



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

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA ET L'IGN
POUR LE MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION - JUIN 2017



En vue de limiter le changement climatique en cours, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et le stockage de carbone sont des objectifs mondiaux d'importance majeure que chaque échelon national a vocation à décliner. Les forêts et, plus largement, la filière forêt-bois sont considérées comme stratégiques pour l'atténuation du changement climatique, notamment grâce à leur capacité de stockage du carbone et de limitation des émissions de GES. Le bilan carbone de la filière combine un effet de stockage du carbone dans les écosystèmes et dans les produits issus de la filière et un effet de substitution résultant de l'usage du bois en remplacement d'énergies ou de matériaux concurrents, plus émetteurs de GES. Dans ce contexte, le Ministère français de l'Agriculture et de l'Alimentation a confié à l'INRA et à l'IGN la réalisation d'une étude sur le potentiel d'atténuation des émissions de GES par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050. Sont ici concernées toutes les forêts métropolitaines disponibles pour la production de bois ainsi que les industries qui transforment les produits ligneux et les acteurs sociaux qui contribuent via cette chaîne de production primaire et de transformation au développement de la bioéconomie.

En simulant, à l'horizon 2050, les effets de trois scénarios contrastés de gestion forestière, l'étude confirme le rôle central de la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique. Au stockage de carbone dans la biomasse forestière, s'ajoutent les bénéfices importants à attendre d'une accélération des usages du bois en tant que source d'énergie et surtout en tant que matériau. Ce second facteur, qu'une gestion forestière active et une politique volontariste de plantations pourraient favoriser, jouerait en outre un rôle d'autant plus crucial que les conditions climatiques auraient tendance à se dégrader ou que la forêt subirait des crises biotiques ou abiotiques de grande ampleur.

Quatre leviers forestiers permettent d'agir sur le changement climatique : stockage du carbone dans (i) les écosystèmes forestiers et (ii) les produits-bois, effet de substitution du bois à des (iii) matériaux et (iv) énergies fossiles plus émetteurs de GES. Ces quatre leviers étant directement liés aux politiques forêt-bois, il y a lieu de se demander sur le(s)quel(s) d'entre eux il serait intéressant d'agir pour favoriser le stockage du carbone dans l'écosystème forestier en limitant les prélèvements ou le stockage en produits bois et les effets de substitution en stimulant les usages des produits issus de la filière bois.

La mobilisation actuelle des quatre leviers forestiers de stockage du carbone par la filière française

L'évaluation d'un bilan carbone de la filière forêt-bois française, relatif aux quatre leviers forestiers identifiés, a tout d'abord nécessité de réaliser une revue de l'abondante littérature scientifique internationale traitant de ces questions. Il s'est agi, d'une part, de repérer et d'affiner les hypothèses et coefficients de stockage et substitution, applicables au contexte français et, d'autre part, d'identifier les incertitudes qui peuvent peser sur certains paramètres clés.

Le stockage de carbone dans l'écosystème forestier résulte de sa capacité à absorber du CO₂ atmosphérique pour l'accumuler dans la biomasse vivante (aérienne et souterraine), le bois-mort et les sols forestiers. La dynamique forestière est ici cruciale, sachant qu'elle est sensible à l'âge des peuplements, aux modes de gestion, au climat et aux crises biotiques et abiotiques.

Le stockage de carbone dans les produits-bois ou à base de bois dépend directement des rendements industriels, de l'usage qui est fait du bois et de la durée de vie des produits plus ou moins pérennes concernés.

La substitution-énergie correspond à la quantité d'émissions de CO₂ économisée par l'usage du bois-énergie plutôt que le recours à des énergies de référence (fuel, gaz, charbon, mix électrique ou énergétique national...).

La substitution-produits correspond à la quantité d'émissions de CO₂ évitée par le recours au matériau-bois plutôt qu'à des matériaux de référence (béton, acier, plâtre, aluminium...) dans des secteurs clés comme la construction.

Centrale pour appréhender le rôle de la forêt et de ses produits dans l'atténuation du changement climatique, l'évaluation des effets de substitution est délicate, car elle suppose de comparer les filières de production de chaque produit qui, selon les principes de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), vont des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie. Les coefficients de substitution dépendent ainsi du contexte industriel national.

En mobilisant un jeu de coefficients de stockage et de substitution issus de la littérature internationale et en les adaptant au contexte français, on peut convertir les flux de matière entre les différents stades de la filière forêt-bois française, exprimés en Mm³/an, en flux d'équivalents CO₂ relatifs aux différents leviers d'atténuation, exprimés en MtCO₂éq/an (Figure 1).

Ce bilan est actuellement dominé par le stockage dans les écosystèmes forestiers, à hauteur, selon notre évaluation, de 88 MtCO₂éq/an. Le compartiment le plus sollicité pour le stockage est celui de la biomasse aérienne et souterraine des peuplements feuillus. Le stockage en biomasse de résineux, en bois-mort et dans les sols intervient également mais à bien moindre hauteur. Le stockage annuel via les usages des produits bois est ici considéré comme nul, ce qui signifie qu'actuellement, la quantité de carbone stockée dans les productions de l'année est égale au déstockage lié à la fin de vie et à la destruction des produits bois antérieurs. L'effet favorable des usages ne s'appuie donc que sur les effets de substitution. L'effet majeur revient à la substitution bois-matériau (32,8 MtCO₂éq/an selon notre évaluation), la substitution liée aux usages énergétiques ne contribuant que faiblement au bilan carbone de la filière.

A l'avenir, les orientations de gestion forestière et les évolutions de la filière forêt-bois, notamment au travers des niveaux de prélèvements, des rythmes de reboisement et des usages des produits, influenceront directement le bilan carbone de la filière. Elles agissent, d'une part, via la dynamique des peuplements et leur capacité à stocker ou à émettre du carbone et, d'autre part, via la capacité de la filière à mettre en marché des produits à fort taux de substitution par rapport aux filières concurrentes. Un maintien à un faible niveau de récolte permettrait, dans un contexte de croissance du stock sur pied, un stockage additionnel de carbone en forêt mais limiterait le déploiement des stratégies de bioéconomie et donc les effets de substitution attendus du développement des usages de produits bois. La limitation des prélèvements pourrait néanmoins engendrer une plus grande sensibilité des forêts aux aléas climatiques et un risque de pertes accrues lors des crises diverses qui pourraient affecter les forêts françaises. A l'inverse, une récolte plus soutenue, autorisant une transformation des peuplements et une stratégie d'adaptation au changement climatique, affaiblirait temporairement le puits de carbone en forêt, mais aurait un effet compensé, au moins en partie, par le renforcement des effets de substitution en aval. En stimulant la filière, cette dernière stratégie entrerait en résonance avec les objectifs du développement de la bioéconomie et les avantages économiques et en emplois qui y sont liés.

