

## Réchauffement du climat : est-ce que la forêt française peut apporter des solutions d'ici 2050 ?

**Le plan climat présenté le 6 juillet 2017 par le gouvernement français s'est fixé un objectif de neutralité carbone en 2050. Dans ce contexte, le secteur forêt-bois est amené à prendre une importance stratégique. Cependant de grandes incertitudes persistent sur la stratégie à adopter comme l'illustre l'auteure de cet article. En faisant le point sur deux études indépendantes sur le sujet, son article montre en effet que la plupart des scénarios conduisent à une hausse temporaire des émissions de gaz à effet de serre du secteur forestier et pour finir à une absence d'amélioration du bilan carbone à l'horizon 2050, suivie cependant d'une amélioration potentielle à des horizons plus lointains, et donc plus proches des échelles temporelles de la gestion forestière.**

**D**

epuis la révolution industrielle du dix-neuvième siècle, la déprise agricole, l'exode rural et l'utilisation des énergies fossiles ont permis aux forêts françaises de récupérer après des siècles de surexploitation. La surface de forêts est ainsi passée de 9 Mha environ en 1830 à près de 17 Mha en 2017 aboutissant à une forêt française aujourd'hui relativement jeune et productive. Dans ce contexte, le secteur forestier est appelé à jouer un rôle important dans les objectifs de décarbonation de l'économie pour ralentir le changement climatique. Cependant, les études scientifiques sont maintenant nombreuses à réfuter la neutralité carbone des produits bois et à montrer que les leviers d'atténuation du changement climatique en forêt sont plutôt modestes. Alors que les modèles globaux de climat estiment que les émissions planétaires de CO<sub>2</sub> doivent diminuer d'ici à 2030-2050 pour envisager un maintien des températures en deçà de 1,5° C de réchauffement (Lamontagne *et al.*, 2019; Millar *et al.*, 2017), l'année 2017 a vu paraître deux études indépendantes (Roux *et al.*, 2017; Valade *et al.*, 2018) s'intéressant au contexte français : comment augmenter la récolte de bois tout en augmentant la séquestration de carbone par la filière ?

### Les pièces élémentaires du bilan carbone

Établir le bilan carbone du secteur forestier revient à faire la somme de tout le carbone séquestré et libéré lors des différentes étapes de la transformation du bois. On considère généralement trois processus : la séquestration du carbone par les arbres en forêt, le stockage du carbone dans les produits bois, et la substitution lorsque le bois remplace d'autres matériaux ou énergies plus émetteurs en carbone. La substitution fait souvent l'objet d'incompréhension car c'est l'effet le plus éloigné des mesures physiques et des inventaires statistiques (encadré 1). De par l'incertitude qui sous-tend l'estimation de la substitution liée aux évolutions biologique et socio-économique des scénarios de référence et alternatif, et en l'absence d'analyse approfondie de ces facteurs, cette étude limite les calculs de substitution à l'horizon 2050.

### Caractériser la faible mobilisation dans les forêts françaises

Le taux de prélèvement moyen dans les forêts françaises est de 49% (Colin *et al.*, 2011), ce qui explique que le stock de bois en forêt augmente régulièrement. La difficulté d'accès aux parcelles et les conditions socio-éco-

nomiques sont fréquemment invoquées pour expliquer ce faible taux de prélèvement (Colin *et al.*, 2011) et suggèrent une diversité des niveaux de gestion sur le terrain qu'il est primordial de caractériser pour envisager une mobilisation supplémentaire de bois. Pour chaque essence et structure de forêt (taillis, futaie, taillis sous futaie), on peut définir un mode de gestion standard avec un diamètre de coupe, une densité de peuplement, et un niveau d'exploitabilité acceptable (pente, portance du sol...) correspondant aux recommandations sylvicoles. Ensuite, en comparant les caractéristiques de chaque placette avec l'itinéraire sylvicole standard pertinent, on estime le type de gestion le plus probable (plus de détails dans Valade *et al.* (2018)) :

- les placettes dont le niveau d'exploitabilité est en-deçà du seuil défini comme acceptable pour cette essence sont supposées « inexploitable » pour des raisons topographiques et on peut supposer qu'elles ne seront pas récoltées puisque leur exploitation demanderait d'importants investissements en infrastructures ou méthodes d'exploitation ;
- les placettes dont le diamètre est supérieur au diamètre de récolte standard sont identifiées comme « surmatures ». Pour des raisons diverses, qui peuvent être sociales ou économiques, la récolte a été négligée par les propriétaires qui ne semblent donc pas intéressés par la vente du bois. Sans action politique particulière, on suppose que ces forêts ne seront pas exploitées ;
- les peuplements dont le diamètre est inférieur au diamètre standard de coupe mais dont la densité est supérieure à la situation standard révèlent un comportement

différent. Les propriétaires manquent de formation ou d'intérêt pour les coupes intermédiaires d'amélioration de leurs peuplements mais peuvent tout de même être motivés par la coupe finale. Sans politique ciblée, on peut donc supposer qu'aucune éclaircie ne sera pratiquée dans ces forêts mais que leur bois sera mobilisé quand le diamètre standard de coupe sera atteint ;

- enfin, les placettes dont l'exploitabilité est estimée acceptable, dont le diamètre est inférieur au diamètre de coupe et la densité est inférieure à la densité standard sont supposées gérées activement. Les propriétaires pratiquent éclaircies et coupes selon les itinéraires sylvicoles standards.

