-labour qui sont valorisées en termes de stockage carbone en cohérence avec les modalités de l'inventaire, c'est-à-dire selon les recommandations du GIEC au moment de sa construction. Dans le même sens, l'étude INRAE de 2013 prévoyait un bénéfice carbone à la réduction du travail du sol, de même que la simulation Climagri, qui simule un potentiel de 2,3 MtCO₂ de stockage. Toutefois, l'étude 4p1000 a progressé dans l'évaluation du non labour, ce qui a conduit à remettre en cause l'existence d'un bénéfice carbone. L'étude 4p1000 identifie en effet un faible gain de stockage de carbone sur l'horizon 0-30 cm, mais ce gain devient négligeable lorsque la totalité du profil de sol est considérée, soit sur un mètre de profondeur. La remise en cause de l'efficacité du non labour pour la séquestration du carbone n'enlève rien aux bénéfices de cette mesure pour la réduction d'émissions d'autres GES (diminution de la lixiviation, conséquence de la réduction de la minéralisation, et consommation réduite de combustibles fossiles avec la diminution des passages d'engins agricoles), ainsi que pour la biodiversité et la lutte contre l'érosion. Sur le plan strictement carbone, il convient en revanche de soustraire cette partie minime du stockage dans les projections à venir. Ce changement est déjà en marche avec la révision des recommandations du GIEC de 2019, qui réduit drastiquement le facteur de stockage lié à la réduction du travail du sol.

L'enherbement des vignobles et l'allongement de la période d'enherbement présentent un gain carbone limité, susceptibles de renforcer le puits.

L'étude 4p1000 évalue un faible potentiel de stockage additionnel pour l'enherbement des vignobles, avec près de 0,5 MtCO₂/an. Ces pratiques, à coûts faibles ou négatifs, sont donc susceptibles de renforcer à la marge le puits agricole SNBC, mais leurs estimations à travers Climagri et l'inventaire devraient pour cela être revues à l'aune des résultats de l'étude 4p1000. A l'heure actuelle par exemple, l'inventaire ne capte pas par exemple le gain carbone associé à un allongement des prairies temporaires.

La cohérence de certaines pratiques stockantes de l'étude 4p1000 avec les hypothèses de la SNBC sur la réduction du cheptel reste à évaluer.

L'étude 4p1000 évalue un potentiel de stockage additionnel important pour la pratique d'insertion de prairies temporaires dans les rotations avec un gain moyen de 466 kgCO₂/ha/an ; ou encore un potentiel plus faible pour la réduction de la fauche au profit du pâturage par exemple. Ces pratiques semblent compatibles les hypothèses de la SNBC sur l'augmentation de l'herbe dans les rations, mais la compatibilité des surfaces concernées dans l'étude 4p1000 avec la réduction du cheptel reste un impensé de l'étude 4p1000. Dans le système SNBC, l'insertion de prairies temporaires pourrait entraîner une augmentation trop importante du surplus fourrager par rapport au cheptel et aux besoins pour les bioénergies. Dans le même esprit, le passage de la fauche au pâturage exigerait une transition encore plus importante de la SNBC vers une alimentation en herbe des bovins, difficile à réaliser dans un contexte de réduction du cheptel.

En conclusion, le déploiement de plusieurs pratiques stockantes peut être renforcé dans la SNBC et la comptabilité de ces leviers mériterait d'être améliorée.

TABLEAU 3 : COMPARAISON SYNTHÉTIQUE DU PUIT AGRICOLE DE LA SNBC AVEC L'ÉTUDE 4P1000

	SNBC					Comparaison avec la littérature		
Orientation	Levier d'action	Assiette en 2050	Potentiel estimé avec Climagri par an sur 20 ans	Prise en compte dans l'inventaire et les projections SNBC (oui/non) ; et si oui, estimation du levier d'action	Catégorie d'inventaire associée	Levier d'action	Assiette	Potentiel de stockage additionnel (issu de l'étude 4p1000)
Limiter l'artificialisation des sols	Limiter les pertes de terres agricoles	6,1 Mha artificialisés	Ø	5 MtCO ₂ eq	Terres artificialisés	Ø	6,4 Mha artificialisés en 2050 (Solagro, 2016)	Ø
Préserver les prairies permanentes	Augmenter de la part du cheptel nourri principalement à l'herbe	8,8 Mha	Ø	7 MtCO ₂ eq	Terres cultivées (avec déstockage) ou Forêts (avec stockage)	Ø	Assiette technique maximale pour les pratiques sur prairies permanentes: 7 Mha (4p1000)	Ø
Développer l'agroforesterie	Plantation d'arbres en intra-parcellaires	0,07 Mha (0,2 % de la SAU totale)	12,4 MtCO ₂ eq	0,3 MtCO ₂ eq	Terres cultivées	Développement de l'agroforesterie intra-parcellaire	5,3 Mha de SAU de terres cultivées portant des arbres (2 % d'emprise d'arbres sur la SAU totale)	21 MtCO ₂ eq (sol et biomasse aérienne)
	Plantation de haies	1,8 Mha (6,7 % de haies sur la SAU totale)		9 MtCO ₂ eq	Prairies	Implantation de haies	8,83 Mha de SAU de terres cultivées portant des haies (0,8 % d'emprise de haies sur la SAU totale)	8 MtCO ₂ eq (sol et biomasse aérienne)
Augmenter les restitutions au sol de résidus de cultures et de matières organiques de qualité	Augmentation des apports en matière organique Produits Résiduaires Organiques (digestats, déchets verts et alimentaires)	Ø	Prise en compte du bilan azoté; sans quantification du stockage	Prise en compte dans les inventaires, sans modulation spécifique du stockage dans la SNBC	Terres cultivées et prairies	Apport au sol de matières organiques exogènes	4,21 Mha	0,3 MtCO ₂ eq
						Remplacer fauchage par le pâturage	7 Mha	0,07 MtCO ₂ eq
	Développement des CIPAN	4,3 Mha	3,8 MtCO ₂ eq	5 MtCO ₂ eq	Terres cultivées	Insertion et allongement des cultures intermédiaires (CIPAN, CI courts et longs)	16 Mha	6,6 MtCO ₂ eq

3. LA MOBILISATION DES LEVIERS, GLOBALEMENT CONFORME À DES SCÉNARIOS DE TRANSITION VOLONTARISTES

Orientation	SNBC					Comparaison avec la littérature		
	Levier d'action	Assiette en 2050	Potentiel estimé avec Climagri par an sur 20 ans	Prise en compte dans l'inventaire et les projections SNBC (oui/non) ; et si oui, estimation du levier d'action	Catégorie d'inventaire associée	Levier d'action	Assiette	Potentiel de stockage additionnel (issu de l'étude 4p1000)
Développer les pratiques agro-écologiques favorables à la séquestration carbone	Enherbement des vignes et vergers	0,1 Mha	0,1 MtCO ₂ eq	?	Cultures	Enherbement des vignobles	0,6 Mha	0,5 MtCO ₂ eq
	Semi direct	4 Mha en 2050	2,3 MtCO ₂ eq	Prise en compte dans l'inventaire et dans la SNBC	Cultures	Réduction du travail du sol avec passage au semis direct	11,29 Mha	0 MtCO ₂ eq
	Labour occasionnel	4 Mha en 2050	0,5 MtCO ₂ eq					
	Allongement de la durée des prairies temporaires	0,9 Mha	0,5 MtCO ₂ eq	Non	Cultures	Allongement et insertion de prairies temporaires dans les successions de grandes cultures	16 Mha	3,1 MtCO ₂ eq (principalement lié à l'insertion des prairies temporaires, qui est exclus de la SNBC)
Préserver les milieux agricoles humides	non précisé	non précisé	Ø	non	Catégorie de destination des terres en cas de conversion et Terres cultivées en cas de drainage	Ø	Ø	Ø

@i4ce_

Conclusion et tableau de synthèse

Les sols agricoles doivent passer d'émetteurs nets en 2015 (7 MtCO₂/an) à séquestrateurs nets en 2050 (-16 MtCO₂/an) ce qui correspond à une évolution du puits de 23 MtCO₂ sur la période 2015-2050. Cette inversion est permise par la mobilisation de trois grands leviers, qui sont par ordre d'importance : la multiplication par cinq des haies, l'arrêt du retournement des prairies, et la généralisation des intercultures auxquels s'ajoute la division par cinq de l'artificialisation des terres par rapport à 2015 permettant de préserver des prairies.

Le puits assigné aux écosystèmes agricoles en 2050 est très ambitieux, car nécessitant une inversion de tendances émettrices majeures à l'heure actuelle. Il semble néanmoins réaliste dans la mesure où il est globalement en-deçà du potentiel technique maximum estimé dans l'étude de référence 4p1000.

Prise individuellement, chacune des actions de stockage agricole de la SNBC apparaît cohérente avec des scénarios de transition volontaristes, mais certaines pratiques stockantes sont comptabilisées de manière insuffisante, c'est le cas par exemple de l'agroforesterie. De manière générale,

l'amélioration de la prise en compte des pratiques stockantes est indispensable au suivi du puits agricole.

Le tableau ci-dessous tente d'évaluer le degré de faisabilité des différentes composantes du puits prévues dans la SNBC, sur la base de la comparaison avec la littérature. Il combine à la fois une évaluation de la cohérence avec la littérature (hypothèses de la SNBC présentes ou non dans les études), mais tient également compte de la faisabilité des différents scénarios tels que discutés dans la littérature.

L'évaluation est faite selon les catégories suivantes :

- **VERT** : levier cohérent avec la littérature et dont la faisabilité n'est pas remise en cause.
- **ORANGE** : levier cohérent avec certains scénarios étudiés dans la littérature mais dont la faisabilité technique ou économique est mise en doute.
- **ROUGE** : levier non-cohérent avec les scénarios étudiés dans la littérature et qui fait face à un obstacle technique ou économique difficile à surmonter.

Composante du puits	Estimation du levier	Niveau de cohérence avec la littérature	Comparaison à la littérature	Faisabilité technique	Faisabilité économique	Niveau d'ambition
Développement des haies	7 MtCO ₂	Globalement cohérent	<ul style="list-style-type: none"> Estimation du stockage carbone cohérente avec la littérature Surfaces incohérentes avec la littérature 	Faisable techniquement, avec l'adaptation des systèmes techniques (machineries en grandes cultures)	Coûts élevés de mise en œuvre et adaptation des modèles économiques associés (valorisation du bois énergie)	Très élevé
Maintien des prairies	7 MtCO ₂	Cohérent	Surfaces cohérentes avec la littérature	Faisable techniquement, avec le passage à une alimentation en herbe	Adaptation des modèles économiques associés (montée en gamme avec l'alimentation en herbe)	Très élevé
Réduction de l'artificialisation des terres agricoles	5 MtCO ₂	Cohérent	Surfaces cohérentes avec la littérature	Faisable techniquement, avec l'augmentation de la densité sur des terres déjà artificialisées		Très élevé
Augmenter les cultures intermédiaires	3 MtCO ₂	Cohérent	Surfaces inférieures avec la littérature	Faisable techniquement	Faisable économiquement	Élevé
Leviers agricoles non attribués	2 MtCO ₂	Pas d'évaluation possible	Pas de comparaison possible	Non identifié	Non identifié	Non identifié

@i4ce_

Bibliographie

- European Court of Auditors. (2021). Common Agricultural Policy and climate – Half of EU climate spending but farm emissions are not decreasing.
- CGDD. (2019). Trajectoires vers l'objectif «zéro artificialisation nette»: Éléments de méthode.
- CGEDD, CGAER. (2020). Contribution à l'évaluation des programmes d'action contre la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole.
- France Stratégie. (2019). Objectif «Zéro Artificialisation Nette»: Quels leviers pour protéger les sols?
- Gedney, N. (2019). Significant feedbacks of wetland methane release on climate change and the causes of their uncertainty. *Environmental Research Letters*.
- Iddri. (2018). Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine.
- Iddri. (2021). Vers une transition juste des systèmes alimentaires - Enjeux et leviers politiques pour la France.
- INRAE. (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût.
- INRAE. (2019). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?
- Pointereau, P. (2002). Les haies : évolution du linéaire en France depuis quarante ans. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*.
- Solagro. (2006). La haie en France et en Europe: évolution ou régression au travers des politiques agricoles.
- Solagro. (2016). Scénario Afterres 2050.
- Sotteau, C. (2021). Evaluation du plan de développement de l'agroforesterie 2015-2020.

Puits de carbone :
l'ambition de la France
est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale
Bas-Carbone 2

Captage et Stockage géologique de CO₂

Auteurs :

Clothilde **Tronquet** (I4CE)

Thomas **Bonvillain** (I4CE)

Sommaire

Captage et Stockage géologique de CO₂ (CSC)

1. PANORAMA GLOBAL DU PUIT CAPTAGE ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO₂ (CSC) DANS LA SNBC	59
1.1. Une estimation indicative du volume de CSC, largement dépendante des bioénergies	59
1.1.1. Des modules de CSC associés à l'industrie et l'énergie, dans une économie décarbonée	59
1.1.2. Un cinquième du puits, principalement via la biomasse énergie	59
1.1.3. Les enjeux du stockage, en partie résolus	60
1.2. Un volume global cohérent avec la littérature, qui requiert une forte concentration des infrastructures	62
1.2.1. Le recours au CSC, en cohérence avec les scénarios d'atténuation globaux	62
1.2.2. La projection du volume total de CSC, en cohérence avec les estimations disponibles	62
1.2.3. Les modalités de stockage restent à préciser	63
1.2.4. Une technologie subordonnée à l'existence de grandes infrastructures	63
1.3. Éléments de mise en œuvre et conditions de réalisation	63
2. LES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DE CSC	66
2.1. La BECSC, un large potentiel incompatible avec une configuration diffuse des installations	66
2.1.1. Une estimation globale, adossée aux productions de biomasse	66
2.1.2. La projection BECSC, remise en cause par l'atomicité des installations et leur approvisionnement durable	66
2.2. Le CSC des émissions non-énergétiques dans l'industrie, une projection limitée et réaliste	68
2.2.1. Un traitement pour des procédés industriels émetteurs	68
2.2.2. Un objectif cohérent avec le gisement d'émissions	68
CONCLUSION ET TABLEAU DE SYNTHÈSE	69
BIBLIOGRAPHIE	70

1. Panorama global du puits Captage et Stockage géologique de CO₂ (CSC) dans la SNBC

1.1. Une estimation indicative du volume de CSC, largement dépendante des bioénergies

1.1.1. Des modules de CSC associés à l'industrie et l'énergie, dans une économie décarbonée

Le Captage et Stockage géologique de CO₂ (CSC) consiste dans la SNBC à récupérer, transporter et stocker du CO₂ issu exclusivement de productions industrielles et énergétiques. D'après la SNBC, le Captage et Stockage géologique de CO₂ (CSC) est un « processus consistant à extraire (piéger ou capter) un courant gazeux relativement pur de dioxyde de carbone (CO₂) des sources d'émissions industrielles et énergétiques, à le conditionner, à le comprimer et à le transporter vers un site de stockage afin de l'isoler de l'atmosphère pendant une longue période ». Autrement dit, en ajoutant un module aux infrastructures émettrices existantes, ou en le prévoyant dès la conception des nouvelles, il est possible de capter directement le CO₂ émis, avant qu'il ne se diffuse dans l'atmosphère et ne participe au forçage radiatif des GES. Cela se déroule donc en trois étapes : captation (qui consomme une grande quantité d'énergie), transport puis stockage. La nécessité de capter un flux concentré d'émissions exclut l'utilisation de cette technologie pour les transports, et autres émissions diffuses. Par ailleurs, l'option de capture du CO₂ directement dans l'atmosphère n'est pas étudiée « faute de données disponibles » mais la SNBC indique que ce procédé pourrait constituer une alternative ou un complément à la transition. Pareillement, l'option de captage, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS), dans des produits à longue durée de vie comme les matériaux de construction par exemple, n'est pas considérée, bien que son intérêt potentiel soit mentionné. Le choix d'exclure le recours à ces procédés de stockage dans les projections SNBC tient à la non-disponibilité de ces technologies à date, et témoigne d'une volonté de modérer les paris technologiques pour l'atteinte de la neutralité carbone.