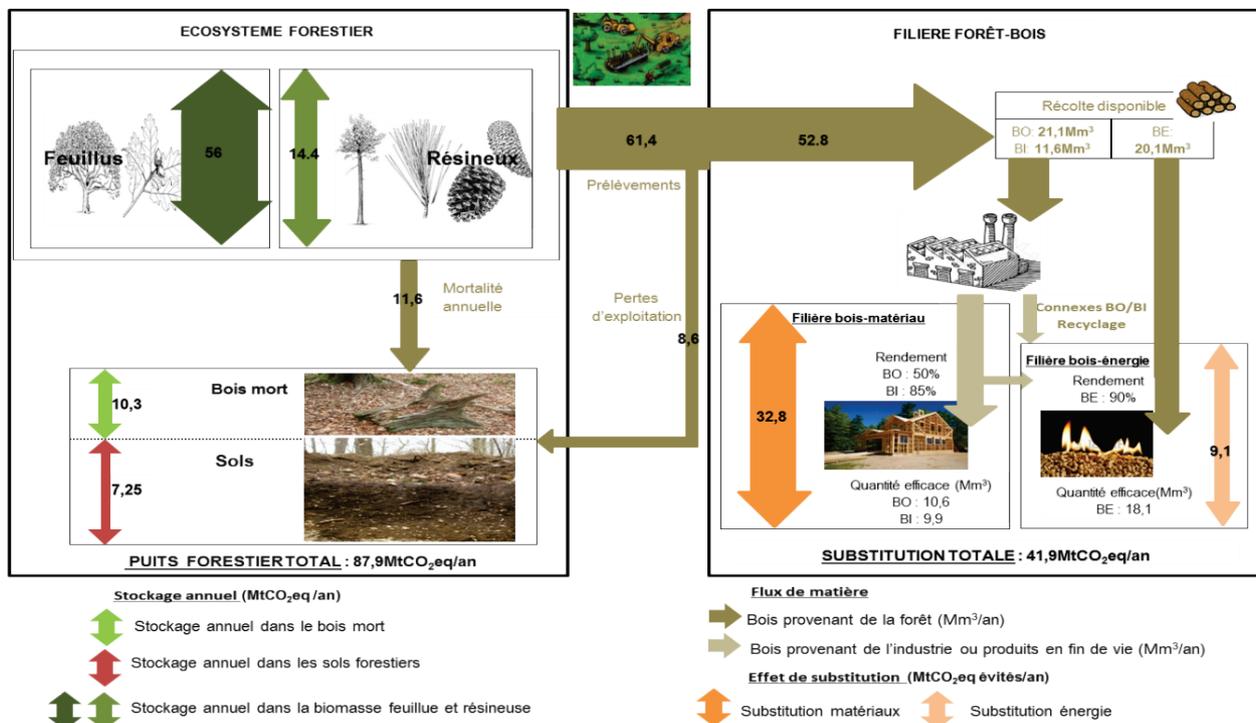


Figure 1 – Flux de matière et de CO₂ aux différents stades de la filière forêt-bois française en 2013 (VAT=Volume aérien total, BO=Bois d'œuvre, BI=Bois d'industrie, BE=Bois énergie)

NB : La variation de stock de carbone dans les produits bois est estimée à 0 et -0,1 MtCO₂eq/an pour BO et BI respectivement et n'apparaît donc pas dans les flux de CO₂ de la filière en 2013

Trois scénarios de gestion forestière pour stimuler le rôle de la filière forêt-bois

En vue d'évaluer les impacts, à l'horizon 2050, de diverses stratégies de mobilisation des leviers forestiers d'atténuation, trois scénarios de gestion forestière ont été simulés, en s'appuyant sur trois modèles complémentaires (Encadré, p. 5). Ces outils permettent d'intégrer dans l'analyse les dynamiques de la ressource, variables selon les effets du changement climatique et les crises que peuvent subir les forêts, les niveaux différenciés de prélèvements et le devenir des produits bois. Ces trois scénarios de gestion se distinguent par le poids relatif qu'ils donnent au puits forestier, au stockage dans les produits bois ou aux effets de substitution issus de leur utilisation.

Scénario « Extensification et allègement des prélèvements »

La pression sociale pour une plus forte naturalité couplée à un contexte de signaux, prix et politique, peu incitatifs conduirait à la poursuite d'une extensification, avec de vastes espaces en libre évolution et une gestion peu active d'une bonne partie des peuplements forestiers. Les forêts de montagne et méditerranéennes feraient l'objet d'une gestion minimale tandis que certaines forêts du Massif central resteraient sous-exploitées. Les gestionnaires forestiers feraient confiance à l'évolution spontanée des écosystèmes forestiers pour s'adapter au changement climatique.

La récolte nationale resterait proche du niveau actuel (50 Mm³ VAT/an), soit une **baisse du taux de prélèvement de 50 % de l'accroissement biologique net à 42 % en 2035 et 37 % en 2050**. On observerait la poursuite du « grignotage » des gros diamètres feuillus pour des débouchés bois-énergie. L'absence de mécanisation adaptée pour la récolte des feuillus, ainsi que l'affaiblissement de leur sciage, concentreraient la transformation nationale sur la ressource en résineux.

Excepté dans le massif landais, la pratique dominante serait basée sur la régénération naturelle. Compte tenu de l'absence de gestion active qui caractérise une majorité de forêts dans ce scénario, on s'attend à la poursuite de la capitalisation rapide observée depuis 30 ans et à un accroissement du puits de carbone *in situ*. Un certain ralentissement de la croissance forestière lié au vieillissement et à la densité des peuplements en place pourrait induire, dans un terme à définir, une évolution moins favorable des ressources en bois mobilisables et du stock de carbone en forêt.