On estime ainsi que 63 % de la superficie forestière française est en gestion active, 15 % surmature, 11 % en surdensité et 11 % inexploitable avec des différences importantes selon la localisation et l'essence (figure 1). La répartition entre forêts surmatures et en surdensité ne semble pas suivre de tendance régionale, ce qui est cohérent avec la nature socio-économique de cette catégorisation. En revanche la part majeure de forêts inexploitable dans les régions montagneuses est évidente avec jusqu'à 53 % des parcelles des Alpes. La répartition des niveaux de gestion par essence souligne les préférences de la filière bois pour quelques essences, avec 86, 77 et 68 % respectivement des parcelles de pin maritime, d'épicéa et de sapin pectiné gérées activement pour les conifères et 77 et 77 % respectivement des parcelles de chêne pédonculé et de châtaignier pour les feuillus.

## 1 COMPRENDRE LA SUBSTITUTION

Estimer le potentiel de substitution d'un produit bois revient à comparer deux scénarios, un scénario de référence (non-bois), et une alternative (bois) qui positionne le bois comme produit de remplacement. En calculant les émissions de gaz à effet de serre liées aux procédés de chacune de ces deux versions, on peut en déduire les émissions évitées en choisissant l'option basée sur le bois plutôt que l'option basée sur les énergies fossiles. Le coefficient de substitution ramène cette différence d'émissions à l'unité de bois supplémentaire utilisée dans le scénario bois par rapport au scénario de référence (équation 1). Derrière l'apparente simplicité du raisonnement se cachent cependant plusieurs hypothèses importantes pour s'assurer de la validité des résultats présentés.

### Équation 1

$$S_{\text{coeff}} = \frac{\text{Émissions}_{\text{bois}} - \text{Émissions}_{\text{non-bois}}}{\text{Quantité}_{\text{non-bois}} - \text{Quantité}_{\text{bois}}}$$

#### Le choix de la référence est primordial

L'ADEME estime qu'en moyenne la construction d'une maison individuelle à ossature bois émet 140 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> alors que la construction d'une maison équivalente à ossature béton cellulaire émet 200 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> et à ossature brique 150 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup> (Jayr *et al.*, 2011). Selon l'hypothèse choisie sur le type de maison substitué on aura donc économisé 60 ou 10 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>2</sup>.

#### Les différences de flux de carbone en forêt doivent être prises en compte

En comparant deux scénarios d'utilisation du bois on compare aussi, souvent de manière implicite, deux intensités de récolte. Dans le cas du choix d'une maison à ossature béton les arbres qui auraient été utilisés pour une ossature bois ne sont pas coupés, le carbone qu'ils contiennent reste stocké et davantage de carbone est séquestré tant qu'ils restent vivants.

#### Les coefficients de substitution choisis doivent être cohérents avec le choix de la référence

L'ADEME estime par exemple qu'1 m<sup>3</sup> de bois énergie permet d'éviter l'émission de 0,5 t CO<sub>2</sub>-eq m<sup>3</sup> (ADEME, 2015). Le scénario de référence attaché à ce chiffre considère que le gaz est la principale alternative au bois\*. Pour une application dans lequel le scénario de référence consisterait en l'absence totale d'utilisation du bois (Roux *et al.*, 2017), ce coefficient semble peu cohérent quand on sait que le bois énergie est principalement utilisé pour le chauffage domestique en zone rurale et que seul un quart des communes – les plus urbaines – sont raccordées au réseau GRDF.

\* Ce chiffre serait cependant de 0,9 t CO<sub>2</sub>-eq m<sup>3</sup> pour le fuel qui représente les trois-quarts des modes de chauffage domestique en zone rurale en France.