Le CSC est susceptible d'être appliqué dans divers sous-secteurs industriels et énergétiques : la SNBC n'indique pas de manière détaillée à quelles activités le CSC sera associé, mais le potentiel identifié dans la SNBC porte sur un large panel de sous-secteurs industriels et énergétiques :

- Des centrales de production d'énergie (chaleur et/ou électricité) :
 - à partir de biogaz ;
 - à partir du bois (réseaux de chaleur urbain...).

- Des procédés industriels, intrinsèquement émetteurs ou utilisant la biomasse comme combustible :
 - biomasse utilisée pour des combustions à usage industriel ;
 - la fabrication du ciment passe par une réaction chimique qui émet du CO₂ ;
 - la chimie ;
 - la sidérurgie, la métallurgie ;
 - la papeterie.

En principe, le CSC ne devrait pas contribuer au maintien des énergies fossiles : la SNBC postulant une décarbonation quasi complète du secteur énergétique pour 2050, le CSC ne peut être appliqué à la combustion d'énergies fossiles. Toutefois, les hypothèses de la SNBC indiquent que si la décarbonation du mix énergétique n'est pas aussi rapide que prévu, le CSC pourrait également être employé sur les émissions fossiles afin de rattraper le retard. La SNBC spécifie en revanche que le développement des unités de CSC « ne devra pas avoir pour conséquence le maintien de l'utilisation d'énergies fossiles ».

1.1.2. Un cinquième du puits, principalement via la biomasse énergie

Le CSC pourrait compenser l'équivalent de 20 % des émissions nationales en 2050 : au même titre que les terres agricoles et la forêt, le recours au CSC permet de compenser les émissions résiduelles de la France en 2050. La part du CSC est non négligeable dans le puits projeté en 2050 puisque sa participation est de l'ordre de 15 MtCO₂/an sur un puits total de 82 MtCO₂/an, soit 18 % du puits national. Cette proportion est inférieure à celle du stockage dans les produits bois (20 MtCO₂/an), mais reste du même ordre de grandeur. C'est ainsi le troisième poste le plus important du puits en 2050, derrière les écosystèmes forestiers et les produits bois. Il est par ailleurs considéré dans la SNBC comme une solution permettant de maintenir une dynamique d'absorptions nettes sur le très long-terme, contrairement au puits dans les écosystèmes, dont les absorptions se réduisent à mesure que l'écosystème se rapproche d'un niveau d'équilibre.

Une estimation globale permet d'identifier un levier de 15 MtCO₂/an d'émissions évitées en 2050 : Pour chiffrer les émissions évitées par le CSC, la SNBC se base sur un potentiel théorique maximal pour la France : ce potentiel est évalué à presque 35 MtCO₂ en 2050, tous secteurs confondus. Considérant que différentes contraintes sont

susceptibles de brider ce potentiel, le volume chiffré est divisé par deux pour aboutir à un calibrage «a minima» de 15 MtCO₂/an. La division par deux du potentiel théorique ne correspond pas à une quantification précise des limites pouvant restreindre la mise en œuvre du CSC ; et dans le même sens, le chiffre de 15 MtCO₂/an d'émissions évitées ne correspond pas à une sélection spécifique d'activités auxquelles seraient associées le CSC.

Les deux tiers du puits de CSC sont liés à la biomasse énergie (BECSC), et un tiers est lié à l'industrie : Sur les 35 MtCO₂ de potentiel théorique, l'évaluation du CSC distingue 76 % d'émissions liées à la biomasse énergie avec captage et stockage du carbone (BECSC¹) (26 MtCO₂) et 24 % de CSC industriel (8 MtCO₂). Sur la base de cette répartition des potentiels techniques de trois quarts BECSC et un quart CSC industriel, la SNBC projette une répartition pour les 15 MtCO₂ retenus en 2050, faisant la part belle à la BECSC, avec deux tiers de BECSC et un tiers de CSC industriel :

- 10 MtCO₂/an sont associées à la BECSC. La majeure partie de ce stockage pourrait provenir des centrales de

biomasse-énergie (biogaz et bois chaleur), qui représente près de 70 % du potentiel technique BECSC ; tandis qu'une part plus restreinte serait captée sur des sites industriels utilisant directement la combustion de biomasse (30 % du potentiel technique BECSC). Ces derniers sites pourraient par exemple être des incinérateurs de déchets.

- 5 MtCO₂/an sont associées aux émissions « non-énergétiques de l'industrie », des émissions produites par des procédés industriels intrinsèquement émetteurs, en particulier la production de ciment et d'acier.

De la même manière que l'estimation globale de CSC ne correspond pas à une affectation à des sous-secteurs précis, la part attribuée aux deux grandes familles de CSC a été établie sans y associer des activités précises. Par exemple les 10 MtCO₂/an basées sur les bioénergies pourraient aussi bien être réalisés quasi exclusivement grâce à des centrales dédiées à la production d'électricité ou de chaleur pour les réseaux à partir de biogaz ; ou alternativement, grâce à des centrales utilisant le bois. Selon les combinaisons d'options retenues, les implications sur l'appareil industriel seront tout à fait différentes.

ENCADRÉ 1 : LES MODALITÉS COMPTABLES DU CSC

Puits VS réductions d'émissions : formellement parlant, le CSC associé à des énergies fossiles produit des réductions d'émissions et non des absorptions relevant du puits. Toutefois, afin de faciliter la lecture et pour mieux coller aux catégories de l'inventaire CCNUCC (catégorie 1C des inventaires), la SNBC comptabilise l'ensemble du CO₂ évité grâce au CSC dans le puits de carbone.

Emissions négatives à partir de la combustion de biomasse VS combustion fossile : dans l'inventaire national de GES, les émissions libérées par la combustion de fossiles sont comptabilisées différemment des émissions liées à la combustion de biomasse : les combustions fossiles sont comptabilisées dans les secteurs où la consommation du combustible a lieu (industrie, transport, énergie, etc.), alors que la combustion de la biomasse est comptabilisée soit, pour le bois, indirectement par le biais de la récolte en forêt, c'est-à-dire en diminuant d'autant la captation de CO₂ dans les écosystèmes forestiers ; soit elle n'est pas comptabilisée, c'est le cas de la biomasse énergie issue de cultures annuelles. Dans le cas du CSC à partir de biomasse, on parle ainsi « d'émissions négatives » car, contrairement au CSC associé à des énergies fossiles ou aux émissions non-énergétique de l'industrie, la BECSC stocke dans le sous-sol du CO₂ qui a été soutiré de l'atmosphère grâce à la photosynthèse, suivant un cycle relativement court de production et de dégradation de la matière, du moins par rapport aux fossiles.

Emissions évitées VS émissions stockées : le volume de CSC potentiel proposé dans la SNBC correspond au solde entre le total des émissions effectivement stockées, et les émissions nécessaires à l'activité de capture et stockage, de sorte que le volume de 15 MtCO₂ recouvre en réalité les émissions réellement évitées et non l'intégralité des émissions stockées, qui sont de l'ordre de 10 à 20 % supérieures.

1.1.3. Les enjeux du stockage, en partie résolus

Une capacité de stockage suffisante, mais dont les modalités restent à préciser : tout en reconnaissant que le potentiel total de stockage est « mal connu à terre et inconnu en mer », la SNBC considère que les capacités de stockage et leur localisation ne sont pas problématiques. Tout d'abord, la SNBC fait état de capacités de stockage qui permettent à la France de gérer cet aspect indépendamment de pays étrangers. La SNBC reprend ainsi une évaluation du BRGM qui estime entre 1 à 1,5 GtCO₂ les capacités de stockage sur

le territoire national, c'est-à-dire très largement supérieures à l'ambition pour 2050. Trois principaux bassins sédimentaires sont identifiés pour le stockage en France, soit des aquifères salins soit des champs de production d'hydrocarbures épuisés : le bassin parisien, le bassin d'Aquitaine et le bassin du Sud-Est (Figure 1). Le stockage offshore, bien qu'encore moins bien connu sur le territoire français, est cependant mentionné comme d'intérêt, notamment pour son degré supérieur d'acceptabilité sociale. Le projet Northern Lights, consistant à développer le stockage en Mer du Nord, joue un rôle de projet pilote pour démontrer la faisabilité du

1 En anglais BECCS pour « Bioenergy with carbon capture and storage ».

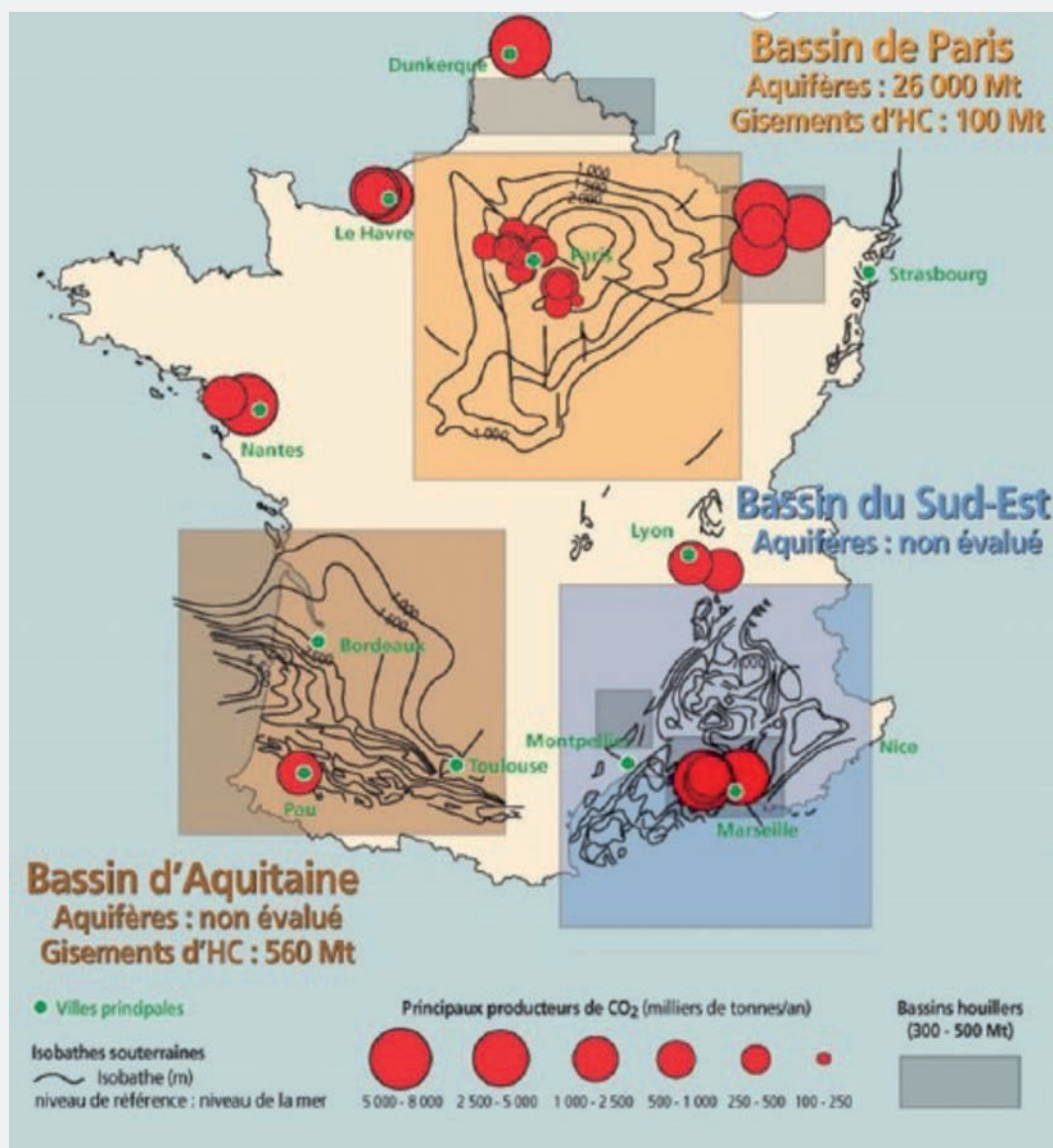
stockage en mer et calculer son coût. Il en ressort à l'heure actuelle que si la solution se révèle faisable techniquement, elle implique un coût relativement élevé. En résumé, le texte de la SNBC considère les deux options : sur terre et en mer, mais ne tranche pas sur le mode de stockage à adopter. Celui-ci dépendra de l'évolution des conditions techniques et économiques.

La colocalisation des émissions avec les sites de stockage n'est pas toujours assurée : la SNBC estime que la colocalisation des principaux centres industriels émetteurs de CO₂ et des grands bassins de stockage potentiels est globalement correcte en France, et ce, en dépit du fait que certaines zones industrielles n'aient pas encore de site de stockage identifié à proximité. Les options de stockage offshore sont susceptibles de renchérir le coût des tonnes de CO₂ stockées, mais elles semblent plutôt appropriées pour des sites industriels et énergétiques localisés sur les

côtes, par exemple de l'Ouest et du Nord de la France : Le Havre ou Dunkerque. Les sites émetteurs inventoriés dans la SNBC correspondent à des sites destinés au CSC industriel ; aucune indication n'est en revanche fournie sur la nature des installations, la concentration des émissions et la localisation des sites qui pourraient être destinés à la BECSC.

Les enjeux d'acceptabilité sociale et environnementaux restent en suspens : les sites de stockage sur terre sont susceptibles de faire l'objet de contestation sociale, cet enjeu est mentionné dans la SNBC sans être approfondi. Quant aux risques environnementaux qui pourraient découler du stockage, comme les fuites, la SNBC ne les aborde pas car il a été considéré que les normes européennes en matière de sécurité des sites de stockage sont suffisantes pour prévenir ces aléas.

FIGURE 1. IDENTIFICATION DES SOURCES DE CAPTATION ET DES LIEUX DE STOCKAGE EN FRANCE MÉTROPOLITAINE



Source : SNBC

1.2. Un volume global cohérent avec la littérature, qui requiert une forte concentration des infrastructures

1.2.1. Le recours au CSC, en cohérence avec les scénarios d'atténuation globaux

Le recours au CSC est reconnu comme de plus en plus inévitable pour atteindre la neutralité carbone à l'échelle globale : L'utilisation du CSC dans la SNBC est cohérente par rapport aux trajectoires globales projetées à 2050 dans la littérature, celles-ci prévoient en effet un recours à ces technologies, et ce, d'autant plus que les objectifs d'atténuation ne sont pas atteints :

- la majorité des simulations mondiales de trajectoires bas-carbone à 2050 reprises dans les derniers rapports du GIEC ont recours aux technologies de CSC.
- l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) considère dans un rapport sur le sujet qu'il sera « quasiment impossible » d'atteindre la neutralité carbone sans le CSC (AIE, 2020).