Scénario « Dynamiques territoriales »

Ce scénario est caractérisé par des crises plus ou moins territorialisées qui incitent acteurs de la filière et politiques forestières à emprunter des trajectoires divergentes entre territoires, avec un rôle d'orientation important dévolu aux Régions qui se substituent à l'État comme cadre de l'action collective. Un autre moteur du scénario est la forte demande en biomasse, surtout pour l'énergie, associée néanmoins à des prix peu rémunérateurs, qui induisent une simplification des pratiques de gestion et une spécialisation des objectifs. L'usage de bois d'industrie serait pénalisé par la forte demande en bois-énergie nécessaire à alimenter des réseaux de chaleur. La gestion resterait cependant extensive dans certaines régions (haute montagne et zone méditerranéenne). Forestiers et industriels seraient conscients des risques climatiques, mais le jeu des contraintes économiques, sylvicoles et environnementales laisserait peu d'opportunités pour transformer les pratiques.

Le niveau de récolte correspondrait au maintien du taux de prélèvement actuel sur la période (soit, en moyenne, 50 % de l'accroissement biologique net), **le volume prélevé évoluant de ce fait vers les 75 Mm³ VAT/an à l'horizon 2035**. De nouveaux procédés se développeraieent pour valoriser les feuillus, la capacité d'investissement des acteurs industriels français pouvant être amplifiée par des groupes étrangers installés là où les approvisionnements seraient sécurisés par contrats. Le niveau des investissements en forêt serait hétérogène, avec une légère extension des dessertes et des travaux sylvicoles uniquement dans les régions où la demande de l'aval et l'action politique locale combinerait leurs effets.

Scénario « Intensification avec plan de reboisement »

Dans un contexte économique et politique favorable à une transition forte et rapide, la consommation des bois feuillus serait facilitée par les innovations technologiques et les investissements en forêt et dans le tissu industriel de la filière, par l'évolution du comportement des consommateurs, par les efforts de formation et par les fortes incitations publiques au regroupement des propriétés, à la contractualisation et à la simplification des pratiques d'aménagement. Une telle conjoncture serait propice à un investissement forestier élevé, du fait de marchés motivants et d'une fiscalité plus favorable.

Ce contexte favoriserait une gestion plus active des forêts, permettant la mise en œuvre de diverses stratégies d'adaptation (sécurisation des services écosystémiques, amélioration de l'efficacité de la filière pour mieux absorber les chocs consécutifs aux événements extrêmes).

Les forêts de montagne seraient en partie remises en gestion ou reconstituées, tandis que les forêts méditerranéennes fourniraient davantage de bois-énergie, de bois d'industrie et de sciages résineux, voire feuillus de petit diamètre. Les modes de gestion sylvicole seraient marqués par des âges d'exploitabilité plus faibles (réduction des risques et adaptation aux procédés de transformation valorisant les petits diamètres) à la fois dans le massif landais et dans d'autres régions où ces itinéraires contribueraient à la diversification des massifs en espèces forestières et en classe d'âge.

Un **plan de reboisement** spécifique est mis en place dans ce scénario et concerne d'importantes surfaces déjà forestières mais peu productives ou sans avenir économique. L'objectif visé est de reboiser 50 000 ha/an pendant les 10 prochaines années, soit 500 000 ha au total. Ces plantations forestières auraient à terme un fort impact sur la production totale tant en quantité qu'en qualité, grâce à la diffusion de variétés très productives (résineux, peuplier), issues de programmes de sélection redéfinis dans un contexte d'interactions entre impacts du changement climatique et bio-économie.

La récolte nationale augmenterait, de manière différenciée entre régions, **vers un taux de prélèvement moyen de 70 % de l'accroissement biologique net en 2035**, taux qui resterait stable ensuite. Cette augmentation progressive mais importante nécessiterait une adaptation des capacités de production des industries concernées (pépiniéristes, première transformation française, mais aussi seconde et troisième transformation).

Biodiversité et services écosystémiques dans les 3 scénarios

Dans chacun des scénarios, on s'attend *a priori* à des bénéfices tangibles, bien que de natures différentes, en matière de biodiversité et services écosystémiques. Une extension du monitoring de la biodiversité serait utile dans les trois cas, afin de vérifier la réalité des bénéfices attendus et détecter des signaux de dégradation.

Des stratégies qui accentuent le rôle de la filière dans l'atténuation du changement climatique

Les effets des trajectoires décrites ci-dessus sur les différentes composantes du bilan carbone de la filière forêt-bois française ont été simulés jusqu'à l'horizon 2050 à l'aide du modèle de ressource de l'IGN, MARGOT (cf. Encadré, p. 5). Ces trajectoires se traduisent tout d'abord par une forte différenciation des volumes prélevés annuellement dans la forêt française, qui augmentent très sensiblement avec le niveau d'intensification. Le corollaire de cette accentuation des prélèvements est une croissance moindre des stocks de bois sur pied quand on passe du scénario « Extensification » au scénario « Intensification ».

De ce fait, les projections des capacités de stockage du carbone dans l'écosystème forestier (biomasse forestière, bois mort et sols) divergent selon les scénarios étudiés (Figure 2). L'accroissement du stockage annuel du carbone dans l'écosystème forestier est considérable dans le scénario « Extensification » : il passerait dans ce cas à plus de 130 MtCO₂eq/an en 2050. La croissance du stockage de carbone serait beaucoup plus modérée dans le scénario « Dynamiques territoriales » puisqu'il n'atteindrait pas les 100 MtCO₂eq/an en 2050. La tendance serait même à la baisse dans le scénario « Intensification » du fait de l'accroissement, jusque 2035, du taux de prélèvement et des effets du plan de reboisement.

Le plan de reboisement provoque, tout d'abord, une chute du stockage liée à la concentration des coupes rases entre 2021 et 2030 (Figure 2). Cette chute n'est que partiellement compensée dans les décennies

suivantes car l'horizon 2050 est trop proche pour que puissent apparaître à cet horizon les bénéfices des nouvelles plantations. Les bénéfices liés à ces plantations n'apparaîtront vraiment qu'après 2050 et culmineront vers 2070. De plus, le gain de ces plantations est plus faible qu'espéré du fait des contraintes réalistes appliquées au plan de reboisement : la contrainte d'accessibilité et la reprise de peuplements en impasse sylvicole n'ont pas amené à proposer au reboisement les surfaces les moins productives.