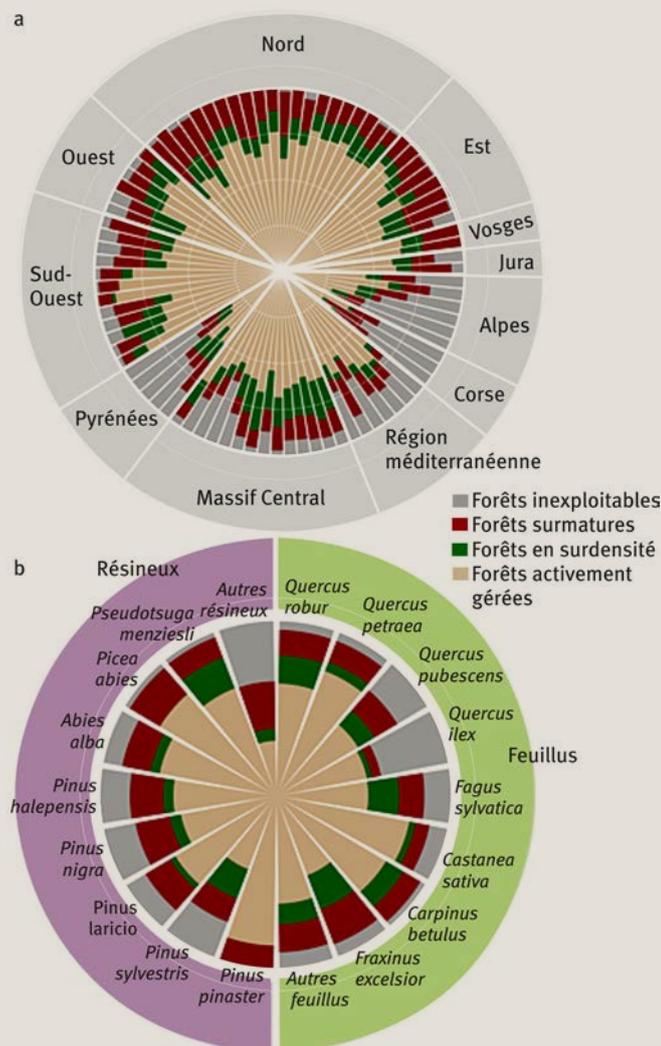
## Modéliser les flux de carbone dans la filière forêt-bois : les scénarios

La catégorisation des forêts françaises selon leur niveau de gestion décrite ci-dessus permet de définir des scénarios pour la modélisation du secteur forestier. On peut ainsi projeter l'évolution de la ressource en maintenant les forêts dans leur mode de gestion actuelle, mais aussi envisager la mise en place de scénarios de mobilisation accrue qui atteignent chacun une catégorie de forêts en particulier. Cinq types de mobilisation sont envisagés dans cinq scénarios différents.

La simulation de référence reproduit les pratiques courantes de gestion. Cette simulation reproduit donc l'évolution de la ressource forestière française sous l'hypothèse d'une continuité de comportement des agents.

### 1 Répartition de la surface forestière française métropolitaine en forêts gérées activement, inexploitable, surmatures, en surdensité.

a) répartition par région. Chaque secteur correspond à une sylvoécocorégion IGN. Les sylvoécocorégions sont groupées par grande région écologique. b) répartition par essence (secteurs). Les essences sont groupées par type de bois, feuillu (droite) ou résineux (gauche).



Dans le modèle, les forêts identifiées comme activement gérées sont alors éclaircies et récoltées, les forêts en surdensité sont récoltées et ne sont pas éclaircies, les forêts surmatures ou difficilement exploitables ne sont ni récoltées ni éclaircies.

Les quatre autres scénarios ciblent une ou toutes des trois catégories de forêt : diminution du diamètre de récolte des forêts activement gérées, éclaircie des forêts en surdensité ou récolte des forêts surmatures. En arrière-plan, on imagine que la mise en œuvre de ces scénarios nécessiterait des politiques très différentes : des subventions à la coupe ou à la consommation de bois pour les forêts activement gérées qu'on peut supposer répondre au prix du marché, des incitations basées sur les travaux prévus dans les plans de gestions pour les forêts en surdensité, et de l'information, du regroupement de parcelles ou une fiscalité plus élevée sur le foncier forestier pour les forêts surmatures qu'on peut supposer délaissées voire ignorées par leurs propriétaires. Pour chaque catégorie de forêt ciblée, on considère que la mobilisation est réalisée progressivement à un horizon de trente ans.

La croissance des peuplements est simulée grâce à deux équations principales qui décrivent respectivement l'accroissement du volume et du diamètre quadratique moyen des peuplements de chaque placette de l'inventaire forestier national. Ces relations ont été obtenues par des régressions multi-variables par essence en suivant une approche de multiplication des facteurs de croissance (*multiplicative potential-modifier function*) (Charru *et al.*, 2010; Pretzsch, 2009; Wykoff, 1990). Pour considérer le puits de carbone biologique, on utilise les facteurs d'expansion globaux issus du projet CARBOFOR (feuillus : 2,063 ; conifères : 1,735 – Loustau, 2004). Les deux fonctions définissant l'incrément en diamètre et en volume utilisent comme facteurs explicatifs l'âge, l'indice de densité et l'indice de fertilité.

Pour chaque type de peuplement (essence et structure), des règles de gestion similaires aux seuils utilisés pour définir les niveaux de gestion permettent de simuler la récolte. Quand le diamètre quadratique moyen d'un peuplement atteint le diamètre standard de récolte pour ce type de forêt, le peuplement est récolté, une fraction de la biomasse aérienne est laissée en forêt et supposée décomposée en moins de cinq ans, une partie est transférée à la filière bois pour transformation. De même, à chaque pas de temps, les éclaircies et la mortalité sont appliquées par le retrait du peuplement d'une fraction fixe de biomasse.

