



ACADÉMIE
DES SCIENCES

INSTITUT DE FRANCE

Rapport du Comité des sciences de l'environnement
de l'Académie des sciences et points de vue
d'Académiciens de l'Académie d'Agriculture de
France - juin 2023

Les forêts françaises face au changement
climatique





SOMMAIRE

In memoriam	4
Résumé exécutif	6
Introduction	7
La forêt française et sa filière bois	7
Les forêts contribuent aux sociétés et au bien-être humain de manière large et diversifiée	10
Les forêts contribuent à atténuer le changement climatique	11
Les forêts sont des habitats riches en biodiversité	14
Les forêts apportent beaucoup d'autres contributions au bien-être humain	15
Les forêts sont vulnérables au changement climatique	16
Canicules, sécheresses et incendies	16
Autres effets du changement climatique	19
Ravageurs et pathogènes	19
Invasions biologiques	19
La filière forêt-bois doit s'adapter au contexte sociétal et climatique	20
Contribuer à l'atténuation du changement climatique	20
Prendre en compte les multiples contributions des forêts	21
Prendre en compte les nouvelles conditions climatiques	21
Prendre en compte le potentiel d'adaptation des arbres forestiers	22
Optimiser la gestion des forêts pour atteindre les objectifs de développement durable	22
Conclusion et avis	24
Recommandations	25
Recommandations pour la recherche	25
Recommandations pour la gestion forestière	26
Recommandations pour la filière bois	27
Recommandations pour les politiques publiques	27
Références bibliographiques	28
Contributeurs au rapport	32
Secrétariat éditorial	32
Personnes auditionnées dans le cadre de l'étude	33
Membres du Comité des sciences de l'environnement de l'Académie des sciences	34
Liste des figures du rapport	35
Liste des sigles et abréviations utilisés dans le rapport	35
Annexes	36
Annexe 1 La forêt française et la filière forêt-bois métropolitaines	36
Annexe 2 Les contributions des forêts aux sociétés et au bien-être humain	44
Références bibliographiques des annexes	49

In Memoriam



ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Hommage à Jean-Marc Guehl

Lorsque s'est engagée la préparation de ce rapport, le groupe de travail restreint qui animait la démarche comprenait, au nombre de ses membres, Jean-Marc Guehl. La maladie a fait que cette fructueuse collaboration s'est interrompue le 9 avril 2022. Nous souhaitons dédier à Jean-Marc Guehl le fruit de nos réflexions communes auxquelles il a activement contribué.

Jean-Marc Guehl était un éco-physiologiste des plantes qui travaillait sur l'écologie fonctionnelle des écosystèmes forestiers en développant des approches intégratives allant des niveaux plus fins aux plus globaux de l'organisation du vivant. Il consacra une partie importante de ses travaux à l'étude de la réponse des arbres forestiers tempérés à l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone et à la sécheresse. Ceci l'amena à jouer un rôle de premier plan dans l'analyse des mécanismes forestiers de lutte contre le renforcement de l'effet de serre, dans la compréhension des impacts du changement climatique et dans l'élaboration de stratégies d'adaptation. Il faut ajouter à cela qu'il s'est également intéressé à la forêt tropicale humide guyanaise, notamment pour analyser la diversité fonctionnelle des arbres selon les caractéristiques biochimiques de leur environnement (eau, carbone, azote). Il a tiré de ses recherches de nombreuses publications scientifiques ou techniques, ainsi que des éléments d'enseignement, tant pour les chercheurs que les ingénieurs, aussi bien en France qu'à l'étranger. Ses larges connaissances et ses capacités d'animation l'ont naturellement conduit à participer à des réflexions collectives, dont l'appui aux politiques publiques de recherche, d'une part, de la forêt, d'autre part. Ancien directeur du département « Ecologie des forêts, prairies et milieux aquatiques » de l'INRA (Institut aujourd'hui intégré au sein d'INRAE) et ancien président du groupement d'intérêt public Ecofor sur les écosystèmes forestiers, Jean-Marc Guehl était membre titulaire de l'Académie d'Agriculture de France. C'est à ce titre qu'il s'était investi dans le groupe de travail constitué sur les forêts entre l'Académie des sciences (Comité des sciences de l'environnement) et l'Académie d'Agriculture de France (Sections « Forêts et filière-bois », « Interactions milieux-êtres vivants » et « Environnement et territoires »).

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Les forêts françaises couvrent 31% du territoire métropolitain. Elles contribuent de multiples façons au bien-être humain (production de bois, purification de l'air et de l'eau, maintien des sols, habitat pour la biodiversité, alimentation, santé, activités récréatives, etc.) et participent aux Objectifs de Développement Durable fixés par l'ONU. En particulier, la France s'étant engagée à atteindre la neutralité carbone dès 2050, le rôle de puits et de stockage de carbone des forêts est considéré comme un élément majeur de sa Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC).

Depuis quelques années, les forêts françaises, dont la surface n'avait cessé de croître depuis plus d'un siècle, connaissent, de façon inquiétante, une diminution de productivité, des dépérissements massifs et un risque incendie accru. Le changement climatique en cours met ainsi en péril les ressources forestières et leur contribution attendue pour préserver la biodiversité, favoriser le développement rural et la bioéconomie, renforcer la production de bois, assurer le bien-être sociétal et équilibrer le bilan carbone de la France. Les enjeux sont considérables et l'orchestration des mesures à prendre s'avère extrêmement délicate en raison de la diversité des attentes de la société.

L'Académie des sciences dresse ici un état des lieux des connaissances actuelles sur les diverses contributions des forêts à la société, puis identifie les défis à relever au regard des menaces actuelles et à venir. Finalement, elle présente un ensemble de recommandations pour assurer simultanément la résilience des forêts, leur rôle de puits de carbone, la production de bois, la préservation de la biodiversité, et la qualité des autres contributions du milieu forestier au bien-être humain.

Les recherches scientifiques devront porter sur les connaissances nécessaires à la compréhension du bilan carbone des forêts, l'adaptation du milieu forestier au changement climatique et l'efficacité d'utilisation du bois. Des modèles capables de simuler l'évolution des forêts en réponse aux perturbations naturelles et anthropiques ainsi que les pratiques sylvicoles doivent être développés. Les données nécessaires à leur validation (composition des peuplements, biomasse aérienne et souterraine, flux de carbone) doivent être acquises et diffusées largement. La prise en compte des facteurs physico-chimiques, biologiques, économiques et sociaux dans l'évaluation des enjeux liés aux forêts nécessite des études interdisciplinaires. Enfin, une méthodologie vérifiable et transparente de calcul des émissions évitées grâce aux usages du bois est nécessaire pour évaluer la contribution des produits bois aux objectifs de la SNBC.

Un effort majeur de **gestion forestière** est nécessaire pour optimiser à l'échelle nationale l'adaptation des forêts au changement climatique, la production de bois et la préservation de la biodiversité. Ces pratiques doivent être flexibles, évolutives et adaptées au contexte socio-écologique local. Pour gérer les effets du changement climatique par une stratégie sans regrets, la structure des peuplements devra être ajustée en favorisant la sylviculture à couvert continu, en ajustant les densités de peuplement aux conditions hydriques, en augmentant la diversité des essences, en évitant autant que possible les coupes rases dont les impacts écologiques et climatiques sont trop importants, et en conservant des vieux arbres qui sont des refuges pour la biodiversité et représentent un patrimoine génétique à préserver.

Le rôle de la filière bois sera crucial pour la réussite de la transition énergétique. La filière devra optimiser son bilan carbone depuis le prélèvement en forêt jusqu'au recyclage des produits bois et des connexes de scierie. Sa réindustrialisation doit être soutenue afin de permettre la transformation du bois français en France, le développement des produits bois à longue durée de vie, la valorisation des bois de feuillus, et une maîtrise à court terme des volumes de produits à courte durée de vie.

Les politiques publiques devront accompagner la filière forêt-bois de manière cohérente pour assurer le succès de la transition énergétique. La récente diminution du puits net de carbone des forêts appelle à une révision urgente de la SNBC dont les objectifs ne seront pas tenus. D'autres scénarios doivent être évalués sur un temps long et en s'inscrivant dans une approche écosystémique et multifonctionnelle de la forêt. Enfin la gouvernance forestière devra mieux prendre en compte les intérêts et souhaits des différents acteurs.

Introduction

Le sixième rapport du GIEC souligne que la foresterie est un secteur d'intervention capable à la fois d'atténuer une partie des émissions des gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique, de nous adapter à ce changement, et de contribuer à atteindre de nombreux objectifs de développement durable (IPCC 2023). Les forêts apportent en effet un très grand nombre de contributions aux sociétés et au bien-être humain (anciennement appelées services écosystémiques) (Fig. 1) (IPBES 2019). Dans le cas des forêts françaises, ces contributions sont d'autant plus importantes qu'elles sont issues d'une biomasse et d'une biodiversité considérables, points pour lesquels la France se place au premier rang européen. Les contributions relatives à la captation et au stockage du carbone atmosphérique ont pris une importance considérable ces dernières années. La capacité du bois à être substitué aux divers matériaux dont la production émet beaucoup de gaz à effet de serre, comme l'acier et le béton, est une autre contribution du secteur forestier à l'atténuation du changement climatique. Les forêts et la filière bois sont ainsi amenées à jouer un grand rôle dans la politique énergétique de la France et la neutralité carbone qu'elle s'est fixée d'atteindre pour 2050 en cohérence avec les cadres énergie-climat de l'Union Européenne. Cependant, les forêts, et par conséquent leurs contributions, sont soumises à des risques nombreux, élevés et croissants sous la pression des activités humaines : destruction, événements météorologiques extrêmes, incendies, ravageurs, pathogènes et grands herbivores. À cela s'ajoutent les effets progressifs du changement climatique qui exacerbent les effets des autres pressions, et dont l'ampleur à long terme, bien qu'étant incertaine, risque d'entraîner des conséquences importantes sur les contributions des forêts aux sociétés et au bien-être humain.

Ainsi, la forêt est aujourd'hui au cœur d'un grand nombre de débats et d'enjeux majeurs pour la société française. Il s'agit d'optimiser, de façon conjointe et à l'échelle nationale, l'adaptation des forêts au changement climatique, l'atténuation de l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la production de bois, la préservation de la biodiversité comme toutes les autres contributions des forêts. Les recherches forestières, issues d'une longue tradition en France, en Europe et dans le

monde, doivent aujourd'hui relever des défis de plus en plus nombreux et nécessitant un impérieux besoin de connaissances, de données, d'instrumentation, de modélisation, d'analyses à travers de multiples échelles spatiales et temporelles, et des approches interdisciplinaires.

Dans ce contexte, la société, en France comme ailleurs, fait de plus en plus entendre sa voix pour dire l'intérêt qu'elle accorde aux forêts et aux arbres et pour exprimer ses aspirations et ses craintes. La gestion des forêts relève non seulement de la politique forestière mais aussi d'un grand nombre de politiques auxquelles elle contribue concernant la conservation de la biodiversité, le développement rural, le climat, l'énergie, la bioéconomie, le développement durable, le bois et la recherche et innovation (Peyron et Nivet 2018). L'orchestration de ces différentes politiques entre elles s'avère délicate et les objectifs de développement durable fournissent un cadre précieux pour évaluer les différentes options et réaliser des arbitrages. Le secteur forestier relève en effet de plusieurs de ces objectifs (Fig. 1) (Nations Unies 2019). Ce rapport présente tout d'abord le rôle majeur des forêts pour atteindre les objectifs de développement durable et leurs nombreuses contributions aux sociétés et au bien-être humain, avant de dresser un bilan des menaces que font peser les changements globaux sur les forêts françaises (principalement métropolitaines) et d'identifier les options qui devraient être privilégiées pour accroître à la fois leur résilience et la qualité de leurs contributions. Il se concentre sur les résultats scientifiques récents concernant le rôle de la forêt et de la filière bois dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique.

La forêt française et sa filière bois¹

Les forêts françaises couvrent plus de 25 millions d'hectares dont les deux tiers se situent en métropole. Elles occupent 31% du territoire métropolitain, 97% du territoire Guyanais, 42% des autres régions d'outre-mer. Les forêts des Outre-mer sont principalement publiques, tandis que les forêts métropolitaines sont aux trois-quarts privées, détenues par 3,3 millions de propriétaires (dont 60% détiennent moins d'un hectare), et au quart publiques, gérées par l'Office National des Forêts (ONF) pour le compte de l'État, de collectivités locales et autres établissements publics (voir Fig.2 pour plus de détails).

¹. Cet état des lieux est complété dans l'annexe 1, qui est illustrée par des graphiques montrant l'évolution de nombreux indicateurs sur plusieurs décennies (1980-2020).



Figure 1. Contributions des forêts aux sociétés, au bien-être humain, et aux objectifs de développement durable. Les objectifs de développement durable (ODD) auxquels les forêts participent figurent dans le cercle extérieur en regard des contributions auxquelles ils correspondent situées dans le cercle intérieur. Les forêts assurent un très grand nombre de contributions aux sociétés et au bien-être humain (IPBES 2019, Fig.SPM7). Ces contributions, anciennement appelés « services écosystémiques », peuvent être classées en quatre catégories : contributions matérielles, contributions à la régulation des processus écologiques et physico-chimiques, contributions immatérielles (santé et culture), et contribution au maintien et à l'évolution de la vie. En termes de contributions matérielles, les forêts fournissent du bois utilisé comme matériau dans de nombreuses industries (construction, ameublement, carton et papier) et comme énergie. Elles fournissent aussi des médicaments issus des espèces animales, végétales et fongiques qui y vivent, ainsi que des denrées alimentaires issues de la cueillette et de la chasse. Les forêts jouent un rôle essentiel de régulation de nombreux cycles biogéochimiques. Elles captent le CO₂ atmosphérique par leur photosynthèse et le stockent durablement dans le bois et le sol. Elles purifient l'air. Par leur transpiration et leur capacité de rétention de l'eau dans le sol, elles purifient l'eau et en régulent le cycle. Elles sont ainsi une composante essentielle du système climatique global et local. Elles maintiennent les sols grâce à leurs systèmes racinaires et empêchent leur érosion. Elles enrichissent également le sol de matière organique par la décomposition de leur litière. Elles constituent les habitats les plus riches en biodiversité. Les forêts jouent également un grand rôle dans notre santé et notre identité culturelle. Elles permettent tout un ensemble d'activités sportives, récréatives et spirituelles importantes pour notre santé (les Français vont en moyenne une fois par mois en forêt). Elles façonnent nos paysages et contribuent au caractère esthétique et remarquable de certains lieux amenant une activité économique touristique importante et à des identités culturelles fortes. Enfin, elles assurent des services de soutien indispensables au maintien de la vie sur Terre, et notamment la photosynthèse, le recyclage des nutriments, la formation des sols. L'ensemble de ces contributions jouent également un rôle important dans les ODD que se sont fixés les 193 États membres de l'ONU pour 2030. Les forêts contribuent à 11 des 17 ODD : atténuation du changement climatique (ODD 13), préservation de la biodiversité terrestre (ODD 15), santé et bien-être des populations humaines (ODD 3), accès à de l'eau potable (ODD 6), industrie innovante, durable et responsable (ODD 9), énergie propre, durable et abordable (ODD 7), villes et communautés durables (ODD 11), consommation durable (ODD 12), travail décent pour tous (ODD 8), disparition de la pauvreté (ODD 1) et de la faim (ODD 2). Il faut également noter que les contributions des forêts peuvent aussi avoir des effets négatifs sur le bien-être humain (par exemple allergies au pollen, vecteurs de maladies et de parasites).

Les forêts ultramarines sont essentiellement protégées et gérées pour leur biodiversité et l'accueil du public, rarement pour la production de bois, sauf dans une faible partie (4%) des forêts guyanaises. À l'inverse, la majeure partie des forêts métropolitaines est considérée comme étant disponible pour la production de bois (95% des forêts, soit environ 16 Mha). Les proportions en surface des forêts françaises métropolitaines gérées conformément à un document de gestion durable ou dans le cadre d'une certification de gestion durable sont respectivement de l'ordre de la moitié et du tiers, notamment en raison du morcellement de la forêt privée.

Les ressources forestières métropolitaines sont marquées depuis deux siècles par un essor continu en surface, qui se poursuit aujourd'hui malgré une utilisation des terres de plus en plus contrainte. Il

s'accompagne d'un accroissement du volume à l'hectare (actuellement 174 m³/ha) du fait que la croissance des arbres (88 Mm³/an soit 5,5 m³/ha/an sur 2012-2020) est très supérieure à la somme de la mortalité naturelle (11 Mm³/an soit 0,7 m³/ha/an) et des prélèvements (51 Mm³/an soit 3,2 m³/ha/an) (Fig. 3, [IGN 2022](#)).

Le bois occupe une place particulière dans l'économie nationale en raison de son caractère biologique et renouvelable, de son contenu élevé en carbone et de la relative sobriété en énergie de sa transformation. Hors des crises qui affectent épisodiquement la forêt (tempêtes, sécheresses, attaques biotiques) et occasionnent des coupes sanitaires, la récolte de bois est relativement stable pour les débouchés du bois d'œuvre, des panneaux, papiers et cartons (30,3 Mm³/an) (Fig. 3). Quant à la récolte de bois

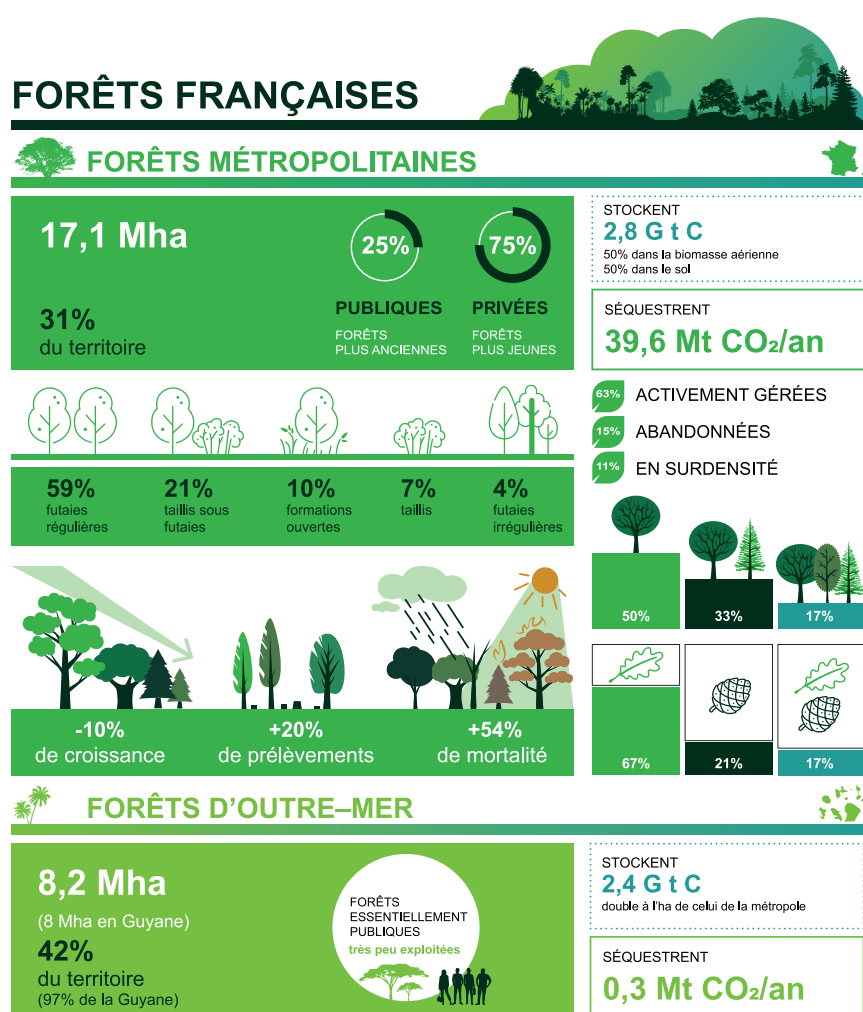


Figure 2. Les forêts françaises aujourd'hui.

Les forêts françaises (métropolitaines et d'Outre-mer) couvrent plus de 25 millions d'hectares. Elles couvrent différentes zones bioclimatiques : atlantique, continentale, alpine, méditerranéenne et tropicale. Alors que les forêts d'Outre-mer sont très peu exploitées, 63 % des forêts métropolitaines sont activement gérées, 15% sont abandonnées, 11% sont en surdensité. Alors que les forêts d'Outre-mer sont considérées comme à l'équilibre en termes de bilan carbone (captent autant qu'elles rejettent de CO₂), les forêts métropolitaines ont séquestré, en moyenne sur la période 2015-2020, 39,6 millions t CO₂/an de façon nette (croissance des arbres moins la mortalité et la récolte qui ne se retrouve pas dans les produits bois). Toutefois, les forêts d'Outre-mer représentent un stock de carbone de 2,4 Milliards t C, soit le double à l'hectare de celui de la métropole qui représente un total de 2,8 Milliards t C réparti pour moitié dans la biomasse aérienne, et pour autre moitié dans le sol. Ce stockage de carbone en métropole est assuré pour 63% par des futaies (régulières 59% et irrégulières 4%), 7% par des taillis, 21% par des taillis sous futaies, et 10% par des formations ouvertes. La moitié des forêts métropolitaines est composée d'une seule essence, 33% de deux essences en mélange et 17% de trois essences ou plus ; et 67% sont constituées uniquement

de feuillus (essentiellement chêne et hêtre), 21% de résineux (essentiellement épicéa et sapin pectiné), et 17% sont mixtes. La croissance nette des forêts métropolitaines a diminué de 10%, la mortalité a augmenté de 54% et les prélèvements ont augmenté de 20% entre 2005-2013 et 2012-2020. Sources : [CITEPA 2022](#) et [IGN 2022](#).

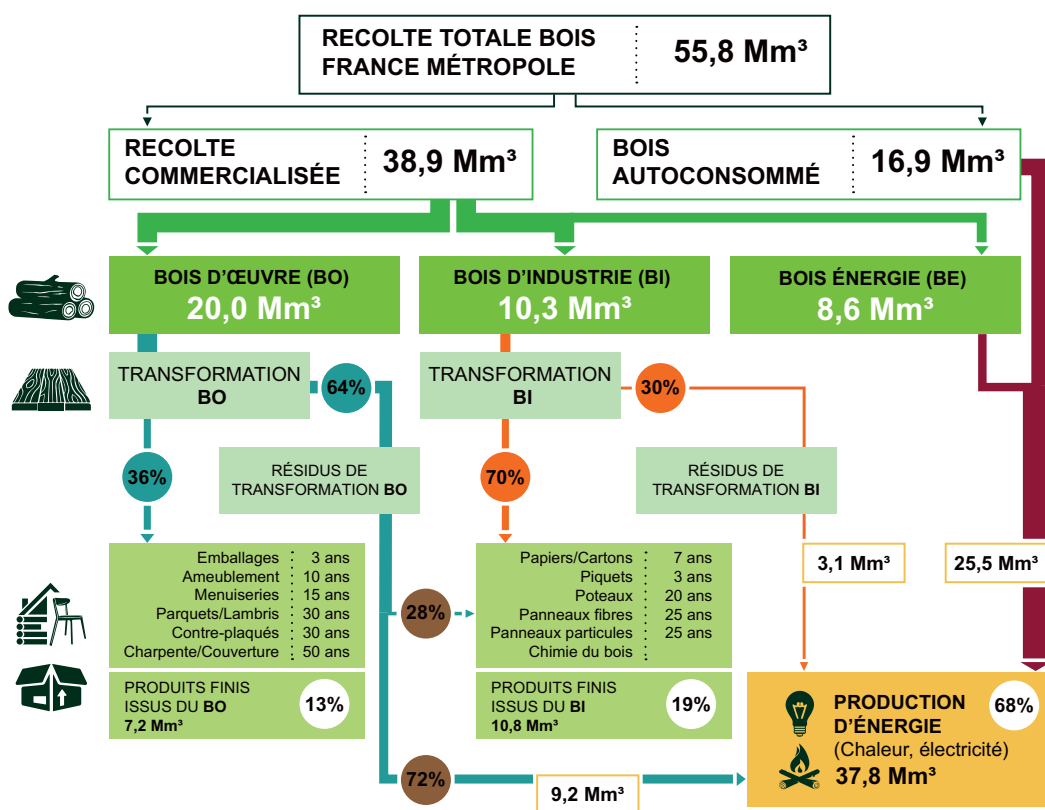


Figure 3. Flux annuels de la filière bois (d'après ADEME 2021, voir aussi Valade et al. 2022). Les données chiffrées sont pour l'année 2018 et issues de Agreste N°360, décembre 2019. Selon les données LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) de United Nations Framework Convention on Climate Change (<https://unfccc.int/fr>), la récolte totale de bois en France métropolitaine est passée de 55,8 Mm³ en 2018 à 55,3 Mm³ en 2019 et 54,7 Mm³ en 2020, ce qui correspond à des stocks de carbone annuels de respectivement 13 Mt C, 12,8 Mt C, 12,7 Mt C. Les durées indiquées sont les durées de demi-vie (CITEPA, 2022 ; FCBA, 2008).