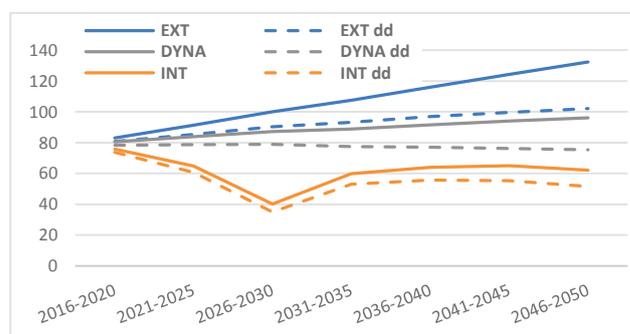


Figure 2 : Stockage annuel de carbone dans l'écosystème forestier selon les trois scénarios de gestion, avec et sans introduction de l'effet « densité dépendance » (dd), climat actuel, en MtCO₂ eq/an.

Il faut néanmoins nuancer ce résultat en tenant compte d'une des limites du modèle de ressource utilisé. S'appuyant sur des données d'observation et simulant la croissance d'un effectif d'arbres, il ne prend pas en compte les effets qu'une capitalisation très prononcée des forêts françaises pourrait avoir sur la productivité forestière. Celle-ci pourrait fléchir, à un horizon tel que 2050, en raison d'un effet défavorable de la densité des peuplements sur la croissance. En introduisant, à des fins exploratoires, une contrainte de cette nature dans la modélisation (« dd » dans la Figure 2), les évolutions de la capacité de stockage de la forêt française s'en trouvent largement modifiées. L'écart entre les scénarios se réduit fortement : la croissance entre 2016 et 2050 de la capacité de stockage annuel ne serait plus que de 25 % dans le scénario « Extensification » (contre + 60 % sans cette contrainte), alors que la capacité de stockage resterait stable avec le scénario « Dynamiques territoriales » et que la chute serait légèrement plus accentuée dans le scénario « Intensification ».

Le stockage dans les produits bois et, surtout, les émissions de GES évitées grâce au recours aux matériaux bois ou à l'énergie bois viennent compléter le bilan carbone de la filière. Toujours positifs, les effets de substitution liés aux usages du bois se maintiendraient dans le temps avec le scénario « Extensification » ; ils seraient légèrement croissants dans le scénario « Dynamiques territoriales » et leur croissance serait forte dans le scénario « Intensification » (Figure 3.A).

Avec les hypothèses retenues ici, le stockage cumulé sur toute la période 2016-2050 obtenu dans le scénario « Intensification » par effet de substitution serait ainsi de 33 % supérieur à celui résultant du scénario « Dynamiques territoriales » et de 60 % supérieur à celui du scénario « Extensification » (Figure 3.B).

Les niveaux d'émissions évitées sont, dans l'état actuel des connaissances, très sensibles aux coefficients de substitution bois-matériau et à leur évolution dans le temps. Les incertitudes en la matière sont de plusieurs ordres. La valeur retenue ici, commune au bois d'industrie (BI) et au bois d'œuvre (BO), de 1,6 tCO₂ évitées/m³ de bois est la valeur centrale de la plage de variation repérée dans la littérature, allant de 0,59 à 3,47 tCO₂/m³.¹ Les coefficients de substitution du bois-matériau dépendent du type de produits bois pris en compte et des technologies alternatives considérées en référence, rendant le résultat tout d'abord sensible à la finesse de désagrégation des produits issus de BI et de BO.

¹ Sathre, R., O' Connor, J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13 (2): 104-114.

Encadré : Trois modèles complémentaires pour simuler les dynamiques de la ressource et des prélèvements

Au centre du dispositif de simulation des effets des divers scénarios envisagés à l'horizon 2050, le modèle **MARGOT** (*Matrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale*), développé par l'IGN, permet une analyse fine de la dynamique de la ressource forestière à l'échelle régionale. En s'appuyant sur des « domaines d'étude », basés sur les données collectées dans le cadre de l'enquête d'Inventaire Forestier National (IFN) et regroupant des peuplements comparables en termes d'essence, de propriété, de conditions de milieu et de sylviculture, il associe deux modèles démographiques pour évaluer l'évolution de la ressource forestière : l'un décrit un effectif d'arbres (hormis les peupleraies) par classe de diamètre (de 5 cm à 90 cm et plus) et y applique un taux de croissance de son volume moyen identique à celui observé au cours d'une période antérieure pour la même classe de diamètre ; l'autre, centré sur les seules peupleraies cultivées, met en œuvre une démarche analogue mais par classe d'âge. Les taux de prélèvement peuvent y être fixés de diverses façons. Ils ont été maintenus constants (en taux) par rapport à la période antérieure dans le cas du scénario « Dynamiques territoriales ». Dans le cas du scénario « Intensification », ils ont été revisités afin de pouvoir augmenter les taux de prélèvement. Enfin, le scénario « Extensification » s'est appuyé sur les niveaux de récolte issus des simulations réalisées avec le modèle FFSM.

Le modèle économique **FFSM** (*French Forest Sector Model*), développé par l'UMR LEF à Nancy, est conçu principalement à des fins d'analyse théorique même s'il est calibré sur des données réelles. Il s'agit d'un modèle multi-modulaire dont un des modules décrit la filière économique en équilibre partiel. A partir de jeux de paramètres décrivant les comportements économiques des agents (propriétaires et gestionnaires forestiers, transformateurs, consommateurs), il fournit en sortie des variables économiques d'équilibre offre-demande des différents stades de la filière à l'horizon envisagé (prix, quantités offertes et demandées, échanges internationaux, surplus). Il permet donc une analyse économique des différents scénarios et envisage notamment les instruments de politiques publiques qu'il serait nécessaire de mettre en place pour orienter la dynamique des filières vers des trajectoires qu'elles ne suivraient pas sans incitation.