Les volumes commerciaux récoltés (bois fort tige : jusqu'à la découpe 7 cm) simulés par le modèle de croissance sont utilisés en entrée d'un modèle de filière bois qui reproduit la production de bois d'œuvre (BO), bois d'industrie (BI) et bois énergie (BE) en prenant en compte les première et deuxième transformation, l'utilisation en cascade des produits, la réutilisation et le recyclage. Autant que possible, les paramètres ont été tirés de la littérature pour les années 2013 à 2015. La coupe rase de résineux est entièrement affectée à la filière BO alors que 45 % du bois issu de coupe rase de feuillus sont affectés aux filières BIBE. Le bois d'éclaircies est quant à lui affecté entièrement au BIBE pour les feuillus alors que 29 % des éclaircies de résineux sont dirigées vers le BO. Selon les données disponibles, environ 16 % de la production

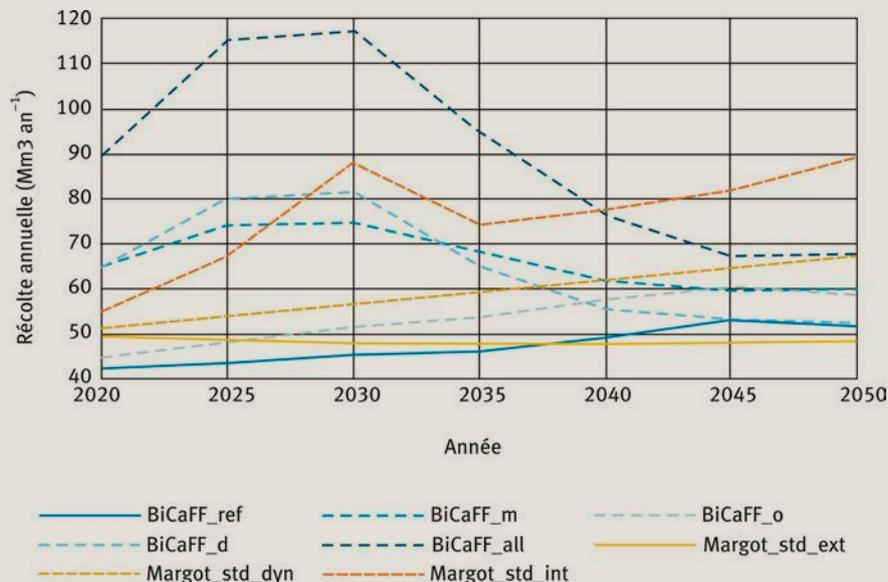
actuelle de bois énergie provient de la valorisation en fin de vie de produits BO ou BI. Pour le calcul du stockage de carbone dans les produits bois, les utilisations secondaires et tertiaires du bois (suite à l'utilisation en cascade) ne sont pas considérées pour éviter le double compte du carbone. La variation de stock de carbone dans les produits bois est régie par des équations de décroissance exponentielle. La durée de demi-vie est de 50 ans pour le BO, 4 ans pour le BI et 1,7 ans pour le BE.

Chaque produit bois produit au-delà du scénario de référence est supposé se substituer à un produit équivalent plus émetteur de carbone dans sa production et/ou son utilisation *via* un coefficient de substitution moyen selon l'utilisation du bois. Cette approche de la substitution est très simpliste et ne prend pas en compte la diversité réelle des produits bois, ni de leurs alternatives et n'a comme objet que de fournir un ordre de grandeur de cette composante du bilan carbone. L'ensemble du modèle (forêt et filière-bois) est décrit en détail dans Valade *et al.* (2018).

### Plus de bois mobilisé ne signifie pas moins de carbone dans l'atmosphère

Les volumes récoltés peuvent être multipliés par 1,5 en ciblant une seule des trois catégories ou même triplés en ciblant simultanément les trois catégories surmatures, surdensité et activement gérées à la fois (figure 2) dans des ordres de grandeur comparables aux conclusions de Roux *et al.* (2017a). Cependant, cette augmentation de récolte ne peut pas être maintenue au-delà d'une décennie puisqu'elle provient pour l'essentiel de la mobilisation d'une partie du stock de bois sur pied jusqu'ici abandonnée – forêts surmatures – ou destinée à être coupée un peu plus tard – forêts activement gérées. Les niveaux de récolte atteints après le régime transitoire de mobilisation du stock sont toutefois supérieurs aux niveaux de récolte du scénario de référence en raison d'une augmentation de la production biologique due au rajeunissement moyen de la forêt. L'augmentation de la récolte se répercute dans l'augmentation de la production de produits bois BO, BI et BE.

2 Récolte annuelle dans les différents scénarios de récoltes des études récentes sur la France. BiCaFF et Margot renvoient aux modèles utilisés dans Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017) respectivement. Les scénarios sont décrits dans le tableau 1. Pour les scénarios de Roux *et al.* (2017), les résultats de la version standard de Margot, sans densité-dépendance, sont représentés ici, mais la variante avec densité-dépendance n'affecte quasiment pas la récolte sur 2020-2050.