énergie (25,5 Mm³/an) (Fig. 3), les volumes commercialisés augmentent alors que les volumes autoconsommés diminuent, notamment en raison de l'amélioration de la performance énergétique des équipements. La récolte est inférieure aux prélèvements sur les stocks, notamment car le prélèvement inclut les pertes d'abattage et le volume des branches. Elle ne suffit pas à satisfaire les demandes en bois de l'économie française qui recourt à des importations et dont le commerce extérieur est structurellement déficitaire, notamment pour des produits élaborés des secteurs de l'ameublement, des papiers et cartons, du bâtiment. En dépit d'une réduction progressive de ses emplois et de sa valeur ajoutée, la filière forêt-bois représente encore 0,6 à 0,7% de l'économie française et semble montrer, au cours des dernières années, quelques signes d'amélioration de ses performances. D'ailleurs, la décroissance de la consommation de produits en bois par habitant, nette jusque vers 2015, semble marquer le pas depuis.

Les forêts contribuent aux sociétés et au bien-être humain de manière large et diversifiée

La biodiversité, sur ses différents niveaux d'organisation (espèces, paysages), apporte de nombreuses contributions aux sociétés humaines.

Celles-ci peuvent être classées en quatre catégories : contributions matérielles (alimentation, matériaux, médicaments, etc.), contributions à la régulation des processus écologiques et physico chimiques (régulation du climat, des cycles de l'eau, de l'oxygène et des nutriments, photosynthèse, formation des sols, etc.), contributions immatérielles (santé physique et psychique, identité culturelle, etc.), contributions au maintien de la vie sur Terre (évolution et adaptation du monde vivant). Les forêts jouent un rôle important dans nombre de ces contributions, ainsi que dans les objectifs de développement durable tels que définis et adoptés en 2015 par les 193 États membres des Nations Unies (Fig. 1). Elles sont essentielles au bien-être humain en participant fortement au fonctionnement des écosystèmes, aux moyens de subsistance, au développement rural et au soutien des économies nationale et locales. Parmi toutes les contributions des forêts aux objectifs de développement durable et au bien-être humain, quatre grandes contributions ont fait l'objet d'une attention plus particulière dans ce rapport : (i) maintien de conditions climatiques supportables, (ii) maintien de la biodiversité terrestre, (iii) maintien et formation des sols et (iv) fourniture de biens, de matériaux et d'énergie.

Les forêts contribuent à atténuer le changement climatique

Les forêts, grâce à la photosynthèse et au temps de résidence du carbone dans le bois et dans les sols, font partie des principaux puits de carbone atmosphérique à l'échelle globale. La séquestration du carbone dans le bois puis dans le sol s'étend de plusieurs dizaines à centaines d'années pour les forêts non gérées où le temps de résidence du carbone est contrôlé par les processus de mortalité naturelle, à quelques dizaines d'années pour les forêts gérées où le temps de résidence dépend de la fréquence de récolte du bois. La capacité des forêts à puiser et à séquestrer le carbone atmosphérique dépend au premier ordre de leur âge : les forêts jeunes ont une croissance et un taux de séquestration plus élevés, avec des stocks de carbone plus faibles. Avec l'âge, le taux de séquestration diminue mais les stocks continuent à augmenter car ils représentent l'intégrale temporelle des taux de séquestration passés. Il est classiquement admis que les vieilles forêts ne sont plus des puits de CO₂ importants car l'absorption de ce gaz par la photosynthèse y est compensée par son émission par la respiration. Toutefois, plusieurs observations récentes sur de vieilles forêts montrent qu'elles peuvent encore être des puits de carbone importants ([Köhl et al. 2017](#) ; [Besnard et al. 2018](#) ; [Curtis et Gough 2018](#)) et plusieurs hypothèses, encore non tranchées, ont été avancées pour expliquer ce fait : effet fertilisant de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, allongement de la saison de croissance dans les régions tempérées-boréales et croissance sous-estimée des arbres âgés sur le très long terme.

En plus de l'âge des arbres et de l'ancienneté de l'état boisé, la séquestration de carbone par les forêts dépend : (i) des essences, les espèces à croissance rapide séquestrant plus rapidement du carbone mais ayant des bois de faible densité et une longévité plus courte, (ii) de la fertilité des sols et leur capacité de rétention de l'eau, (iii) de la santé des arbres au cours de leur vie, (iv) de la compétition entre les arbres qui dépend notamment de la densité par unité de surface, (v) des conditions climatiques saisonnières qui déterminent la croissance, en particulier la température dans les régions tempérées et froides et la disponibilité en eau dans les régions méditerranéennes et tropicales, (vi) de la fréquence et de la sévérité des perturbations sporadiques comme les incendies, tempêtes, attaques de ravageurs, et (vii) des pratiques de gestion sylvicoles qui interagissent

avec tous les facteurs précédents ([Luyssaert et al. 2018](#)). Une parcelle forestière peut ainsi devenir, dans certaines conditions, une source de carbone atmosphérique, en particulier après un événement extrême ou après une récolte par coupe totale du peuplement (par exemple par coupe rase).

Les forêts tropicales françaises étaient jusqu'ici à l'équilibre en termes de flux de carbone (récolte équivalente à la croissance) mais des données récentes suggèrent que le bilan pourrait devenir positif (source de CO₂) ([ONF Direction Territoriale de Guyane 2022](#)). En ce qui concerne les forêts métropolitaines, le stock de carbone dans la biomasse (vivante et morte, aérienne et souterraine) est de 2786 millions de tonnes de carbone (Mt C) ([MAA & IGN 2021](#) ; [Jobbagy & Jackson 2000](#)) (Fig.4). La moitié de ce stock (1405 Mt C) est présente dans les sols forestiers - soit le deuxième en importance après les zones humides - dont la moitié dans la couche supérieure (30 cm). Les arbres hors-forêts (haies, arbres de bord de route, arbres urbains) représentent environ 9,7% de la couverture arborée totale, pour 3,2% du stock de biomasse totale, et sont plus nombreux dans les régions de l'Ouest de la France. Le volume aérien et la biomasse des forêts présentent une très grande variabilité spatiale qui reflète principalement l'âge et les essences de chaque parcelle, ainsi que les conditions climatiques et les conditions de sol qui affectent la croissance (Fig.5).

Le stockage de carbone dans la biomasse vivante et dans les sols (principalement les dix premiers centimètres) s'est accru, respectivement, de 9,6 Mt C/an et de 0,5 à 5,5 Mt C/an entre 2015 et 2020. Les sols des jeunes forêts (<100 ans) tendent à absorber du carbone alors que les sols des vieilles forêts sont à peu près à l'équilibre. L'augmentation nette du stock de carbone dans les forêts (10,8 Mt C/an soit 39,6 Mt CO₂/an, moyenne 2015-2020) reflète la différence entre d'une part la croissance des arbres de 38,2 Mt C/an et d'autre part la récolte utile de 17 Mt C/an, les pertes d'abattage laissées sur site de 3,6 Mt C/an, et la mortalité naturelle incluant les perturbations sporadiques dont les tempêtes et les incendies de 7,4 Mt C/an (Fig.4). Ce puits est passé de ~53 Mt CO₂/an à ~32 Mt CO₂/an entre 2015 et 2020 (Fig. 6) du fait de la mortalité naturelle qui a augmenté de 54%, des prélèvements qui ont augmenté de 20%, et de la production biologique nette qui a diminué de 10% entre 2005-2013 et 2012-2020 ([IGN 2022](#)).

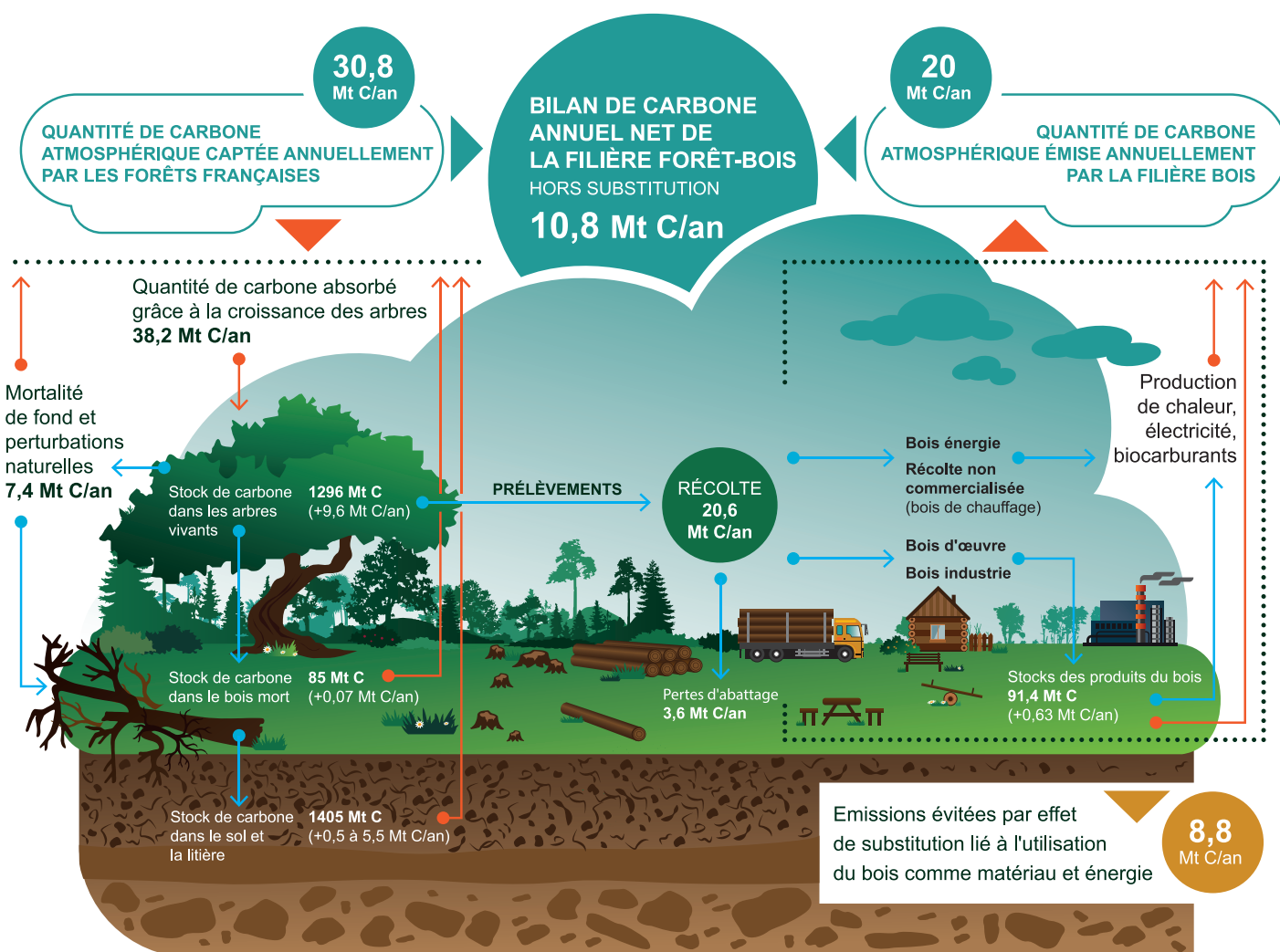


Figure 4. Bilan de carbone des écosystèmes forestiers (à gauche) et des produits du bois (à droite) pour le territoire métropolitain. Les flux et les stocks sont exprimés en Mt C/an. Une variation annuelle de stock de 1 t C / an correspond à 3,664 t CO₂/an. La forêt a séquestré de façon nette, en moyenne sur 2015-2020, 10,2 Mt C/an (30,8 Mt C captés par la croissance moins 20,6 Mt C récolté) soit 37,4 Mt CO₂/an. L'ensemble de la filière forêt et bois a séquestré de façon nette 10,8 Mt C/an (10,2 Mt C dans la forêt et 0,6 Mt C dans les produits bois) soit 39,6 Mt CO₂/an. Rouge : Flux de carbone échangés avec l'atmosphère, une absorption est une flèche dirigée vers le bas. Bleu : transferts de carbone entre compartiments. Marron clair : effet estimé de substitution qui représente des émissions évitées (non mesurables). Les changements de stocks de chaque compartiment sont donnés entre parenthèses. Les changements de stocks de biomasse, les pertes de biomasse liées à la mortalité et aux prélèvements sont obtenues à partir des données de l'inventaire national du CITEPA et du rapport EFESE pour la période 2015-2020. Les pertes d'abattage sont déduites du rapport EFESE. L'estimation basse de la séquestration dans les sols est celle de l'inventaire national et l'estimation haute correspond à l'extrapolation des données ONF-RENECOFOR sur 102 sites de forêts publiques avec un taux de séquestration de 0,35 tC/ha/an. Selon l'estimation haute, les forêts françaises atteindraient donc l'objectif de stockage de l'initiative internationale "4 pour mille". La mesure des changements du carbone du sol est difficile car leur amplitude est très faible par rapport au stock existant. La revisite de l'inventaire dense du RNQS est en cours et apportera des valeurs plus précises. Le changement de stock du bois mort n'est pas estimé par l'inventaire [CITEPA \(2022\)](#) et la valeur reportée sur la figure ne concerne que le bois mort des terres nouvellement converties en forêts.

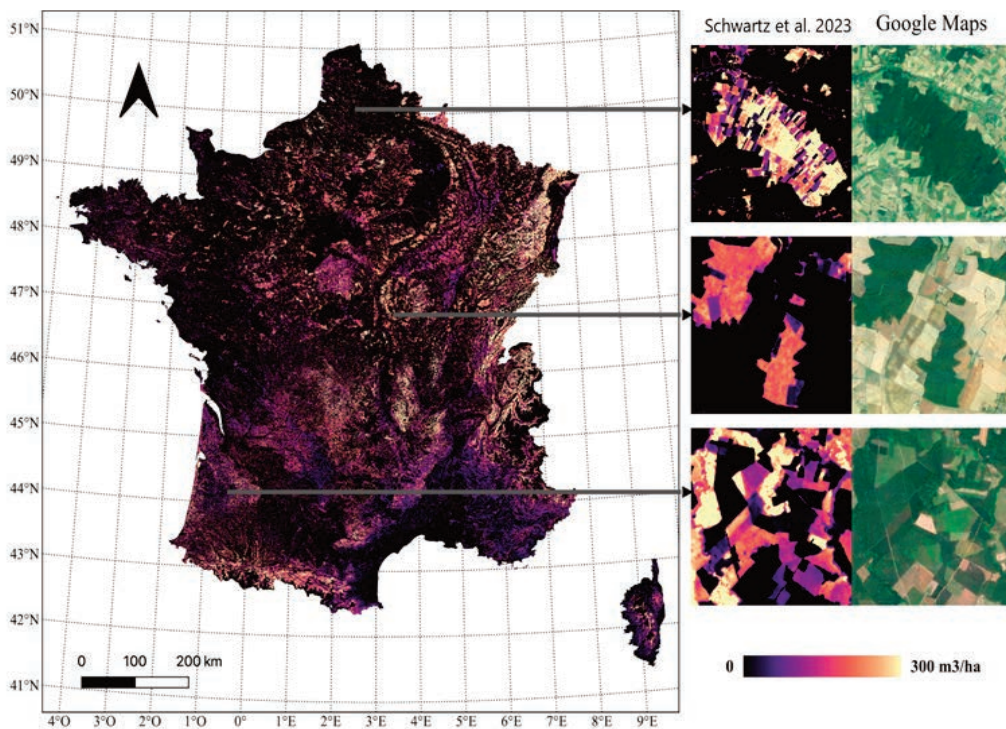


Figure 5. Cartographie à 10 m de résolution du volume aérien des forêts sur les années 2018-2020 déduite de données de télédétection et évaluée avec les placettes de l'inventaire forestier national (IGN). On observe de très fortes variations de volume entre régions : des valeurs faibles dans les zones de plantations et les forêts méditerranéennes, et des valeurs élevées dans les Alpes du Nord et les Vosges.

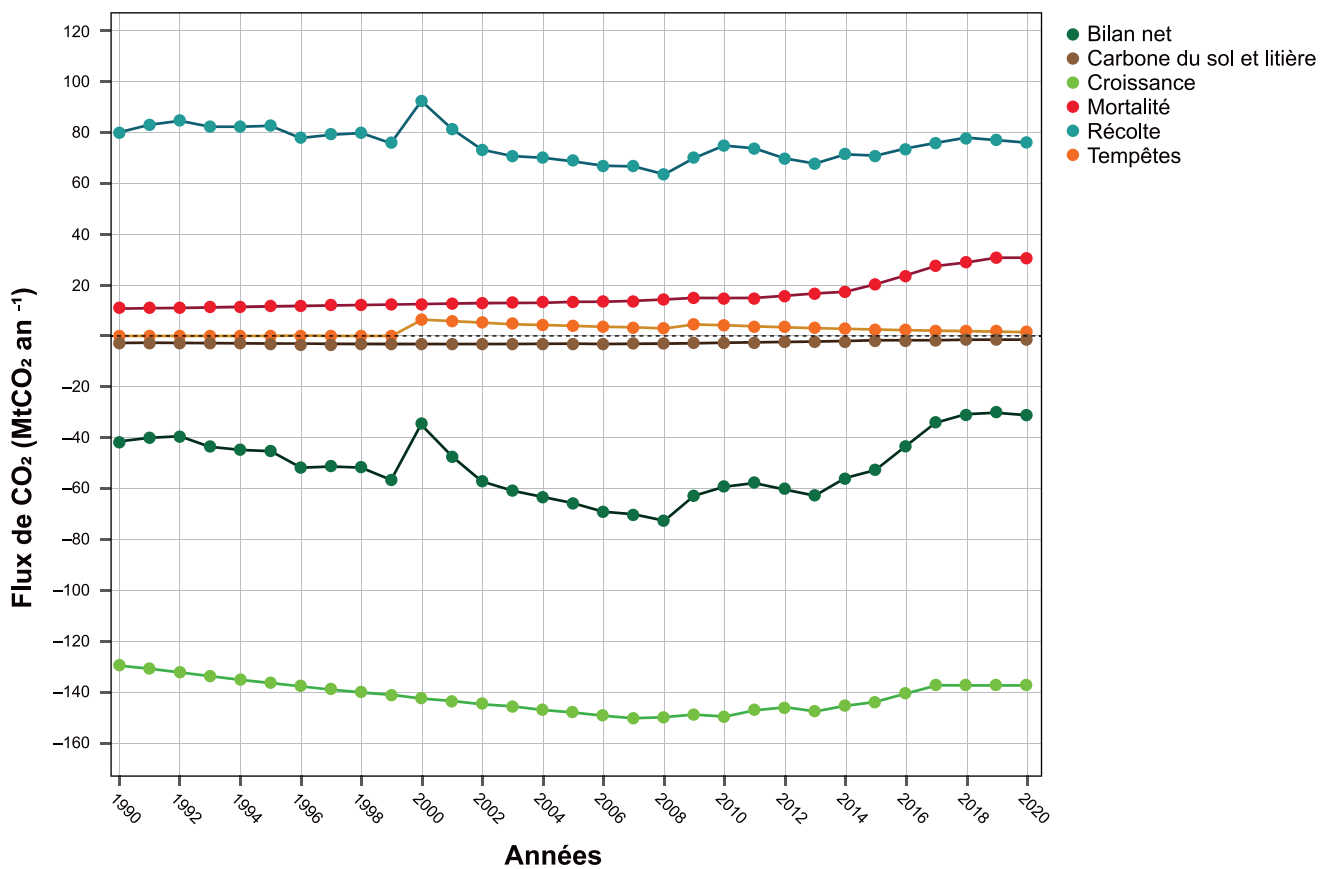


Figure 6. Bilan de CO₂ de la forêt française. Les absorptions nettes de CO₂ sont des flux négatifs et correspondent à la croissance des forêts établies. Les émissions de CO₂ pour la forêt sont des flux positifs et correspondent aux prélèvements de bois, à la mortalité naturelle et aux mortalités exceptionnelles liées aux tempêtes Lothar et Martin (1999) et Klaus (2009). Données CITEPA 2022.

La récolte commercialisée de 38.9 Mm³/an est constituée de bois d'œuvre (51,5%), bois-industrie (26,5%) et bois-énergie (22%) (Fig.2). La récolte non commercialisée de 16.9 Mm³/an est utilisée quasiment uniquement en bois de chauffage. Si l'on ajoute à cela les résidus de transformation du bois d'œuvre et du bois d'industrie qui sont finalement valorisés en bois énergie, 68% du volume total de bois récolté est consommé en bois énergie. Celui-ci représentait en 2022 6,6% des énergies renouvelables utilisées en France. Les produits bois permettant le stockage du carbone ne constituent que 32% de la récolte (Fig.3). Ce puits dans les produits bois diminue depuis 1990 (77% entre 2011 et 2019) en raison d'une production plus importante de produits à courte durée de vie alors que l'effet de substitution du bois énergie a augmenté (25% entre 2011 et 2019) du fait d'une plus grande efficacité énergétique des équipements et de l'augmentation des prélèvements (principalement bois énergie). L'augmentation de la demande en bois énergie, notamment en granulés, a engendré une inversion de la balance commerciale, la France important actuellement deux fois plus de bois énergie qu'elle n'en exporte. Sur la période 2009-2017, le taux de prélèvement moyen, défini par le rapport entre les prélèvements de bois et la production (croissance) nette, était de 60% : le stock de carbone des forêts a ainsi augmenté sur cette période avec des prélèvements inférieurs à la croissance des arbres sur la période (Fig.4). Toutefois, une très forte augmentation des prélèvements pourrait conduire à une perte nette de stock de carbone par les écosystèmes forestiers dans la prochaine décennie. Le niveau de prélèvement a augmenté ces dernières années (20% sur 2013-2021) en raison de la demande de bois et des multiples crises qui ont engendré des dépérissements massifs ([IGN 2022](#)). Actuellement, en forêt publique, 50% des volumes récoltés proviennent d'arbres morts ou dépérissants pour les résineux et 20% pour les feuillus (statistiques de récolte ONF 2021). La mortalité naturelle représente aujourd'hui une perte moyenne de stock de biomasse équivalente à 16% de la croissance annuelle moyenne. Cependant, lors d'années extrêmes on estime que le surplus de mortalité de la biomasse atteint 500% à l'échelle nationale pour les tempêtes de 1999 et 2009 ([Gardiner et al. 2010](#)) et 17% pour les incendies en 2022 ([Vallet et al. 2023](#)). Ces événements extrêmes destructeurs sont localisés sur de petites régions mais détruisent toute la biomasse vivante présente, ce qui explique qu'ils ont un très fort impact sur la moyenne nationale.