Pour tenir compte des effets du changement climatique sur la dynamique forestière, le **modèle GO+**, développé par l'UMR ISPA à Bordeaux, a été mobilisé. En représentant les principaux processus biophysiques et biogéochimiques d'un écosystème forestier pour certaines espèces forestières de production (Pin maritime, Douglas et Hêtre), ce modèle de croissance, de production et de gestion forestière permet la prise en compte de modifications de conditions environnementales, notamment climatiques, dans l'analyse des dynamiques forestières. Les anomalies de croissance que GO+ met en évidence en cas d'accroissement des effets du changement climatique (RCP 8.5), ont alors été introduites dans le modèle MARGOT pour en modifier les paramétrages : les résultats du modèle « Hêtre » ont été utilisés pour tous les feuillus ; ceux du « Pin maritime » pour tous les pins et ceux du « Douglas » pour tous les autres résineux.

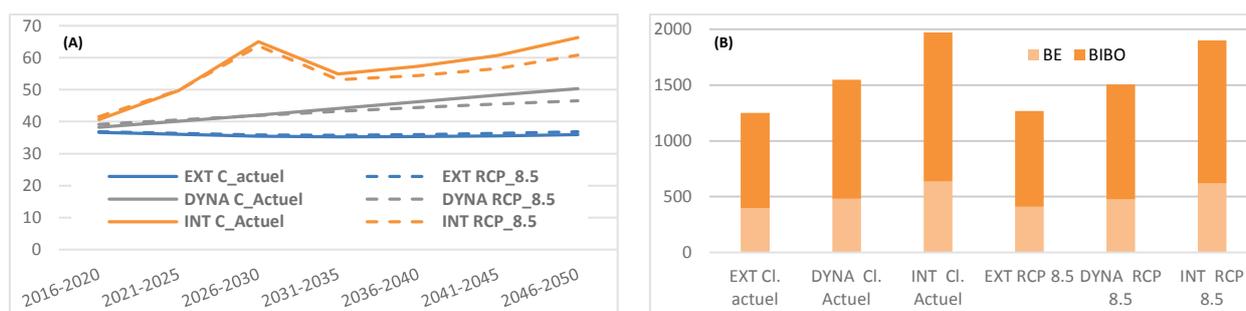


Figure 3 : Emissions de GES évitées par effet de substitution des produits issus de la filière selon les trois scénarios de gestion et les deux options climatiques, climat actuel et climat dégradé (RCP 8.5). (A) Stockage annuel en MtCO₂ eq/an ; (B) Stockage cumulé 2016-2050 en MtCO₂ eq

Par ailleurs, leur évolution, d'ici à 2050, est délicate à envisager car dépendant des évolutions comparées des technologies à mettre en concurrence et des usages à venir des produits bois : une accentuation des usages en bois d'œuvre au détriment du bois d'industrie (non pris en compte dans cette étude) couplée à une faible amélioration de l'empreinte environnementale des filières concurrentes, amènerait à envisager une croissance dans le temps de ces coefficients.

Quoiqu'il en soit, et en dépit des deux points d'incertitude majeurs auxquels sont sensibles les résultats (vitesse d'évolution de la productivité forestière aux horizons lointains ; niveau et évolution des coefficients de substitution bois-matériau), il ressort des trois scénarios un renforcement du rôle important de la filière forêt-bois française dans l'atténuation des émissions de GES à l'horizon 2050. Ce rôle s'appuie sur les capacités de stockage du carbone dans l'écosystème forestier et sur les effets de substitution limitant les émissions de GES que le recours aux produits bois pourrait permettre. Le premier effet, plus favorable au scénario « Extensification », pourrait cependant être limité du fait des effets du vieillissement de la ressource sur pied sur la productivité globale de la forêt. Le second, plus favorable au scénario « Intensification », pourrait être accentué si les usages du bois et les évolutions technologiques distinguent encore mieux qu'aujourd'hui les produits bois aux coefficients potentiellement les plus forts.

La nécessité d'importants efforts collectifs pour accroître les usages de la ressource

L'analyse économique, menée à l'aide du modèle FFSM (cf. Encadré), met en lumière les freins économiques à l'accroissement des prélèvements tel qu'envisagé dans le scénario « Intensification » et même « Dynamiques territoriales ». Ainsi, si se maintiennent en l'état la structure industrielle de la filière et les préférences des consommateurs pour les différents produits bois, il s'avérerait très difficile et très coûteux en aides publiques, d'augmenter les niveaux de prélèvements pour maintenir les taux actuels de prélèvement, hypothèse centrale du scénario « Dynamiques territoriales ». Pour faire face à la faible évolution « spontanée » des prix, induite par l'absence de modification de la structure de l'offre, un signal économique très fort auprès des consommateurs et des producteurs serait nécessaire. Côté demande, il y a lieu d'inciter les consommateurs à orienter leurs comportements vers les produits bois. Côté offre, il y a nécessité à aider les propriétaires forestiers et les secteurs de la transformation pour les inciter à mettre en marché leur ressource et à la transformer en produits bois adéquats.

Quelle que soit la forme de l'effort collectif à fournir pour accroître les niveaux de prélèvements, les gains pour la filière dans son ensemble pourraient être conséquents. Ainsi, les gains économiques que consommateurs, propriétaires et transformateurs tireraient du simple passage d'un scénario « Extensification » à un scénario de type « Dynamiques territoriales » pourraient doubler et les conséquences en emplois mériteraient d'en être évaluées.

L'impact potentiellement important du changement climatique sur le bilan carbone

Les effets que les scénarios de gestion forestière ont sur chaque composante du bilan carbone de la filière, peuvent être modifiés par les conséquences du changement climatique sur les peuplements forestiers et l'évolution de la ressource. Le climat moyen de la période 2003-2013 constitue ici ce que l'on nomme le « climat actuel ». Il présente, à l'horizon 2050, une succession d'années sèches comme cela a été le cas de 2003 à 2006. Ce climat « témoin » est comparé à une option accentuant les effets du changement climatique par rapport au régime climatique actuel, basée sur la trajectoire RCP 8.5 du GIEC. Les impacts de ce « climat dégradé » sur la productivité forestière ont été étudiés à l'aide du modèle GO+ avant d'être intégrés au modèle MARGOT (cf. Encadré, p. 5). Les effets de la sécheresse sur la mortalité ont nécessité la mobilisation des données du réseau systématique de surveillance de la forêt. Sous ce forçage climatique, une sécheresse d'intensité supérieure ou égale à celle de 2003 est envisageable dès la première période 2016-2020 avec une récurrence quasi systématique sur plusieurs années. Elle est considérée ici comme provoquant une mortalité additionnelle, plus forte sur résineux que sur feuillus, qui touche les seuls arbres adultes de moyen et gros bois, sans distinction spatiale ni temporelle.