1 Description des scénarios analysés dans les études Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017).

| Étude                       | Modèle  | Scénario | Description  |
|-----------------------------|---|----------|--|
| Valade <i>et al.</i> (2018) | BiCaFF  | ref      | Scénario de référence : maintien des pratiques actuelles |
|                             |   | m        | Intensification de toutes les forêts activement gérées   |
|                             |   | o        | Éclaircie de toutes les forêts en surdensité             |
|                             |   | d        | Mobilisation de toutes les forêts surmatures             |
|                             |   | all      | All à la combinaison des trois                           |
| Roux <i>et al.</i> (2018)   | Margot sous deux versions : Std (standard) DD (avec densité-dépendance) | ext      | Scénario de référence : extensification                  |
|                             |   | dyn      | « Dynamiques territoriales »                             |
|                             |   | int      | Intensification avec plan de reboisement                 |

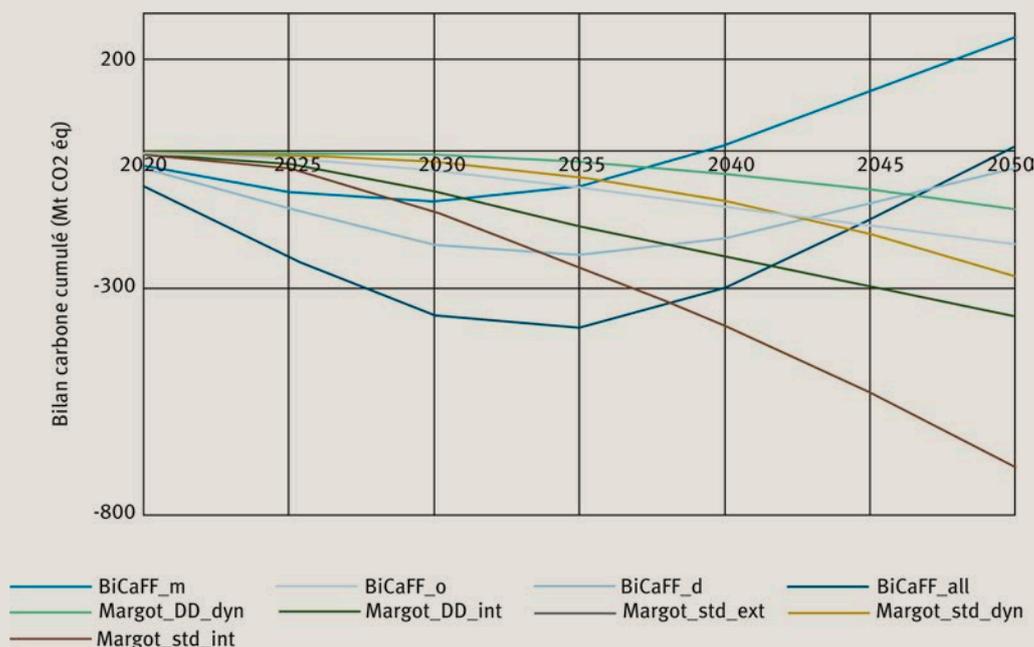
► Quand on intègre les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois, on observe que tous les scénarios de mobilisation accrue présentent un bilan carbone moins bon que le scénario de référence entre 2015 et 2040 (figure 3), que ce soit avec les simulations de Valade *et al.* (2018) ou de Roux *et al.* (2017) (valeurs négatives sur la figure 3). Seule la mobilisation accrue des forêts activement gérées présente un bilan carbone meilleur que la référence à partir de 2040. Avec la mobilisation des forêts en surdensité, l'écart entre le bilan carbone des scénarios d'intensification et du scénario de référence augmente avec le temps en raison de la proportion importante de bois d'éclaircie affectée au BE et dont le carbone est donc rapidement émis dans l'atmosphère. Ce résultat est à nuancer : en effet, les parts de filière BO, BI et BE sont maintenues constantes alors qu'on pourrait attendre de ce scénario une augmentation de la part de la récolte destinée à la filière BO. Les scénarios qui ciblent les forêts surmatures et les forêts activement gérées montrent des profils d'évolution de leur bilan carbone assez proches dans les premières années avec une dégradation du bilan carbone par rapport au scénario de référence dans les premières années, puis un rattrapage progressif, plus rapide pour le scénario des forêts activement gérées que pour celui des forêts surmatures. La dégradation initiale du bilan carbone avec une mobilisation accrue est due aux coupes de peuplements de fort volume qui diminuent rapidement le stock de carbone en forêt, un effet qui n'est que partiellement compensé par la substitution et la séquestration dans les produits bois. Une fois que les peuplements coupés repoussent, leur potentiel de séquestration redevient important et s'ajoute aux bénéfices de substitution liés à l'utilisation des produits bois.