Les taux de coupes fortes avec plus de 50% du couvert dominant prélevé sont plus élevés pour les forêts privées sans Plan Simple de Gestion que pour les forêts sous Plan Simple de Gestion et les forêts domaniales et publiques. Il est aussi important de noter qu'une grande partie de la forêt est considérée comme étant difficile ou très difficile à exploiter en raison de limites d'accessibilité (manque de pistes, terrain accidenté) et de verrous fonciers (morcellement d'une partie significative de la forêt privée), soit au total environ 37% de la forêt métropolitaine Française ([IFN 2012](#)) (Fig. 7). Le taux de prélèvement moyen des forêts globalement faciles à exploiter (en vert sur la Fig. 7) était de 67% sur la période 2009-2017, contre 60% pour l'ensemble des forêts.

Au-delà du puits net de carbone des écosystèmes forestiers, le bilan carbone étendu à la filière bois dépend de l'usage et du temps de vie (donc de résidence du carbone) des différents produits issus du bois (Fig.3). Les produits du bois peuvent se substituer à des matériaux dont la production est émettrice de gaz à effet de serre ou à des combustibles fossiles, voire aux deux. Le temps de résidence des produits du bois varie beaucoup et il est possible d'augmenter le stock de carbone dans ces produits en favorisant des produits à temps de vie long et en recyclant les matériaux. En revanche, l'effet de substitution n'est pas lié au contenu en carbone du bois mais à la quantité de gaz à effet de serre émise pour exploiter et transformer le bois comparée à celle émise pour produire les matériaux auxquels on substitue le bois. En pratique, la substitution est donc calculée avec un coefficient d'écart d'émission entre le bois et le matériau auquel il se substitue. Ainsi, si le bois est substitué à une énergie décarbonée ou à un matériau transformé sans énergie fossile, il n'y a pas d'émissions évitées. Ces coefficients sont établis à partir de méthodes d'analyse de cycle de vie des matériaux dont les incertitudes restent importantes. Des rétroactions socio-économiques complexes peuvent aussi déplacer les émissions au-delà d'une simple substitution d'un produit par un autre.

Les forêts sont des habitats riches en biodiversité

L'état et l'évolution de la biodiversité jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes, leur capacité d'adaptation aux perturbations et leur aptitude à contribuer au bien-être humain. Or la forêt

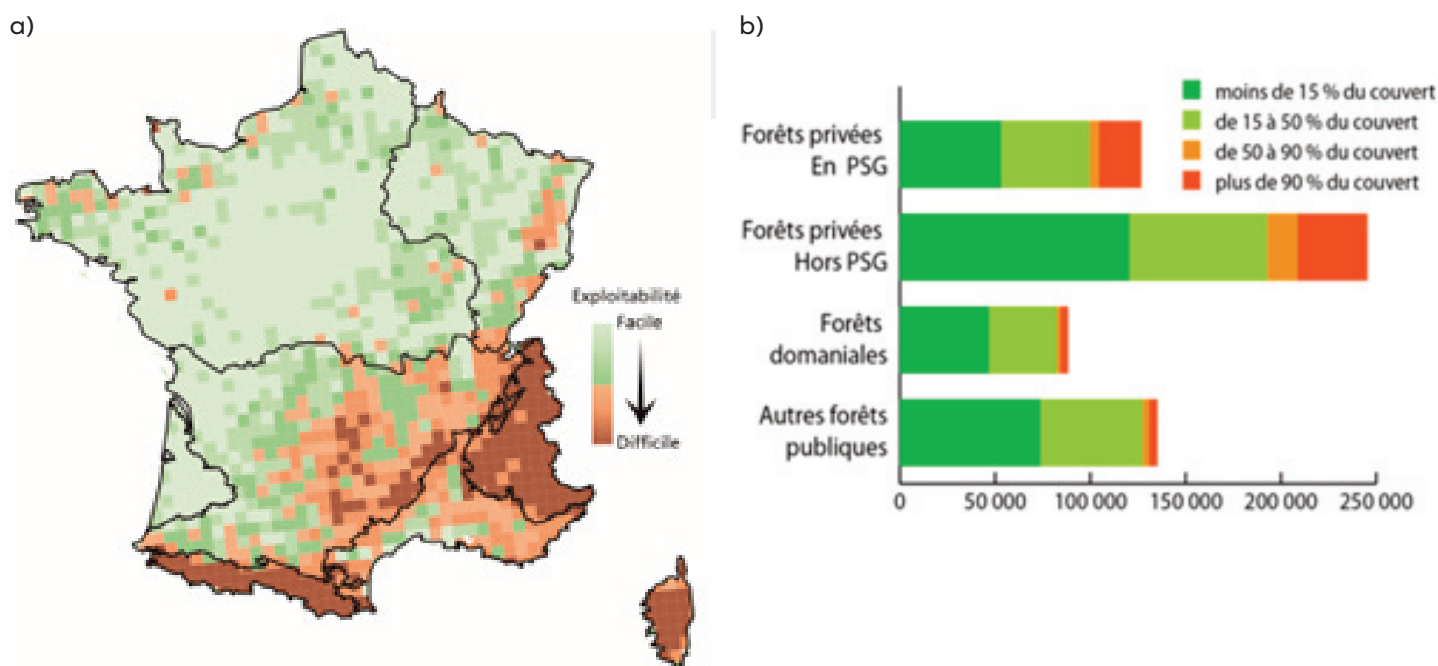


Figure 7. (a) Surfaces des forêts considérées comme difficiles (orange) ou très difficiles (marron) à exploiter sur la période 2005-2011. (b) Superficie en hectares (ha) des différents types de coupe en pourcentage du couvert réduit lors de la coupe, par type de forêt. PSG, Plan Simple de Gestion. Sources : IFN 2012 et INRAE.

française métropolitaine fait l'objet d'un bilan mitigé du point de vue de la biodiversité (voir annexe 2) et bien que les connaissances sur cette biodiversité se soient améliorées au cours des trois dernières décennies, elles restent lacunaires (Picard *et al.* 2022).

La forêt française possède des atouts majeurs : une augmentation de l'abondance des arbres communs, une richesse locale en essences et un volume de bois favorable à la biodiversité, avec notamment de très gros arbres, un rôle prépondérant laissé à la régénération naturelle (87% des surfaces), une forte dominance des essences indigènes (93% des surfaces), une stabilité des densités d'oiseaux communs alors que celles-ci déclinent fortement en milieux agricoles et une proportion dorénavant supérieure à 2% des surfaces bénéficiant d'une protection forte (MAA & IGN 2021). Cependant, seule une faible part (2,5%) des surfaces forestières comporte des arbres très âgés et les habitats forestiers en danger de disparition, vulnérables, rares ou endémiques voient leur état se dégrader, davantage en zone tempérée qu'en zone méditerranéenne et montagnarde (Levêque *et al.* 2014 ; Bensettiti et Gazay 2019). En outre, les populations de grands ongulés (cervidés, sangliers) se développent de manière forte depuis plusieurs décennies faute de prédateurs, ce qui constitue tant

une menace pour le renouvellement des forêts qu'une inquiétude pour l'adaptation de celles-ci au changement climatique.

Les forêts apportent beaucoup d'autres contributions au bien-être humain

La société bénéficie de contributions de la part des écosystèmes forestiers grâce à leur bon fonctionnement écologique et leur biodiversité (CSA 2009 ; Beyou *et al.* 2016 ; Puydarrieux *et al.* 2017 ; Dorioz *et al.* 2018 ; MAA & IGN 2021) (Fig. 1). Si ces différentes contributions sont souvent analysées individuellement, elles doivent aussi être considérées globalement pour deux grandes raisons. D'une part, elles sont en interaction les unes avec les autres, soit au niveau des fonctions écologiques sur lesquelles elles reposent, soit au niveau de l'utilisation qui en est faite par la société. D'autre part, même si elle s'intéressait préférentiellement à l'une de ces contributions, la gestion forestière impacterait toutes les autres également. Ainsi, les stratégies ou politiques en la matière se fondent nécessairement sur une approche globale, pour rechercher les meilleurs compromis et les incitations réglementaires, financières ou informationnelles appropriées.

Or cet arbitrage est délicat dans la mesure où il mobilise des connaissances issues de champs disciplinaires variés, depuis les sciences physiques et écologiques jusqu'aux sciences économiques, humaines et sociales, et que ces connaissances ne sont encore que très partielles et pas toujours sous forme quantitative. S'il existe des évaluations des principales contributions (voir annexe 2), il s'agit de moyennes établies à large échelle (planétaire, nationale, régionale) alors qu'il serait nécessaire de disposer de données établies au niveau de la parcelle et d'une manière dynamique permettant de comparer l'effet de plusieurs options de gestion sur l'ensemble des contributions. Par exemple, une plantation est efficace pour produire du bois dont la substitution à d'autres matériaux réduit les émissions de gaz à effet de serre. Si cette plantation est réalisée dans le cadre du boisement d'une friche agricole, elle séquestre également du carbone de façon nette. En revanche, si elle est consécutive à une coupe rase, elle émet du carbone pendant plusieurs années voire plusieurs décennies car la séquestration de CO₂ de la jeune plantation ne compense pas les émissions de CO₂ et de CH₄ par le sol engendrés par la coupe rase, ainsi que les émissions de CO₂ engendrés par les engins de récolte et la transformation du bois. De plus, ses autres contributions sont en général de moindre qualité qu'une forêt naturelle ou sub-naturelle (Dorioz *et al.*

2018). La difficulté de la recherche d'un compromis réside dans la prise en compte à la fois des temps longs, de la diversité des contributions, des usagers des forêts et autres acteurs, d'un continuum d'échelles spatiales (depuis la parcelle forestière jusqu'à la planète), d'un contexte nouveau d'incertitudes fortes associées au changement climatique.

Les forêts sont vulnérables au changement climatique

Les forêts sont soumises à de nombreux aléas météorologiques, dont les plus importants en termes de volume détruit sont les tempêtes. L'exposition à certains de ces aléas est en train de changer à cause du changement climatique et amplifie parfois les effets d'autres aléas notamment causés par les ravageurs et pathogènes.

Canicules, sécheresses et incendies

Alors que le réchauffement global de la planète est de 1,1°C depuis 1900, le climat de la France métropolitaine s'est réchauffé de +1,7°C depuis 1900, et ce réchauffement s'est accéléré depuis 1980 (+0,3°C/décennie) (données Météo France). Le changement climatique s'est manifesté également par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses extrêmes en été au cours des dernières

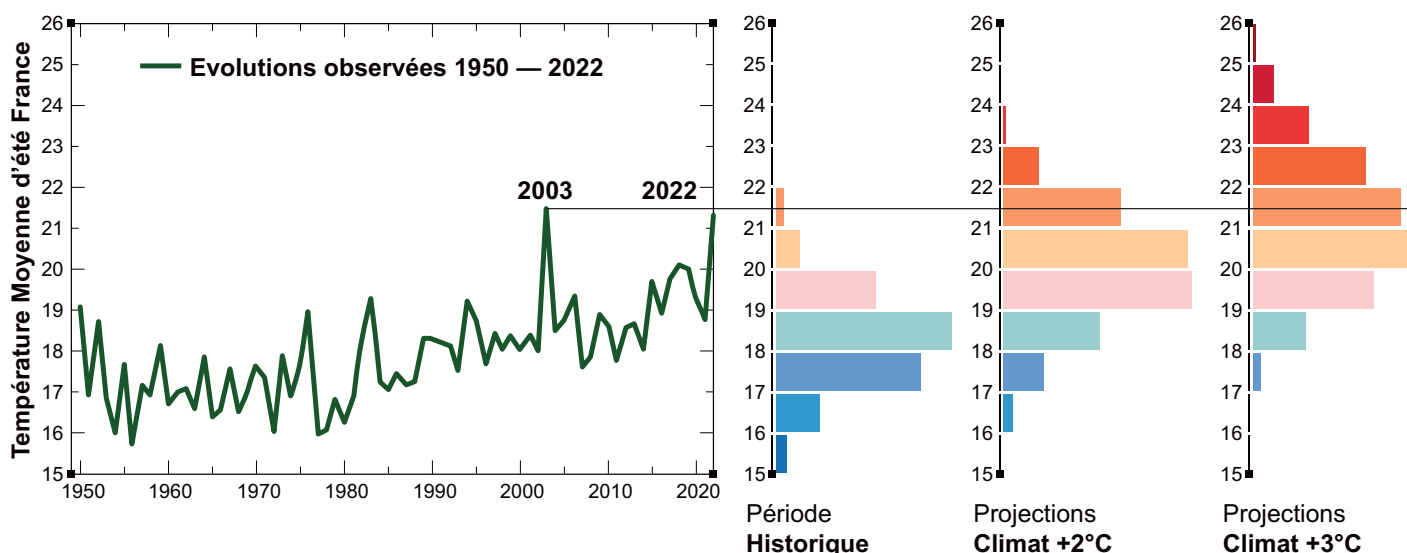


Figure 8. Observations de la température moyenne estivale en France depuis 1950 (en noir) et évolution des distributions des températures pour la période historique, pour un réchauffement global de 2°C et de 3°C avec l'ensemble de modèles de climat régionaux CORDEX Europe (histogramme en gris correspondant au nombre d'années avec une température dans chaque intervalle de 1°C). Dans les modèles, le forçage imposé est l'augmentation anthropique du forçage radiatif des gaz à effet de serre et des aérosols et la variabilité interannuelle est stochastique, c'est à dire que la fréquence de retour d'une sécheresse est analysée à partir d'un ensemble de modèles.

années. Pour un réchauffement global de +2°C, les modèles régionaux de climat prévoient sur la France une fréquence de retour de 12% des sécheresses extrêmes analogues à celles de 2003 et 2022, avec une température moyenne d'été de 21°C (Fig.8). Pour un réchauffement global de 3°C, cette fréquence augmente à 42%, soit presque une année sur deux (Fig.8). Les modèles prévoient aussi des sécheresses sans analogue récent, avec une température moyenne d'été atteignant 25°C (Fig. 8).

Depuis le début des années 2000, la France connaît des sécheresses estivales plus fréquentes et plus intenses avec un nombre variable de régions touchées. Ces sécheresses sont le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs. L'augmentation de température de l'air, à niveau de précipitation égale, engendre une augmentation, à la fois, de l'évaporation de l'eau du sol et de la transpiration de la végétation. À cela s'ajoute un démarrage de l'activité de la végétation de plus en plus tôt au printemps, qui engendre une raréfaction de l'eau dans les sols de plus en plus tôt en saison. La diminution des cumuls de précipitations de ces dernières années aggrave encore cette situation, et les peuplements forestiers établis sur des sols qui ont une faible capacité de rétention de l'eau (par exemple sableux) sont les premiers touchés par la sécheresse.

La sécheresse est le premier déterminant majeur de l'état sanitaire des forêts : les dépérissements suivent les années de sécheresse extrême. Les sécheresses des dernières années (2018, 2019, 2020, 2022) ont fait beaucoup de dégâts, notamment sur épicéa, sapin, pin sylvestre, hêtre. Ces dégâts s'observent sur les populations vivant en limite de l'aire climatique des espèces mais aussi sur des populations vivant au cœur de l'aire. Ils s'observent également chez des espèces supposées robustes aux conditions climatiques contraignantes, comme le pin sylvestre. Lors de sécheresses extrêmes, la mortalité des arbres survient à la suite d'une embolie des vaisseaux conducteurs sous l'effet de l'augmentation de la tension dans la colonne d'eau. Les peuplements qui survivent à une sécheresse n'en sortent en général pas indemnes. En effet, le manque d'eau provoque des arrêts précoces de la croissance des arbres, parfois de plusieurs semaines, et des arrêts de la photosynthèse, qui engendrent une diminution importante de la productivité, de la croissance annuelle (par exemple, -25% dans les chênaies du Nord-Est en 2003), et du puits de carbone.

Les observations disponibles ont montré qu'au cours des sécheresses récentes en Europe, les forêts étaient devenues des sources de CO₂ en été, avec des pertes de carbone les années suivantes par mortalité, dépérissement, et une vulnérabilité accrue aux attaques d'insectes et de pathogènes ([Jactel et al. 2012](#)). En effet, en réponse aux sécheresses, les arbres produisent moins de feuilles les années suivantes, réduisant ainsi leur surface transpirante et leurs pertes en eau, et présentent une moindre croissance et une moindre production de graines ([Limousin et al. 2012](#) ; [Rambal et al. 2014](#) ; [Csilléry et al. 2020](#) ; [Le Roncé et al. 2021](#)). Pendant plusieurs décennies, les forêts ont augmenté leur croissance, du fait i) de l'âge assez jeune des peuplements ([Ciais et al. 2008](#)), ii) de l'effet fertilisant de l'augmentation des dépôts d'azote et du CO₂ atmosphériques, et l'allongement de la saison de croissance dans les régions tempérées et froides, iii) de l'augmentation de la surface des forêts liée à la déprise agricole et certaines mesures d'intervention comme la protection des incendies dans le sud de la France. Cependant, cette croissance tend maintenant à diminuer (Fig.6). La moindre production des arbres affecte leur capacité à faire face aux nombreux ravageurs et pathogènes qui profitent de leur affaiblissement. L'ensemble de ces phénomènes est responsable d'une augmentation du bois dit "de crise" (issus de peuplements sinistrés) depuis 2019, et de ce fait du volume des récoltes. Enfin, le taux de mortalité des jeunes plants lors des plantations a augmenté au cours de la dernière décennie pour atteindre un maximum en 2022 (38% ; [DSF 2023](#)). Cette mortalité est attribuée à des causes abiotiques, notamment la sécheresse, dans 92% des cas.

Les facteurs de vulnérabilité à la sécheresse identifiés dans les peuplements existants sont multiples : (i) état des arbres (les grands arbres et les arbres productifs sont plus vulnérables) ([Cailleret et al. 2014](#)); (ii) état du sol (les sols naturellement pauvres et les sols tassés ne permettent pas une bonne récupération des arbres après l'épisode de sécheresse), et (iii) type d'essence (les feuillus sont en moyenne plus vulnérables que les résineux). La grande plasticité de développement des arbres et la sélection naturelle pourraient permettre aux jeunes arbres en cours de croissance une moindre vulnérabilité à la sécheresse arrivés à l'âge adulte que leur parents.

L'accroissement de la fréquence et de l'intensité des sécheresses a augmenté le risque incendie dans de

nombreuses régions du globe et, en Europe, ce risque est essentiellement présent dans les régions du Sud. Bien que les conditions météorologiques (responsables de la moitié du risque) favorisant le risque incendie aient été rencontrées plus fréquemment au cours des dernières décennies, les surfaces brûlées et le nombre de feux ont diminué depuis 1980. Ceci est dû à des politiques de prévention, surveillance et lutte anti-incendie performantes mais dont l'efficacité présente

des limites. En France, le risque incendie va particulièrement augmenter dans le Sud-Ouest et les régions de forêts de feuillus, jusqu'ici relativement épargnées, où le risque élevé deviendra la norme dès 2060. En 2022, les surfaces brûlées ont quadruplé par rapport à la moyenne de la décennie précédente, principalement dans la forêt des Landes et les forêts tempérées (Fig.9). La saison des feux va également s'allonger et le risque de très grands feux augmenter.

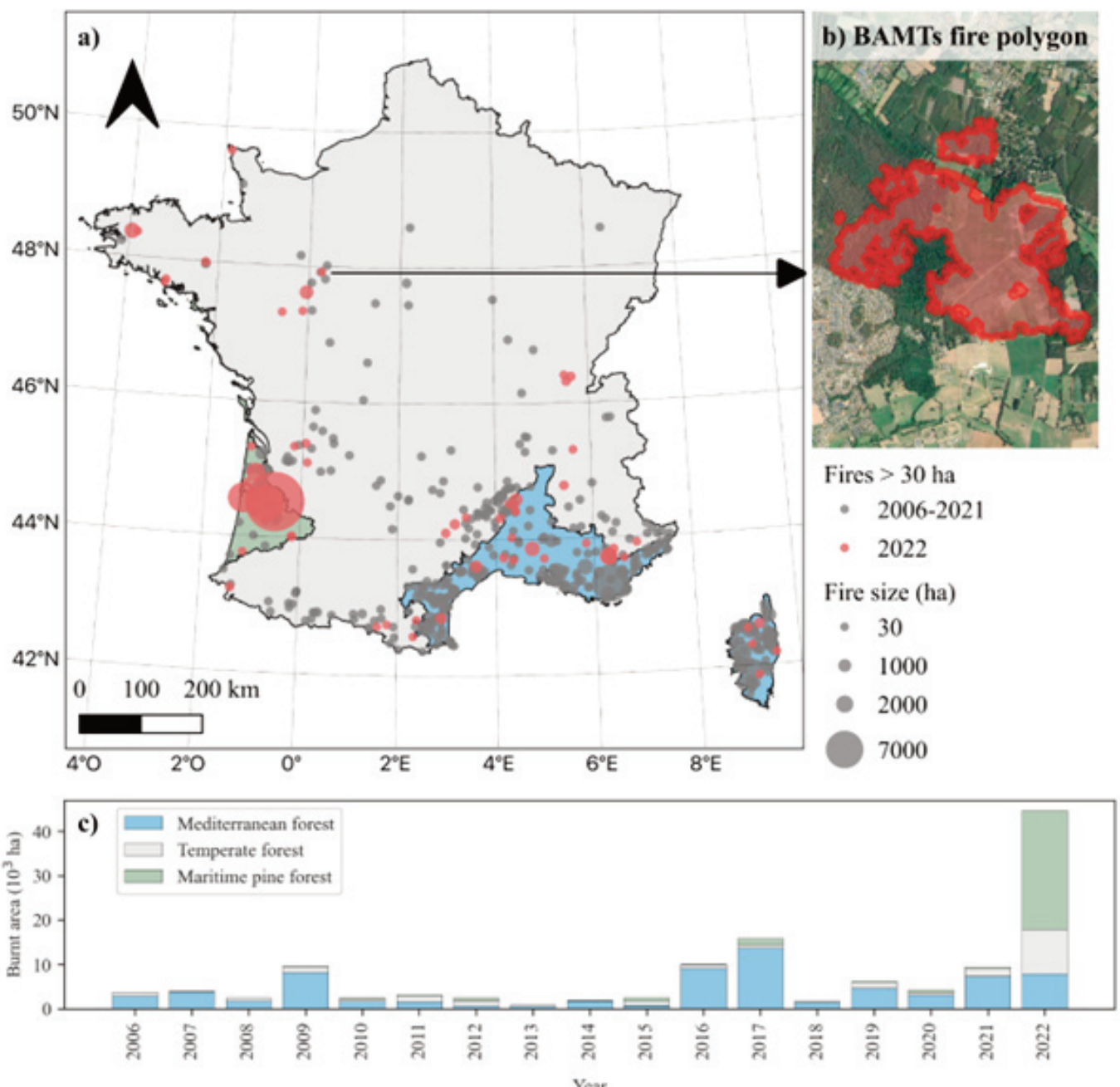


Figure 9. Observations par satellite des surfaces brûlées en France en 2022, montrant l'augmentation inédite en 2022 des feux dans les Landes (en vert) et diverses forêts tempérées en Bretagne, Pays de la Loire et Jura (en gris). Source : Vallet *et al.* 2023.