Les auteurs de la SNBC estiment donc que, même si cette technologie présente plusieurs limites, ses avantages sont tels qu'on ne peut se permettre de s'en passer sous peine de devoir fournir des efforts plus conséquents ailleurs. Cette question d'arbitrage n'est pas spécifique au CSC puisqu'elle est valable pour les autres éléments du puits de la SNBC, en revanche elle pose des questions différentes au sens où le CSC est le moins bien connu et le moins développé des éléments du puits dans les écosystèmes (estimations du potentiel et des coûts plus complexes par manque de données, pari sur le développement de cette technologie, etc.).

L'utilisation limitée du CSC dans la SNBC cadre avec un scénario d'atténuation «intermédiaire» : le CSC a été développé dans les années 1990 avec pour objectif de capter les émissions issues d'énergies fossiles. Par la suite, le recours au CSC dans les négociations climatiques est apparu historiquement, non comme un moyen d'augmenter les objectifs climatiques, mais plutôt comme un moyen de continuer à s'inscrire dans la trajectoire à +2°C puis +1,5°C, et ce, en dépit des retards sur les objectifs de réductions d'émissions (McLaren, D., Markusson, N., 2020). Par conséquent, l'utilisation du CSC dans les scénarios projetés varie en règle générale selon le degré de décarbonation de l'économie. Par exemple, dans les scénarios socio-économiques repris par le GIEC, plus la décarbonation est importante, moins l'utilisation de CSC est nécessaire ; plus les émissions résiduelles restent élevées, plus il est nécessaire d'avoir recours (tôt) au CSC pour les compenser. C'est

d'ailleurs ce que prévoit l'AIE dans son scénario d'évolution du mix énergétique mondial² dans lequel le CSC permet de stocker 1 GtCO₂ dès 2030, contre 23 MtCO₂ aujourd'hui. La SNBC table quant à elle sur un recours modéré au CSC, ce qui l'inscrirait dans un scénario intermédiaire en termes de mobilisation de ce levier technologique. De plus, la SNBC postule l'utilisation du CSC dans le contexte d'une énergie déjà quasi-décarbonée, ce qui la différencie significativement de la plupart des scénarios recourant au CSC. Néanmoins, la SNBC reconnaît qu'en cas de retard dans la transition énergétique, le développement du CSC pourra servir à contrebalancer l'utilisation des carburants fossiles.

1.2.2. La projection du volume total de CSC, en cohérence avec les estimations disponibles

Le potentiel de CSC en France est difficile à évaluer, mais le chiffrage de la SNBC est réaliste : à date, peu de littérature spécifique existe sur le potentiel du CSC en France. Il est difficile de trouver des éléments de référence et de comparaison, tant pour la partie industrielle que pour la partie concernant les centrales de biomasse-énergie.

Dans un avis publié par l'Ademe en 2020, le potentiel du CSC industriel en France (hors BECSC et hors production électrique à partir de fossiles) est chiffré comme « pouvant aller jusqu'à 24 MtCO₂/an » (Ademe, 2020). Si le seul CSC Industrie peut atteindre un potentiel de plus de 20 MtCO₂/an, on peut envisager que le CSC total (Industrie et BECSC) pourrait aisément atteindre le puits de 15 MtCO₂/an prévu en 2050. La SNBC limitant à 5 MtCO₂/an le volume de CSC dans l'industrie, l'Ademe juge cet objectif « compatible » avec ses propres estimations.

En complément, l'exercice de prospective Transition(s) 2050, publié fin 2021 par l'Ademe, permet également d'inscrire la projection de CSC de la SNBC par rapport à des scénarios de transition possibles. Deux des quatre des scénarios construits par l'Ademe envisagent un développement important du CSC en France, et projettent des volumes d'émissions évitées supérieurs à ceux de la SNBC (Ademe, 2021). Sans surprise, il s'agit des scénarios les plus tournés vers des options technologiques :

- le scénario 3 « Technologies Vertes » (S3) correspond à « Plus de nouvelles technologies que de sobriété », il projette 21 MtCO₂/an de BECSC en 2050³.
- le scénario S4 « Pari Réparateur » (S4) maintient le système de consommation de masse, il projette 29 MtCO₂/an de BECSC en 2050⁴.

A l'inverse, les scénarios 1 et 2, respectivement orientés vers la frugalité et l'économie du partage ne développent pas cette technologie.

Un rapport de l'AIE est plus ambitieux et confiant que la SNBC en soulignant le potentiel, jugé important et réaliste,

² Voir le « Sustainable Development Scenario » (aligné avec l'Accord de Paris) : <https://www.iea.org/reports/world-energy-model/sustainable-development-scenario>

³ La technologie BECSC des scénarios de l'Ademe inclut les activités catégorisées comme « CSC industriel » dans la SNBC.

⁴ La technologie BECSC des scénarios de l'Ademe inclut les activités catégorisées comme « CSC industriel » dans la SNBC.

de ces technologies. L'AIE prévoit ainsi pour l'Europe dans son « Sustainable Development Scenario » un développement du CSC tel qu'il permettrait de stocker 35, 350 et 700 MtCO₂/an respectivement en 2030, 2050 et 2070 (AIE, 2020). Les estimations ne sont pas déclinées par pays, mais dans un tel scénario, le puits de CSC français tel projeté dans la SNBC représenterait 4 % du puits européen en 2050. La comparaison du volume global de CSC dans la SNBC avec les estimations existantes est cohérente, mais il convient de rappeler que leur comparabilité n'est pas optimale dans le sens où les différents scénarios postulent un mix d'installations associées au CSC différent, qui peut notamment intégrer des infrastructures industrielles utilisant des combustibles fossiles, ce qui est exclu de la SNBC.

1.2.3. Les modalités de stockage restent à préciser

L'objectif de CSC est cohérent par rapport aux capacités de stockage globales en France : les travaux du BRGM⁵ ont permis d'identifier les sites de stockage retenus dans la SNBC. Ils évoquent un potentiel de stockage de 1 à 1,5 GtCO₂ au global pour la France, permettant aisément de gérer les 15 MtCO₂/an prévus par la SNBC. La capacité de stockage ne semble donc pas être une difficulté sur le plan quantitatif.

Des travaux restent à mener sur l'identification des sites de stockage : si le potentiel de stockage total sur terre en France ne semble pas poser de problème globalement, l'identification de sites spécifiques, dont la capacité soit suffisante et dont la localisation soit pertinente par rapport aux hubs industriels d'émissions de CO₂, reste en partie à faire. Des travaux de prospection de sites de stockage ont déjà été réalisés sur deux des trois bassins identifiés. Dans le bassin parisien, plusieurs sites ont été identifiés avec des capacités allant de 20 à 150 MtCO₂ grâce au projet France Nord piloté par Total et GDF Suez. Dans le Bassin Sud-est, le projet VASCO, visant à identifier des sites pour les installations de la zone industrielle Fos-Berre-Lavéra-Gardanne-Beaucaire, n'a en revanche pas permis de trouver des sites à la capacité suffisante.

L'acceptation sociale des sites de stockage est un obstacle : le déploiement du CSC dans la SNBC compte sur l'hypothèse qu'il n'y ait pas de problème majeur d'acceptabilité du stockage. Or, l'Ademe insiste sur le défi de l'acceptation sociale de ces installations. De nombreux projets de CSC ont été stoppés en Europe suite à une mobilisation des populations locales. L'étude Rosa *et al.* (2021) retient uniquement des espaces de stockage offshore en Mer du Nord, considérant que ceux-ci sont plus acceptables sur le plan social, bien qu'ils posent des problèmes de transport. D'autre part, l'étude recommande que le stockage onshore soit développé, pour réduire les coûts et difficulté de transport. La SNBC est alignée avec ces constats et recommandations en proposant des sites sur terre (bassin parisien, aquitain et sud-est), tout en reconnaissant que les sites en mer offrent un degré supérieur

d'acceptabilité. Il conviendrait d'examiner davantage ces aspects dans la SNBC.

1.2.4. Une technologie subordonnée à l'existence de grandes infrastructures

Une part limitée des infrastructures existantes atteint le niveau d'émissions requis : la mise en œuvre du CSC exige un volume d'émissions par unité de captation suffisamment élevé, impliquant notamment pour la BECSC un usage centralisé de la biomasse. Ainsi deux tiers du potentiel BECSC européen identifié par Rosa *et al.* (2021) seraient captés sur des sources relativement importantes d'émissions (papeterie par exemple⁶) tandis que le tiers restant le serait sur des installations à émissions plus diffuses. La carte illustrant la SNBC (voir Figure 1) signale les émetteurs susceptibles de mettre en œuvre du CSC industriel, représentant un tiers seulement du potentiel CSC de la SNBC. En revanche, les infrastructures susceptibles de mettre en œuvre la BECSC, représentant les deux tiers du CSC, ne sont pas spécifiées.

Des estimations de l'Ademe permettent d'évaluer les installations existantes adaptées au CSC :

- les gisements de BECSC : actuellement, en France, les sources d'émissions de CO₂ issues de la biomasse sont principalement des chaufferies à bois, dont la puissance est globalement insuffisante pour y appliquer cette technologie. L'Ademe souligne que la majeure partie des chaudières biomasse ont une puissance trop faible (inférieure à 100 MW) pour faire l'objet d'un déploiement de CSC sur leur site (Ademe, 2020).
- les gisements de CSC industriel : l'Ademe écarte plus de 90 % des sites français car ils émettent moins de 100 ktCO₂/an et ne pourront donc faire appel au CSC industriel à un prix raisonnable (Ademe, 2020).

Cette configuration diffuse des installations entraîne un rendement moindre, et donc des coûts supérieurs, eux-mêmes renchérissés par les coûts de transport, selon la distance séparant les installations émettrices des sites de stockage. Elle rend difficile l'utilisation du CSC en général, et en particulier la projection de BECSC, en l'état des infrastructures.

1.3. Éléments de mise en œuvre et conditions de réalisation

Une technologie nouvelle, dont les projections restent incertaines : contrairement aux chapitres précédents, où « l'effet puits » des secteurs agricole et forestier est d'ores-et-déjà mis à contribution, le CSC n'est à ce jour pas encore pleinement effectif. Si pour le secteur des terres un historique et une projection de l'évolution du puits de la SNBC sont présentés, une telle référence n'existe pas pour le CSC. La SNBC mentionne que le « déploiement progressif » du CSC doit être engagé dès 2030, mais il n'existe pas d'objectifs

5 <https://www.brgm.fr/fr>

6 L'étude inclut l'industrie papetière dans les BECSC, ce qui n'est pas le cas de la SNBC.

quantitatifs intermédiaires détaillant à quel rythme ces technologies doivent se développer pour être capables de stocker les 15 MtCO₂/an prévues en 2050.

Le CSC est constitué d'un ensemble de techniques qui nécessitent encore d'être optimisées. A l'heure actuelle, seule une vingtaine de projets de CSC à grande échelle fonctionnent au niveau mondial (hors démonstrateurs), les trois quarts aux USA ou au Canada. Les premiers ont été lancés dans les années 90 et ils concernent principalement des exploitations pétrolières. Le volume stocké reste pour l'instant relativement faible : environ 23 MtCO₂/an (pour un total cumulé, à date, de 260 MtCO₂) (Ademe, 2020). Malgré un nombre encore limité d'installations fonctionnelles, les projets de CSC connaissent un nouvel essor en Europe, avec 76 projets (incluant les démonstrateurs) dans 16 pays (Ifri, 2021). En France, seul un projet démonstrateur, géré par Total, a été fonctionnel. Désormais fermé, il a permis de stocker un peu plus de 60 000 tCO₂ (Ademe, 2020). Malgré un recours limité à ces nouvelles technologies dans la SNBC, il n'en reste pas moins que leur utilisation et leur massification pour l'atteinte des objectifs restent incertaines.

Une technologie à développer rapidement pour assurer ses capacités à horizon 2050 : le puits de 15 MtCO₂/an de CSC prévu en 2050 suppose un développement technologique important. En effet, le puits national projeté pour 2050 devrait se rapprocher du puits CSC mondial actuel (23 MtCO₂/an). En raison de l'incertitude quant au développement du CSC, il convient d'amorcer les recherches et expérimentations sur ces processus industriels le plus en amont possible. En ce sens, l'AIE invite l'ensemble des pays à penser dès maintenant la place du CSC, et des technologies associées, dans leurs stratégies carbone (AIE, 2020). L'agence insiste sur la nécessité de créer le plus rapidement possible des incitations à l'investissement pour ce procédé puisque son développement nécessitera encore plusieurs années. De même, l'Ademe indique dans un avis technique que des financements importants doivent être déclenchés dès maintenant. En effet, les auteurs rappellent que la R&D nécessaire au développement de projets de CSC requiert de l'ordre d'une dizaine d'années pour aboutir et doit donc être anticipée (Ademe, 2020).

Dans cette perspective, la SNBC se fixe comme orientation le soutien au développement d'unités pilotes et éventuellement commerciales en capture et stockage du carbone (CSC) et en capture et utilisation du carbone (CUC). Plusieurs projets de recherches et d'application, tant sur la captation que sur le stockage, sont en cours en France. En 2019, un projet H2020 a été attribué au BRGM pour piloter la « Strategy CCUS »⁷ qui doit permettre de faire la démonstration des potentialités du CSC sur le territoire français. Des projets de stockage dans les fonds marins en Mer du Nord (offshore) sont également à l'étude, à l'image du projet Northern

Lights en Norvège, qui pourrait devenir le premier réseau de transport et de stockage de CO₂ transfrontalier accessible aux tiers ; ou encore les projets Aramis et d'Artagnan, proches des Pays-Bas, et auxquels la France participe.

Ce développement technologique doit aussi permettre d'identifier et d'encadrer les risques liés à ces technologies, par exemple pour prévenir les fuites potentielles de carbone. Ces projets pourront ainsi contribuer à étoffer le cadre législatif du CSC, aujourd'hui encadré par la transposition d'une directive européenne de 2009.

Des « hubs » de CO₂ pour réduire les coûts : une des stratégies envisageables pour répondre à la contrainte de la concentration d'émissions est de rassembler des sites suffisamment émetteurs de CO₂. Ces hubs d'émissions permettraient des économies d'échelle sur les infrastructures de traitement et de transport liées au CSC (processus de purification ; de compression ; infrastructures : canalisations, bateaux pour l'offshore, etc.). Les principaux centres industriels français existants pourraient devenir des hubs de CSC : ils sont soit directement desservis par un port (Fos, le Havre, Dunkerque...) soit accessibles par voies navigables (vallée du Rhône, Bassin parisien).

Un besoin de coopération entre les acteurs du secteur, et de concertation avec la société civile : le développement de cette technologie nécessite la coopération d'acteurs majeurs, publics et privés, du secteur de l'énergie. Une partie de la capacité de la France à remplir ses objectifs SNBC repose également sur la dynamique internationale sur le sujet. Si elle agit seule, la France aura bien plus de mal à développer une technologie de CSC efficace et à coût optimal que si elle interagit avec le reste du monde (et surtout avec ses voisins pour ce qui est du stockage). Des exemples de cette nécessaire participation à des projets internationaux existent déjà comme Northern Lights en Norvège, auquel Total Energies participe⁸. Au-delà de la coopération entre acteurs industriels, énergéticiens et gouvernements, une concertation avec les parties prenantes locales, et notamment les citoyens, semble nécessaire, au vu des craintes que peuvent susciter le développement de ces installations de CSC.