Ainsi, sous les hypothèses de modélisation de l'étude de Valade *et al.* (2018), parmi lesquelles le maintien de la filière bois à sa structure et son efficacité actuelles, on trouve que l'augmentation de la production de produits bois, et la substitution et l'augmentation de la production biologique en forêt qui en résultent, ne permettent de compenser les émissions liées à la diminution du volume de bois sur pied que pour un des scénarios testés. Pour plus de détails sur ces résultats, voir Valade *et al.* (2018) et Valade *et al.* (2017).

### Deux approches de modélisation différentes

Le fait que mobiliser plus de bois n'est pas meilleur pour l'atmosphère à moyen terme est un résultat qui tend à se généraliser malgré des différences entre les réponses des modèles. Là où Valade *et al.* (2018) estime un temps de remboursement de la dette carbone entre vingt et trente ans pour trois des quatre scénarios et infini pour le quatrième, le cumul des effets de substitution ne contrebalance les pertes en forêt dans aucun des scénarios d'intensification étudiés par Roux *et al.* (2017) à l'horizon 2050. La dépendance de l'horizon de remboursement de la dette carbone en fonction des types de forêt et des hypothèses d'utilisation du bois trouvée ici est par ailleurs cohérente avec la revue de littérature du Joint Research Center qui indique un temps de remboursement allant de plusieurs décennies à plus d'un siècle suivant l'origine du bois (Agostini *et al.*, 2013). Plus particulièrement, les divergences de tendances entre les deux études françaises sont le résultat d'approches de modélisation différentes. Margot simule l'évolution de domaines d'étude construits à partir de l'agrégation de placettes, alors que BiCaFF simule explicitement chaque

3 Différence de bilan carbone cumulé avec un scénario « fil de l'eau » dans les études récentes sur la France. BiCaFF et Margot renvoient aux modèles utilisés dans Valade *et al.* (2018) et Roux *et al.* (2017) respectivement. Les scénarios sont décrits dans le tableau 1. Le bilan carbone représenté inclut le stockage en forêt et dans les produits bois, et la substitution.



placette. Alors que le scénario de référence de Margot est à volume récolté constant, celui de BiCaFF est à pratiques constantes, donc à volume récolté croissant. De plus, l'augmentation de la récolte avec Margot distingue seulement les forêts de conservation des forêts de production alors que BiCaFF distingue forêts surmatures, en surdensité et activement gérées.

### Application à la prise de décision

Dès lors, on peut poser la question sous un autre angle : en partant du présupposé qu'une augmentation de la récolte est souhaitable – par exemple pour des raisons économiques, quel scénario permet de réaliser cette augmentation avec le moindre impact carbone ? Cette approche revient à corriger les coefficients de substitution usuels n'incluant que les procédés de transformation (entre 0,59 et 0,75 en pondérant BO, BI, BE par leurs volumes respectifs, tableau ②) en y intégrant l'impact d'une récolte supplémentaire sur le stockage de carbone en forêt et dans les produits bois (encadré ①). Ces nouveaux coefficients de substitution « filière entière » calculés ici pour l'horizon 2050 (tableau ②) poussent à orienter les politiques vers la réduction du diamètre de coupe dans les forêts déjà activement gérées (0,4 tCO<sub>2</sub>-éq évitée par m<sup>3</sup> récolté) plutôt que vers la mobilisation des forêts surmatures (0,1 tCO<sub>2</sub>-éq émise par m<sup>3</sup> additionnel récolté, substitution négative) et *a fortiori* des forêts en sur-densité (0,9 tCO<sub>2</sub>-éq émise par m<sup>3</sup> additionnel récolté, substitution négative ; tableau ②). Les deux scénarii étudiés par Roux *et al.* (2017) donnent des coefficients de substitution « filière-entière » équivalents en termes d'impact carbone par mètre cube supplémentaire (0,3 et 0,4 tCO<sub>2</sub>-éq émise par m<sup>3</sup> additionnel récolté).

En rapportant ces coefficients non plus au m<sup>3</sup> récolté mais au m<sup>3</sup> de BE produit, grâce une allocation économique (voir annexe ①), trois des quatre scénarios de Valade *et al.* (2018) donnent un potentiel de substitution faible mais positif pour le bois énergie, alors que les scénarii étudiés

par Roux *et al.* (2017) convergent sur un coefficient de substitution négatif. Pour des politiques publiques qui envisageraient de subventionner le bois-énergie à hauteur de son impact sur le climat, c'est la gamme de variation de ce coefficient corrigé, multiplié par la valeur tutélaire du carbone, qu'il conviendrait d'utiliser.

### Conclusion

Les études françaises récentes sur le bilan carbone de scénarios d'augmentation de la récolte confirment les résultats à l'échelle européenne : une augmentation massive de la récolte augmentera les émissions de CO<sub>2</sub> pendant au minimum trois décennies, alors que les climatologues estiment que seule une diminution des émissions totales d'ici 2030 à 2050 peut nous permettre de rester sous le seuil des 1,5 degrés de réchauffement ciblés par l'Accord de Paris. Ces résultats vont également dans le sens de la relativisation du rôle du compartiment « forêt » dans l'atténuation du changement climatique, du moins en Europe (Luysaert *et al.*, 2018). Les leviers d'atténuation de la filière reposent donc sur l'orientation du bois vers les usages où la substitution est la plus efficace ou sur l'identification des situations forestières particulières où le laisser-faire a un bilan carbone négatif, et non sur l'augmentation massive de la récolte. ■

### Les auteurs

#### Aude VALADE

CREAF, Ecological and Forestry Applications Research Centre, Campus UAB, Edifici C., 08193 Bellaterra, Barcelone, Espagne.