Les modèles actuels sous-estiment beaucoup les grands incendies, essentiellement parce qu'ils prennent mal en compte l'état de la végétation. Le risque prédit par les modèles est donc probablement sous-évalué. Pour toutes les raisons exposées ci-dessus, il est maintenant certain que le changement climatique sera responsable d'une baisse de la séquestration du carbone par les forêts dans les prochaines décennies, mais la quantification des impacts reste difficile du fait des effets retard, des interactions entre les différents facteurs de perturbation, des incertitudes sur l'évolution des modes de gestion des forêts et du climat, et des capacités de résistance et d'adaptation des différentes essences.

Autres effets du changement climatique

Le changement climatique affecte également le cycle de développement des arbres. Entre 1950 et 2010, la période d'activité des arbres s'est allongée notablement, reprenant de plus en plus tôt au printemps et s'arrêtant de plus en plus tard à l'automne (Menzel et al. 2006), ce qui a contribué à une plus forte productivité des forêts pendant cette période. Depuis la décennie 2010, la précocité des arbres au printemps les expose de plus en plus souvent aux dommages de gels tardifs (Lenz et al. 2013 ; Vitasse et al. 2018). Cette précocité conduit aussi à une utilisation plus précoce de l'eau du sol en saison, ce qui épuise plus tôt les réserves et accentue le stress hydrique estival (Jump et al. 2017). Aujourd'hui, la sécheresse tend, au contraire, à raccourcir la période d'activité des arbres dont les feuilles ont tendance à tomber plus tôt en saison. Ces modifications des cycles de développement entraînent des conséquences sur la croissance, la reproduction et la survie des arbres (Chuine 2010). Les projections des modèles de fonctionnement des arbres forestiers montrent que les tendances déjà visibles de dépérissement vont s'accroître dans les prochaines années et que des essences emblématiques telles que le chêne, le hêtre, ou encore le pin sylvestre risquent de disparaître d'une grande partie de la France avant la fin du 21^e siècle (Cheaib et al. 2012).

Ravageurs et pathogènes

Les principales maladies des arbres forestiers sont causées par des champignons pathogènes souvent introduits involontairement par la main humaine et, notamment, par le commerce international des pépinières. La fréquence de retour des épidémies a doublé depuis 1976, probablement avec la

mondialisation des échanges commerciaux. Beaucoup de maladies et de ravageurs sont d'origine tropicale et sont favorisés par le réchauffement climatique qui étend leur répartition géographique et augmente leurs survie et fécondité (exemple *Phytophthora ramorum*, champignon pathogène très agressif qui attaque un grand nombre d'essences). Mais le changement climatique peut aussi avoir des effets négatifs directs et indirects sur la survie et la dynamique de populations de ces pathogènes et ravageurs qui profitent de l'affaiblissement des arbres engendré par le changement climatique (Jactel et al. 2012, 2019).

Les dégâts des ravageurs et pathogènes diminuent avec la diversité des essences présentes dans un peuplement (souvent significativement dès deux essences en mélange) et la diversité génétique au sein de chacune de ces essences localement (Jactel et al. 2021). Ainsi, les plantations forestières monospécifiques sont toujours plus affectées que les plantations diversifiées et les forêts naturelles.

Invasions biologiques

Les invasions biologiques sont actuellement la cinquième cause de perte de biodiversité et peuvent affecter les capacités des espèces autochtones à s'adapter au changement climatique. Un certain nombre d'espèces d'arbres sont envahissantes en France (par exemple le mimosa à feuille de saule et l'ailante) et sont le résultat d'introductions volontaires depuis l'Amérique du Nord, l'Australie ou l'Asie, motivées par certains usages (plantes à usage ornemental ou pour la stabilisation de berges ou de talus). Certaines d'entre elles ont des effets positifs sur la stabilité du sol mais la plupart ont des effets négatifs sur la biodiversité forestière car, dotée d'une croissance très rapide, elles éliminent par compétition les espèces natives, en particulier au moment de leur régénération (Richardson et al. 2014). L'invasion de ces espèces met en moyenne une cinquantaine d'années (Osunkoya et al. 2021) à s'établir après leur introduction mais le caractère envahissant ne s'exprime pas toujours et dépend souvent des conditions du milieu. On estime que le nombre d'espèces envahissantes va augmenter de 50% dans les prochaines années, alors même que les règles de gestion des espèces exotiques envahissantes ne sont en général pas respectées. Ces espèces étant introduites pour des raisons d'usage, leur gestion génère souvent des conflits. Les études sur les invasions biologiques en forêt restent peu nombreuses

et en particulier celles qui intègrent les différentes dimensions biologiques, climatiques, sociétales et économiques du problème.

La filière forêt-bois doit s'adapter au contexte sociétal et climatique

La prise en compte du contexte sociétal dans la gestion des forêts est nécessaire mais difficile du fait notamment des conflits d'usage entre acteurs aux intérêts divergents (promenade, chasse, exploitation du bois, etc.) et qui ont rarement une vision d'ensemble des contraintes de la gestion forestière.

Contribuer à l'atténuation du changement climatique

La France s'est fixée d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et a défini pour cela une stratégie nationale, dite Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), en cohérence avec les accords de Paris et les recommandations du GIEC. La [SNBC-2](#) (actuellement en révision), adoptée par décret le 21 avril 2020, fixe la stratégie du gouvernement pour 2019-2033 et influe sur toutes les autres mesures adoptées dans l'ensemble de la filière bois. La forêt et la filière bois ont un grand rôle à jouer dans celle-ci. Pour ce qui est du problème du réchauffement climatique seul, il s'agit d'optimiser le bilan des flux de carbone des forêts et de l'ensemble de la filière bois, en tenant compte des importations et exportations, du temps de résidence du carbone en forêt et dans les produits bois, et de leur effet de substitution. La [SNBC-2](#) prévoit d'atteindre la neutralité carbone en 2050 avec 80 Mt C émis pour 80 Mt C absorbés, ce qui correspond à un doublement de l'absorption actuelle et une division par cinq environ des émissions actuelles. La [SNBC-2](#) préconise une augmentation des prélèvements de bois, engendrant une baisse du puits national de 32 Mt CO₂/an dans les forêts en place, à moitié compensée en réorientant le bois récolté vers des usages à plus longue durée de vie et pour le substituer à des matériaux dont la production émet davantage de gaz à effet de serre, et à des combustibles fossiles. Elle privilégie donc le stockage du carbone dans les objets hors de la forêt plutôt que dans la forêt elle-même, et la substitution bois énergie. Elle préconise également de nouvelles plantations sur les prairies considérées peu productives et les terres agricoles abandonnées, le prolongement des boisements par accrus naturels et la réduction de la déforestation permettant de stocker 17 Mt CO₂/an. Ce scénario aboutirait à une quasi-stabilité du puits de la filière prise dans son ensemble. La [SNBC-2](#) est en

phase avec le Programme National de la Forêt et du Bois (PNFB) qui s'est fixé un objectif de coupe supplémentaire pour arriver à +12 Mm³/an en 2026. Le PNFB est décliné localement par les Programmes Régionaux de la Forêt et du Bois.

La SNBC-2 s'est appuyée sur un rapport de l'ADEME ([ADEME 2016](#)) et un rapport commandé par le ministère de l'Agriculture ([Roux et al. 2017](#); [Roux et al. 2020](#)) évaluant trois scénarios de gestion forestière correspondant à des degrés de coupe plus ou moins importants dans les années à venir. Le scénario Extensification correspond au maintien du volume de récolte actuel. Le scénario Intensification et augmentation des prélèvements (adopté pour l'essentiel par la [SNBC-2](#)) prévoit un accroissement net des prélèvements de 70% à l'horizon 2035. Ce scénario s'inscrit dans une stratégie de recherche d'une plus grande productivité visant à atténuer le changement climatique par un programme de plantations (essentiellement par coupes rases) à forte productivité (résineux, peupliers, eucalyptus), avec des cycles de rotation courts (réduction des risques), tournée vers l'industrie, et une contribution marquée à la bioéconomie. Or, toutes les études qui ont procédé à des évaluations similaires ([Roux et al. 2017](#), [Roux et al. 2020](#) ; [du Bus de Warnaffe & Angerand 2020](#) ; [Valade et al. 2017](#) ; [Grimault et al. 2022](#)) s'accordent sur le fait que le scénario Intensification et augmentation des prélèvements aura pour effet de décroître le puits de carbone total dans les années à venir du fait des émissions liées à l'exploitation et la transformation, même en tenant compte de l'effet de substitution. De plus, la récente diminution de la séquestration nette de CO₂ par les forêts ainsi que la dégradation du stock de carbone dans les sols forestiers en cas d'augmentation des coupes rases ne sont pas comptabilisées dans les bilans de ces scénarios, ni l'altération du microclimat forestier qui en résulte, pouvant compromettre la survie des jeunes plantations. Enfin, le niveau d'adaptation et de développement de la filière bois en France pour pouvoir atteindre les objectifs de la SNBC-2 ne semble pas non plus pris en compte alors qu'il apparaît actuellement insuffisant pour les atteindre. Cela se traduit notamment par une augmentation du déficit commercial du fait d'un niveau d'exportation de bois brut important et d'un niveau d'importation de bois transformé qui va croissant.

Toutes les projections souffrent actuellement de lacunes qui amènent à estimer de façon encore imprécise le puits de carbone forestier. Ces lacunes proviennent essentiellement d'un manque de connaissances et d'outils permettant d'identifier les scénarios de gestion optimaux, de toutes les contributions des forêts, de l'évolution du climat et son impact sur le fonctionnement des forêts. Par exemple, l'effet du changement climatique sur la baisse de productivité, les dépérissements massifs et les incendies, comme observé ces dernières années, n'est pas pris en compte ou de façon extrêmement succincte dans ces projections. Se pose également la question des limites des études actuelles dont l'horizon temporel est trop restreint par rapport au cycle de vie des peuplements forestiers. Par ailleurs, l'application des coefficients de substitution des produits bois souffre de très fortes imperfections. Les coefficients sont considérés comme constants dans le temps alors qu'une grande partie des industries s'efforce actuellement de diminuer le bilan carbone de leur production, ce qui influe sur les coefficients de substitution.

Afin d'encourager les pratiques permettant d'améliorer le bilan carbone de la filière forêt-bois, le label Bas Carbone a été créé par le Ministère de la Transition Écologique. Les projets obtenant ce label reçoivent un financement d'origine publique ou privée. À ce jour, environ 400 projets forestiers ont été labellisés (essentiellement du boisement ou reboisement) pour environ 800.103 t CO₂ séquestrées sur 30 ans, ce qui représente moins de deux millièmes des émissions françaises annuelles et de l'ordre de 0,2 millième de la surface des forêts françaises métropolitaines. Ce dispositif contribue donc pour le moment de façon très modeste aux objectifs fixés par la [SNBC-2](#).

Prendre en compte les multiples contributions des forêts

Bien que la forêt apporte de très nombreuses contributions au bien-être des Français (Fig.1), très souvent, seule la production de bois et les ressources de la chasse sont prises en compte dans les bilans économiques de la forêt. De plus, le changement climatique accroît le risque d'aléas auxquels les peuplements forestiers seront soumis et accroît ainsi le risque économique à les maintenir sur pied au-delà de l'âge minimum de rentabilité. Or ce risque n'est pas partagé entre les différents bénéficiaires des

contributions des forêts. Une façon de partager les coûts de gestion des forêts pour l'ensemble des contributions qu'elles assurent pourrait être de mettre en place des paiements pour services environnementaux, des paiements pour missions d'intérêt général, ou des rémunérations compensatoires. Dans l'établissement du budget de l'ONF à travers le contrat État-ONF, une part est déjà attribuée aux autres contributions que la production de bois, à travers les Missions d'Intérêt Général (MIG). Cette partie, bien qu'en augmentation lors du dernier contrat Etat-ONF 2021-2025, ne représente que 6,7 % du budget de l'ONF. Pourtant, toutes les études cherchant à estimer la valeur de la forêt en tenant compte de toutes ses contributions aboutissent à des valeurs de 5 à 10 fois supérieures à la valeur obtenue par la simple récolte de bois (voir annexe 2). Ce décalage important est sans doute à la source des nombreux conflits entre d'une part les usagers des forêts qui, sans en avoir fait une évaluation chiffrée, ont conscience de la valeur des forêts pour leur bien-être, et d'autre part les forestiers dont le revenu financier provient essentiellement de la vente de bois. Cette dissonance est encore accrue dans le contexte du réchauffement climatique et du rôle de puits de carbone que l'on souhaite faire jouer aux forêts, ainsi que de la perte de biodiversité auxquels les usagers sont particulièrement sensibles.

Prendre en compte les nouvelles conditions climatiques

On assiste depuis une vingtaine d'années à une surmortalité, un déficit de régénération et des pertes de productivité, essentiellement à cause des sécheresses qui provoquent un affaiblissement des arbres alors rendus plus sensibles aux pathogènes et aux ravageurs. Tous les types de forêts sont concernés par cette situation, y compris la forêt méditerranéenne. Or, il apparaît que les différents rapports sur la filière forêt-bois ne tiennent pas compte, ou de façon très simpliste, des effets du changement climatique sur la croissance, la régénération et la survie des peuplements forestiers. Peu d'études sont pour le moment en effet disponibles sur ces effets. Certaines suggèrent que les vieilles forêts peuvent être plus résilientes aux aléas climatiques que les jeunes forêts ([Thom et al. 2019](#)) ; et aucune étude n'a évalué comment les pratiques sylvicoles interagissent avec les effets du changement climatique. Tout l'enjeu pour la sylviculture dans les décennies à venir sera donc de réussir à maintenir la productivité la plus élevée possible malgré des conditions climatiques sous-

optimales pour la croissance des arbres et leur régénération.

Les pistes étudiées par la recherche scientifique pour maintenir des forêts fonctionnelles dans des conditions climatiques dégradées portent sur la complémentarité fonctionnelle des essences forestières, la diversité génétique intraspécifique présente au sein des peuplements, les pratiques sylvicoles telles que l'éclaircie et l'introduction de nouvelles essences mieux adaptées à des conditions plus chaudes et plus sèches en tenant compte de leur potentiel d'invasion et de leur résistance au feu. D'autres pistes consisteraient à explorer le rôle des microorganismes du sol et du microbiome des arbres dans l'adaptation de ces derniers au changement climatique et en particulier aux sécheresses.

Prendre en compte le potentiel d'adaptation des arbres forestiers

Un arbre ne peut être à la fois productif et résilient : s'il est capable de pousser vite, il sera en général peu résistant aux aléas, et inversement ([Fririon et al. 2023](#)). Lorsque la fréquence des sécheresses augmente, les arbres s'acclimatent dans un premier temps en réduisant leur surface foliaire pour mieux résister à la sécheresse (moins de transpiration), au détriment de leur croissance ([Limousin et al. 2012](#); [Rambal et al. 2014](#); [Csilléry et al. 2020](#)). Si ce type d'acclimatation n'a pu se faire à temps, ce sont les arbres les moins productifs qui survivent en général le mieux à une sécheresse, soit parce qu'ils ont investi davantage dans des stratégies de résistance, soit parce que leur plus faible dynamique de croissance les rend moins exposés ([Cailleret et al. 2014](#)). L'acclimatation des arbres à de nouvelles conditions climatiques est donc possible mais limitée ([Duputié et al. 2015](#)). Lorsque celle-ci ne suffit plus, les processus d'évolution génétique peuvent prendre le relais. Cependant, la vitesse d'évolution des arbres est très lente en regard de la vitesse actuelle d'évolution du climat bien que la pression de sélection soit très forte et que la diversité génétique présente dans les populations permette une évolution génétique ([Alberto et al. 2013](#); [Lefèvre et al. 2013](#)). Cela est dû essentiellement au fait que le temps de génération est long chez les arbres, ce qui ralentit l'action de la sélection naturelle.

L'évolution génétique des arbres au cours des derniers

siècles a été essentiellement pilotée en France par l'effet d'événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les gels ([Saleh et al. 2021](#)). Jusqu'ici, les épisodes de mortalité massive à la suite de ce type d'événements ont toujours épargné quelques individus qui avaient un patrimoine génétique leur permettant d'y survivre. Les vieux arbres sont ainsi des réservoirs de diversité génétique pouvant se révéler précieux pour adapter les populations aux conditions climatiques futures. La diversité génétique dans les populations d'arbres est en général élevée, ce qui augmente l'efficacité de la sélection naturelle ([Alberto et al. 2013](#); [Lefèvre et al. 2013](#)). Cette diversité génétique est un levier important sur lequel le gestionnaire pourra avoir prise et il s'agira pour lui de l'augmenter.

Les pratiques sylvicoles peuvent également modifier les capacités d'adaptation des peuplements aux conditions climatiques. D'abord, la diversité en essences, si elle atteint un niveau suffisant, permet d'augmenter la résilience d'un peuplement grâce à la complémentarité des stratégies écologiques ([Jactel et Brockerhoff 2007](#); [Liang et al. 2016](#); [Anderegg et al. 2018](#)). Ensuite, la pratique de l'éclaircie dans les stades jeunes réduit l'efficacité de la sélection naturelle : plus l'éclaircie est forte, plus le taux d'évolution de la population par sélection naturelle est réduit ([Fririon 2022](#)). Il est ainsi conseillé de ne pas éclaircir le peuplement au stade jeune pour que la sélection naturelle soit efficace et sélectionne les individus les plus résistants² (auto-éclaircie) mais de le faire progressivement dans un stade plus avancé de manière à réduire la compétition pour l'eau et favoriser la croissance des individus laissés sur pied.

S'il est possible d'accélérer l'adaptation des peuplements forestiers au changement climatique par ces différentes actions de gestion, leurs effets à court terme seront néanmoins probablement modestes au regard de l'ampleur des dégâts attendus.

Optimiser la gestion des forêts pour atteindre les objectifs de développement durable

La gestion forestière fait actuellement face à des défis majeurs inédits. Il s'agit pour elle de réussir à concilier des enjeux de court terme, tels que les dépérissements et la dynamisation de la filière bois, et des enjeux de long terme, tels que la neutralité carbone et l'adaptation des forêts au changement climatique.

². Néanmoins, lorsque la densité des semis est très élevée, une éclaircie au stade jeune s'avérerait avantageuse, car ce sont alors les semis les plus vigoureux qui seraient sélectionnés à ce stade mais qui au stade adulte seraient les moins résistants au stress hydrique ([Fririon 2022](#)).

Mais il s'agit aussi de faire des choix dans un contexte de fortes incertitudes, dues à la fois au manque de données et de connaissances sur les effets du changement climatique sur les forêts, mais aussi à la mise en œuvre ou non d'actions permettant d'atténuer le changement climatique. Certaines décisions en matière de gestion des forêts peuvent avoir des effets aussi importants que ceux du changement climatique. Les incitations gouvernementales telles que le plan France Relance, qui cadrent les conditions d'éligibilité des projets financés par l'Etat, jouent donc un rôle très important pour l'avenir des forêts françaises (voir Encadré).

Bien que la libre évolution représente le mode de gestion actuellement le plus efficace pour piéger puis stocker durablement le CO₂, et pour maintenir d'autres contributions importantes des forêts, la France a besoin d'exploiter une partie de ses forêts pour produire sur son territoire les produits biosourcés dont elle a besoin, réduisant ainsi sa dépendance vis-à-vis de produits plus émissifs lors de leur production ou du fait de leur importation. Toute la question est de savoir quelle proportion doit être exploitée et à quel rythme. Dans un avenir très incertain, cinq points font néanmoins consensus.

1. La recherche est actuellement incapable de prédire correctement les dépérissements et les bilans de carbone de la forêt, faute de modèles suffisamment complexes qui puissent prendre en compte les contextes sylvicoles, les options de gestion, le fonctionnement du sol, l'histoire des peuplements et les effets du changement climatique sur le fonctionnement des arbres, mais aussi faute d'observations de terrain pour paramétrer ces modèles et les valider.

2. L'échelle spatiale à laquelle les questions doivent être traitées et les diagnostics réalisés devrait être celle des territoires et des massifs en fonction du contexte climatique local et de la vulnérabilité des peuplements en place, et non l'échelle nationale.
3. Les études prospectives doivent considérer plusieurs échéances temporelles. Des projections relativement équivalentes à l'horizon 2050 ne sont pas nécessairement équivalentes à plus long terme. Or le temps long est essentiel en forêt : une essence forestière plantée aujourd'hui s'installe pour plusieurs dizaines (30 ans pour le pin maritime) voire des centaines d'années (170 ans pour le chêne) avant sa possible exploitation. Le choix des essences aujourd'hui est donc crucial.
4. La longueur du cycle forestier influe sur de nombreux facteurs dont le bilan de carbone, la qualité des sols et la vitesse d'évolution des peuplements (sous régénération naturelle). Hors crise sanitaire, un raccourcissement des cycles d'exploitation impacte négativement le bilan de carbone de la forêt mais aussi la qualité des sols (les arbres jeunes, notamment les résineux, sont plus gourmands en nutriments et acidifient les sols). Cependant, un allongement des cycles augmenterait l'exposition de volumes importants de bois aux aléas (tempêtes, incendies notamment), et pourrait ralentir la vitesse d'évolution génétique des peuplements naturels. Dans l'objectif de maintenir, voire d'augmenter, l'absorption du carbone, une adaptation des pratiques prenant en compte les compromis entre raccourcissement et allongement des cycles d'exploitation devra être recherchée en

France Relance : la transition écologique comme objectif stratégique

La mesure forestière présentée dans le plan de relance de la France en 2020 a affecté un budget de 200 millions d'euros dont 150 millions d'euros au titre du renouvellement forestier. Les conditionnalités relatives à la diversification des forêts, la biodiversité, les sols, la durabilité de l'exploitation, de la transformation et des usages du bois y sont fort peu contraignantes (Peyron et al. 2021). Si 58% des projets financés ont concerné des peuplements sinistrés (32% peuplements pauvres et 10% peuplements vulnérables), 87% d'entre eux ont impliqué des plantations en plein sur terrain nu après coupe (coupe rase), le plus souvent en monoculture (Canopée 2022). Il apparaît donc important que les prochains programmes de renouvellement forestier soient en cohérence avec un plan d'adaptation des forêts au changement climatique, avec la stratégie nationale bas carbone révisée et avec les objectifs de développement durable. Cela nécessiterait en particulier de conditionner les aides de l'Etat à des garanties sur la diversité en essences plantées et les orientations sylvicoles utilisées.

fonction du contexte local incluant les facteurs biologiques et socio-économiques.

5. Les coupes rases (notamment avec dessouchage) vont à l'encontre de plusieurs objectifs de développement durable. Ces pratiques engendrent un déstockage massif du carbone du sol (50%) et génèrent une dette carbone qui n'est annulée qu'au bout de cinquante ans après plantation. Elles impactent également négativement la fertilité des sols et leur fonctionnement, ainsi que la biodiversité de nombreux groupes taxonomiques, le paysage et le microclimat ([GIP ECOFOR 2022](#)).