Un coût estimé au minimum à 60 €/tCO₂ en 2050 (soit 900 M€/an au total) : Le scénario SNBC propose une évaluation du coût du CSC, dont les valeurs sont à prendre avec précaution en raison du peu de données actuellement disponibles. L'estimation est réalisée à partir des connaissances disponibles au moment de la construction de la SNBC 2. Elle différencie le coût de captage du coût de transport et de stockage. Selon le secteur concerné, la SNBC estime que le prix du captage varie de 40 à 100 €/tCO₂, avec la plupart des valeurs entre 45 et 65 €/tCO₂. Dans cette estimation, le captage dans le secteur industriel est considéré environ 15 % moins cher que dans le secteur énergétique, possiblement en raison des concentrations

⁷ <https://www.brgm.fr/sites/default/files/documents/2020-10/communique-strategy-ccus-capture-stockage-co2-cp.pdf>

⁸ <https://www.totalenergies.com/fr/medias/actualite/communiqués-presse/feu-vert-pour-le-projet-de-northern-lights-en-norvege>

de CO₂ plus élevées dans l'industrie. Les coûts de transport et le stockage sont estimés à environ 20 €/tCO₂, mais ils sont susceptibles d'être multipliés par deux ou par trois dans le cas d'un stockage en mer. C'est donc le captage qui coûte le plus cher (environ 75 % du coût total en 2020, puis plus de 80 % en 2050). Suivant une hypothèse de décroissance linéaire des coûts, de l'ordre de 1 % par an, le scénario aboutit à un coût global du CSC en 2050 d'environ 60 €/tCO₂, soit un total de 900 M€/an en 2050 pour atteindre les 15 MtCO₂ séquestrées par an. Il y a donc un enjeu à rendre cette technologie économiquement et énergétiquement rentable.

Le scénario SNBC fait l'hypothèse d'une décroissance du coût du CSC de 1 % par an (les coûts relatifs à la surveillance des sites de stockage étant compris). La validité de ce postulat est compliquée à évaluer du fait, encore une fois, du manque de données disponibles. Néanmoins, l'avis de l'Ademe cité plus haut évoque cette question du coût. Les auteurs soulignent le défi de taille que représente la réduction du coût du CSC (évalué de 100 à 150 €/tCO₂). Deux facteurs limitent la réduction du coût de cette technologie :

- elle est très consommatrice d'énergie ;
- elle doit être adaptée au cas par cas (il faut prendre en compte les spécificités de chaque installation, il y a donc peu d'économies d'échelle permises).

Pour ces raisons, l'Ademe estime que le CSC portant sur les émissions non-énergétiques de l'industrie « ne verra donc pas ses coûts réduits drastiquement par un effet d'échelle ».

2. Les différents compartiments de CSC

2.1. La BECSC, un large potentiel incompatible avec une configuration diffuse des installations

2.1.1. Une estimation globale, adossée aux productions de biomasse

La BECSC représente les deux tiers des émissions évitées par le CSC en 2050 dans la SNBC, soit environ 10 MtCO₂/an d'émissions « négatives ». Il s'agit de capter du carbone produit par la combustion de biomasse énergie, dans des centrales de biomasse-énergie sur des sites industriels ou sur des sites de production d'électricité et de chaleur (biogaz et biomasse). Comme indiqué précédemment, la BECSC est qualifiée « d'émissions négatives » car elle stocke des émissions captées directement dans l'atmosphère grâce à la photosynthèse (voir Encadré 1).

La nature des installations associées à la BECSC reste à déterminer : Le potentiel technique maximal d'émissions évitées grâce à la BECSC s'élève à 26,4 MtCO₂/an en 2050, soit 2,5 fois plus que la projection retenue pour 2050. Le potentiel technique identifié se décompose de la manière suivante :

- 8 MtCO₂/an issues du biogaz utilisé pour la production d'électricité ou de chaleur pour les réseaux ;
- 10 MtCO₂/an issues des centrales bois énergie (électricité) ou chaleur (réseaux de chaleur urbain) ;
- 8,5 MtCO₂/an de biomasse industrielle, qui pourraient inclure par exemple des incinérateurs de déchets, des usines de traitement de l'eau (Rosa, 2021), ou encore des bioraffineries (Ademe, 2021), etc.

Au-delà de cette répartition indicative du potentiel technique maximal, le type d'installations sur lesquelles la BECSC sera développée n'a pas été spécifié. Les activités BECSC sont susceptibles de porter soit sur un seul type d'installation (100 % centrales bois par exemple), soit sur un panel de solutions (un tiers de centrales biogaz, un tiers de centrales bois énergie, un tiers de diverses installations « biomasse industrielle »).

La quantité de BECSC dépend des hypothèses de production de bois et de biomasse agricole, et pas l'inverse : la quantité de biomasse disponible pour la BECSC découle des hypothèses de décarbonation formulées pour les autres secteurs ; et spécifiquement les approvisionnements nécessaires en bois et biomasse agricole. La quantité de biomasse disponible pour la BECSC est donc calculée « en bout de chaîne », en cohérence avec les hypothèses de production industrielles,

agricoles et forestières, de sorte que l'introduction de la technologie BECSC dans la SNBC ne devrait pas entraîner d'accroissement des besoins en biomasse dans la modélisation. Cette construction est censée assurer que la production de biomasse destinée à l'énergie n'aura aucun impact négatif supplémentaire sur l'usage des sols et la sécurité alimentaire.

2.1.2. La projection BECSC, remise en cause par l'atomicité des installations et leur approvisionnement durable

Le volume de BECSC dans la SNBC est inférieur au potentiel identifié dans la littérature : l'étude Rosa *et al.* (2021) estime que 200 MtCO₂/an pourraient être captées en Europe grâce à la BECSC (correspondant à 5 % des émissions européennes en 2018), dont 21 MtCO₂/an en France, correspondant à 5 % des émissions françaises de 2018. Dans ce contexte, la France serait un des principaux acteurs de la BECSC en Europe, derrière la Suède, l'Allemagne, le Royaume Uni, et la Finlande. Le potentiel identifié de 21 MtCO₂/an en BECSC (papeterie incluse) est un chiffre proche des estimations de potentiel maximum reprises dans la SNBC (26 MtCO₂) ; et représente le double de ce que la SNBC projette de manière effective pour 2050. Le volume de BECSC de la SNBC semble donc réaliste. Dans le même sens, les deux scénarios de la prospective de l'Ademe pour 2050 utilisant le CSC, projettent des émissions BECSC d'au moins 15 MtCO₂ en 2050 (Ademe, 2021).

Les installations associées à la BECSC dans la SNBC ne recoupent que partiellement les activités identifiées dans la littérature : deux études datant de 2021 proposent des potentiels BECSC par activité, en 2050 au niveau français : Rosa *et al.*, qui simule un potentiel européen et par Etat membre ; et les scénarios prospectifs de transition pour 2050 de l'Ademe. Les mix d'activités BECSC varient selon les hypothèses des études ; et sont difficilement comparables à la SNBC, qui n'offre pas ce niveau de détail. L'étude Rosa *et al.* (2021) répartit le potentiel BECSC français de la manière suivante :

- Les sources diffuses de biomasse dirigées vers le biogaz 13 MtCO₂/an (BECSC énergie), dont :
 - résidus de culture : 7 MtCO₂/an ;
 - fumiers : 3 MtCO₂/an ;
 - déchets alimentaires : 2,7 MtCO₂/an.
- Les installations industrielles existantes (Biomasse industrielle) : 8 MtCO₂/an, dont :
 - incinérateurs : 4 MtCO₂/an ;
 - papeterie (émettant plus de 100 000 tCO₂) : 4,2 MtCO₂/an ;
 - traitement des eaux usées (des villes de plus de 100 000 habitants) : 0,2 MtCO₂/an ;

Les scénarios prospectifs S3 et S4 de l'Ademe recourent en particulier aux utilisations BECSC suivantes⁹ :

- cogénération industrie et tertiaire, en particulier les réseaux de chaleurs (BECSC énergie) : $\geq 10 \text{ MtCO}_2/\text{an}$;
- bioraffineries (Biomasse industrielle) : $\geq 5 \text{ MtCO}_2/\text{an}$.

Il est difficile de comparer ces leviers à la SNBC, car la SNBC ne détaille pas la répartition attendue des installations BECSC :

- concernant la BECSC énergie, les hypothèses de la SNBC évoquent un potentiel technique équivalent du bois chaleur et du biogaz, sans en distinguer les différents usages. La prospective Ademe met quant à elle l'accent sur l'intérêt des

réseaux de chaleur, notamment dans les usages industriels. De manière distincte, l'étude Rosa *et al.* privilégie nettement les infrastructures de biogaz pour la France.

- concernant la BECSC industrielle, la SNBC ne précise pas à quelles industries cette technologie sera appliquée, à l'exception de la papeterie. La prospective Ademe souligne le potentiel important des bioraffineries produisant du bioéthanol ; un potentiel qui n'est pas mis en avant pour la France dans l'étude Rosa *et al.* Cette dernière étude considère en revanche que les incinérateurs de déchets représentent un potentiel non négligeable en France, équivalent à la papeterie¹⁰.

TABEAU 1 : POTENTIEL BECSC EN FRANCE

Potentiel BECSC en France (en MtCO_2/an)	Activités	Etude Rosa <i>et al.</i> , 2021	Scénarios 3 et 4 de Transition(s) 2050, Ademe, 2021	Potentiel technique maximal identifié dans la SNBC	Projections SNBC selon les hypothèses AMS
BECSC énergie	Bois chaleur	0	> 10	10	10
	Biogaz	12,6		8	
Biomasse industrielle	Biomasse industrielle (hors papeterie)	4,2	> 5	8,5	
	Papeterie	4,2		1,1	
Total		21	> 15	27,6	10

Sources : I4CE à partir des données SNBC; Ademe, 2021; Rosa *et al.*, 2021.

@i4ce_

L'atomicité des infrastructures rend difficile la mise en œuvre de la BECSC : le recours à la BECSC nécessite un usage suffisamment centralisé de la biomasse dans des installations fixes, alors qu'aujourd'hui la bioénergie est davantage utilisée dans de petites installations de manière diffuse (par exemple chauffage individuel), c'est une des limites au développement de la BECSC. L'Ademe détaille qu'actuellement «les chaudières biomasse installées sont de petites capacités qui ne correspondent pas aux critères pour le CSC (même pour les industries de type papeterie

ou bioéthanol)». L'avis technique indique qu'en deçà d'une puissance de 100 MW, en raison du faible volume de CO_2 généré, le coût de captage des chaudières de bois-énergie serait trop élevé pour mettre en œuvre cette technologie (Ademe, 2020).

En 2020, le nombre de chaudière de ce type en fonctionnement en France métropolitaine était de 51 installations, avec une puissance moyenne de 12,4 MW¹¹. Seules deux de ces 51 installations dépassent la puissance de 23 MW.

ENCADRÉ 2 : LE PROJET DE GARDANNE

A l'heure actuelle, le seul projet français de centrale de biomasse-énergie dépassant la puissance installée de 100 MW requise pour l'application de CSC est le projet de reconversion de la centrale à charbon de Gardanne (Bouches du Rhône). Pensé depuis une dizaine d'années, ce projet a suscité une vive réaction de la part de la société civile et des associations environnementales à cause de sa taille. La centrale est supposée consommer 850 000 tonnes de bois chaque année et son approvisionnement en biomasse, notamment, pose question.

Ce projet, après avoir été suspendu en 2017 par un jugement du tribunal administratif de Marseille, devrait finalement voir le jour suite à l'arrêt rendu par la cour administrative d'appel de Marseille en décembre 2020¹² qui invalide la précédente décision et permet donc l'exploitation du site.

Une évaluation précise de l'approvisionnement en biomasse est nécessaire : le recours à la BECSC suppose un approvisionnement en biomasse suffisamment important et il est indispensable d'évaluer les impacts de la production

de biomasse supplémentaire et de son éventuelle importation. Dans la SNBC, la BECSC est considérée sans impact sur la conversion des sols, les surfaces et la production agricoles.

⁹ Certaines activités recensées comme des BECSC par l'Ademe sont libellées différemment dans la SNBC.

¹⁰ A noter que la SNBC considère les papeteries dans CSC industriel, et non dans BECSC industriel.

¹¹ http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/energie_renouvelable_france/ObservER-Barometre-EnR-Electrique-France-2020.pdf

¹² http://marseille.cour-administrative-appel.fr/content/download/178239/1753238/version/1/file/arr_%C3%AA%2017MA03489%2017MA03528.doc.pdf

Les Cultures Intermédiaire à Vocation Énergétique (CIVE) qui alimenteront en partie les méthaniseurs sont par exemple introduites en tant qu'intercultures sur des surfaces déjà cultivées. Ces estimations et les hypothèses associées ne correspondent pas aux résultats obtenus dans des publications récentes ; et nécessitent donc une évaluation plus approfondie.

Au niveau national, une étude de France Stratégie quantifie la biomasse disponible pour des usages énergétiques dans des scénarios tendanciel et agroécologique. Elle conclut que, même en retenant l'option agroécologique, qui permet d'augmenter significativement la production de biomasse, la biomasse disponible pour des usages énergétiques demeure inférieure aux projections de la SNBC (France Stratégie, 2021). Selon les auteurs, ce résultat s'expliquerait par des différences de méthodes : méthodes d'estimations, hypothèses de surfaces, de rendements agricoles et arbitrages sur les vecteurs énergétiques, incertitudes liées aux cultures dédiées pérennes et annuelles. Une étude devrait être menée par l'INRAE pour 2022 afin d'examiner la ressource biomasse disponible pour les différents usages en France.

En complément, dans le cadre de la prospective Transition(s) 2050, l'Ademe projette un potentiel de biomasse mobilisable pour les usages énergétiques inférieur à celui de la SNBC : le scénario S4 de l'Ademe parvient à valoriser de la biomasse énergie à hauteur de 337 TWh, alors que la SNBC envisage une mobilisation encore plus élevée, à hauteur de 431 TWh. Cette différence tient en partie à une projection moindre de production de biomasse agricole de type CIVE, destinée à la méthanisation, et par extension à la BECSC. Les chiffres de l'Ademe sont accompagnés de recommandations sur la prise en compte des risques de concurrence entre usages alimentaires et non-alimentaires.

Dans le même sens, mais au niveau européen cette fois, une étude conclut qu'à l'échelle européenne la ressource en biomasse actuelle n'est pas suffisante pour pouvoir être utilisée durablement dans toutes les applications actuellement envisagées (Material Economics, 2021). Une autre étude met également en garde sur les ressources limitées en biomasse considérée comme durable (résidus agricoles, etc.) (Rosa, 2021).

2.2. Le CSC des émissions non-énergétiques dans l'industrie, une projection limitée et réaliste

2.2.1. Un traitement pour des procédés industriels émetteurs

Un tiers des émissions captées et stockées en 2050 proviendra de l'industrie, soit 5 MtCO₂/an : le CSC sera développé dans des usines dont les processus industriels génèrent de fortes concentrations d'émissions de CO₂. En effet, même dans une économie à l'énergie décarbonée,

les procédés physico-chimiques de certaines industries continueront à émettre de CO₂, à l'image de la fabrication du ciment.

L'application du CSC à la fabrication du ciment suffirait à remplir l'objectif de CSC industriel : la fabrication du ciment concentre l'essentiel du potentiel maximum de CSC industriel sur les émissions non-énergétiques : 5 sur les 8 MtCO₂/an identifiées dans les hypothèses de la SNBC. Les autres secteurs concernés sont : la papeterie, la sidérurgie/métallurgie et la chimie, avec des potentiels techniques d'environ 1 MtCO₂/an chacun. Ainsi l'application du CSC au gisement d'émissions des cimenteries permettrait à lui seul de couvrir l'objectif de 5 MtCO₂/an.