Dans ce cas et quel que soit le scénario de gestion envisagé, la capacité de l'écosystème forestier français à stocker du carbone se trouverait fortement réduite (Figure 4). Le stockage annuel n'augmenterait plus que de 30 % pour le scénario « Extensification » entre 2016 et 2050 (contre + 60 % en climat actuel) ; il serait quasi constant pour le scénario « Dynamiques territoriales » (contre + 20 %) et il chuterait de 40 % dans le scénario « Intensification » (contre une baisse de 20 % entre 2016 et 2050 en climat actuel).

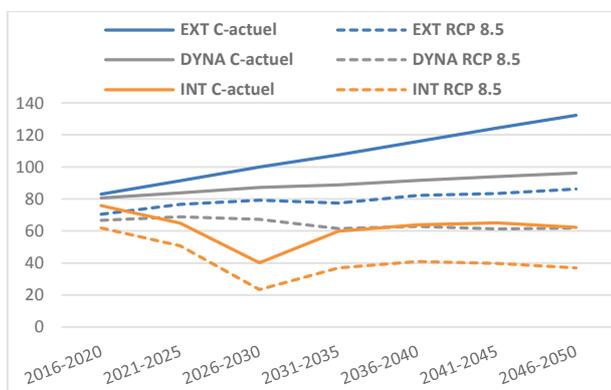


Figure 4 : Stockage annuel dans l'écosystème forestier selon les trois scénarios de gestion, comparaison entre climat actuel et climat dégradé (RCP 8.5), en MtCO₂eq/an

L'impact sur les effets de substitution serait de bien moindre ampleur. Pratiquement identique pour le scénario « Extensification », la trajectoire d'émissions de GES évitées par substitution des produits se positionne, en cas d'aggravation des effets du changement climatique, très légèrement en-dessous de celle obtenue en climat actuel pour les scénarios « Dynamiques territoriales » et « Intensification » (Figure 3.A). Ainsi, le cumul de ces émissions évitées sur les 35 ans étudiés serait très peu impacté par le renforcement des tendances climatiques (Figure 3.B).

Au total, la diminution du stockage de carbone dans l'écosystème forestier, potentiellement surestimée par le fait d'asseoir les résultats relatifs aux feuillus sur une essence particulièrement sensible à la sécheresse (le hêtre), pourrait être amortie, en cas d'aggravation des effets du changement climatique, par le maintien du niveau des effets

de substitution. En matière de bilan carbone, l'impact global serait alors moins défavorable pour les scénarios s'appuyant le plus sur les effets de substitution (« Intensification » et « Dynamiques territoriales ») et serait plus pénalisant pour un scénario de type « Extensification ».

Des crises qui atténuent les écarts entre scénarios de gestion

La fréquence et l'intensité des aléas biotiques et abiotiques auxquels sont soumises les forêts françaises pourraient à l'avenir augmenter. Certaines crises majeures, telles que tempêtes, incendies ou invasions biologiques sévères, peuvent bouleverser les gains attendus d'un stockage de carbone dans l'écosystème forestier national. C'est pourquoi on a introduit, dans deux des scénarios précédemment décrits (« Extensification » et « Dynamiques territoriales »), trois types de crises majeures : (i) incendies de grande envergure dépassant les capacités de prévention, dont la probabilité serait accentuée à l'issue de périodes de sécheresse répétées et donc renforcée avec le changement climatique ; (ii) tempêtes accompagnées de leurs cascades de risques (pullulation de scolytes et incendies) ; (iii) invasions biologiques de grande ampleur touchant de façon drastique une proportion plus ou moins forte des essences de feuillus ou de résineux.

Incendies après sécheresse

Les périodes de sécheresse augmentent considérablement le risque d'incendies, comme ce fut le cas en 2003, année de référence avec près de 75 000 ha brûlés. Pour en mesurer l'impact sur le bilan carbone, une seule crise « incendies après sécheresse » a été positionnée au début de la période de simulation (2026-2030). Sa localisation et son ampleur varient en fonction d'un « indice de danger d'incendie » associé aux conditions climatiques. En considérant comme référence les mois de juillet et août 2003 pour le « climat actuel », cet indice débouche sur un risque d'incendie 2,4 fois plus élevé en climat dégradé (RCP 8.5). La surface totale brûlée lors de la crise s'élève alors à 75 000 ha dans le climat actuel et à 175 000 ha en climat dégradé. Sur chaque zone brûlée, la mortalité des arbres est totale.

Compte tenu de la faiblesse relative des surfaces finalement impactées et de la faible quantité de biomasse réellement consommée ne se retrouvant pas sous forme de bois mort, comparée à la surface forestière nationale, l'impact sur le bilan carbone de la filière de ce type de crise, vu au niveau national, est faible (Figures 5 et 6). Le stockage de carbone en forêt comme les émissions de GES évitées par effet de substitution ne sont pas modifiés par rapport au scénario sans crise, et ce même dans le cas d'un changement climatique plus sévère. Notons néanmoins que c'est plutôt à une succession de sécheresses et donc de crises incendiaires à laquelle il faut s'attendre. L'impact cumulé de chacune de ces crises, aux effets faibles, pourrait finalement peser sur le bilan carbone.

Tempête, suivie de pullulations de scolytes et d'incendies

On envisage ici le passage d'une tempête hivernale d'ampleur nationale entraînant, outre les dégâts associés en chablis et volis, une pullulation de scolytes sur pins et épicéas et une saison d'incendies pendant l'été de la même année. Les tempêtes Lothar et Martin de 1999 qui ont détruit 176 Mm³ de bois en France ont été prises en référence. La tempête simulée ici traverserait la France du sud-ouest vers le nord-est, au départ des Charentes entre 2026 et 2030, et toucherait une surface de 700 000 ha à 1 million d'ha.