✉ [a.valade@creaf.uab.cat](mailto:a.valade@creaf.uab.cat)

#### Valentin BELLASSEN

INRAE, AgroSup Dijon, UMR CESAER, Université Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France.

✉ [valentin.bellassen@inrae.fr](mailto:valentin.bellassen@inrae.fr)

### ② Dette carbone et correction des coefficients de substitution.

Les tirets indiquent que la dette carbone n'est pas remboursée à l'horizon temporel de la simulation. La dernière colonne propose une correction du coefficient de substitution pour le bois-énergie en retranchant à sa valeur originelle son impact sur le stockage en forêt et dans les produits-bois à l'horizon temporel 2015-2050. Cet impact suit une allocation économique entre BO et BIBE en pondérant l'impact d'un mètre cube moyen récolté par la valeur économique relative du bois énergie par rapport au bois d'œuvre (voir annexe ①). Une valeur négative du coefficient de substitution indique que le bois-énergie est plus émetteur que ses substituts fossiles.

| Scénario       | Échéance de la dette carbone | Récolte supplémentaire sur 2015-2050 (Mm <sup>3</sup> ) | Coefficient de substitution filière (tCO <sub>2</sub> éq m <sup>-3</sup> ) |                         | Coefficient de substitution bois-énergie (tCO <sub>2</sub> éq m <sup>-3</sup> ) |                         |
|----------------|------------------------------|---|--|-------------------------|---|-------------------------|
|                |                              |   | hors forêt   | avec compartiment forêt | hors forêt  | avec compartiment forêt |
| BiCaFF_m       | 2040                         | 660   | 0,66   | 0,4                     | 0,5   | 0,33                    |
| BiCaFF_o       | –                            | 217   | 0,59   | – 0,9                   | 0,5   | – 0,42                  |
| BiCaFF_d       | 2055                         | 606   | 0,65   | – 0,1                   | 0,5   | 0,07                    |
| BiCaFF_all     | 2050                         | 1 483   | 0,65   | 0,0                     | 0,5   | 0,12                    |
| Margot_DD_dyn  | –                            | 391   | 0,75   | – 0,3                   | 0,5   | – 0,15                  |
| Margot_DD_int  | –                            | 982   | 0,73   | – 0,4                   | 0,5   | – 0,16                  |
| Margot_std_dyn | –                            | 391   | 0,76   | – 0,7                   | 0,5   | – 0,38                  |
| Margot_std_int | –                            | 982   | 0,73   | – 0,7                   | 0,5   | – 0,36                  |

## ANNEXE 1

### Allocation économique pour la correction du coefficient de substitution du bois-énergie

Lorsqu'un procédé émetteur (ou séquestrant) – ici une récolte de bois – génère plusieurs produits – ici du BO, du BI et du BE – et qu'on ne peut compartimenter physiquement les émissions de chaque produit, il est nécessaire d'allouer les émissions du procédé entre les produits. La manière la plus courante et la plus logique de le faire est l'allocation économique : chaque co-produit se voit attribuer des émissions (ou de la séquestration) au prorata de sa valeur économique. Cette valeur est en effet le meilleur proxy de sa part de responsabilité dans l'existence du procédé, et donc des émissions qui en résultent.

Dans notre cas, l'allocation économique résulte de l'équation A1.

Équation A1

$$CS_{BE} = CS_{BE_{forêt}} + CS_{BE_{hors-forêt}}$$

$$CS_{BE_{forêt}} = (Bilan\ C\ forêt_{scénario} - Bilan\ C\ forêt_{ref}) \times \frac{Valeur\ BE}{Valeur_{BOBIBE}} \times \frac{1}{Récolte\ BE_{scénario} - Récolte\ BE_{ref}}$$

$$= (Bilan\ C\ forêt_{scénario} - Bilan\ C\ forêt_{ref}) \times \frac{Prix_{BE}}{(Récolte\ BE_{scénario} - Récolte\ BE_{ref}) \times Prix_{BO} \cdot Part_{BO} + Prix_{BIBE} \cdot Part_{BIBE}}$$