La compatibilité avec les industries émettrices dépend de la trajectoire de décarbonation : le recours au CSC n'est possible que si des sources d'émissions centralisées, c'est-à-dire des infrastructures, sont maintenues en quantité suffisante. Les objectifs relatifs au CSC ont donc été calculés par rapport à ceux concernant la décarbonation du mix énergétique français et ceux relatifs au développement de l'industrie française.

Si le nombre de ces infrastructures venait à ne pas évoluer comme prévu par la SNBC, les objectifs concernant le CSC s'en verraient modifiés en conséquence. Paradoxalement, un moindre recours au CSC peut être une bonne nouvelle, si cela correspond à des progrès dans la décarbonation des sites industriels et énergétiques français (d'autant que le CSC ne compensera jamais l'intégralité des émissions du site où elle est implantée). Il faudra en revanche veiller, si développement ou maintien de ces sites il y a, à ce qu'un morcellement trop important de ces sources d'émissions ne vienne empêcher le déploiement du CSC.

Dans ce contexte, une délocalisation importante de l'industrie française pourrait être problématique car d'une part, les émissions seraient possiblement relocalisées dans des pays n'ayant pas les moyens techniques et financiers de mettre en œuvre du CSC ; et d'autre part, cela pourrait diminuer considérablement le niveau d'émissions de certains hubs industriels et donc empêcher la mise en œuvre de CSC sur les sites non-délocalisés à cause d'un coût prohibitif.

2.2.2. Un objectif cohérent avec le gisement d'émissions

Le volume de CSC industriel de la SNBC est inférieur au potentiel technique identifié dans la littérature : dans un avis technique, l'ADEME estime le potentiel de CSC industriel (hors BECSC et hors production électrique à partir de fossiles) comme « pouvant aller jusqu'à 24 MtCO₂/an » (Ademe, 2020), soit un gisement près de cinq fois supérieur à la projection retenue pour 2050 dans la SNBC. Le chiffre du volume de CSC industriel de la SNBC semble donc raisonnable.

Conclusion et tableau de synthèse

Malgré l'incertitude et les contraintes multiples qui pèsent sur le développement du CSC, les objectifs de volumes captés et stockés dans la SNBC semblent réalistes au regard de la littérature existante.

Les projections du volet BECSC, qui représente l'essentiel du puits de CSC, exigent un dimensionnement important des installations utilisant la biomasse énergie, qui est loin de correspondre à la réalité actuelle du tissu industriel des filières bioénergies en France.

Or, la tendance générale n'est pas à une augmentation de la taille des installations : la révision de la directive européenne RED II va notamment rendre plus strictes les modalités d'approvisionnement en biomasse. De plus, les installations de grande taille font souvent face à une vive opposition de la part de la société civile et des associations environnementales.

Le tableau ci-dessous tente d'évaluer le degré de faisabilité des différentes composantes du puits prévues dans la SNBC, sur la base de la comparaison avec la littérature. Il combine à la fois une évaluation de la cohérence avec la littérature (hypothèses de la SNBC présentes ou non dans les études), mais tient également compte de la faisabilité des différents scénarios tels que discutés dans la littérature.

L'évaluation est faite selon les catégories suivantes :

- **VERT** : levier cohérent avec la littérature et dont la faisabilité n'est pas remise en cause.
- **ORANGE** : levier cohérent avec certains scénarios étudiés dans la littérature mais dont la faisabilité technique ou économique est mise en doute.
- **ROUGE** : levier non-cohérent avec les scénarios étudiés dans la littérature et qui fait face à un obstacle technique ou économique difficile à surmonter.

	Composante du puits	Estimation du levier	Niveau de cohérence avec la littérature	Comparaison à la littérature	Faisabilité technique	Faisabilité économique	Niveau d'ambition
Stockage géologique	BECSC	10 MtCO ₂	Cohérent	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de stockage carbone cohérent avec la littérature. • Mix d'infrastructures de bioénergies en partie cohérent avec la littérature. • Fournitures en biomasse en partie cohérente avec la littérature. 	Difficile techniquement : <ul style="list-style-type: none"> • Technologie à optimiser. • Massification nécessaire des centrales utilisant la biomasse énergie. • Filières d'approvisionnement de grande ampleur en bioénergies. 	Coûts élevés de R&D et de mise en œuvre.	Très élevé
	CSC industriel	5 MtCO ₂	Cohérent	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de stockage carbone cohérent avec la littérature. • Mix d'infrastructures industrielles cohérent avec la littérature. 	Plutôt difficile techniquement : <ul style="list-style-type: none"> • Technologie restant à développer, mais basée sur des infrastructures existantes. 	Coûts élevés de R&D et de mise en œuvre.	Elevé

@i4ce_

Bibliographie

- Ademe. (2020). *Avis de l'Ademe - Captage et Stockage géologique du CO₂ (CSC) en France.*
- Ademe. (2020). *Captage et stockage géologique de CO₂ (CSC) en France.*
- Ademe. (2021). *Transition(s) 2050: Choisir maintenant, agir pour le climat.*
- AIE. (2020). *A new era for CCUS - CCUS in clean energy transition - Analysis.*
- AIE. (2020). CCUS in clean energy transitions. *Energy technology perspectives.*
- AIE. (2020). *World Energy Model Documentation.*
- BRGM. (2019). Programme H2020: Coup d'envoi à Orléans de Strategy CCUS, grand projet de capture et de stockage de CO₂.
- Cour Administrative d'appel de Marseille. (2020). Arrêt portant sur l'exploitation de la centrale de Provence à Gardanne.
- France Stratégie. (2021). *Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel ?*
- Ifri. (2021). *Un nouvel élan pour le captage, stockage, et utilisation du carbone en Europe.*
- Material Economics. (2021). *EU Biomass Use In A Net-Zero Economy - A Course Correction for EU Biomass.*
- Rosa, L. D. (2021). Assessment of Carbon Dioxide Removal Potential via BECCS in a Carbon-Neutral Europe. 14 (5): 3086 97. <https://doi.org/10.1039/D1EE00642H>. *Energy and Environmental Science.*

Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ?

Analyse de la Stratégie Nationale
Bas-Carbone 2

| Annexes

Annexes Forêt-Bois

Annexe 1 : Etat des lieux de la littérature

TABEAU COMPARATIF ET SYNTHÉTIQUE DE LA LITTÉRATURE

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)
Description des scénarios	<p>3 scénarios avec des objectifs de prélèvements contrastés, évalués sur la période 2015-2050, et déclinés avec un scénario de changement climatique fort (RCP8.5) et un scénario prenant en compte l'évolution de la croissance des arbres selon la densité des forêts :</p> <p>A1) Extensification, le scénario de référence :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Poursuite de la capitalisation dans l'écosystème dans un contexte de risques climatiques accrus, avec peu de forêts gérées avec un objectif de production ; • Récolte maintenue au niveau de 2015, le bois énergie reste le débouché principal pour les feuillus et les usages bois matériaux se développent avec l'importation de résineux. <p>A2) Dynamiques territoriales :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les régions pilotent les politiques forestières, conduisant au renforcement de l'hétérogénéité actuelle entre les territoires ; • Augmentation de la récolte, due à une forte demande en biomasse énergie et à une expansion de la ressource et conduisant à une capitalisation moindre du puits en forêt ; • La demande en bois énergie pénalise le bois industrie développant tout de même de nouveaux procédés de valorisation des feuillus. <p>A3) Intensification :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gestion plus active, spécialement en forêt privée, permise par une transition économique et politique, accompagnée d'un plan de reboisement ; • Forte augmentation des taux de prélèvements avec la réduction des âges d'exploitabilité, réduisant fortement le puits dans les écosystèmes ; • Les effets de substitution sont maximisés avec le développement de nouvelles filières pour les feuillus, impulsées par la puissance publique. <p>Le modèle économique FFSM est utilisé pour déterminer de manière endogène et comparer des variables économiques telles que le prix, les quantités offertes et demandées, selon les différents scénarios, en faisant varier des paramètres comme les comportements des propriétaires forestiers et les conditions de mise en marché. Des simulations sont ensuite</p>	<p>5 scénarios modélisant une augmentation du niveau de récolte, par prélèvement partiel d'une catégorie de forêt, évalués sur la période 2015-2040 :</p> <p>REF) Référence : maintien des pratiques courantes de gestion :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les forêts activement gérées sont éclaircies et récoltées ; • Les forêts en surdensité sont récoltées et ne sont pas éclaircies ; • Les forêts sur-matures ou difficilement exploitables ne sont ni récoltées ni éclaircies. <p>SMAT) Sur-matures : Mobilisation de toutes les forêts sur-matures.</p> <p>DENS) Surdensité : mobilisation des forêts en retard d'exploitation avec éclaircie de toutes les forêts en surdensité .</p> <p>DIAM) Intensification de la gestion de toutes les forêts activement gérées, avec des durées de rotation raccourcies des forêts activement gérées (diamètre moyen de récolte réduit).</p> <p>MAX) Intensification de la gestion de toutes les forêts activement gérées, en combinant les 3 leviers des scénarios précédents.</p> <p>Les scénarios se présentent sous la forme d'un objectif progressif de mobilisation d'une catégorie de forêts, avec entre 1 et 10 simulations correspondant à différentes intensités en termes de taux de mobilisation à 30 ans : i) de 10 % à 100 % en surface (pour les forêts en surdensité et sur-matures) ou ii) de moins 1 à moins 10 cm de diamètre de récolte pour toutes les essences simultanément pour les forêts activement gérées.</p>	<p>Évaluation sur la période 2020-2050 ECOS) Priorité écosystème :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volumes d'équilibre atteints en 2050 avec des prélèvements de branches et de bois mort les plus bas possibles, en donnant la priorité aux stocks, à la fertilité et à la biodiversité. <p>R60) Compromis :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proche des volumes d'équilibre avec un prélèvement global stable de 60 Mm³/an en Bft vivant et une récolte modérée des branches et du bois mort. <p>R95) Priorité filière :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Récolte maximum techniquement réalisable de branches et de bois mort pour atteindre un prélèvement de 95 Mm³/an en 2050. <p>Pour chaque scénario, les trois situations-type (surfaces en libre évolution ; sylviculture continue ; impasses) sont gérées avec des traitements, une composition et des coupes différentes.</p>

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)									
Description des scénarios (suite)	réalisées en incluant des politiques publiques incitatives permettant de soutenir des trajectoires de filières dynamiques et ainsi sortir de la trajectoire tendancielle, lorsque que cela s'avère nécessaire. Le modèle FFSM n'inclut pas de changement des préférences des consommateurs, ni d'évolution technique majeure ou des capacités de transformation notable : il ne comporte pas de module spécifique visant les investissements dans les filières de transformation.											
Production biologique et mortalité	<p>Méthode de calcul et unité de mesure :</p> <p>Production biologique nette, calculée à partir des taux de prélèvements et des disponibilités techniques en Mm³, exprimés en bois total : bois fort + menus bois.</p> <p>Le modèle MARGOT simule la ressource par classes de diamètre.</p> <p>Résultats :</p> <p>La production biologique nette en bois total est estimée à 102,6Mm³ en 2015.</p> <p>Hors CC, la production biologique des feuillus suit une tendance à la hausse du fait de la jeunesse des peuplements : de 90 Mm³, jusqu'à 110 à Mm³ en 2050.</p> <p>La gestion intensive en A3 réduit la mortalité, en raison de l'adaptation des peuplements, par rapport à A1 et A2 pour lesquels la mortalité de fond évolue au gré du vieillissement.</p> <p>Plus spécifiquement, l'accroissement net toutes essences confondues hors CC, s'élève au maximum à 130 Mm³/an en A1 et au minimum à 123 Mm³/an en A3. Le CC ralentit la production, qui plafonne pour les feuillus et est en légère augmentation pour les résineux. Il accentue également la mortalité additionnelle, de 0,13 % pour les feuillus et de 0,76 % pour les résineux. Au total, le scénario RCP8.5 entraîne une baisse d'environ 30Mm³ des projections d'accroissement net.</p>	<p>Méthode de calcul et unité de mesure :</p> <p>Production biologique brute donnée en Mm³/an de bois fort tige.</p> <p>La modélisation est basée sur une croissance appliquée à chaque placette en fonction de ses caractéristiques propres d'âge, de fertilité et densité. La mortalité est définie d'après les données de l'inventaire, comme une fraction de volume aérien constant par essence transférée au réservoir 'mortalité'.</p> <p>Résultats :</p> <p>Dans REF, la production biologique décroît : passant de 83,6Mm³ en 2015 à 78,5Mm³ en 2040, en raison du vieillissement des peuplements.</p> <p>A l'inverse, les scénarios d'augmentation des prélèvements conduisent à un rajeunissement de la forêt française et donc à une augmentation de la production biologique une fois les coupes réalisées, atteignant au 90 Mm³ pour DIAM et jusqu'à 98 Mm³ pour MAX. Le niveau de production se stabilise ensuite à partir de 2035-2040.</p>	<p>Méthode de calcul et unité de mesure :</p> <p>La production biologique est exprimée en m³, en brut et en net, en Bft et en bois total (avec les coefficients de Lousteau). La production brute est considérée constante, sur la base des données IFN, sauf dans les situations d'impasses.</p> <p>Résultats pour la production actuelle :</p> <table><tr><th>Production biologique</th><th>brute</th><th>nette</th></tr><tr><td>Bft</td><td>90</td><td>80</td></tr><tr><td>Bois total (tige et branches)</td><td>135</td><td>120</td></tr></table> <p>Deux niveaux d'évolution de la mortalité (M1 et M2) sont simulés, M2 pouvant correspondre au scénario climatique RCP 8.5.</p> <p>La production nette moyenne totale (tige + branches) serait donc de 7,5 m³/ha/an.</p>	Production biologique	brute	nette	Bft	90	80	Bois total (tige et branches)	135	120
Production biologique	brute	nette										
Bft	90	80										
Bois total (tige et branches)	135	120										

@i4ce_

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)
<p>Puits de carbone dans les écosystèmes</p>	<p>Avec un stock de feuillus sur pied supérieur à 3Mds m³/an, A1 préserve un important puits de carbone dans les écosystèmes en 2050, de l'ordre de 132 MtCO₂/an, soit le double du puits A3 en 2050, qui s'élève à 62 MtCO₂/an, une séquestration inférieure à celle de 2015.</p> <p>Dans tous les scénarios, y compris les plus intensifs, les volumes de gros bois restent en augmentation.</p> <p>En A3, les coupes rases réduisent momentanément le stockage dans la biomasse, partiellement compensé par les effets de substitution et à la marge le stock dans les produits bois.</p> <p>Figure 6.2. Stockage annuel du carbone dans l'écosystème forestier sur la période 2016-2050, selon les trois scénarios de gestion et deux scénarios climatiques (en MtCO₂eq/an).</p> <p>Les effets d'un fort changement climatique sont susceptibles de réduire le stockage cumulé en forêt sur la période 2016-2050 de 27 % en A1 à 33 % en A3 (figure 6.3). Le stockage annuel diminue en 2050 d'environ 45 MtCO₂/an dans le scénario d'extensification, 35 MtCO₂/an dans le scénario Dynamiques territoriales, et de 20MtCO₂/an dans le scénario d'intensification.</p>	<p>Le volume de Bft est en augmentation dans REF pour atteindre 2948,6 Mm³ en 2040, avec un stock in situ correspondant plus de 200MtC. En raison d'une mobilisation accrue, les scénarios de gestion ralentissent l'augmentation du stockage in situ dans les premières années (SMAT et DIAM plafonnent autour de 2680 Mm³ de Bft) ou conduisent à une réduction temporaire de ce stockage. Lorsque les peuplements coupés repoussent, l'accélération du stockage de carbone est importante, sans pour autant atteindre les niveaux de séquestration de REF à horizon 2040.</p> <p>Les émissions liées à la diminution du volume de bois sur pied ne sont compensées que dans le scénario DIAM, par l'augmentation de la production biologique en forêt, cumulée à l'augmentation de la production de produits bois, et la substitution.</p> <p>Le carbone du sol n'est pas inclus dans la modélisation.</p>	<p>Le puits dans les écosystèmes est d'autant plus élevé que les prélèvements sont faibles :</p> <ul style="list-style-type: none">• Dans ECOS, le puits augmente de près de 6 tCO₂/ha/an à plus de 7 tCO₂/ha/an. Le puits total ECOS est supérieur avec M2 qu'avec M1, en raison de la plus forte baisse des prélèvements en M² entre 2020 et 2050.• Pour R60, le puits se maintient dans le temps autour de 6 tCO₂/ha/an. Cette légère hausse vient des plantations opérées après exploitation des peuplements en impasse.• Pour R95, le puits diminue de moitié du puits sur la période, de 6 à 3 tCO₂/ha/an. <p>Le rythme du stockage du carbone dans le sol n'est pas modulé par manque de données.</p> <p>■ Ss ■ Bmr ■ Bma ■ Bv ■ Pb</p>