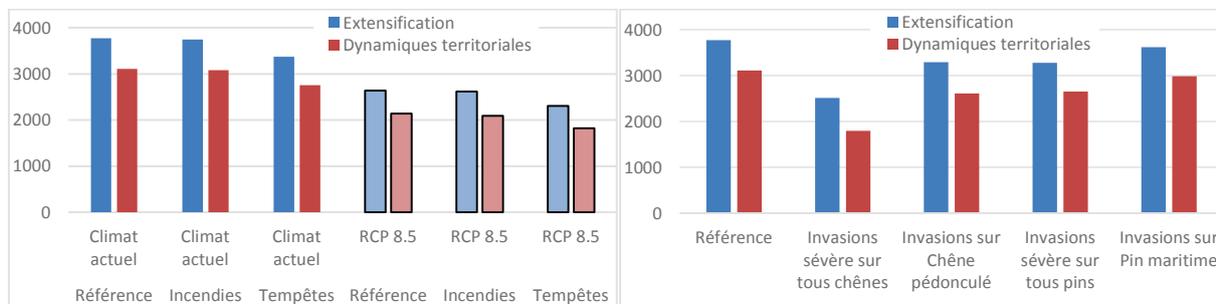


Figure 5 : Stockage C cumulé 2016-2050 dans l'écosystème forestier pour deux scénarios de gestion avec crises (MtCO₂ eq)

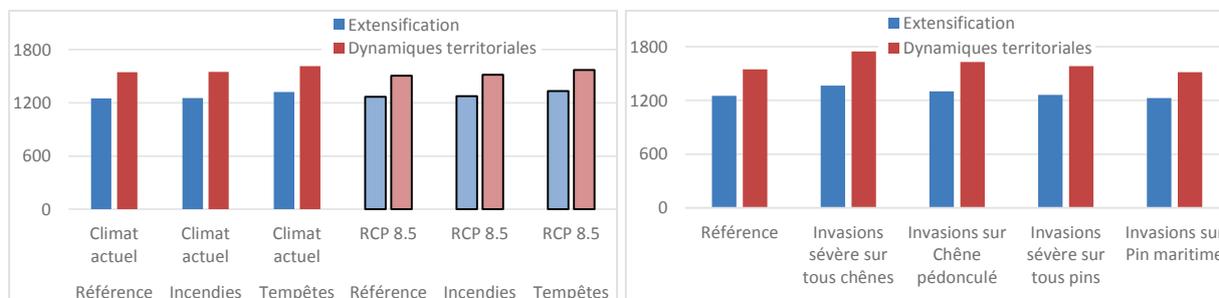


Figure 6 : Emissions de GES évitées par effet de substitution, cumul 2016-2050 selon les crises majeures (MtCO₂ eq)

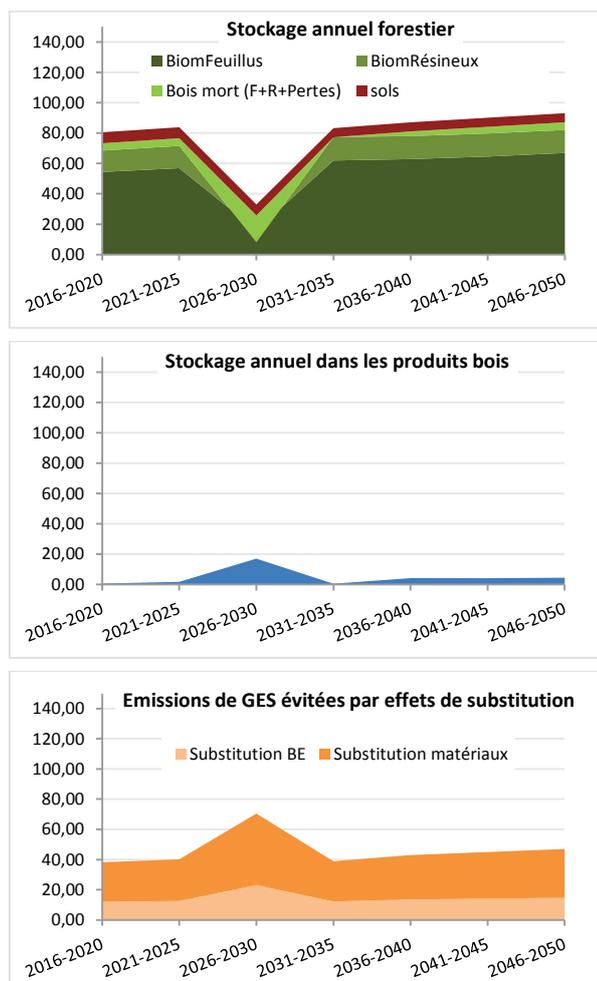


Figure 7 : Impacts sur le bilan carbone de la filière d'une Tempête intervenant en 2026-2030, suivie de scolytes et incendies ». Stockage annuel et émissions de GES évitées, « Dynamiques territoriales », Climat actuel, en MtCO₂eq/an.

Au cœur de la trajectoire, le taux de dégâts serait supérieur à 40 % alors que, dans une zone périphérique d'environ 685 000 ha, les peuplements seraient touchés à moins de 40 %.

Si les dégâts directs de la tempête ne sont pas affectés par le climat, le climat dégradé (RCP 8.5) modifie les dégâts additionnels liés aux pullulations de scolytes. Ceux-ci, compris pour le climat actuel entre 6 % et 12 % selon les espèces et la zone de dégâts, seraient multipliés par 1,7 dans le cas d'une dégradation du climat (RCP 8.5).

Les incendies post-tempête se concentrent sur la trajectoire de la tempête. L'ampleur envisagée est identique à celle de la crise feux de forêt post-sécheresse (75 000 ha en climat actuel et 175 000 ha en climat dégradé, RCP 8.5). La mortalité des arbres ayant survécu aux tempêtes y a été considérée comme totale

L'effet est, cette fois, beaucoup plus conséquent, tout au moins ponctuellement. Ainsi, dans le cas, par exemple, du scénario « Dynamiques territoriales » en climat actuel, le stockage annuel en forêt chuterait brutalement de 60 % entre la période 2021-2025 et celle juste après le passage de la tempête, 2026-2030 (Figure 7). Le choc sur la biomasse forestière serait néanmoins quelque peu compensé par un excès de bois mort qui conserverait en forêt une partie du carbone. Parallèlement, en considérant possible la mise en marché de grandes quantités de ce bois, le stockage de carbone en produits bois et les effets de substitution augmenteraient fortement, à la suite du choc : les émissions de GES évitées augmenteraient brutalement de 75 % et le stockage en produits, bien que faible, serait ponctuellement multiplié par 10.