Conclusion et avis

Les forêts françaises contribuent beaucoup au bien-être des Français et à l'économie de la France. Parmi ces contributions, celle de puits et de stockage de carbone a pris beaucoup d'importance ces dernières années et fait jouer aux forêts un rôle majeur dans la Stratégie Nationale Bas Carbone. La forêt française métropolitaine a vu sa surface augmenter depuis plus d'un siècle, et sa productivité a globalement augmenté jusqu'en 2010. Depuis, du fait de l'accélération du changement climatique et de ses impacts ces dernières années, la productivité diminue, le taux de mortalité, y compris des jeunes plantations, augmente ainsi que le risque incendie, et ces tendances sont amenées à se poursuivre dans les décennies à venir. Malgré des conditions difficiles d'exploitation et de valorisation par la filière, les prélèvements ont augmenté ces dernières années notamment du fait du bois dit "de crise" issu des peuplements sinistrés. Les derniers bilans de l'Inventaire Forestier National et du CITEPA, ainsi que les projections qui peuvent être faites sur l'évolution du puits et du stock de carbone en forêt et dans les produits bois en tenant compte des effets de substitution suggèrent que les objectifs affichés de la SNBC-2 pour la filière forêt-bois ne pourront pas être tenus, et qu'il est urgent de les réviser. L'accélération

des dépérissements massifs appelle à la mise en œuvre d'un plan d'adaptation des forêts françaises au changement climatique de façon urgente. A cet égard, il apparaît essentiel que les projets financés par le plan de relance forestier respectent scrupuleusement les préconisations pour l'atténuation mais aussi l'adaptation, en particulier en ce qui concerne l'usage des coupes rases et la diversité des essences au sein d'un peuplement. Enfin, le bois devient une ressource dont les usages doivent être rationalisés. Les méthodes de calcul de la substitution des produits bois n'apparaissent pas encore assez fiables et doivent être améliorées. Les produits bois à longue durée de vie et à fort potentiel de substitution doivent être privilégiés. En cela, l'augmentation de la récolte de bois pour l'énergie issue de la biomasse ligneuse primaire³ dans les dix années à venir pose question. En effet, ce bois contribue à augmenter les émissions de CO₂ sur un laps de temps pendant lequel celles-ci ne seront pas compensées par une séquestration équivalente (CITEPA 2020).

Relever les défis auxquels la forêt et ses usages sont confrontés s'avère beaucoup plus complexe que l'idée simpliste selon laquelle il suffirait de planter des arbres ou de les laisser pousser. La complexité de la situation, sa dépendance au contexte local et à l'évolution du climat nécessitent des outils d'aide à la décision capables d'intégrer les multiples dimensions des problèmes auxquels la forêt et la filière-bois sont confrontés. Ces outils n'existent pas encore et nécessitent notamment des modèles de fonctionnement de l'arbre et des peuplements forestiers capables d'intégrer des scénarios de gestion, les effets du changement climatique, et le potentiel d'adaptation des peuplements. Ils nécessitent également des outils de suivi et des indicateurs de l'état sanitaire des forêts, de la biodiversité, des ressources ligneuses, et des flux et stocks de carbone en forêt y compris dans les sols.

³. La biomasse ligneuse primaire correspond à tout bois récolté directement dans les forêts, y compris le bois récupéré à la suite de mortalité naturelle. La biomasse ligneuse secondaire correspond à tout bois issu d'une première transformation (chutes de scierie ou produits de bois recyclés ou en fin de vie).

Recommandations pour la recherche

Trois grandes questions scientifiques nécessitent un effort de recherche important : le bilan carbone des forêts, l'adaptation des forêts au changement climatique et l'efficacité d'utilisation du bois.

Plus spécifiquement, il apparaît urgent d'accroître l'effort de recherche sur les points suivants :

- Le développement de modèles prédictifs plus intégrateurs et plus robustes du fonctionnement des arbres, de leur croissance, état hydrique (important pour les modèles de dynamique incendie) et sanitaire, et du fonctionnement des sols. Ces modèles doivent notamment prendre en compte l'évolution des conditions climatiques, les différents types de perturbations naturelles, les différents contextes sylvicoles. Ils doivent être évalués à l'aide des données des inventaires et des réseaux de suivi à long terme, et être utilisés avec les projections climatiques régionales à haute résolution spatiale. Enfin, des recherches sur les mécanismes de la résilience, consécutifs à des crises de dépérissement antérieures sont nécessaires notamment pour améliorer la représentation des processus physiologiques et écologiques dans les modèles.
- L'acquisition et la diffusion des données nécessaires à la calibration et la validation de ces modèles : données large échelle sur la composition spécifique des peuplements, leur biomasse aérienne et souterraine, leur état sanitaire, leur régénération, les flux de carbone entre végétation et atmosphère et entre végétation et sol; données de télédétection spatiale permettant un suivi à très haute résolution des hauteurs, volumes, biomasses, des perturbations forestières, des trajectoires de repousse et de la reconstitution des stocks de carbone suite à différents types de perturbations. Étant donnée la forte évolution des taux de mortalité, une intégration dans l'inventaire forestier des changements de stock dans le bois mort serait également nécessaire.
- La mise au point d'une méthodologie robuste de référence d'inventaire multi-sources pour évaluer les stocks de carbone en forêt, notamment dans le sol où les incertitudes de mesure sont les plus élevées, ainsi que des flux de carbone des peuplements, en fonction de leur composition, de leur durée de vie, et des itinéraires sylvicoles. Celle-ci aiderait à identifier les options de gestion permettant d'optimiser le bilan carbone de la forêt.
- Les effets des pratiques et itinéraires sylvicoles sur les différentes contributions des forêts, et en particulier l'atténuation du changement climatique, la préservation de la biodiversité, la préservation des sols, ainsi que sur l'adaptation des peuplements forestiers au changement climatique et sur le risque-incendie. Ce sujet de recherche nécessite en outre de prendre en compte la faisabilité des changements de gestion par les gestionnaires et leur acceptation par la société.
- La mise au point d'une méthodologie vérifiable et transparente de calcul des émissions évitées par la substitution bois selon les filières concurrentes, les usages du bois et leurs évolutions futures prenant en compte le comportement des consommateurs et les mécanismes de marché, et la définition des scénarios contrefactuels sans substitution.
- La quantification du potentiel d'adaptation des peuplements et de la contribution à la dynamique d'adaptation de l'enrichissement de la ressource génétique in situ par migration assistée de matériel génétique mieux adapté aux conditions futures. La possibilité d'introduire de nouvelles essences mieux adaptées aux futures conditions climatiques, en évaluant notamment leur caractère envahissant.
- Les enjeux liés aux forêts nécessitent des recherches interdisciplinaires qui puissent prendre en compte à la fois les facteurs physico-chimiques, biologiques mais aussi géographiques, économiques et sociaux et leurs interactions. Ces recherches interdisciplinaires, bien qu'en augmentation, restent insuffisantes au regard des enjeux et de l'urgence de la situation, et nécessitent une formation multidisciplinaire des chercheurs. Les enjeux liés aux forêts requièrent également de prendre en compte les dynamiques d'acteurs dans les recherches. Les méthodes issues de la recherche-action participative se prêtent particulièrement bien à ce contexte qui nécessite de trouver des solutions locales à un problème global.
- L'ampleur, l'urgence et l'extension géographique de ces enjeux plaident pour une forte intégration du progrès des connaissances sur la forêt et sa filière-bois non seulement au niveau français mais également au sein d'un partenariat européen de recherche et innovation.

Recommandations pour la gestion forestière

Les enjeux liés aux forêts nécessitent d'optimiser, de façon conjointe et à l'échelle du territoire national, l'adaptation des forêts au changement climatique, son atténuation, la production de bois, la préservation de la biodiversité et de ses autres contributions.

Plus spécifiquement, il apparaît urgent d'adopter des pratiques qui permettent à la fois de gérer la pénurie en eau et les autres effets du changement climatique, d'optimiser la séquestration et le stockage de carbone tout en préservant les autres contributions des forêts y compris la production de produits bois à plus longue durée de vie, et d'augmenter le potentiel d'adaptation des forêts. Il apparaît crucial que ces pratiques soient diversifiées à l'échelle régionale, adaptées au contexte socio écologique local, et surtout flexibles. Enfin, il paraît important d'avoir une approche intégrée et dynamique tenant compte de l'évolution des stocks de carbone et des autres contributions des forêts, ainsi que du devenir des produits bois dans la bioéconomie, en incluant les exports et imports.

Les pratiques suivantes répondent à ces critères :

- Ajuster la structure des peuplements en favorisant la sylviculture à couvert continu et le balivage (transformation de taillis en futaies). Ces pratiques permettent une gestion plus souple du peuplement, une meilleure maîtrise de la densité et de la composition, une meilleure régénération naturelle, une meilleure préservation du carbone dans les sols et des bois morts (véritables points chauds de biodiversité en forêt). Elles permettent également de garder des îlots de sénescence et de vieillissement pour préserver la biodiversité. *A contrario*, hors sinistres et dépérissement, il apparaît indispensable d'éviter les coupes rases autant que possible en raison de leurs impacts écologiques, paysagers et climatiques trop importants.
- Ajuster les densités de peuplement aux conditions hydriques par éclaircies très progressives tout au long de la vie du peuplement, en fonction de sa composition et de sa structure, de manière à réduire la compétition pour l'eau si elle devient trop forte et sans dépasser un niveau d'éclaircie qui compromettrait la régénération naturelle du peuplement.

- Augmenter fortement la diversité des essences afin de renforcer la résilience des peuplements face aux événements climatiques extrêmes et aux attaques de ravageurs et pathogènes (les options de mélanges les plus intéressantes étant la combinaison de feuillus et de résineux). Augmenter la diversité génétique au sein des peuplements, et éclaircir les peuplements le plus tardivement possible pour rendre la sélection naturelle plus efficace dans les jeunes stades. Introduire de nouvelles essences mieux adaptées aux nouvelles conditions lorsque les essences autochtones ne peuvent plus se maintenir, de façon expérimentale et contrôlée, et assortie d'une analyse de risque.
- Prendre en compte systématiquement la résistance au feu et le pouvoir de propagation du feu des essences introduites, favoriser autant que possible les essences de feuillus qui résistent mieux au feu en général, dans les régions où le risque incendie devient prégnant, ainsi qu'une structure des peuplements plus résistantes à l'incendie.
- Maintenir quelques très vieux arbres (> 150 ans) car au-delà des habitats qu'ils offrent à la biodiversité, ils représentent un patrimoine biologique à préserver et sont porteurs d'une diversité génétique utile pour adapter les populations au changement climatique.
- Ne pas raccourcir trop les temps de révolution (âge de coupe) au risque de ne pas équilibrer le bilan carbone et d'acidifier trop les sols. Préserver au maximum les sols lors des interventions nécessitant des engins mécaniques en utilisant des engins plus légers.

Recommandations pour la filière bois

La filière bois a un grand rôle à jouer dans la transition énergétique et la transition écologique. Son adaptation à ce contexte et à la situation sanitaire des forêts sera cruciale pour la réussite de ces transitions. Les évolutions souhaitables pour réussir ces transitions sont cependant très importantes et la filière devra être accompagnée pour atteindre les objectifs. Comme tous les secteurs industriels, la recherche et développement de la filière bois doit travailler à optimiser le bilan carbone de la filière depuis le prélèvement en forêt jusqu'au recyclage des produits bois et des connexes de scierie. Elle doit également travailler sur la valorisation technologique et industrielle des bois de feuillus. L'optimisation du bilan carbone de la France passe également par une réindustrialisation permettant la transformation du bois français en France, ce qui participe également à la dynamisation des territoires en offrant notamment des débouchés à plus forte valeur ajoutée. Il passe ensuite par un développement plus important des produits bois à longue durée de vie et notamment le bois d'œuvre, ce qui nécessitera des incitations fortes et à une maîtrise, notamment dans les dix ans à venir, des volumes de produits à courte durée de vie, notamment le bois énergie (biomasse primaire). Un changement important que la filière doit également anticiper est la valorisation des bois dits "de crise" dont le volume risque d'augmenter dans les années à venir.

Recommandations pour les politiques publiques

Les politiques publiques ont un grand rôle à jouer dans la transition énergétique et la transition écologique et doivent accompagner la filière forêt-bois de manière cohérente. Cette cohérence appelle à les regrouper au sein d'un même ministère. Plusieurs points de vigilance doivent faire l'objet d'une attention particulière dans les politiques à venir :

- Il est nécessaire que la SNBC-2, qui prévoit une forte augmentation des prélèvements dans le futur, revoie ses projections en tenant compte de l'évolution récente du bilan de carbone forestier et des niveaux de prélèvement (en incluant le bois de crise), afin de rechercher la neutralité carbone sous la contrainte des conditions climatiques des prochaines décennies. D'autres scénarios doivent être évalués sur un temps long en s'inscrivant dans une approche écosystémique et multifonctionnelle de la forêt.
- Les impasses sanitaires doivent être reboisées avec des mélanges d'essences mieux adaptées à un climat plus chaud et plus sec.
- Des dispositifs financiers pour rémunérer les externalités positives du secteur forestier, au-delà des fonctions sylvicoles et cynégétiques, doivent être créés. Cela nécessiterait notamment la création d'indicateurs basés sur les dernières connaissances scientifiques pour évaluer le stock et les flux de carbone des parcelles forestières, et leurs autres valeurs sociales et environnementales.
- Les réglementations et incitations sur la substitution bois doivent veiller à ce que celle-ci concerne des matériaux dont la production émet davantage de gaz à effet de serre que les produits bois.
- La gouvernance forestière doit mieux prendre en compte les intérêts des différents acteurs concernés par les forêts en impliquant l'ensemble des parties prenantes à travers un projet territorial coconstruit et partagé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alberto F.J., Aitken S.N., Alía R., González-Martínez S.C., Hänninen H., Kremer A., Lefèvre F., Lenormand T., Yeaman S., Whetten R., Savolainen O. 2013 Potential for evolutionary responses to climate change – evidence from tree populations. *Glob. Change Biol.* 19:1645-1661. [Lien](#).
- ADEME 2016. Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035. TOME 1. 91 pages.
- ADEME 2021 Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique (No.010986), Expertises. ADEME, [Lien](#).
- Anderegg W.R.L., Konings A.G., Trugman A.T., Yu K., Bowling D.R., Gabbitas R, Karp D.S., Pacala S, Sperry J.S., Sulman B.N., Zenes N. 2018 Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature* 561:538–541. [Lien](#)
- Bensettiti F., Gazay C. 2019 Biodiversité d'intérêt communautaire en France : un bilan qui reste préoccupant. Résultats de la troisième évaluation des habitats et espèces de la DHFF (2013-2018). Rapportage INPN, UMS Patrinat, septembre 2019, 4 p. [Lien](#).
- Besnard S., Carvalhais N., Arain M.A., Black A., de Bruin S., Buchmann N., Cescatti A., Chen J., Clevers J.G.P.W., Desai A.R., Gough C.M., Havrankova K., Herold M., Hörtnagl L., Jung M., Knohl A., Kruijt B., Krupkova L., Law B.E., Lindroth A., Noormets A., Rouspard O., Steinbrecher R., Varlagin R., Vincke C., Reichstein M. 2018 Quantifying the effect of forest age in annual net forest carbon balance *Environ. Res. Lett.* 13(12):124018. DOI [10.1088/1748-9326/aaeaeab](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaeaeab)
- Beyou W., Darses O., Devaux J., Kervinio Y., Puydarrieux P., Crosnier C., Degeorges P., Phantharangsi M. 2016 EFESSE : l'essentiel du cadre conceptuel. Commissariat général au développement durable, 4 p. [Lien](#).
- Cailleret M., Nourtier M., Amm A., Durand-Gillam N. M. et Davi H. 2014 Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France. *Annals of Forest Science* 71:643–657. [Lien](#).
- Cailleret, M., Nourtier, M., Amm, A., Durand-Gillmann, M., & Davi, H. (2014). Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France. *Annals of Forest Science*, 71(6), 643-657 [Lien](#).
- Canopée 2022 Planté ! Le bilan caché du plan de relance forestier. 49p. [Lien](#).
- Centre d'analyse stratégique (CAS) 2009 Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique. Rapport du groupe de travail présidé par Bernard Chevassus-au-Louis, 378 p. [Lien](#).
- Cheab A., Badeau B., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrêne E., François C., Gritti E.S., Legay M., Pagé C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P. 2012 Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters* 15(6):533-544. [Lien](#)
- Chuine I. 2010 Why does phenology drive species distribution? *Phil. Trans. R. Soc. B* 365:3149–3160. [Lien](#)
- Ciais P, Schelhaas M, Zaehle S, Piao L, Cescatti A, Liski J, Luysaert S, Le-Maire G, Schulze E, Bouriaud O, Freibauer A, Valentini R, Nabuurs G. 2008 Carbon Accumulation in European Forests. *Nature geoscience* 1; p. 425-429. JRC37511 [Lien](#).
- CITEPA. Rapport Secten Edition 2020. Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphérique en France. Supplément La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ? p 427-434. [Lien](#).
- CITEPA 2022 Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. [Lien](#).
- Csilléry K, Buchmann N, Fady B. 2020 Adaptation to drought is coupled with slow growth, but independent from phenology in marginal silver fir (*Abies alba* Mill.) populations. *Evol. Appl.* 13:2357– 2376. [Lien](#).
- Curtis P.S., Gough C.M. 2018 Forest aging, disturbance and the carbon cycle. *New Phytol* 219:1188-1193. [Lien](#).
- Dorioz J., Peyron J.L., Nivet C. 2018 Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques ; les écosystèmes forestiers. Ministère de la transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable, 192 p.
- DSF- Département de la santé des forêts 2023 BILAN DE LA SANTE DES FORETS EN 2022. 14 p. [Lien](#).
- du Bus de Warnaffe G., Angerand S. 2020 Gestion forestière et changement climatique - Une Nouvelle Approche de la Stratégie Nationale d'Atténuation. [Lien](#).

-
- Duputié A., Rutschmann A., Ronce O., Chuine I. 2015 Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. *Glob Chang Biol.* 21(8):3062-73. DOI: [10.1111/gcb.12914](https://doi.org/10.1111/gcb.12914)
- FCBA 2008 Rapport final V2, Carbone stocké dans les produits bois, [Lien](#).
- Forest Europe 2020 State of Europe's Forests 2020, 244p. [Lien](#).
- Fririon V. 2022 Vulnérabilité des forêts face aux perturbations climatiques, une approche par simulation démo-génétique pour raisonner des stratégies de gestion adaptative du cèdre et du sapin douglas. Thèse de doctorat. Université de Montpellier. 228 p. [Lien](#).
- Fririon V., Davi H., Oddou-Muratorio S., Lebourgeois F., Lefèvre F. 2023 Within and between population phenotypic variation in growth vigor and sensitivity to drought stress in five temperate tree species. *For. Ecol. Manage.* 531. [Lien](#).
- Gardiner B., Blennow K., Carnus J.M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.L., Reviron M.P., Schelhaas M.J., Schuck A., Spielmann M., Usbeck T. 2010 Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts. The Atlantic European Regional Office of the European Forest Institute – EFIATLANTIC report to the EC. 138 p.
- GIP ECOFOR 2022 Expertise collective « Coupes Rases et RENouvellement des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique » (CRREF). Résumé à l'occasion du séminaire du 22 novembre 2022 à Paris. GIP ECOFOR, ministère de l'Agriculture et la sécurité alimentaire, Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. 12 pages.
- Grimault J., Tronquet C., Bellassen V., Bonvillain T., Foucherot C. 2022 Puits de carbone : l'ambition de la France est-elle réaliste ? I4CE, Institute for Climate Economics. Programme national de la forêt et du bois, 2016-2026, ministère de l'Agriculture. [Lien](#).
- IFN 2012 Quelles sont les ressources exploitables ? Analyse spatiale et temporelle. L'Inventaire Forestier 30. Institut National de l'Information Géographique et Forestière, Paris. [Lien](#).
- IGN 2022 Inventaire forestier national ; mémento, édition 2022. 35 p. [Lien](#).
- IPBES 2019 Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Díaz S., Settele J., Brondízio E.S. et al. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. [Lien](#)
- IPCC 2023 Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report. [Lien](#).
- Jactel H., Brockerhoff E. G. 2007 Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecol. Lett.* 10:835–848. [Lien](#).
- Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M. L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., & Koricheva, J. 2012 Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(1), 267-276. [10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x)
- Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. 2019. Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current opinion in insect science*, 35, 103-108. [Lien](#).
- Jactel, H., Moreira, X., & Castagneyrol, B. 2021. Tree diversity and forest resistance to insect pests: patterns, mechanisms, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 66, 277-296. [Lien](#)
- Jobbagy E.G., Jackson R.B. 2000 The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *2000 Ecological Applications*, 10(2), pp. 423-436. [Lien](#).
- Jump A.S., Ruiz-Benito P., Allen C.D., Kitzberger T., Fensham R.O.D. 2017 Structural overshoot of tree growth with climate variability and the global spectrum of drought-induced forest dieback. *Glob. Chang. Biol.* 23:3742-3757. <https://doi.org/10.1111/gcb.13636>
- Köhl M., Neupane P.R., Lotfiomran N. 2017 The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *PLoS ONE* 12(8):e0181187. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>
- Lefèvre F., Boivin T., Bontemps A. Courbet F., Davi H., Durand-Gillmann M., Fady B., Gauzere J., Gidoïn C., Karam M-J., Lalagüe H., Oddou-Muratorio S., Pichot C. 2013 Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science* 71:723–739. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0272-1>

- Lenz A., Hoch G., Vitasse Y., Körner C. 2013 European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. *New Phytol.* 200(4):1166-1175. DOI: [10.1111/nph.12452](https://doi.org/10.1111/nph.12452)
- Levêque A., Bensettiti F., Puissauve R. 2014 Biodiversité rare ou menacée : 22% des habitats et 28% des espèces dans un état favorable. CGDD, « Le point sur », Observation et statistiques n°196, déc. 2014, 4 p.
- Le Roncé I., Gavinet J., Ourcival J. M., Mouillot F., Chuine I., Limousin J. M. 2021 Holm oak fecundity does not acclimate to a drier world. *New Phytol.* 231(2):631-645. <https://doi.org/10.1111/nph.17412>
- Liang J., Crowther T.W., Picard N., Wiser S., Zhou M., et al. 2016 Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354(6309). DOI: [10.1126/science.aaf8957](https://doi.org/10.1126/science.aaf8957)
- Limousin J. M., Rambal S., Ourcival J-M., Rodríguez-Calcerrada J., Pérez-Ramos I.M., Rodríguez-Cortina R., Misson L., Joffre R. 2012 Morphological and phenological shoot plasticity in a Mediterranean evergreen oak facing long-term increased drought. *Oecologia* 169:565-577. DOI: [10.1007/s00442-011-2221-8](https://doi.org/10.1007/s00442-011-2221-8)
- 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* 562:259-262. DOI: [10.1038/s41586-018-0577-1](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1)
- MAA & IGN 2021 Etat et évolution des forêts françaises métropolitaines ; indicateurs de gestion durable 2020. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA) et Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), 307 p. [Lien](#).
- Menzel A., Sparks T., Estrella N., Koch E., Aasa A., Ahas R., Alm-Kübler K., Bissolli P., Braslavská O., Briede A., Chmielewski F.M., Crepinsek Z., Curnel Y., Dahl A., Defila C., Donnelly A., Filella Y., Jactzak K., Måge F., Mestre A., Nordli Ø., Peñuelas J., Pirinen P., Remisova V., Scheifinger H., Striz M., Susnik A., Van Vliet A.J.H., Wielgolaski F-E., Zach S., Züst A. 2006 European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12:1969-1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Nations Unies 2019 Rapport sur les objectifs de développement durable. New York. 64 pages. [Lien](#).
- ONF Direction Territoriale de Guyane 2022 Rapport d'activité 2021, 70 pages. [Lien](#).
- Osunkoya O.O., Lock C.B., Dhileepan K., Buru J.C. 2021 Lag times and invasion dynamics of established and emerging weeds: insights from herbarium records of Queensland, Australia. *Biol Invasions* 23:3383-3408. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02581-w>
- Peyron J.-L., Nivet C. 2018. Science-policy interaction in France. SNS-EFINORD network on "Tools for improving science-policy interaction in forestry. Approaches in leveraging forest research in Northern and Central European Countries", Risto Paivinen and Liisa Käär (editors), *Tapio* n°36, pp.30-44.
- Peyron J.L., Chuine I., Alexandre S. 2021 Les mesures forestières du plan de relance à l'aune des objectifs de développement durable et critères de gestion durable des forêts. Contribution au groupe interacadémique (technologies, agriculture et sciences) sur les Objectifs de développement durable co-présidé par Gérard Payen et Valérie Masson-Delmotte, 39 p.
- Picard N., Appora V., Landmann G. 2022 Programme de recherche « Biodiversité et gestion forestière » : bilan 1996-2018. GIP ECOFOR et Ministère de la transition écologique, Paris, 160 p. [Lien](#).
- Puydarrieux P., Beyou W., Beaufaron G., Bruley E., Darses O., Degeorges P., Devaux J., Fiorina C., Kervinio Y., Sapijanska J., Maris V., Arnauld de Sarre X., Doussan I., Hervé-Fournereau N. 2017 EFESÉ : cadre conceptuel. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, 88 p.
- Rambal S., Lempereur M., Limousin J. M., Martin-StPaul N. K., Ourcival J. M., Rodríguez-Calcerrada J. 2014 How drought severity constrains gross primary production (GPP) and its partitioning among carbon pools in a *Quercus ilex* coppice? *Biogeosciences* 11:6855-6869. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6855-2014>.
- Richardson D.M., Hui C., Nuñez M.A., Pauchard A. 2014 Tree invasions: patterns, processes, challenges and opportunities. *Biol. Invasions* 16:473-481. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0606-9>
- Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), 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., 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. [Lien](#).