| Variable                     | Définition   | Valeur/unité                             | Source                      |
|------------------------------|--|--|-----------------------------|
| $CS_{BE}$                    | Coefficient de substitution du bois énergie                              | t CO <sub>2</sub> éq m <sup>-3</sup>     | Cet article (tableau 1)     |
| $CS_{BE_{forêt}}$            | Composante « forêt » du coefficient de substitution du bois énergie      | t CO <sub>2</sub> éq m <sup>-3</sup>     | Cet article (tableau 1)     |
| $CS_{BE_{hors-forêt}}$       | Composante « hors forêt » du coefficient de substitution du bois-énergie | 0,5 t CO <sub>2</sub> éq m <sup>-3</sup> | Ademe (2015)                |
| $Bilan\_C\_forêt_{scénario}$ | Bilan carbone cumulé de « scénario » sur 2015-2050                       | t CO <sub>2</sub> éq                     | Cet article (figure 2)      |
| $Récolte_{scénario}$         | Récolte cumulée de « scénario » sur 2015-2050                            | m <sup>3</sup>                           | Cet article (figure 1)      |
| $Prix_{BE}$                  | Prix du bois-énergie (approximé au prix des connexes de scierie)         | 33,3 euros m <sup>-3</sup>               | CEEB (2018) et FCBA (2012)  |
| $Prix_{BO}$                  | Prix du bois d'œuvre (prix des sciages)                                  | 300 euros m <sup>-3</sup>                | CEEB (2018)                 |
| $Part_{BO}$                  | Part du bois d'œuvre dans les produits de la récolte totale              | 8,00 %                                   | Valade <i>et al.</i> (2018) |
| $Part_{BIBE}$                | Part du BIBE dans les produits de la récolte totale                      | 92,00 %                                  | Valade <i>et al.</i> (2018) |

Réchauffement du climat : la forêt française peut-elle apporter des solutions d'ici 2050 ?

## EN SAVOIR PLUS...

- ▣ **ADEME**, 2015, *Forêt et atténuation du changement climatique*, Les avis de l'ADEME.
- ▣ **AGOSTINI, A., GIUNTOLI, J., BOULAMANTI, A.**, 2013, *Carbon accounting of forest bioenergy (JRC Technical Report)*, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy.
- ▣ **CEEB**, 2018, *Prix et indices nationaux sciages et bois énergie - 2<sup>e</sup> trimestre 2018*, Centre d'études de l'économie du bois.
- ▣ **CHARRU, M., SEYNAVE, I., MORNEAU, F., BONTEMPS, J.-D.**, 2010, Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France, *For. Ecol. Manag.*, n° 260, p. 864–874, disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.005>
- ▣ **COLIN, A., HERVÉ, J.-C., LUCAS, S.**, 2011, *Prélèvements de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles*, 28 p.
- ▣ **FCBA**, 2012, *Mémento*, Institut technologique forêt, cellulose, bois-construction et ameublement.
- ▣ **JAYR, E., LAURENT, J., LEBERT, A., CHEVALIER, J.**, 2011, *Bilan carbone appliqué au bâtiment: Guide méthodologique*, Angers ADEME.
- ▣ **LAMONTAGNE, J.-R., REED, P.-M., MARANGONI, G., KELLER, K., GARNER, G.-G.**, 2019, Robust abatement pathways to tolerable climate futures require immediate global action, *Nat. Clim. Change* 1.
- ▣ **LOUSTAU, D.**, 2004, *Rapport final du projet CARBOFOR, Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts des différents scénarios climatiques et sylvicoles (n° GIP ECOFOR n°3/2001)*, GICC 2001, Bordeaux.
- ▣ **LUYSSAERT, S., MARIE, G., VALADE, A., CHEN, Y.-Y., DJOMO, S.N., RYDER, J., OTTO, J., NAUDTS, K., LANSØ, A.S., GHATTAS, J., MCGRATH, M.J.**, 2018, Trade-offs in using European forests to meet climate objectives, *Nature*, 562, 259, disponible sur : <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- ▣ **MILLAR, R.J., FUGLESTVEDT, J.S., FRIEDLINGSTEIN, P., ROGELJ, J., GRUBB, M.J., MATTHEWS, H.D., SKEIE, R.B., FORSTER, P.M., FRAME, D.J., ALLEN, M.R.**, 2017, Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 C, *Nat. Geosci.*, n° 10, 741.
- ▣ **PRETZSCH, H.**, 2009, *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*, Springer Science & Business Media.
- ▣ **ROUX, A., DHÔTE, J.-F., ACHAT, D., BASTICK, C., COLIN, A., BAILLY, A., BASTIEN, J.-C., BERTHELOT, A., BRÉDA, N., CAURLA, 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., RIGOLOU, 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*, INRA, IGN.
- ▣ **VALADE, A., BELLASSEN, V., MAGAND, C., LUYSSAERT, S.**, 2017, Sustaining the sequestration efficiency of the European forest sector, *For. Ecol. Manag.*, n° 405, p. 44-55.
- ▣ **VALADE, A., LUYSSAERT, S., VALLET, P., NJAKOU DJOMO, S., JESUS VAN DER KELLEN, I., BELLASSEN, V.**, 2018, Carbon costs and benefits of France's biomass energy production targets, *Carbon Balance Manag.*, 13, 26, disponible sur : <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0113-5>
- ▣ **WYKOFF, W.R.**, 1990, A Basal Area Increment Model for Individual Conifers in the Northern Rocky Mountains, *For. Sci.*, n° 36, p. 1077-1104.