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)																												
Niveaux de prélèvement et récolte	<p>Différentes méthodes pour établir les scénarios de récolte : la détermination du niveau de récolte s'opère de manière distincte suivant les études et les scénarios. Dans l'étude INRAE-IGN, les taux de prélèvements sont issus des observations empiriques de l'IGN, modulés à dire d'experts ou suivant un modèle de filière. L'étude BICAFF module les taux de prélèvements selon la catégorie de forêt et la surface de cette catégorie mobilisée : par exemple mobilisation de 50 % des forêts surmatures. Enfin, l'étude Fern-Canopée limite les surfaces gérées et fait varier dans les prélèvements la récolte des branches et du bois mort.</p> <p>La gestion s'intensifie de manière progressive en A2 et A3 :</p> <ul style="list-style-type: none">A1 : 50 Mm³/an de récolte (prélèvements-pertes d'exploitation) en 2050, exprimée en Volume Aérien Total, soit bois fort et menus bois, cumulant tous les usages, soit c'est-à-dire le maintien du niveau de récolte de 2015.A2 : 70 Mm³/an de récolte en 2050, correspondant à un maintien du taux de prélèvement de 2015, à 50 % de l'accroissement net. L'augmentation de la récolte reflète l'arrivée à maturité des forêts françaises, les prélèvements de feuillus augmentent de +40 % pour feuillus et de +20 % pour résineux ;A3 : 90 Mm³/an de récolte en 2050, soit +85 % sur la période, menant à un prélèvement de 70 % à 75 % de l'accroissement net. La gestion s'intensifie progressivement entre 2015 et 2035, puis les taux de coupes sont maintenus constants jusqu'en 2050. L'augmentation des prélèvements porte notamment sur les résineux (+70 % et de résineux, contre +50 % sur les feuillus). <p>Les impacts du CC entraînent une hausse de la récolte d'environ 10 Mm³ par scénario en 2050, due à des récoltes de sauvegarde.</p>	<p>La récolte augmente dans tous les scénarios. Dans REF, le taux de prélèvement augmente légèrement à 60 %, en raison de la structure en âge des forêts, qui arrivent à maturité.</p> <p>La récolte peut être multipliée par 1,5 en ciblant une catégorie de gestion, voire triplée dans le scénario combinant les trois leviers. La mobilisation accrue en 2030 est transitoire : elle ne peut pas être maintenue au-delà d'une décennie car elle provient en partie du stock de bois en forêt.</p> <table><tr><th>Mm³/an</th><th>2030</th><th>2050</th></tr><tr><td>REF</td><td>45</td><td>52</td></tr><tr><td>SMAT</td><td>81</td><td>53</td></tr><tr><td>DENS</td><td>52</td><td>59</td></tr><tr><td>DIAM</td><td>73</td><td>60</td></tr><tr><td>ALL</td><td>117</td><td>68</td></tr></table> <p>Les niveaux de récolte atteints après le pic de mobilisation sont supérieurs au niveau de référence, en raison du rajeunissement moyen de la forêt. Au total, la récolte supplémentaire sur la période 2015-2050 s'élève au maximum à 1 483 Mm³ cumulés dans MAX, contre 982 Mm³ au maximum dans l'étude INRAE-IGN.</p>	Mm³/an	2030	2050	REF	45	52	SMAT	81	53	DENS	52	59	DIAM	73	60	ALL	117	68	<ul style="list-style-type: none">ECOS : Baisse linéaire de 60 à 40 Mm³/an (30 Mm³ en M2), soit un taux de prélèvement de Bft de plus de 60 % de la production nette sur les surfaces en gestion (hors impasse) en 2050.R60 : Maintien à 60 Mm³/an (60 Mm³ en M2) soit un taux de prélèvement de 80 % en 2050 (hors impasses).R95 : Hausse linéaire de 60 à 95 Mm³/an (95 Mm³ en M²), correspondant à un prélèvement de 100 % la production biologique nette des 12,6 Mha exploitables en 2050. <p>En Impasses, le taux de prélèvement augmente rapidement au début, pour atteindre 100 % en 2050.</p> <p>Dans chaque scénario, les taux de prélèvements sont différenciés selon les catégories Bft, branches et du bois mort.</p>										
	Mm³/an	2030	2050																												
REF	45	52																													
SMAT	81	53																													
DENS	52	59																													
DIAM	73	60																													
ALL	117	68																													
Répartition entre les usages	<p>Les pourcentages de pertes d'exploitation restent stables et, compte tenu de limites méthodologiques, la répartition de la récolte entre usages évolue peu entre les scénarios. Elle s'établit en moyenne à : 38 % de BE, 34 % de BO et 28 % en BI. Le volume de la récolte est le principal déterminant dans l'évolution des usages (figure 4.6).</p> <p>Figure 4.6. Répartition des volumes de bois entrant dans la filière en 2015 et en 2050 selon les usages (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois-énergie) et les trois scénarios de gestion (en Mm³).</p>	<p>Avec l'hypothèse de maintien de la filière bois dans sa structure et son efficacité actuelles, l'affectation de la récolte entre usages reste identique par type de coupe et d'essence (éclaircie vs coupe finale, feuillu vs résineux) dans pour tous les scénarios. En moyenne, la répartition est de : 49 % de BE, 32 % de BO et 18 % en BI. Le volume de la récolte est le principal déterminant dans l'évolution des usages.</p>	<p>Le schéma actuel de la filière est maintenu. L'affectation entre les usages évolue selon les scénarios et la mortalité.</p> <p>ECOS : 50 % BO ; 50 % BIBE R60 : 43 % BO ; 57 % BIBE R95 : 36 % BO ; 64 % BIBE</p> <p>Prélèvements année 2050 (Mm³)</p> <table><tr><th>Scénario</th><th>BO</th><th>BIBE</th><th>BIBE/BO</th></tr><tr><td>Ecos-M1</td><td>20</td><td>20</td><td>1,00</td></tr><tr><td>Ecos-M2</td><td>15</td><td>15</td><td>1,00</td></tr><tr><td>R60-M1</td><td>25</td><td>26</td><td>1,31</td></tr><tr><td>R60-M2</td><td>23</td><td>27</td><td>1,40</td></tr><tr><td>R95-M1</td><td>32</td><td>45</td><td>1,79</td></tr><tr><td>R95-M2</td><td>30</td><td>54</td><td>1,88</td></tr></table> <p>Dans les scénarios Ecos et R60, les rapports BIBE/BO sont plus faibles que les valeurs actuelles. La hausse de la mortalité réduit la part de BO, de sorte que pour un scénario donné, le rapport BIBE/BO est supérieur en M2 par rapport à M1.</p>	Scénario	BO	BIBE	BIBE/BO	Ecos-M1	20	20	1,00	Ecos-M2	15	15	1,00	R60-M1	25	26	1,31	R60-M2	23	27	1,40	R95-M1	32	45	1,79	R95-M2	30	54	1,88
Scénario	BO	BIBE	BIBE/BO																												
Ecos-M1	20	20	1,00																												
Ecos-M2	15	15	1,00																												
R60-M1	25	26	1,31																												
R60-M2	23	27	1,40																												
R95-M1	32	45	1,79																												
R95-M2	30	54	1,88																												

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)																																																			
Bois matériau	<ul style="list-style-type: none">A1 : Avec 14,1 Mm³ de BO et 11,7 Mm³ de BI, la filière demeure globalement inchangée avec un déficit commercial : des grumes feuillues haut de gamme partent à l'exportation ; et des plaquettes, sciages, pâte, panneaux, meubles, sont importés.A2 : Avec 20,4 Mm³ de BO et 16,4 Mm³ de BI, la filière bois reste en déficit commercial, avec en particulier un déficit de sciages résineux.A3 : avec 27,4 Mm³ de BO et 21,7 Mm³ de BI, la production, consommation et exportations augmentent très significativement. De nouveaux procédés permettent la valorisation des feuillus, bien que pour chaque scénario, les résineux continuent de représenter environ 70 % de l'usage bois matériau en 2050.	<p>Dans REF, la récolte BOBI augmente légèrement, autour de 15 Mm³ de BO et 9 Mm³ de BI. Par ordre croissant, les scénarios DIAM, SMAT, et MAX permettent de récolter le plus de BO (entre 23 et 37 Mm³).</p> <table><tr><th colspan="2">Mm³/an (volumes répartis sur la base de la récolte, pertes de transformation non comprises)</th><th>2030</th><th>2050</th></tr><tr><td rowspan="2">REF</td><td>BO</td><td>14,4</td><td>16,64</td></tr><tr><td>BI</td><td>8,1</td><td>9,36</td></tr><tr><td rowspan="2">SMAT</td><td>BO</td><td>25,92</td><td>16,96</td></tr><tr><td>BI</td><td>14,58</td><td>9,54</td></tr><tr><td rowspan="2">DENS</td><td>BO</td><td>16,64</td><td>18,88</td></tr><tr><td>BI</td><td>9,36</td><td>10,62</td></tr><tr><td rowspan="2">DIAM</td><td>BO</td><td>23,36</td><td>19,2</td></tr><tr><td>BI</td><td>13,14</td><td>10,8</td></tr><tr><td rowspan="2">MAX</td><td>BO</td><td>37,44</td><td>21,76</td></tr><tr><td>BI</td><td>21,06</td><td>12,24</td></tr></table> <p>Malgré le maintien de l'affectation dans les scénarios, à noter qu'un scénario augmentant les coupes rases devrait augmenter en priorité la production de BO. SMAT conduit à l'augmentation des quantités de produits bois générés, en priorité via la mobilisation de BO (+67 %) mais qui se répercute sur la production de BI (+45 %) et de BE (+20 %) en raison de l'utilisation en cascade des connexes de transformation et des produits en fin de vie. A l'inverse, un scénario d'éclaircies, augmentera le BO de manière limitée.</p>	Mm³/an (volumes répartis sur la base de la récolte, pertes de transformation non comprises)		2030	2050	REF	BO	14,4	16,64	BI	8,1	9,36	SMAT	BO	25,92	16,96	BI	14,58	9,54	DENS	BO	16,64	18,88	BI	9,36	10,62	DIAM	BO	23,36	19,2	BI	13,14	10,8	MAX	BO	37,44	21,76	BI	21,06	12,24	<p>Les volumes de BO augmentent dans tous les scénarios : de 20 Mm³ dans le scénario ECOS à 34 Mm³ dans R95.</p> <table><tr><th>Mm³ en 2050</th><th>BO</th><th>BIBE</th></tr><tr><td>ECOS</td><td>20</td><td>20</td></tr><tr><td>R60</td><td>26</td><td>34</td></tr><tr><td>R95</td><td>34</td><td>61</td></tr></table>	Mm³ en 2050	BO	BIBE	ECOS	20	20	R60	26	34	R95	34	61
	Mm³/an (volumes répartis sur la base de la récolte, pertes de transformation non comprises)		2030	2050																																																		
REF	BO	14,4	16,64																																																			
	BI	8,1	9,36																																																			
SMAT	BO	25,92	16,96																																																			
	BI	14,58	9,54																																																			
DENS	BO	16,64	18,88																																																			
	BI	9,36	10,62																																																			
DIAM	BO	23,36	19,2																																																			
	BI	13,14	10,8																																																			
MAX	BO	37,44	21,76																																																			
	BI	21,06	12,24																																																			
Mm³ en 2050	BO	BIBE																																																				
ECOS	20	20																																																				
R60	26	34																																																				
R95	34	61																																																				
Puits dans les produits bois	<p>Le stockage reste faible dans tous les scénarios, malgré l'augmentation de l'usage bois matériau dans les scénarios A2 et A3, : de 0,8 MtCO₂ au minimum en A1, jusqu'à 7,3 MtCO₂ au maximum en A3 avec boisement (avec un pic du à la valorisation des peuplements rasés pour le reboisement).</p> <p>Figure 4.7: Stockage annuel de carbone dans les produits de la filière bois française selon les trois scénarios de gestion (en MtCO₂/an).</p>	<p>L'évolution du stock de carbone dans les produits bois est calculé à chaque pas de temps à partir d'un stock initial nul. Les scénarios de gestion permettent une faible augmentation du stock dans les produits bois, autour de 2 MtCO₂.</p>	<p>Dans l'étude Fern-Canopée, le stock de carbone dans les produits bois représente environ 1 tCO₂/ha/an en début de période. Le puits dans les produits bois diminue en ECOS et en R60. Il augmente en R95, passant de 1,2 tCO₂/ha en 2020 à 1,8 tCO₂/ha en 2050.</p>																																																			