Roux A., Colin A., Dhôte J.-F., Schmitt B. (coord.) 2020 Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique. Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie, Quæ eds, Versailles.

Saleh D., Chen J., Leplé J.-C., Leroy T., Truffaut L., Dencausse B., Lalanne C., Labadie K., Lesur I., Bert D., Lagane F., Morneau F., Aury J.-M., Plomion C., Lascoux M., Kremer A. 2021 Genome-wide evolutionary response of European oaks since the Little Ice Age. BioRxiv
doi: <https://doi.org/10.1101/2021.05.25.445558>

Schwartz M., Ciais P., Otlé C., De Truchis A., Vega C., Fayad I., Brandt M., Fensholt R., Baghdadi N., Morneau F., Morin D., Guyon D., Dayau S, Wigneron J.-P. 2023. High-resolution canopy height map in the Landes Forest (France) based on GEDI, Sentinel-1, and Sentinel-2 data with a deep learning approach. [arXiv:2212.10265](https://arxiv.org/abs/2212.10265)

Stratégie nationale bas carbone 2020 La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, [Lien](#).

Thom D., Golivets M., Edling L., Meigs G. W., Gourevitch J. D., Sonter L. J., Galford G.L, Keeton W.S. 2019 The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal-temperate North America. *Global Change Biology* 25(7):2446-2458. <https://doi.org/10.1111/gcb.14656>

Valade A., Bellassen B., Luysaert S., Vallet P., Djomo S.N. 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 de recherche, 66p. HAL Archives Ouvertes Id : (hal-01629845)

Valade A., Angerand S., Doucel B., du Bus G., Ouallet J. 2022 Du bon usage du concept de substitution carbone par la filière forêt bois, CIRAD/Canopée. [Lien](#).

Vallet L., Schwartz M., Ciais P., van Wees D., de Truchis M., Mouillot F. 2023 High resolution data reveal a surge of biomass loss from temperate and Atlantic pine forests, seizing the 2022 fire season distinctiveness in France. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-529>

Vitasse V., Schneider L., Rixen C., Christen D., Rebetez M. 2018 Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology* 248:60-69. DOI 10.1016/j.agrformet.2017.09.005. [Lien](#)

CONTRIBUTEURS AU RAPPORT

Auteurs (ordre alphabétique)

CHUINE Isabelle,

CNRS, membre de l'Académie des sciences, membre de l'Académie d'agriculture de France

CIAIS Philippe,

CEA, membre de l'Académie des sciences, membre de l'Académie d'agriculture de France

CRAMER Wolfgang,

CNRS, membre de l'Académie d'agriculture de France

LASKAR Jacques,

CNRS, membre de l'Académie des sciences

Relecture

ROCHET Juliette

Illustrations

PISHKO Oksana

SECRÉTARIAT ÉDITORIAL

ROCHET Juliette,

Directrice des comités, avis et rapports de l'Académie des sciences.

GOZO Florent,

Adjoint de la directrice des comités, avis et rapports de l'Académie des sciences.

PERSONNES AUDITIONNÉES DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE

BRÉDA Nathalie, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

COCHARD Hervé, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

COLIN Antoine, IGN

COPEAUX Daisy, Domaine de Chantilly

DELEUZE Christine, ONF

DELPORTE Frédéric, ministère de l'Agriculture et de l'alimentation

LOUSTEAU Denis, INRAE

DEROUBAIX Gérard, FCBA, membre de l'Académie d'agriculture de France

DERRIEN Delphine, INRAE

DESPREZ-LOUSTAU Marie-Laure, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

DHÔTE Jean-François, INRAE

DU BUS de WARNAFFE Gaëtan, Expert forestier

DUCOUSSO Alexis, INRAE

DUPUY Jean-Luc, INRAE

FOURNIER Meriem, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

GOSELIN Frédéric, INRAE

GRIMAULT Julia, I4CE

JACTEL Hervé, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

KREMER Antoine, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

LE BOULER Hervé, ONF

LEFEVRE François, INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

LEGAY Myriam, AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France

MORIN Xavier, CNRS

NICOLAS Manuel, ONF

PEYRON Jean-Luc, membre de l'Académie d'agriculture de France

PORTÉ Annabel, INRAE

SAINT ANDRÉ Laurent, INRAE

VALADE Aude, CIRAD

VIAL Estelle, FCBA

MEMBRES DU COMITÉ DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

ANDRÉ Jean-Claude

BALIBAR Sébastien

BARD Édouard

CAZENAVE Anny

CHANIN Marie-Lise

CHUINE Isabelle

CIAIS Philippe

COURTILLOT Vincent

DELSENY Michel

DUMAS Christian

DUPLESSY Jean-Claude - président du Comité

GUILLAUMONT Robert

JANVIER Philippe

JOUZEL Jean

LASKAR Jacques

LAVOREL Sandra

LEBRETON Jean-Dominique

LEIBLER Ludwik

Le MAHO Yvon

LERIDON Henri

Le TREUT Hervé

MANSUY Daniel

MARSILY (de) Ghislain

MEUNIER Bernard

MEYER Dominique

MOREAU René

PELLETIER Georges

PUGET Jean-Loup

ROCHEFORT Henri ;

ROUX Didier

TAQUET Philippe

VALLERON Alain-Jacques.

Figure 1. Contributions des forêts aux sociétés, au bien-être humain, et aux objectifs de développement durable

Figure 2. Les forêts françaises aujourd'hui.

Figure 3. Flux annuels de la filière bois

Figure 4. Bilan de carbone des écosystèmes forestiers et des produits du bois pour le territoire métropolitain.

Figure 5. Cartographie à 10 m de résolution du volume aérien des forêts sur les années 2018-2020 déduite de données de télédétection et évaluée avec les placettes de l'inventaire forestier national (IGN).

Figure 6. Bilan de CO₂ de la forêt française.

Figure 7. (a) Surfaces des forêts considérées comme difficiles ou très difficiles à exploiter sur la période 2005-2011. (b) Superficie en hectares des différents types de coupe en pourcentage du couvert réduit lors de la coupe, par type de forêt

Figure 8. Observations de la température moyenne estivale en France depuis 1950 (en noir) et évolution des distributions des températures pour la période historique, pour un réchauffement global de 2°C et de 3°C avec l'ensemble de modèles de climat régionaux CORDEX Europe

Figure 9. Observations par satellite des surfaces brûlées en France en 2022

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS UTILISÉS DANS LE RAPPORT

CEA – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CIRAD – Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CITEPA – Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CNRS – Centre national de la recherche scientifique

FCBA – Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

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

I4CE – Institut de l'Économie pour le Climat

IFN – Inventaire forestier national ; intégré depuis 2012 au sein de l'IGN (voir après)

IGN – Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE – Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

IPBES – Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

ONF – Office National des Forêts

PNFB – Programme national de la forêt et du bois (2016-2026).

Annexe 1 - La forêt française et la filière forêt-bois métropolitaines

Au cours des quatre dernières décennies, ressources forestières métropolitaines a connu un essor continu, notamment dans les propriétés privées et au profit des feuillus divers (Fig. 1, 2 et 3). Elles sont en théorie largement (95%) disponibles pour la production de bois mais leur surface assez facilement exploitable est stable, ce qui signifie que les nouvelles forêts sont difficilement accessibles. L'expansion des forêts françaises métropolitaines faiblit, sinon en valeur absolue, du moins relativement aux surfaces déjà boisées, et ne pourra se poursuivre que dans le cadre d'une utilisation des terres de plus en plus contrainte.

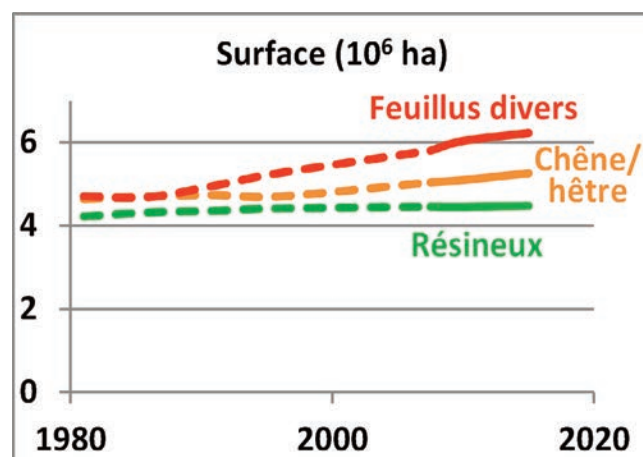


Figure 3

Source : IGN

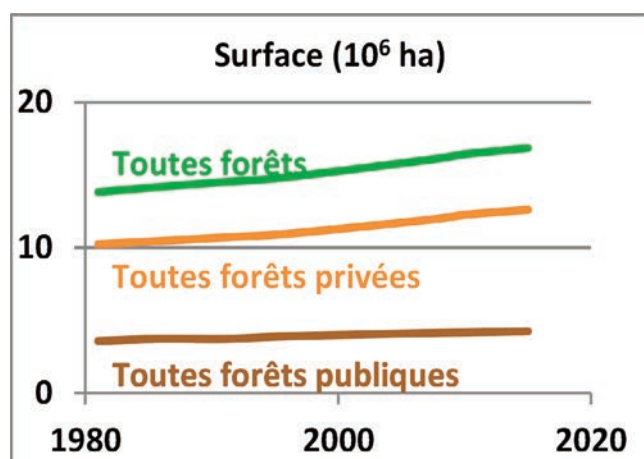


Figure 1

Source : IGN

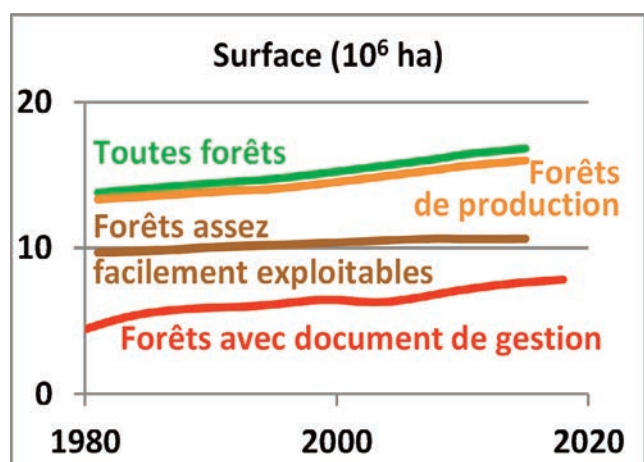


Figure 2

Sources : IGN, MAA, Ecofor, Inrae

Cet essor en surface s'est accompagné d'un accroissement du volume de bois aérien sur pied à l'hectare (Fig. 4 et 5), principalement dans les forêts privées, au bénéfice des bois très gros (de plus de 67,5 cm de diamètre à 1,3 m de hauteur), gros (de 47,5 à 67,5 cm) et moyens (de 22,5 à 47,5 cm). Cet accroissement provient du fait que la production biologique (ou croissance) nette de la mortalité naturelle est supérieure aux prélèvements anthropiques (Fig. 6). Cependant, sous forme brute, la production biologique stagne depuis 1980 et tend même à se réduire depuis quelques années, avant même la crise sanitaire de la fin des années 2010. Cette dernière a, au moins temporairement, accentué ce phénomène, augmenté significativement la mortalité naturelle et suscité des prélèvements

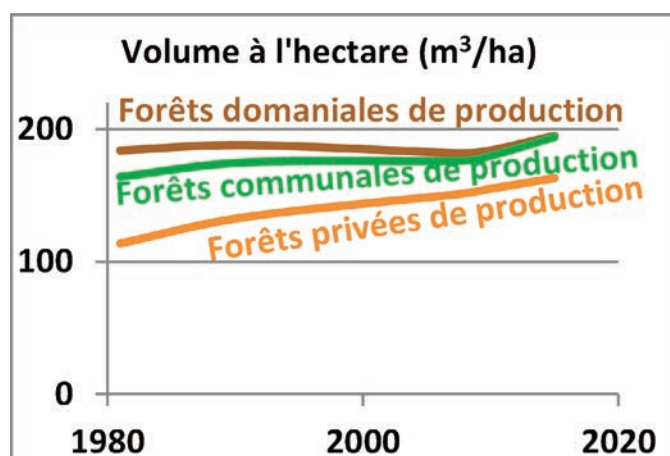


Figure 4

Source : IGN

additionnels pour raisons sanitaires, si bien que le bilan des flux (production biologique brute - mortalité naturelle - prélèvements), jusqu'alors très significatif, s'est fortement réduit. Durant cette période, le volume à l'hectare a donc interrompu sa croissance.

Les tendances à la diminution de la proportion des petits bois et à la stagnation de la production biologique brute illustrent un vieillissement progressif de la forêt française. L'augmentation du volume sur pied se traduit par une concurrence accrue entre les arbres et une vulnérabilité amplifiée face aux risques (tempêtes, sécheresse, incendies) qui expliquent une mortalité en hausse (écart entre productions brute et nette sur Fig. 6). Les événements extrêmes perturbent conjoncturellement ces tendances en réduisant la production biologique et en augmentant tant la mortalité que les prélèvements. Ils affectent ainsi le volume sur pied, soit en freinant son expansion, soit en le réduisant (voir plus loin). Les

politiques publiques (Programme national de la forêt et du bois, Stratégie nationale bas-carbone, Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse...) visent depuis plusieurs décennies à augmenter les prélèvements de bois sans pour autant les amener jusqu'au niveau de la production biologique nette de la mortalité naturelle.

Le taux de prélèvement caractérise la proportion de la production biologique nette qui est prélevée en coupes sanitaires, d'amélioration ou de régénération. Lorsqu'il vaut 100%, le prélèvement est égal à la croissance et le volume de bois sur pied est maintenu constant. À l'échelle de la France, son évolution tendancielle (en moyenne lissée sur 9 ans) fait l'objet d'un suivi qui montre que le taux peut fluctuer au cours du temps tout en restant très inférieur à 100%, d'autant plus lorsque les conditions d'exploitation sont difficiles, pour les feuillus divers et en forêts privées ou communales (Fig. 7 à 9).

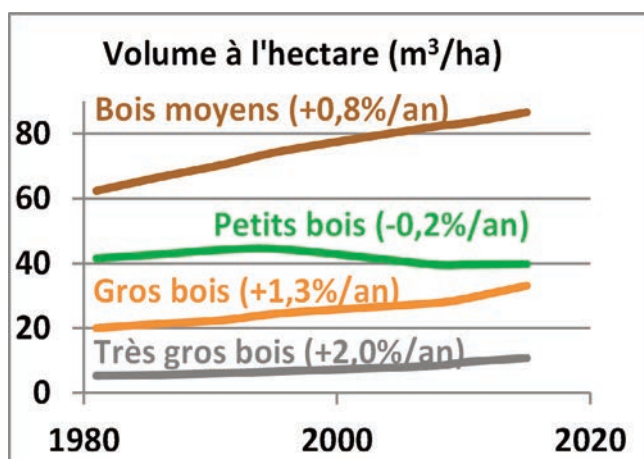


Figure 5
Source : IGN

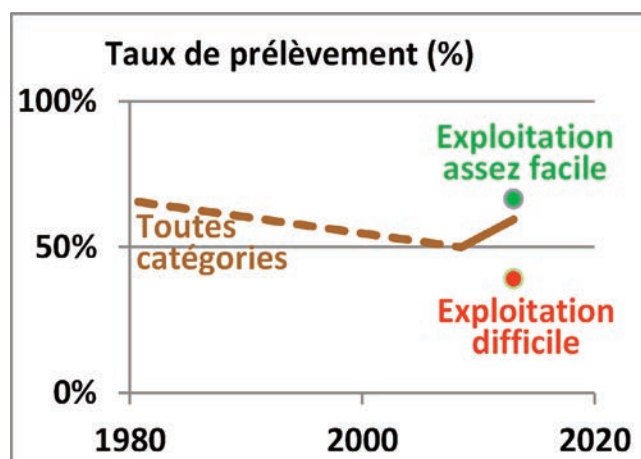


Figure 7
Source : IGN

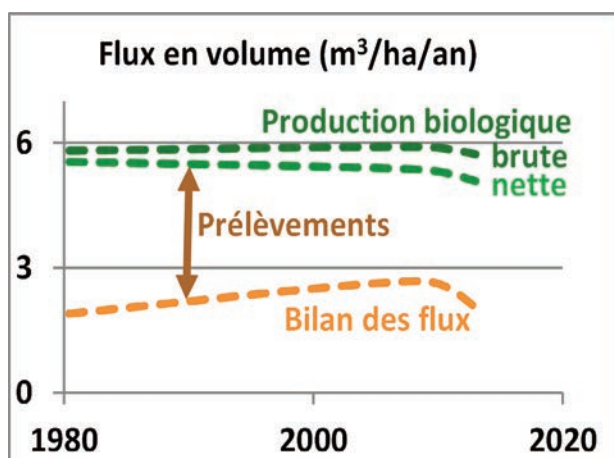


Figure 6
Sources : IGN, IFN

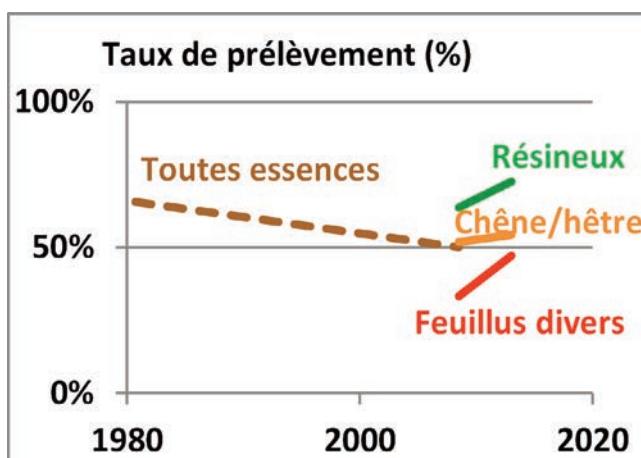


Figure 8
Sources : IGN

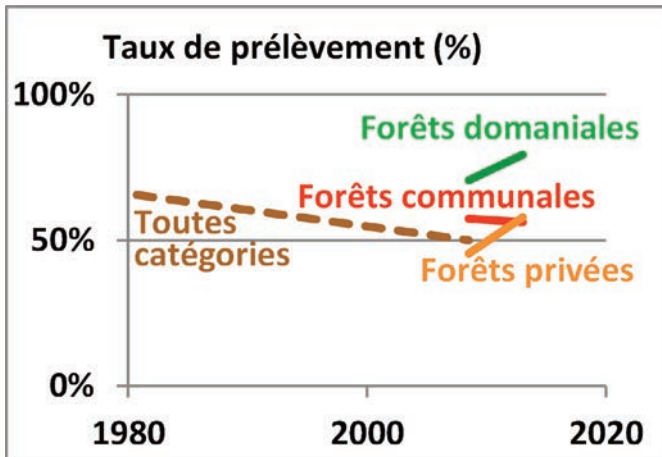


Figure 9
Source : IGN

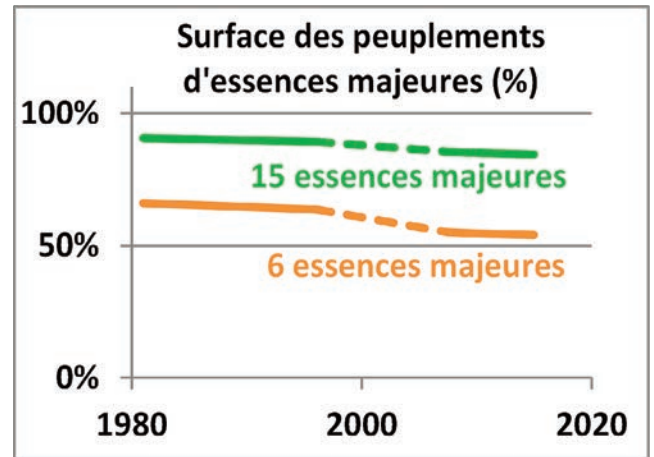


Figure 11
Source : IGN

En matière de biodiversité, la forêt métropolitaine possède communément des atouts majeurs avec une richesse locale en essences d'arbres significative et croissante (Fig. 10), une part prise par les essences majeures qui diminue régulièrement (Fig. 11), une majorité de grands massifs dont la part tend à croître (Fig. 12), une part significative mais relativement faible laissée aux plantations et aux essences introduites (Fig. 13), des volumes croissants de très gros arbres et importants de bois mort (Fig. 14). Les surfaces forestières protégées évoluent avec les mesures de politique publique en faveur de la biodiversité (Fig. 15).