Au total, d'une part, la baisse du stockage cumulé 2016-2050 en forêt est plus forte dans le scénario « Extensification » que dans le scénario « Dynamiques territoriales » (Figure 5). D'autre part, la légère hausse des émissions évitées par substitution est un peu plus favorable au scénario « Dynamiques territoriales » qu'au scénario « Extensification » (Figure 6).

Invasions biologiques

On a également introduit différents types d'invasions biologiques d'importance majeure pouvant toucher les chênes ou les pins. La dispersion du parasite de même que la dynamique de mortalité et de perte de croissance en fonction de son temps de présence ont été calées sur celles de la chararose du frêne. L'invasion entraîne une forte mortalité des recrues (plus modérée pour les adultes) et d'importantes pertes de croissance. Cette crise est analysée ici isolément de toutes les autres crises, y compris climatiques. Elle n'est

donc simulée que sous « climat actuel ». Les essences impactées, chênes ou pins, ainsi que la sévérité de l'attaque, sont déterminantes pour l'ampleur des effets de la crise. L'impact serait potentiellement faible si l'invasion ne touchait que les pins maritimes (avec un départ de l'invasion localisé dans le sud-ouest de la France) : le stockage en forêt, cumulé d'ici 2050, diminuerait de moins de 5 % (Figure 5) et les émissions évitées resteraient inchangées (Figure 6). Le choc serait plus important lors d'une invasion sur les seuls chênes pédonculés, compte tenu de l'importance de cette espèce dans la forêt française et d'un début d'invasion en multiples foyers localisés dans l'est de la France. Il serait d'ampleur à peu près équivalente si toutes les espèces de pins étaient touchées.

L'impact de la crise sur le bilan carbone de la filière serait, en revanche, de grande ampleur si toutes les espèces de chênes caducs étaient susceptibles d'être affectées. Dans ce cas de figure, le stockage annuel de carbone dans la biomasse des essences feuillues diminuerait fortement dès la période 2021-2025 et il deviendrait même négatif sur les deux périodes suivantes. Le surcroît de stockage dans le bois mort ne suffirait pas à maintenir le stockage annuel de l'écosystème forestier et, pris globalement sur la période 2015-2050, le stockage cumulé diminuerait d'un tiers dans le scénario « Extensification » et de 42 % dans le scénario « Dynamiques territoriales » (Figure 5). Dans le même temps, le stockage de carbone en produits bois et les émissions évitées par effet de substitution, fortement stimulés pendant la période de crise, augmenteraient mais faiblement au regard de l'importance des baisses du stockage en forêt : + 9 % en effet de substitution cumulé 2016-2050 pour le scénario « Extensification » et + 12 % en « Dynamiques territoriales », et ce sous l'hypothèse forte que les industries seraient capables de transformer 70 % des chênes dépérissant en scénario « Dynamiques territoriales », soit un volume annuel moyen de 15 Mm³/an.

Conclusions et besoins de recherche

Au travers des résultats de cette étude, il apparaît que le rôle de la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique devrait s'accroître d'ici 2050. Même si tel ou tel compartiment de la filière forêt-bois peut connaître des phases à bilan plus faible ou même négatif (comme à la suite d'une crise biotique profonde), l'ordre de grandeur est important, faisant de cette filière un acteur majeur pour le bilan national d'émissions et d'absorptions de gaz à effet de serre. Les différents leviers et compartiments considérés, *i.e.* stockage dans l'écosystème forestier et les produits bois ainsi que les émissions évitées par effet de substitution, jouent des rôles complémentaires dans le bilan carbone de la filière forêt-

bois. Ainsi, en cas d'intensification de la récolte du bois, d'effort de renouvellement sur un temps court ou de résorption de chablis provoqués par une tempête, le ralentissement du stockage de carbone dans la biomasse est compensé ou amorti par des phénomènes antagonistes, comme le bénéfice à attendre des émissions évitées par effet de substitution, le stockage temporaire en bois mort ou le stockage plus pérenne en produits bois. Les bénéfices à attendre des effets de substitution sont d'autant plus marqués que le niveau des prélèvements augmente. Néanmoins, l'augmentation des niveaux de prélèvements, dont les gains économiques et sociaux peuvent être conséquents, nécessite tout autant une évolution du comportement des consommateurs qu'une réorientation de l'appareil industriel de la filière.

A l'inverse du stockage en forêt qui diminuerait nettement dans ce type de situation, les effets de substitution seraient peu affectés par l'accentuation des effets du changement climatique ou par les diverses crises majeures que nous avons examinées. Ainsi, dans les scénarios de gestion forestière très active, les effets de substitution jouent un rôle d'amortisseur efficace de l'altération du stockage dans la biomasse.

Compte-tenu des incertitudes qui pèsent sur certains des paramètres clés, il est cependant particulièrement délicat de chercher à classer les trois scénarios de gestion forestière en fonction de leur bilan carbone à l'horizon 2050. Par ailleurs, cet horizon de projection est très inférieur à la durée des cycles forestiers des forêts métropolitaines majoritairement feuillues. Si les projections avaient été effectuées à un horizon plus lointain (2100 ou au-delà), les conclusions auraient pu être différentes. Néanmoins, les outils actuellement disponibles ne permettent pas de simuler de façon robuste à de tels horizons.

Au-delà d'une poursuite des réflexions et études à mener sur les modes de comptabilisation du carbone des différents compartiments de la filière, il y a lieu de maintenir les efforts d'étude et de recherche, notamment pluridisciplinaires, en matière de compréhension des mécanismes en jeu, d'acquisition de données et de modélisation nécessaire pour lever les incertitudes et verrous méthodologiques mis au jour au cours de cette étude et améliorer la prise en compte des effets du changement climatique et des crises qui pourraient en découler. L'enjeu est d'améliorer les capacités de couplage entre modèle de ressource basé sur des hypothèses démographiques, modèle biophysique permettant de modifier notamment les conditions climatiques et modèle économique permettant l'analyse des freins économiques à l'intensification des prélèvements. D'autre part, l'intégration de crises liées à des aléas biotiques ou abiotiques nécessite la coordination des sources de données, des outils de modélisation et des recherches sur leurs interactions.

Pour en savoir plus

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., Moisy C., Pâques L., 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, 96 p. + 226 p. (annexes)



147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33(0) 1 42 75 90 00
www.inra.fr



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE
L'ALIMENTATION