Hypothèses	Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique, INRAE-IGN (2017)	BICAFF : Bilan carbone de la ressource forestière française, Ademe (2017)	Gestion forestière et changement climatique, Fern-Canopée (2020)																														
Bois énergie	La demande en bois-énergie augmente en A2 et A3, en particulier pour alimenter les réseaux de chaleur. En A3, la récolte de BE passe de 25 Mm³ à 29 Mm³ entre 2015 et 2050 dans A3. Aucune hypothèse spécifique n'est faite sur la valorisation des déchets bois en BE.	Dans REF, la récolte BE augmente progressivement, jusqu'à 25 Mm³ en 2040. Les scénarios de gestion active augmentent significativement le BE à horizon 2025-2030 par rapport à REF, mais ces prélèvements sont transitoires. L'affectation BE reste stable, bien que dans un scénario d'éclaircies, on puisse considérer que la récolte irait prioritairement en BE. Des alternatives sont listées pour atteindre plus rapidement les objectifs de BE nationaux : diriger la biomasse supplémentaire vers la filière énergie ; importer davantage de BE.	R95 présente une forte augmentation du bois énergie.																														
		<table><tr><th colspan="2">Mm³/an</th><th>2030</th><th>2050</th></tr><tr><td>REF</td><td>BE</td><td>22,05</td><td>25,48</td></tr><tr><td>SMAT</td><td>BE</td><td>39,69</td><td>25,97</td></tr><tr><td>DENS</td><td>BE</td><td>25,48</td><td>28,91</td></tr><tr><td>DIAM</td><td>BE</td><td>35,77</td><td>29,4</td></tr><tr><td>ALL</td><td>BE</td><td>57,33</td><td>33,32</td></tr></table>	Mm³/an		2030	2050	REF	BE	22,05	25,48	SMAT	BE	39,69	25,97	DENS	BE	25,48	28,91	DIAM	BE	35,77	29,4	ALL	BE	57,33	33,32	<table><tr><th>Mm³</th><th>BE récolté sur la période</th></tr><tr><td>ECOS</td><td>429</td></tr><tr><td>R60</td><td>631</td></tr><tr><td>R95</td><td>966</td></tr></table> Les scénarios prévoient de n'utiliser en bois-énergie que le bois non valorisable en produits durables. Ils supposent également une amélioration du rendement des équipements de chauffage, le tout permettant d'aboutir à un bénéfice potentiel par substitution-énergie.	Mm³	BE récolté sur la période	ECOS	429	R60	631
Mm³/an		2030	2050																														
REF	BE	22,05	25,48																														
SMAT	BE	39,69	25,97																														
DENS	BE	25,48	28,91																														
DIAM	BE	35,77	29,4																														
ALL	BE	57,33	33,32																														
Mm³	BE récolté sur la période																																
ECOS	429																																
R60	631																																
R95	966																																
Surface forestière et plan de reboisement	Aucun déboisement n'est considéré et tous les scénarios considèrent que la surface forestière s'accroît de 40 000 ha/an par accrus. Une variante de A3 prévoit un plan de reboisement de 500 000 ha en 10 ans. Les plantations sont réalisées sur des terres déjà forestières, soit en situation d'impasses, soit en déficit de gestion. Le boisement cible 7 essences ayant différentiel de productivité de +10 m³/ha/an en moyenne par rapport à la situation actuelle. Le boisement permet au total une augmentation de 313 Mm³ de volume forestier et +2,5 Mm³ de récolte.	La surface boisée est constante.	La surface forestière est constante à 16,1 Mha. En prenant en compte les verrous techniques et fonciers, la surface potentiellement exploitable en 2050 est établie à 12,5 Mha, soit 78 % de la forêt française. 3 % de la forêt française est volontairement mise en libre évolution en plus des 22 % bloqués, soit en tout 25 % de la forêt française (4 Mha) sans prélèvements entre 2020 et 2050. Les surfaces en impasse, telles que définies par le Département de la santé des forêts selon le protocole Deperis (Goudet & Nageleisen, 2019), et affinées avec par exemple la méthode « Archi » (Sajdak, 2019 ; Drénou & Caraglio, 2019) sont reboisées en l'absence de régénération naturelle. Les surfaces en impasse à renouveler par plantation sont estimées en 2019 à 486 000 ha, soit 3 % de la forêt française.																														

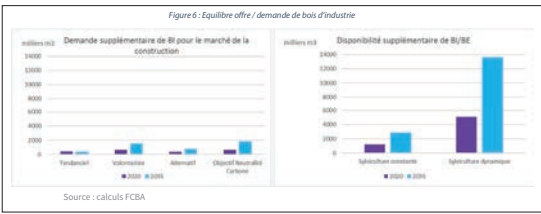
@i4ce_

Hypothèses	Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, IGN-FCBA (2016)	Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments, FCBA (2019)
Description des scénarios	<p>Estimation des volumes de bois disponibles sur la période 2016-2035 en quantité et en qualité, confrontés à des scénarios prospectifs de la demande industrielle et énergétique.</p> <p>2 scénarios de gestion :</p> <p>SC) Sylviculture constante, réalisé sur la base des coupes observées en 2016 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Maintien des pratiques actuelles de gestion pendant les 20 prochaines années. <p>SD) Sylviculture dynamique, visant à accroître les prélèvements :</p> <ul style="list-style-type: none"> Augmentation progressive des taux de coupe de manière différenciée selon les catégories de propriétés et les zonages de gestion ; Diffusion des pratiques les plus dynamiques de 2015 : mise en gestion de nouvelles forêts privées sans PSG, rattrapage des peuplements en retard d'éclaircie, raccourcissement progressif des durées de révolutions. <p>3 scénarios de demande des industries de première et de deuxième transformation :</p> <p>MA) Marché atone :</p> <ul style="list-style-type: none"> Faible activité économique ; Ralentissement du développement de la filière bois-énergie. <p>EBI) Énergie et bois d'industrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la consommation de BE ; Développement des industries de la trituration grâce à la mobilisation accrue du BIBE. <p>FD) Filière dynamique :</p> <ul style="list-style-type: none"> Forte demande en construction et emballage ; Développement du BE. 	<p>4 trajectoires prospectives qualifient la demande de produits bois dans la construction en 2035, et de manière tendancielle en 2050, et sont comparées à 2 scénarios d'offre, l'un à sylviculture constante (SC) et l'autre avec une sylviculture dynamique (SD).</p> <p>T) Tendanciel, s'appuie sur les projections du marché du logement scénarisées dans la SNBC avec mesures existantes (AME) et complétées par des projections BIPE :</p> <ul style="list-style-type: none"> Prolongement des tendances constatées du marché ; Part de marchés du bois construction maintenue au niveau de 2015. <p>V) Volontariste, génère de fortes réductions de GES. Il s'appuie sur les projections de la SNBC avec des mesures supplémentaires (AMS), complété par des projections BIPE :</p> <ul style="list-style-type: none"> Inclut un marché de la rénovation énergétique des bâtiments important ; Fort potentiel pour le développement des innovations technologiques, telles qu'identifiées par les experts du secteur ; Fort potentiel pour le développement des produits bois ; Alternatif, projette la reprise du cycle dans la construction, et la mise en œuvre d'autres mesures ; Scénario intermédiaire entre l'évolution tendancielle et le potentiel maximum de développement des produits bois ; Développement des technologies tenant compte des possibles freins à leur diffusion. <p>ONC) Objectif Neutralité Carbone, a été construit avec le MTE et s'appuie sur les projections AMS de la SNBC sur les surfaces de bâtiments :</p> <ul style="list-style-type: none"> Parts de marché fixées de manière à atteindre des volumes de bois suffisants pour tendre vers l'atteinte des objectifs de neutralité carbone de la construction, intégrés dans une trajectoire multisectorielle ; Volumes de bois construction élevés.
Production biologique et mortalité	<p>La production biologique nette augmente sur la période, de 100 Mm³ en 2015 à 139 Mm³ en 2035 en SC et 135 Mm³ en SD (en VAT, incluant pertes d'exploitation et menus bois).</p> <p>Les modèles ne représentent pas les effets liés à la densité.</p> <p>Les modèles de croissance et de mortalité ne prennent pas en compte les effets liés aux aléas exceptionnels, ou aux effets du changement climatique.</p>	
Puits de carbone dans les écosystèmes	<p>En SC comme en SD, la capitalisation en forêt se poursuit. En 2035, le stock de bois sur pied atteint 3,4 Mds m³ (Bft) en SC et 3,3 Mds m³ en SD. La part des feuillus augmente sur la période, de 64 % en 2015 à 67 % en 2035.</p> <p>En SC, le puits dans l'écosystème (hors sol) croît pour atteindre 86,3 MtCO₂/an en moyenne sur la période 2031-2035, contre 62,1 MtCO₂/an en SD. L'intensité du puits se réduit donc d'environ 10 % par rapport au début de la période en SD alors qu'elle augmente de presque 20 % dans un scénario de gestion constante.</p>	

Hypothèses	Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, IGN-FCBA (2016)	Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments, FCBA (2019)																																																											
Niveaux de prélèvements / Demande en bois construction	<p>La disponibilité brute atteint 76,4 Mm³/an en 2035 en SC, et 97 Mm³/an en SD, soit + 50 % sur la période en SD. Le taux de prélèvement en SC se maintient sur la période à 55 %, tandis qu'il dépasse les 70 % en 2035, soit une augmentation de 25 %. La forêt française permet ainsi une augmentation importante des prélèvements en 2035, de l'ordre de +32 Mm³/an (menus bois compris).</p> <p>Les disponibilités technico-économiques peuvent augmenter de 41 % sur la période, pour atteindre 68 Mm³/an de récolte en SD. Ainsi, la récolte peut augmenter de +20 Mm³/an hors menus bois. 80 % de la disponibilité supplémentaire concerne des feuillus, dont la majorité de BIBE. La croissance potentielle des résineux est limitée en SC, et permettrait de mobiliser SD 4 Mm³/an en fin de période, essentiellement en BO.</p>	<p>La demande de bois augmente dans tous les scénarios sauf le tendanciel qui se maintient.</p> <p>Sur la période 2015-2050, la demande de bois intégré dans les produits finis augmente de +1,7 Mm³/an, +2,9 Mm³/an, et +7,2 Mm³/an respectivement dans les scénarios T, A et V. (pertes de 1^{ère} et 2^{ème} transformations comprises). Dans A et V, la rénovation contribue à environ 70 % de l'accroissement du volume de bois consommé en 2050 par rapport à 2015, alors que sa contribution n'est que de, respectivement, 46 % et 44 % en 2035. A est considéré dans l'étude comme le scénario le plus probable.</p> <p>ONC est le plus éloigné de l'existant avec une multiplication par plus de 2,5 du volume de bois intégré dans les produits finis, atteignant 10 Mm³/an en 2050. L'évolution des parts de marché est responsable d'une grande part de cette croissance.</p> <div><p>Figure 41 Volume de bois pour le marché total du bâtiment pour l'ensemble des produits couverts</p></div>																																																											
	Répartition entre les usages	<p>La récolte progresse pour tous les usages, mais l'augmentation du BIBE est plus forte, en raison de l'importance des feuillus. En SD, la disponibilité technico-économique de 68 Mm³ en 2035 se répartit entre 34,4 Mm³ de BO potentiel (soit 50 % de la récolte), dont 17,1 Mm³ de résineux ; et 33,6 Mm³ de BIBE, dont 80 % de feuillus.</p> <div><div><p>Disponibilité suppl. toutes essences Scénario sylviculture constante</p></div><div><p>Disponibilité suppl. toutes essences Scénario gestion dynamique progressif</p></div></div>	<p>L'augmentation de la demande en BO et BI est attendue principalement entre 2020 et 2035.</p> <p>Dans les scénarios A, T et V, le BO représente deux tiers du volume de bois dans la construction alors que le panneau ne représente qu'un tiers. Dans ONC, le BO consommé représente jusqu'à 75 % de la consommation en volume en 2035 et 2050, et ce, en raison de l'augmentation des parts de marchés du bois dans les charpentes, tandis que la part dans les cuisines, secteur consommateur de panneaux, est déjà à 100 %. ONC projette en particulier une croissance à deux chiffres pour la plupart des produits, en particulier pour la consommation de charpentes, avec des volumes multipliés par 3 entre 2015 et 2050.</p> <table><tr><th rowspan="2">Milliers de m³</th><th colspan="3">BO</th><th colspan="3">Panneaux (BI)</th><th colspan="3">Volume total de bois intégré dans les produits finis</th></tr><tr><th>2020</th><th>2035</th><th>2050</th><th>2020</th><th>2035</th><th>2050</th><th>2020</th><th>2035</th><th>2050</th></tr><tr><td>Tendanciel</td><td>3 195</td><td>3 053</td><td>2 653</td><td>1 626</td><td>1 606</td><td>1 468</td><td>4 821</td><td>4 660</td><td>4 120</td></tr><tr><td>Alternatif</td><td>3 222</td><td>3 789</td><td>3 932</td><td>1 620</td><td>1 798</td><td>1 962</td><td>4 842</td><td>5 587</td><td>5 893</td></tr><tr><td>Volontariste</td><td>3 392</td><td>4 707</td><td>4 663</td><td>1 763</td><td>2 163</td><td>2 428</td><td>5 155</td><td>6 870</td><td>7 091</td></tr><tr><td>Neutralité Carbone</td><td>3 338</td><td>6 194</td><td>7 374</td><td>1 763</td><td>2 277</td><td>2 657</td><td>5 101</td><td>8 471</td><td>10 032</td></tr></table>	Milliers de m³	BO			Panneaux (BI)			Volume total de bois intégré dans les produits finis			2020	2035	2050	2020	2035	2050	2020	2035	2050	Tendanciel	3 195	3 053	2 653	1 626	1 606	1 468	4 821	4 660	4 120	Alternatif	3 222	3 789	3 932	1 620	1 798	1 962	4 842	5 587	5 893	Volontariste	3 392	4 707	4 663	1 763	2 163	2 428	5 155	6 870	7 091	Neutralité Carbone	3 338	6 194	7 374	1 763	2 277	2 657	5 101	8 471
Milliers de m³		BO			Panneaux (BI)			Volume total de bois intégré dans les produits finis																																																					
	2020	2035	2050	2020	2035	2050	2020	2035	2050																																																				
Tendanciel	3 195	3 053	2 653	1 626	1 606	1 468	4 821	4 660	4 120																																																				
Alternatif	3 222	3 789	3 932	1 620	1 798	1 962	4 842	5 587	5 893																																																				
Volontariste	3 392	4 707	4 663	1 763	2 163	2 428	5 155	6 870	7 091																																																				
Neutralité Carbone	3 338	6 194	7 374	1 763	2 277	2 657	5 101	8 471	10 032																																																				

@i4ce

Hypothèses	Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, IGN-FCBA (2016)	Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments, FCBA (2019)
Bois matériau	<p>Sur la période, le BO potentiel augmente significativement en SD (+40 % environ) par rapport à l'augmentation en SC (+15 %). En SD, le BO atteint 38 Mm³ de disponibilité brute en 2035, et 34 Mm³ en disponibilités technico-économiques. En SD, les disponibilités technico-économiques de BO se partagent entre 46 % de feuillus (17 Mm³) et 53 % de résineux (19 Mm³) (hors peupliers).</p> <p>Les prélèvements actuels de BO potentiel sont deux fois plus élevés que les usages réels de BO, une partie de ce bois étant dirigé vers la trituration ou l'énergie.</p> <p>Figure 43 : Comparaison de l'offre de bois d'œuvre potentiel feuillu avec la demande en bois d'œuvre</p>  <p>Figure 44 : Comparaison de l'offre et de la demande de bois d'œuvre résineux</p> 	<p>L'augmentation de la demande en sciages et en panneaux (produits semi-transformés) est la plus forte pour les scénarios Volontariste et Objectif Neutralité Carbone, respectivement +71 % et +105 % pour le BO sur 2015-2035, et atteignant jusqu'à 8Mm³ pour ONC ; et +48 et +57 % pour les panneaux sur la même période, atteignant jusqu'à près de 3 Mm³ pour ONC.</p> <p>La hausse de la demande en V et ONC porte le plus sur les résineux (+80 % et +117 % en 2035) en raison des volumes dirigés vers les systèmes constructifs et les charpentes. La hausse moindre des sciages feuillus (+39 % en V et +64 % en ONC en 2035) découle principalement de l'aménagement intérieur et des menuiseries.</p> <p>Figure 3 : Evolution de la demande de sciages résineux et feuillus</p>  <p>Figure 2 : Evolution de la demande de produits semi-transformés</p>  <p>L'offre de BO feuillus pourrait largement satisfaire les 4 scénarios de demande à horizon 2035, à condition d'adopter une sylviculture dynamique. La gestion dynamique est susceptible d'augmenter la disponibilité supplémentaire de BO feuillus de 0.7 Mm³/an en 2035 par rapport à une sylviculture constante. Dans ce scénario, l'offre supplémentaire pourrait atteindre 2,6 Mm³/an supplémentaires en 2035, soit le double de la demande supplémentaire en ONC.</p> <p>En revanche, même avec une sylviculture dynamique, l'offre de BO résineux resterait inférieure à la demande des scénarios V et ONC. En effet, les sciages résineux représentent 75 % du volume sciages utilisés en construction. La disponibilité supplémentaire en SD pourrait atteindre 3 Mm³/an, alors que la demande en ONC approche les 7 Mm³/an en 2035.</p> <p>Figure 5 : Equilibre offre / demande de bois d'œuvre feuillus</p> 