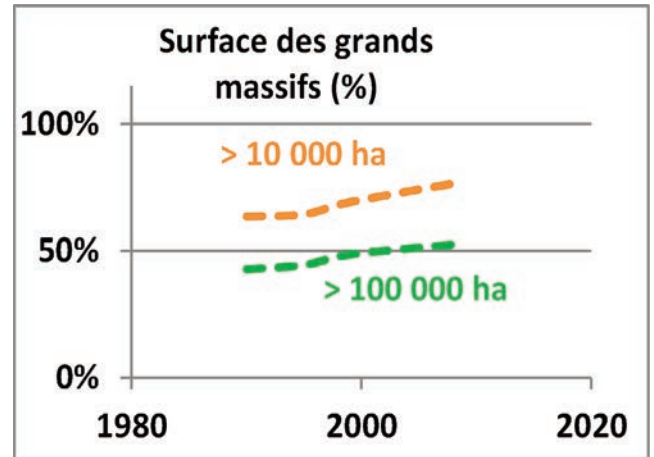


Figure 12
Sources : IGN

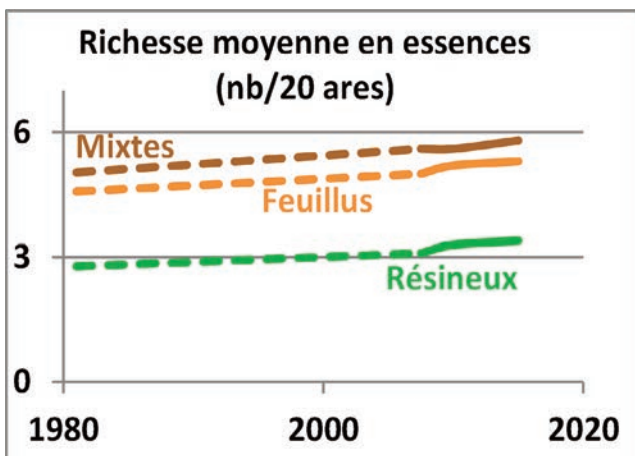


Figure 10
Source : IGN

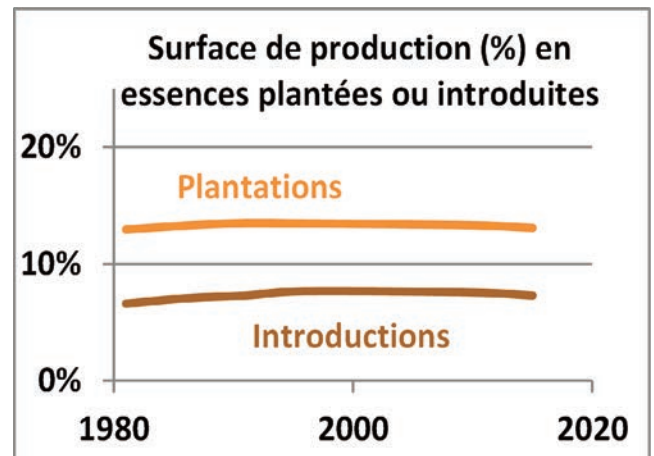


Figure 13
Source : IGN

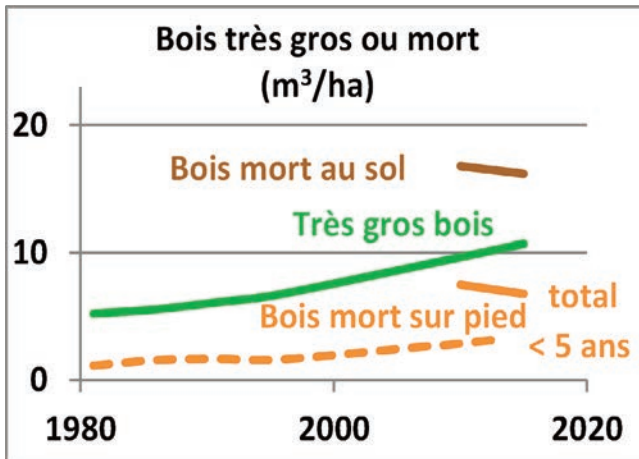


Figure 14
Source : IGN

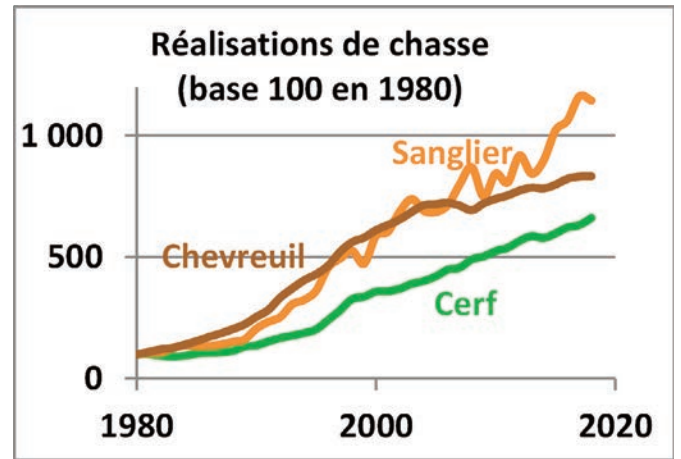


Figure 16
Source : OFB

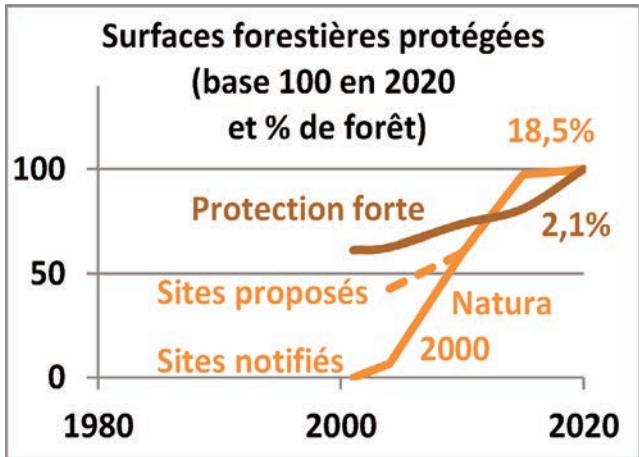


Figure 15
Sources : IGN, MAA, Ecofor, Inrae

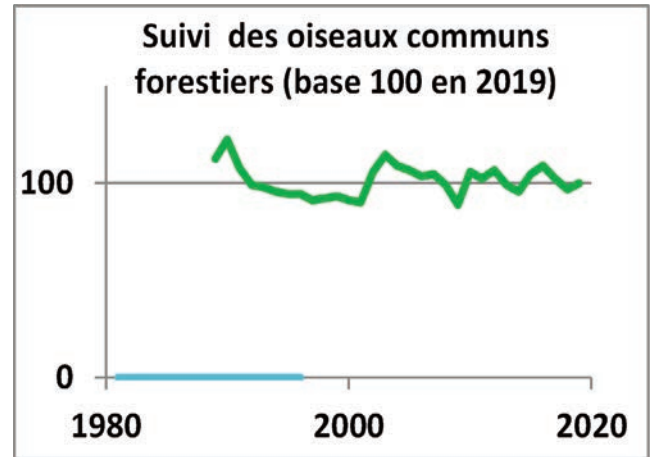


Figure 17
Sources : MNHN

Le suivi des espèces végétales ou animales autres que les arbres est réduit. Les grands ongulés font l'objet d'une attention particulière en tant qu'espèces chassables : leurs populations ne sont pas directement étudiées au niveau national mais les réalisations de chasse sont répertoriées et leur forte croissance à long terme rend indubitablement compte de l'expansion des populations (Fig. 16). Par ailleurs, les oiseaux communs font l'objet d'un programme particulier qui montre une certaine stabilité de leurs populations en forêt (Fig. 17).

Au sein de l'Union européenne, les espèces et habitats d'intérêt communautaire, c'est-à-dire "en danger de disparition, vulnérables, rares ou endémiques" font l'objet tous les six ans d'une évaluation de leur bon état de conservation. Les écosystèmes forestiers y

apparaissent dégradés par rapport à une référence exigeante, mais sensiblement moins que les écosystèmes littoraux, aquatiques, humides ou herbacés. La comparaison entre les deuxième (2013/2014) et troisième (2018/2019) évaluations montre, hors zones méditerranéennes et montagnardes, une réduction de la qualité des habitats forestiers avec une augmentation du nombre de sites en mauvais état et une diminution des sites jugés favorablement (fig. 18 et 19).

Les forêts sont soumises à des risques nombreux et susceptibles de se renforcer. En France et en Europe, elles ont été secouées dans les années 1980 et 1990 par un dépérissement des forêts qui, initialement attribué à la pollution atmosphérique, s'est révélé être aussi consécutif à la sécheresse de 1976. Depuis lors,

la pollution atmosphérique a été fortement réduite (Fig. 20) sans cependant complètement interrompre l'acidification des sols forestiers. Quant à la sécheresse, elle tend à accroître son influence sur les forêts (Fig. 21). La conséquence de ces phénomènes peut s'appréhender en partie à travers l'augmentation du déficit foliaire des arbres feuillus et résineux (Fig. 22).

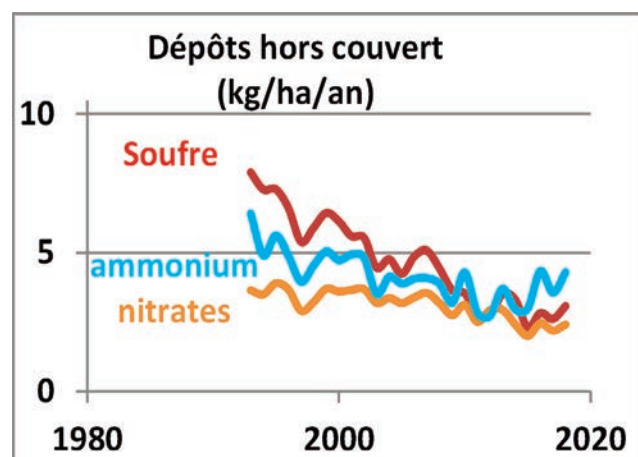


Figure 20

Source : Renecofor/Cataenat

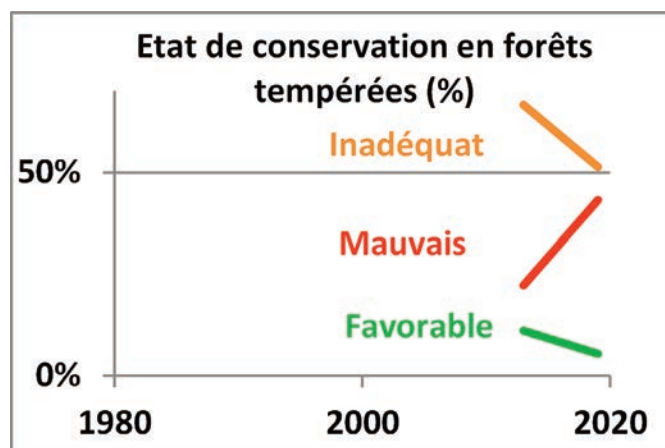


Figure 18

Sources : INPN, Patrinat

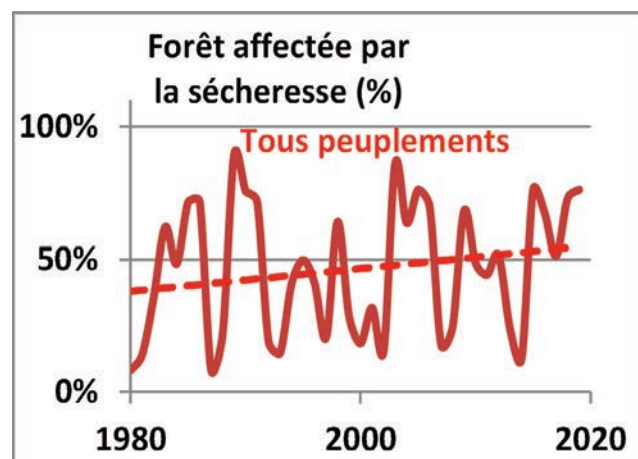


Figure 21

Sources : Inrae

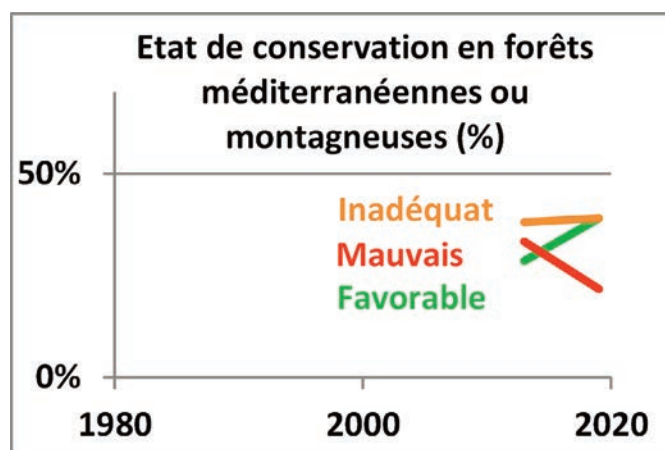


Figure 19

Sources : INPN, Patrinat

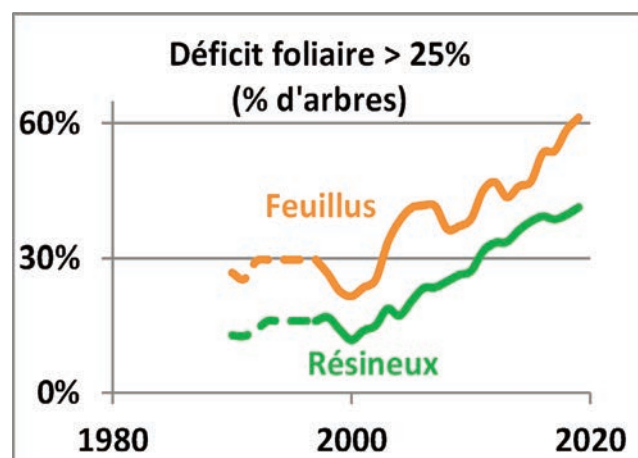


Figure 22

Source : DSF

Les surfaces incendiées ont été progressivement mieux maîtrisées au cours des dernières décennies. C'est cependant beaucoup moins le cas lors des gros épisodes de sécheresse et tandis que les surfaces sensibles au feu tendent à augmenter (Fig.23). Parmi les risques subis par les forêts, ce sont jusqu'à présent les tempêtes qui occasionnent les dégâts les plus intenses et étendus à la fois (Fig.24). Mais en France, le nombre de tempêtes, majeures ou non, ne semble corrélé ni au changement climatique, ni à l'importance des dégâts forestiers (Fig. 25).

La place qu'occupe le bois dans l'économie nationale est un aspect important qui joue sur l'état des forêts. La récolte de bois varie en volume, notamment à la faveur des tempêtes (par exemple à la suite des tempêtes de

1999), mais reste relativement stable dans ces composantes bois d'œuvre, pour l'ameublement et la construction notamment, et bois d'industrie, pour les panneaux, papiers et cartons (Fig 26). Pour ce qui concerne le bois énergie (qui représente en France 4% de la consommation totale d'énergie), on note une baisse de la partie non commercialisée mais une hausse de la partie commercialisée. La contribution de la filière forêt-bois à l'économie de la France baisse régulièrement, par exemple en termes d'emploi (Fig.27), mais ceci résulte de gains de productivité et du développement corrélatif des services. Il n'en reste pas moins vrai que le commerce extérieur de la filière, bien que relativement stable en valeur, est déficitaire de manière chronique (Fig.28).

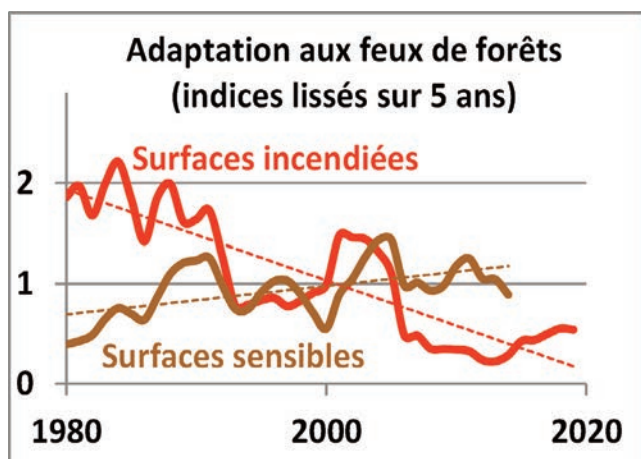


Figure 23

Sources : Météo-France, MAA,IGN

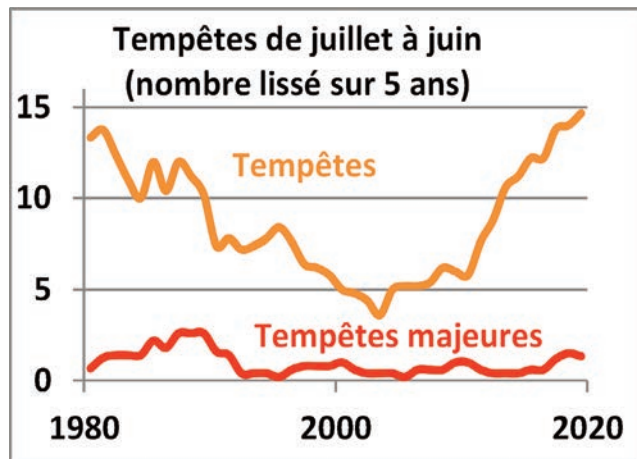


Figure 25

Source : Météo-France

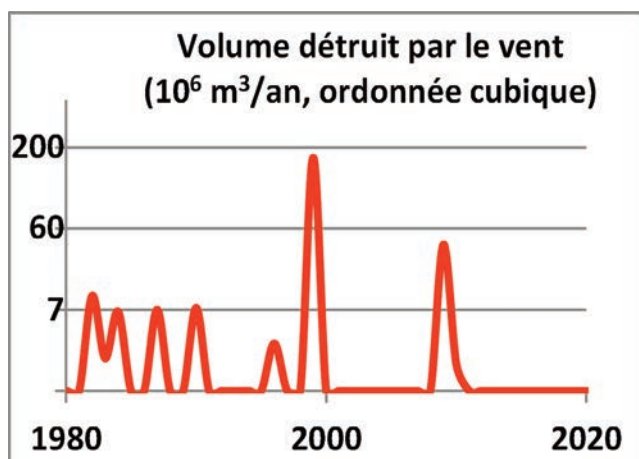


Figure 24

Source : DFDE

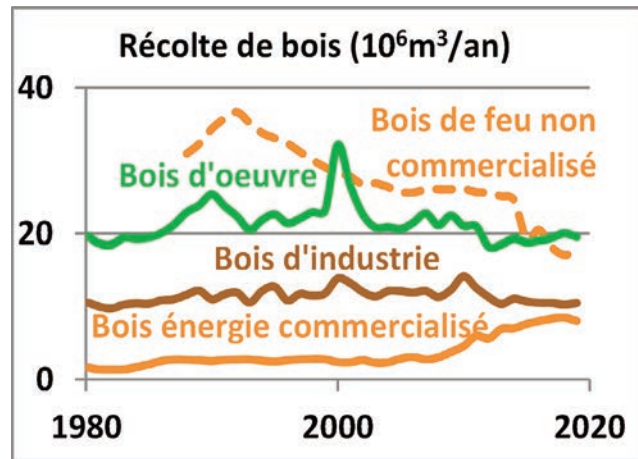


Figure 26

Sources : SSP, Insee

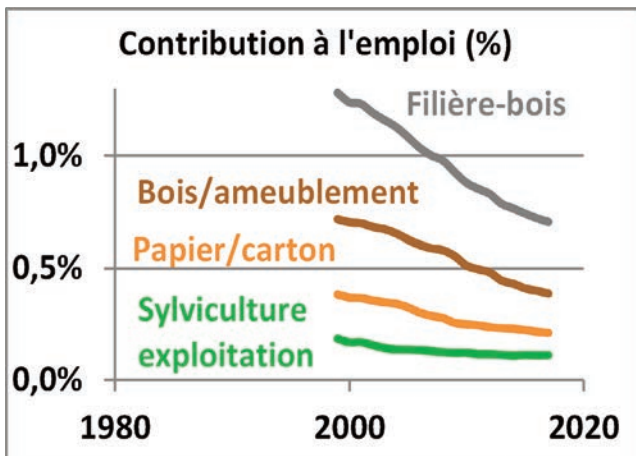


Figure 27
Source : Insee

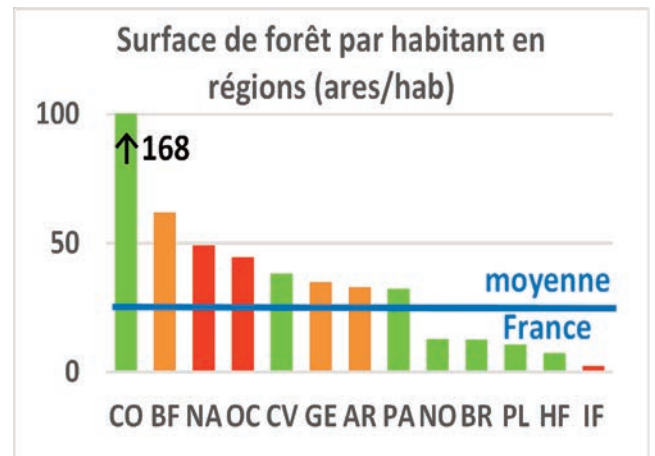


Figure 29
Sources : IGN, Insee

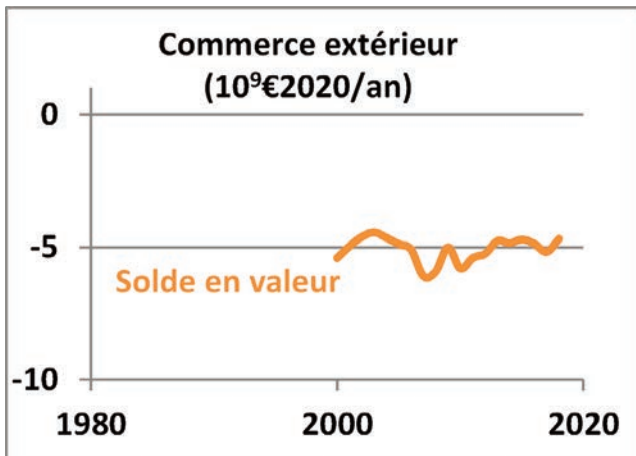


Figure 28
Source : Agreste

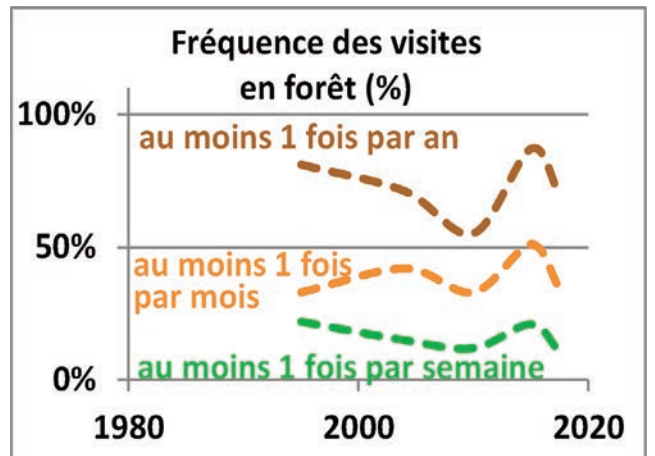


Figure 30
Source : ONF, Univ. de Caen

Selon leur région, les Français ne bénéficient pas tous de la même présence de forêts (Fig.29). En moyenne, ils vont cependant presque une fois par mois en forêt (Fig.30). En revanche, ils consomment de moins en moins de produits en bois, que ceux-ci proviennent de France ou de l'étranger et soient sous forme brute ou élaborée (Fig.31).

Enfin, la prise en compte de l'ensemble de ces éléments dans la gestion courante s'effectue dans le cadre étatique de la gestion durable des forêts et des procédures volontaires de certification (Fig.32).