Hypothèses	Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, IGN-FCBA (2016)	Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments, FCBA (2019)
Bois matériau (suite)		 <p>Figure 6 : Équilibre offre / demande de bois d'industrie</p> <p>Source : calculs FCBA</p> <p>Pour mettre en adéquation offre et demande dans les scénarios V et ONC, les capacités de productions des systèmes constructifs, les charpentes et, dans une moindre mesure, les parements verticaux extérieurs (bardages) doivent être développées.</p> <p>En simulant une production nationale entre 70 et 80 % des sciages résineux, les capacités de production devraient croître de 500 000 m³ en T et jusqu'à 3 Mm³ en ONC en 2035. Ces augmentations semblent difficilement atteignables et impliquent des investissements conséquents à l'amont forestier et dans l'outil industriel. Le coût important de la valorisation des feuillus en construction empêche de projeter à grande échelle une substitution des résineux par les feuillus.</p>
Produits bois		<p>Seuls les produits bois du secteur de la construction et une partie de l'ameublement sont considérés dans l'étude.</p> <p>Tous les scénarios anticipent une hausse du stock de produits bois entre 2015 et 2050, ce stock cumulé sur la période atteint 105 MtCO₂ en T, 145 MtCO₂ en V, 125 MtCO₂ en A et 174 MtCO₂ en ONC (importations incluses), ou respectivement 59 MtCO₂, 76 MtCO₂, 68 MtCO₂, et 97 MtCO₂, si on se limite à l'augmentation de produits bois issus de la récolte nationale (comme exprimé dans la SNBC). L'écart se creuse entre ONC et le tendanciel à partir de 2035.</p> <p>En ONC, les charpentes représentent la plus grande part de contribution au stock de produits bois : 26 % en 2050, contre 20 % environ dans les autres scénarios ; alors que dans T, V et A, ce sont les aménagements intérieurs qui y contribuent le plus (autour de 25 %).</p> <p>Sans faire évoluer les parts de marché françaises par rapport aux importations, le stock dans les produits bois en 2050 serait composé en moyenne de 44 % d'importations : en particulier pour les aménagements intérieurs pour tous les scénarios ; et sur les systèmes constructifs et charpentes, spécialement en ONC. Ces données sont susceptibles d'évoluer si l'augmentation de la demande tire l'offre française vers le haut.</p>
Bois énergie	Le BIBE progresse encore plus vite que le BO en SD : +51 % pour atteindre 41 Mm³ en disponibilités brut, ou +44 % pour atteindre 34 Mm³ de disponibilités technico-économiques.	
Surface forestière	15,9 Mha, incluant les forêts disponibles pour la production de bois, les bosquets de production et les peupleraies cultivées (IGN, 2011).	

@i4ce_

Annexes Agriculture

Éléments méthodologiques sur l'inventaire national sur lequel s'appuie la SNBC

Les émissions du secteur agricole sont comptabilisées sous plusieurs catégories distinctes dans l'inventaire Secten :

- la **catégorie «Agriculture»** (89 MtCO₂eq en 2015¹) inclut principalement les émissions dues à la fermentation entérique (CH₄) et aux épandages d'engrais et autres amendements (N₂O, NO₃), mais aussi les émissions liées aux consommations énergétiques (CO₂) ;
- la **catégorie «Puits du secteur des terres»** (UTCATF) (-26 MtCO₂eq en 2015) inclut les émissions et absorptions de CO₂ dans la biomasse et dans les sols des terres agricoles séparées entre cultures et prairies (12 MtCO₂eq en 2015).

Les émissions de GES en amont ou en aval de l'exploitation agricoles sont inventoriées dans d'autres catégories, c'est le cas de la production d'engrais par exemple ou encore l'industrie agroalimentaire.

Quels sont les postes d'émissions de la catégorie Agriculture ?

En France, les émissions de la catégorie Agriculture se décomposent entre :

- la **fermentation entérique (CH₄)**, principalement issue de l'élevage bovin, est le premier poste d'émissions de l'agriculture : 45 MtCO₂ en 2015 ;
- les **émissions des sols cultivés**, principalement liées aux engrais azotés (N₂O lessivage et NH₃) : 34 MtCO₂ ;
- les **émissions des consommations d'énergie** (engins agricoles, etc.) : 12 MtCO₂.

Au total, les émissions de la catégorie Agriculture sont relativement stables dans le temps (-5 % entre 1990 et 2015).

Quels sont les postes d'émissions des terres agricoles dans la catégorie Puits ?

La catégorie UTCATF de l'inventaire de GES reflète avant tout les changements d'utilisation des sols : Les changements de stocks de carbone dus à des changements d'utilisation des terres sont comptabilisés de manière systématique. Ces émissions sont catégorisées sous l'étiquette de l'utilisation finale de la terre : par exemple, si une surface agricole est transformée en projet immobilier,

le déstockage de carbone induit sera comptabilisé sous la catégorie Zones Artificielles ; si une prairie permanente est retournée pour être convertie en culture, le déstockage apparaîtra dans la catégorie Terres cultivées.

Le chiffrage des flux de séquestration annuels dans les sols, dont les sols agricoles, est donc d'abord la traduction de l'évolution des données surfaciques d'occupation des sols :

- les +20 MtCO₂eq catégorisées en « cultures » dans l'inventaire de 2015 sont composées de :
 - 20,8 MtCO₂eq dues à la conversion de terres en cultures, principalement des prairies, qui entraîne d'importants déstockages ;
 - Seulement -0,8 MtCO₂eq sont dues aux cultures restant cultures pendant au moins 20 ans. Ces absorptions résultent entre autres du développement des techniques culturales simplifiées (voire du non-labour) en forte augmentation depuis 1990², bien que le gain carbone associé soit remis en cause dans la littérature scientifique récente (étude 4p1000, INRAE) ;
- les -8,3 MtCO₂eq catégorisées en « prairies » dans l'inventaire en 2015 sont composées de :
 - environ -8,9 MtCO₂eq dues à la conversion de terres en prairies, principalement des cultures ;
 - seulement 0,7 MtCO₂eq dues aux prairies restant prairies pendant au moins 20 ans. Le déstockage est lié est lié à une baisse de production potentielle découlant d'une baisse de la fertilisation (minérale ou organique), qui est à l'heure actuelle le seul paramètre permettant actuellement de témoigner d'un changement de pratique sur une prairie restant prairie ;
 - les haies sont intégralement comptées dans la catégorie prairie mais les pertes liées notamment à l'arrachage compensaient le stockage lié à la plantation de nouveaux linéaires.

Les estimations des émissions des cultures restant cultures et prairies restant prairies sont partielles et comportent un haut degré d'incertitudes. Des enquêtes sur les pratiques culturales en cours sont susceptibles de faire évoluer ces tendances.

Du fait que la variation de stock de carbone est comptabilisée sous l'étiquette de l'utilisation de terres finale, le bilan des changements d'usages par type de terre n'est que partiellement visible dans l'inventaire : les +20 MtCO₂ des cultures en 2015 traduisent le déstockage des terres devenues des cultures, mais ignorent combien de cultures

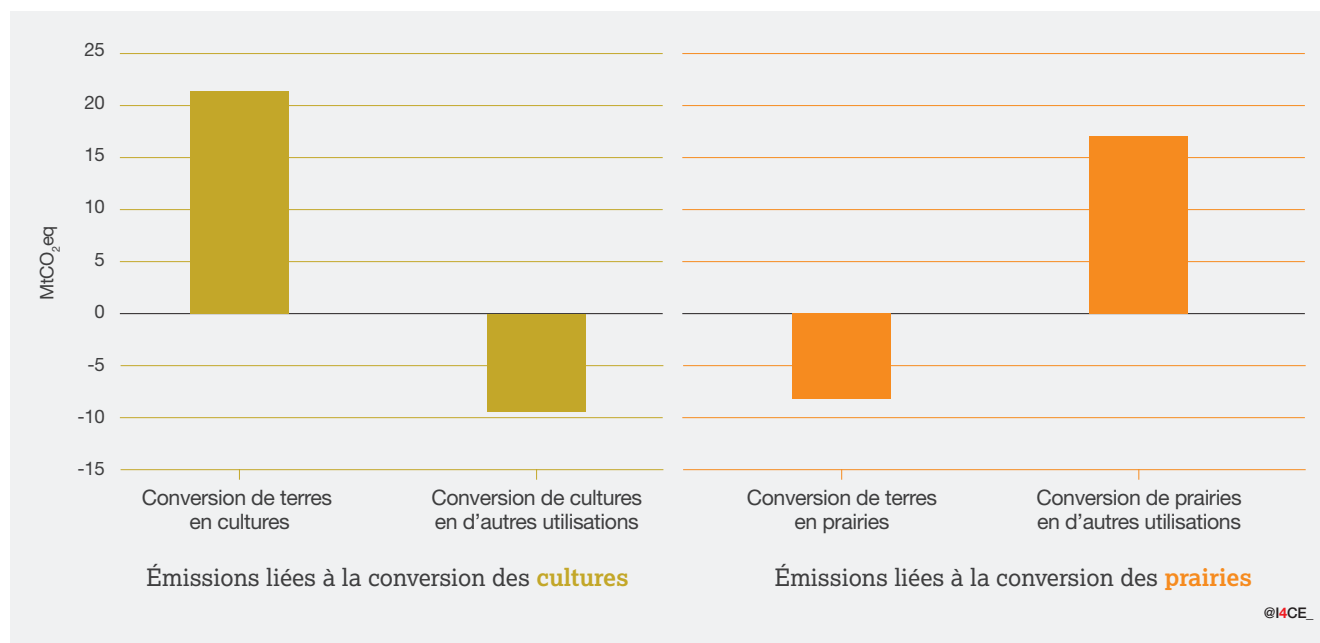
¹ Pour rappel, les données utilisées sont issues de la SNBC 2, publiée en 2018, et ne prennent pas en compte les modifications d'inventaire faites en 2019.

² Service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA), Résultats des Enquêtes Pratiques Culturales, 2000, 2005, 2011, 2017

sont passées à un autre usage. Si on sort de classification de l'inventaire on peut dire que :

- le bilan des changements d'utilisation des cultures représentait 11,3 MtCO₂eq en 2015 : 20,8 MtCO₂eq émises dans des conversions de terres, majoritairement des prairies, devenues des cultures ; et -9,5 MtCO₂eq séquestrées par la conversion de cultures à d'autres utilisations, principalement des prairies (voir graphique) ;
- le bilan des changements d'utilisation des prairies représentait 8,2 MtCO₂eq en 2015 : -8,8 MtCO₂eq séquestrées par la conversion de terres en prairies ; et 17 MtCO₂eq émises par la conversion de prairies à d'autres utilisations, principalement des cultures (voir graphiques).

ÉMISSIONS ET ABSORPTIONS LIÉES AUX CONVERSIONS DE TERRES AGRICOLES EN 2015



Source : I4CE sur la base des données CITEPA

L'impact des pratiques agricoles n'est que très partiellement comptabilisé : A l'heure actuelle, le stockage du carbone dans les écosystèmes est comptabilisé de manière simplifiée et partielle dans l'inventaire, ce qui influence largement le chiffrage historique du puits dans la SNBC mais également projeté. En effet, en raison d'un haut niveau d'incertitude, l'impact des changements de pratiques sur le stockage du carbone est évalué de manière très limitée. Pour les cultures restant cultures, comme pour les prairies restant prairies, des estimations conservatrices de la biomasse ligneuse ainsi que de la matière organique des sols sont réalisées. Dans le cas de la matière organique des sols, l'estimation est par exemple fonction de quelques pratiques culturales comme le travail du sol et la fertilisation.

Tableau comparatif des éléments méthodologiques

Les projections de puits agricole faites dans le cadre de la SNBC ont été réalisées à partir des hypothèses d'assolements, de cheptel et de pratiques dont la cohérence a été vérifiée via l'outil Climagri. L'outil Climagri a permis par ailleurs d'estimer le potentiel de stockage lié aux différents leviers proposés dans la SNBC. Ce potentiel calculé n'a en revanche pas servi directement au chiffrage SNBC. Ce dernier a été réalisé par le CITEPA en suivant la méthode inventaire pour permettre une comparaison avec l'historique et un suivi dans le temps. La méthode inventaire a cependant été « augmentée » pour pouvoir capter une partie des pratiques de stockage proposées par la SNBC. Le tableau ci-dessous résume les différences entre la méthode inventaire, Climagri et la méthode inventaire « augmentée » dont découle la SNBC.

Orientations SNBC	Leviers SNBC	INRAE, 2013	4p1000, INRAE, 2019	Prise en compte dans l'inventaire	Prise en compte dans Climagri
Préserver les prairies permanentes	Augmenter la part du cheptel nourri principalement à l'herbe.	Allonger la période de pâturage.	Remplacer fauchage par le pâturage.	Non	Non
	Optimisation de la fertilisation des prairies (non précisé).	Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement animal.	Fertilisation additionnelle modérée des prairies peu fertilisées (engrais).	Oui	Non
	Allongement des durées de rotation.	Accroître la durée de vie des prairies temporaires (5 ans).	Allongement et insertion de prairies temporaires dans les successions de grandes cultures.	Non	Oui
Développer largement l'agroforesterie	Plantation d'arbres en intra-parcellaire.	Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres.	Développement de l'agroforesterie intra-parcellaire.	Non	Oui
	Plantation de haies.	Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles.	Implantation de haies.	Oui	Oui
Augmenter les restitutions au sol de résidus de cultures et de matières organiques de qualité	Développer la valorisation organique, notamment en généralisant la collecte des déchets organiques, y compris les résidus de biomasse agricole et forestière.	Améliorer la valorisation des produits organiques (effluents d'élevage et autres déchets) apportés : <ul style="list-style-type: none"> dont Améliorer l'efficacité des apports organiques grâce à l'enfouissement systématique des effluents ; augmenter le volume de déchets recyclés, par la mobilisation de ressources non agricoles supplémentaires (boues de stations d'épuration, déchets agro-industriels ou urbains...). 	Apport au sol de matières organiques exogènes - Mobilisation de nouvelles ressources (NRO).	Oui	Non

@i4ce_

Orientations SNBC	Leviers SNBC	INRAE, 2013	4p1000, INRAE, 2019	Prise en compte dans l'inventaire	Prise en compte dans Climagri
Développer les pratiques culturales agro-écologiques favorables à la séquestration de carbone	Couverture des sols avec CIPAN.	Développer les cultures intermédiaires : • Privilégier l'implantation de CI composées de légumineuses ; • Développer l'implantation de nouvelles CI en ZNV ; • Favoriser le développement des repousses.	Insertion et allongement des cultures intermédiaires (CIPAN et CI).	Oui	Oui
	Couverture des sols avec CIVE.	Non inclus	Non inclus	Oui	Non
	Néant	Introduire des cultures intercalaires en vignes et en vergers.	Enherbement des vignobles.	Non	Oui
	Néant	Introduire des bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou en périphérie de parcelles.	Non inclus	Non	Non
	Semis direct et non-labour.	Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol : • Passer au semis direct continu ; • Passer au labour occasionnel un an sur 5 ; • Passer à un travail superficiel du sol.	Réduction du travail du sol – passage au semis direct (impact non significatif sur le stockage du Carbone).	Oui	Oui

@i4ce_



www.i4ce.org