Compte tenu de la faible taille de nombreuses propriétés privées, les surfaces de forêts couvertes par un document de gestion (aménagement en forêt publique, plan simple de gestion, règlement type de gestion ou code de bonnes pratiques sylvicoles en forêt privée) ne représentent pas encore tout à fait la moitié de la forêt métropolitaine. Quant à la certification, après un fort développement au début des années 2000, elle concerne aujourd'hui un tiers des surfaces (commercialisant cependant plus de la moitié des bois).

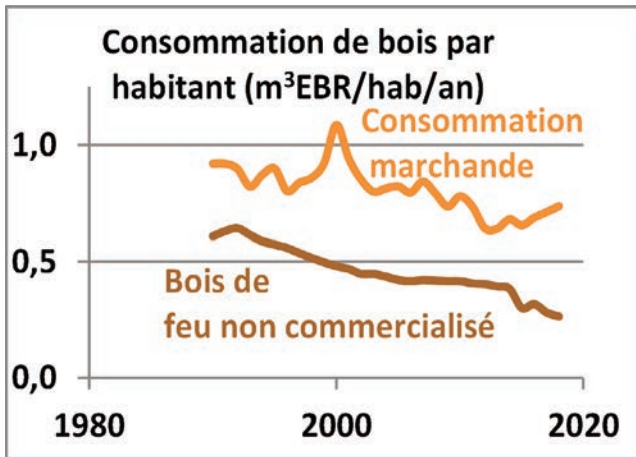


Figure 31

Sources : Beta, Agreste, Insee

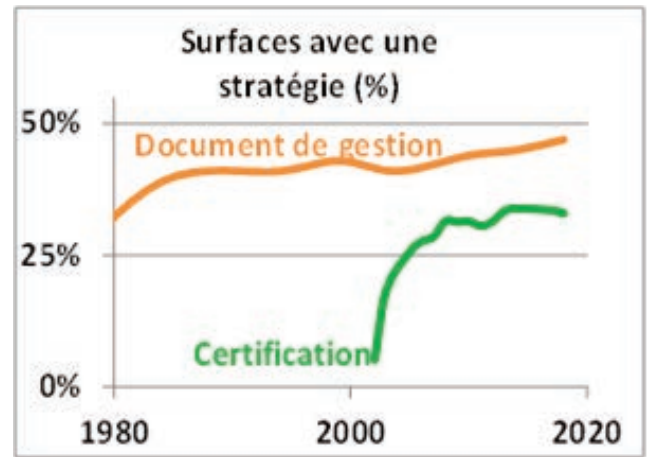


Figure 32

Sources : ONF, CNPF

Annexe 2 Les contributions des forêts aux sociétés et au bien-être humain

La société bénéficie de multiples avantages socio-économiques fondés sur les biens et services qu'elle retire des écosystèmes forestiers du fait de leur extension, de leur bon fonctionnement écologique et de leur biodiversité⁴. L'ampleur de ces avantages repose sur l'état de la biodiversité qui les engendre, sur la pertinence de la gestion forestière qui peut les renforcer ou les amoindrir et sur les politiques publiques qui encadrent cette gestion.

En forêt, une biodiversité réelle mais vulnérable et encore insuffisamment connue

L'état et l'évolution de la biodiversité jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes, leur capacité d'adaptation aux perturbations et, finalement, leur aptitude à fournir des biens et services écosystémiques. Il est en particulier important de conserver la biodiversité existante et, si possible, de l'améliorer pour s'opposer à la crise dite de la 6^e extinction. Or la forêt française fait l'objet d'un bilan contrasté du point de vue de la biodiversité. Celle-ci est surtout issue de régénération naturelle (87%) et dominée par des essences indigènes (93% des surfaces). Sa richesse locale en espèces tend à augmenter de même que le volume des très gros arbres et plus généralement le volume de bois favorable à la biodiversité. L'abondance des arbres communs en forêt croît aussi. On note en outre une stabilité des oiseaux forestiers spécialistes communs tandis que la présence des oiseaux spécialistes des milieux agricoles décline. Cependant, une faible proportion des surfaces forestières comporte des arbres très âgés (2,5%) ou bénéficie d'une protection forte (1,8% selon l'Observatoire national de la biodiversité). Par ailleurs, la proportion d'espèces forestières d'oiseaux et de mammifères menacés ou disparues y est à peine plus faible qu'ailleurs.

Les connaissances sur la biodiversité en forêt se sont améliorées au cours des trois dernières décennies, en particulier dans le cadre du programme de recherche intitulé « Biodiversité et gestion forestière » puis « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » ([Picard et al. 2022](#)). Elles se sont également diffusées au sein de la communauté forestière ([Basilico et al. 2014a](#); [2014b](#) ; [2014c](#) ;

[Gosselin et Paillet 2017](#) ; [Nivet et al. 2018](#) ; [Picard 2020](#) ; [Peyron 2022](#) ; [Morin et al. 2022](#)).

Les enjeux sont aujourd'hui multiples : le changement climatique exerce déjà, et va encore plus exercer à l'avenir, une pression importante sur la biodiversité en forêt. Cette pression est à la fois directe (sécheresses, incendies, dépérissements, pertes d'essences et de couvert forestier) et indirecte via les changements de gestion induits. Les dépérissements forestiers peuvent avoir un effet positif sur la biodiversité à court terme mais risquent de réduire la gamme d'essences autochtones à long terme. Les modalités de gestion tendent à se diversifier et à évoluer vers un maintien du couvert forestier et la réduction des coupes, modalités susceptibles d'être favorables à la biodiversité.

Cependant, la connaissance reste lacunaire. Les conséquences des évolutions de la gestion méritent encore d'être évaluées (en particulier, on peut craindre que des excès en la matière ne soient pas forcément favorables à la biodiversité). L'organisation de réserves mérite d'être raisonnée en réseaux spatio-temporels considérant à la fois la connectivité et la plus ou moins grande stabilité des habitats avec le changement climatique. Il apparaît important d'améliorer les suivis de biodiversité, les métriques et les indicateurs, notamment dans l'optique du changement climatique et à l'interface entre science et société. Les pratiques de gestion adaptative ou apprenante favorisent la co-construction entre chercheurs et gestionnaires ainsi que l'expérimentation système.

Certaines questions demeurent. Une gestion minimale permet-elle réellement d'améliorer la biodiversité ? Un facteur favorable mis en évidence aujourd'hui sera-t-il toujours favorable demain ? La gestion adaptative, fondée sur les constatations d'aujourd'hui, est-elle efficace pour s'adapter au changement climatique ?

Un arbitrage délicat entre des biens et services écosystémiques multiples

La fourniture par les forêts de multiples biens et services écosystémiques fait régulièrement l'objet d'analyses qui se situent à l'interface entre la biodiversité et la gestion forestière ([CAS 2009](#) ; [Dorioz et al. 2018](#) ; [MAA & IGN 2021](#)). En particulier, l'évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques (EFESE) comporte un volet relatif aux

⁴. Voir, pour plus de détails, les travaux de l'EFESE « évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques » et notamment [Beyou et al. 2016](#) ; [Puydarrieux et al. 2017](#).

Biens ou services	Ampleur	Evaluation	Source et Observations
Biens d'approvisionnement			
Bois			
- commercialisé	39 Mm ³	2800 M€	Agreste (MAA & IGN 2021)
- non commercialisé	17 Mm ³	≈ 1000 M€	Agreste et Insee
Venaison	37 000 t	≈ 339 M€	Indicateurs de gestion durable
Champignons			Indicateurs de gestion durable
truffes	12 t	≈ 6 M€	Enquête 2002 LEF Engref/ Inra- Peyron et al. 2002
autres	30 000 t	≈ 225±135 M€	
Châtaignes et baies	36 000 t	≈ 200 M€	Enquête 2002 LEF Engref/Inra
Miel	5600 t	37 M€	Indicateurs de gestion durable
Liège	1600 t	1 M€	Indicateurs de gestion durable
Éléments de décoration	?	?	Hors sapins de Noël
Services de régulation			
Climat global (puits)	117 MtCO ₂ e/an		Vers 2015, à 30 €/tCO ₂ e
dont séquestration			Entre 2010 et 2015
- biomasse vivante	63 MtCO ₂ e/an		Indicateurs de gestion durable
- biomasse morte	ND		Indicateurs de gestion durable
- sol et litière	20 MtCO ₂ e/an	3510 M€/an	Indicateurs de gestion durable
- produits en bois	2 MtCO ₂ e/an		Indicateurs de gestion durable
dont substitution			Vers 2015
- matériaux	14 MtCO ₂ e/an		Indicateurs de gestion durable
- énergie	18 MtCO ₂ e/an		Indicateurs de gestion durable
Climat local			
- température	Moins froid la nuit en hiver, moins chaud le jour en été		
- eau	Effet de condensation et d'évaporation vers d'autres lieux		
- filtration	Piégeage des particules		
- brise-vent	Effet réel mais possibilité de turbulence		
Qualité de l'eau			
- occupation du sol	Meilleure qualité qu'avec d'autres occupations, notamment agricoles		
- effet de la gestion	Effet néfaste de pratiques de gestion (mécanisation, découvert)		
Régulation des crues	Rôle proportionnel à l'importance des enjeux économiques en aval		
Régulation de l'érosion	Importance pour les dunes, pentes, vallées et les zones à fortes précipitations		
Protection en montagne			
- avalanches			100 à 100 000 €/ha/an selon les intérêts en jeu (dommages évités)
- chutes de blocs			
- glissements de terrain			
Services culturels			
Activités récréatives		29 ± 16 G€/an	Abildtrup et al. 2020
Paysage	Effets sur le prix du foncier, entre autres		
Patrimoine naturel			
Arbres remarquables, espèces emblématiques (ex : ours), espèces ordinaires reconnaissables (ex : cervidés, oiseaux, etc.), espèces de cueillette (ex : muguet).			
Interactions artistiques, identitaires			
Attachement des propriétaires à leur forêt.			
Contraintes (services négatifs)			
En matière de sécurité physique des personnes et des biens : incendies de forêt, chutes de branches et d'arbres, accidents de la route (grande faune), accidents de chasse.			
En matière de santé : zoonoses (dont la borréliose de Lyme), urtications et allergies (dont chenilles et pollens), empoisonnement (dont champignons), composés organiques volatils (précurseurs de l'ozone).			
En matière d'économie hors forêt : consommation d'eau (vis-à-vis des autres usages), dégâts aux cultures par les grands ongulés (80 M€ en 2018, JO du Sénat, 07/07/2022)			

Tableau. Caractéristiques des principaux biens et services retirés des forêts (2010-2020). Données principalement issues de l'EFESE ([Dorioz et al. 2018](#)) et des indicateurs de gestion durable des forêts ([MAA & IGN 2021](#)).

écosystèmes forestiers ([Dorioz et al. 2018](#)). Grâce à leur fonctionnement mû originellement par des facteurs naturels, les écosystèmes et leur biodiversité engendrent des biens, services et éléments patrimoniaux dont se saisit la société pour en retirer de multiples avantages et valeurs. Ces écosystèmes donnent aussi lieu à des contraintes que la société subit (allergies, etc.). En gérant les écosystèmes et en les utilisant, la société exerce des pressions sur eux et, à la fois ou en compensation, leur rend des services environnementaux visant à les maintenir ou améliorer. La société retire des forêts un ensemble de biens et services découlant des fonctions écologiques qui bénéficient ensuite indirectement à la société (production primaire résultant de la photosynthèse et de la respiration, recyclage des éléments minéraux, régénération naturelle des espèces). Les services écosystémiques qui en découlent pour la société, cette fois-ci directement, concernent la fourniture de biens (bois et autres matériaux, autres biens pour l'alimentation humaine ou animale, la médecine, la cosmétique, la décoration, etc.), la régulation des grands cycles biogéochimiques (climat global ou plus local, eau, sols soumis à l'érosion, etc.), les aménités socio-culturelles dont une offre récréative et paysagère (relativement quantifiable) et la symbolique du patrimoine naturel (difficilement quantifiable). Ces services écosystémiques donnent lieu à leur tour à des services anthropiques que la société se rend à elle-même, dans le cadre de l'utilisation des services écosystémiques (tourisme, etc.) comme de la transformation des biens (filrière-bois, alimentation, etc.).

Une vision holistique des différents biens ou services est nécessaire, de même que la recherche de compromis tenant compte des différentes attentes et s'appuyant sur des incitations appropriées. Or, historiquement, on a largement utilisé, avant de le critiquer, le paradigme de l'effet de sillage (« *Wake effect* ») de la production de bois, selon lequel cette dernière permet à la fois d'assurer et de financer les autres services d'approvisionnement, de régulation ou socio-culturels. Notons que la production de bois assure encore souvent, avec parfois la chasse, l'essentiel du financement de la sylviculture. Cependant, d'autres effets de sillage tendent à s'imposer, sinon explicitement, du moins implicitement : ceux du climat et de la biodiversité qui apparaissent suffisamment fondamentaux pour être considérés comme devant être prééminents. Or, que l'on mette en avant la

production de bois, le climat ou la biodiversité, cela revient à minimiser une partie des services écosystémiques et à faire de la forêt, d'une certaine manière, une variable d'ajustement d'activités à la recherche soit de ressources pour leur fonctionnement, soit de contreparties à leurs émissions de carbone, soit encore de compensation de leurs impacts sur la biodiversité.

A l'encontre de stratégies axées préférentiellement sur l'un ou l'autre des biens ou services écosystémiques retirés de la forêt, il s'agit donc de considérer non seulement l'ensemble des biens et services écosystémiques mais encore les interactions qui les caractérisent. La notion de bouquets de services répond à cet impératif. De tels bouquets sont centrés sur les biens et services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation et socio-culturels mais peuvent inclure aussi des fonctions écologiques et des services anthropiques. Par exemple, la régulation du climat global s'appuie sur la production primaire (fonction écologique), qui induit la séquestration du carbone en forêt (service de régulation), mais aussi la récolte de bois (service d'approvisionnement) et sa transformation en produits évitant une partie des émissions qui auraient cours avec des matériaux concurrents (service anthropique). Cet exemple illustre aussi l'interdépendance entre les services au niveau de leur constitution (par exemple la fourniture de bois et la séquestration de carbone) ou de leur usage (par exemple l'évitement d'émissions de dioxyde de carbone grâce à la substitution de bois à des produits concurrents énergivores, ou encore la cueillette ou la chasse accompagnant une activité récréative). Par ailleurs, si ces services peuvent fonctionner en synergie tant qu'on n'essaie pas de maximiser l'un d'eux, ce qui ne se fait qu'au détriment des autres, ils sont souvent objets de conflits (fourniture de bois et séquestration de carbone, chasse et promenade, exploitation forestière et paysage, etc.).

La difficulté de la recherche d'un compromis a bien été mise en évidence par la tenue en 2021/2022 des Assises de la forêt et du bois ([Dollat et al. 2022](#)). Elle réside dans la prise en compte des temps longs (qui nécessite de se projeter couramment sur un siècle), de toute la diversité des usages, usagers et autres acteurs (chacun ayant tendance à privilégier sa propre vision, le plus souvent partielle), d'un continuum d'échelles spatiales (depuis la parcelle forestière jusqu'à la planète), d'un contexte nouveau de certitudes et

incertitudes associées au changement climatique.

Quelles conséquences pour la gestion et les politiques publiques ?

Les décisions forestières relèvent d'une analyse globale de l'ensemble des biens et services que la société en retire. C'est en ce sens que le programme national de la forêt et du bois en France et la stratégie forestière de l'Union européenne se fondent sur le concept de multifonctionnalité. En toute rigueur, une analyse multicritère devrait accompagner chaque décision forestière importante. A la suite du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992, six critères de gestion durable des forêts ont été définis au niveau pan-européen. Ils concernent (i) les ressources forestières et leur contribution au cycle du carbone, (ii) la santé et la vitalité des écosystèmes forestiers, (iii) les fonctions de production des forêts (bois et non bois), (iv) la diversité biologique des écosystèmes forestiers, (v) les fonctions de protection liées à la gestion des forêts (pour l'eau et le sol) et (vi) les autres fonctions et conditions socio-économiques dépendant des forêts. Ces critères ont eux-mêmes été déclinés en 35 indicateurs qui constituent une base d'évaluation des décisions forestières ([Forest Europe, 2020](#)) et ont aussi été regroupés en huit à dix enjeux des politiques publiques relatives à la forêt ([Peyron 2016](#) ; [Peyron, Chuine et Alexandre 2021](#)).

Compte tenu de la durée des cycles de vie forestiers, les arbitrages à réaliser pour concrétiser cette multifonctionnalité sont intertemporels : ce n'est pas tant le compromis actuel entre les différents services qui importe que les objectifs que l'on se donne à moyen et long terme. Par ailleurs, si le niveau des différents services à un moment donné constitue une information intéressante, c'est la façon dont le niveau de service varie au cours du temps et selon les décisions prises qui importe vraiment. Ce n'est pas parce que la valeur des usages récréatifs (de l'ordre de 29 ± 16 G€/an) est bien supérieure à celle des biens retirés de la forêt (de l'ordre de 4 à 5 G€/an) et à celle de la régulation du climat global (de l'ordre de 3 à 4 G€/an) qu'il faut délaisser les deux derniers services pour s'intéresser exclusivement au premier. Encore faudrait-il que la hausse de valeur du premier couvre la baisse supposée de valeur des deux derniers.

Par ailleurs, les données de l'arbitrage ne sont pas les mêmes selon qu'on se place du point de vue du propriétaire forestier, qui perçoit essentiellement des

valeurs marchandes, ou de la puissance publique qui a vocation à s'intéresser à l'ensemble des valeurs marchandes et non marchandes. Réconcilier ces deux visions passe par un système d'incitations favorisant la prise en compte des valeurs non marchandes par les gestionnaires forestiers (paiements pour services environnementaux).

Quelles conséquences pour la recherche ?

Les connaissances relatives aux écosystèmes et à la biodiversité restent lacunaires et des efforts sont indispensables pour évaluer les effets, en termes de biodiversité, des évolutions de gestion, du développement de services environnementaux, du changement climatique et d'une combinaison de ces nouvelles conditions. Pour y parvenir, l'amélioration des suivis de biodiversité est un facteur clé, de même que l'utilisation de métriques et indicateurs appropriés ou encore la mise en place et l'évaluation de pratiques de gestion adaptative ou apprenante.

Afin de constituer une aide à la gestion, la recherche ne peut s'intéresser uniquement aux aspects biophysiques liés à l'offre de services par les écosystèmes forestiers. Elle doit les mettre en regard des aspects socio-économiques caractérisant la demande sociale de ces mêmes services. Ce sont donc des recherches interdisciplinaires qu'il convient de développer, d'autant plus que ces services sont en interactions les uns avec les autres, évoluent dans le temps, sont soumis aux changements globaux et à l'incertitude qui les accompagne.

Les connaissances relatives aux différents services écosystémiques sont encore parcellaires et prennent insuffisamment en compte les interactions entre ces services. Or, ces interactions influencent largement la façon dont l'offre et la demande de services varient au cours du temps sous l'effet des facteurs naturels ou anthropiques influençant le fonctionnement des écosystèmes forestiers, dont le changement climatique et la gestion forestière.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DES ANNEXES

- Abildtrup J., Garcia S., Kervinio Y., Sullice E., Tardieu L., Montagné-Huck C. 2021 Les usages récréatifs des forêts métropolitaines ; un état des lieux des pratiques et des enjeux. Etude réalisée dans le cadre de l'Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques. La documentation française, 190 p. [Lien](#).
- Basilico L., Bontemps F., Sapijanskas J., Cordonnier T. 2014a Lisières, connectivité, colonisation : la biodiversité dans l'espace et le temps forestiers. Synthèse BGF 1, GIP ECOFOR, Paris, France. [Lien](#).
- Basilico L., Bontemps F., Sapijanskas J., Gosselin F. 2014b Quels indicateurs pour la biodiversité forestière ? Synthèse BGF 2, GIP ECOFOR, Paris, France. [Lien](#).
- Basilico L., Bontemps F., Sapijanskas J., Morin X. 2014c Quels compromis entre biodiversité, production et autres services forestiers ? Synthèse BGF 3, GIP ECOFOR, Paris, France. [Lien](#).
- Beyou W., Darses O., Devaux J., Kervinio Y., Puydarrieux P., Crosnier C., Degeorges P., Phantharangsi M. 2016 EFESE : l'essentiel du cadre conceptuel. Commissariat général au développement durable, 4 p. [Lien](#).
- Centre d'analyse stratégique (CAS) 2009 Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Contribution à la décision publique. Rapport du groupe de travail présidé par Bernard Chevassus-au-Louis, 378 p. [Lien](#).
- Dollat H., Dunoyer J.L., Hermeline M. 2022 Synthèse des travaux des Assises de la forêt et du bois, 19 octobre 2021 – 16 mars 2022. Résultats des groupes de travail présidés par Anne-Laure Cattelot, Pierre-Olivier Grège, Michel Eddi, Meriem Fournier, Anne-Catherine Loisier, Pierre Piveteau, Remy Rebeyrotte et Patricia Schillinger, 186 p. [Lien](#).
- Dorioz J., Peyron J.L., Nivet C. 2018 Évaluation française des écosystèmes et services écosystémiques ; les écosystèmes forestiers. Ministère de la transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable, 192 p. [Lien](#).
- Gosselin M., Paillet Y. 2017 Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière. Nouvelle édition. Quae éditions, 160 p.
- IGN 2022 Inventaire forestier national ; mémento, édition 2022. 35 p. [Lien](#).
- IPCC 2023 Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report. [Lien](#).
- MAA & IGN 2021 Etat et évolution des forêts françaises métropolitaines ; indicateurs de gestion durable 2020. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (MAA) et Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), 307 p. [Lien](#).
- Morin X., Nivet C., Appora V., Landmann G. 2022 La biodiversité des forêts face au changement climatique : de nouvelles pistes pour la gestion. Synthèse BGF n° 7, GIP Ecofor, Paris, 6p. [Lien](#).
- Nivet C., Aubert M., Chauvat M. 2018 Gestion durable et biodiversité des sols forestiers. Synthèse BGF 4, GIP ECOFOR, Paris, 10p. [Lien](#).
- Peyron J.-L., Harou P., Niedzwiedz A., Stenger A., 2002. National survey on demand for recreation in French forests, décembre 2002, LEF, 40 p. ([hal-01189368](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01189368))
- Peyron J.L. 2016 Des indicateurs aux enjeux relatifs aux forêts : une synthèse à double entrée. In : Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines ; édition 2015. Maaf-IGN, Paris, pp. 10-27, [Lien](#).
- Peyron J.-L., Nivet C. 2018. Science-policy interaction in France. SNS-EFINORD network on "Tools for improving science-policy interaction in forestry. Approaches in leveraging forest research in Northern and Central European Countries", Risto Paivinen and Liisa Käär (editors), Tapio n°36, pp.30-44.
- Peyron J.L., Chuine I., Alexandre S. 2021 Les mesures forestières du plan de relance à l'aune des objectifs de développement durable et critères de gestion durable des forêts. Contribution au groupe interacadémique (technologies, agriculture et sciences) sur les Objectifs de développement durable co-présidé par Gérard Payen et Valérie Masson-Delmotte, 39 p.
- Puydarrieux P., Beyou W., Beaufaron G., Bruley E., Darses O., Degeorges P., Devaux J., Fiorina C., Kervinio Y., Sapijanska J., Maris V., Arnauld de Sarre X., Doussan I., Hervé-Fournereau N. 2017 EFESE : cadre conceptuel. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, 88 p.
- Peyron J.L. 2022 Les propriétaires forestiers et la biodiversité : motivations et réceptivité aux incitations. Synthèse BGF 6, GIP ECOFOR, Paris, 6p. [Lien](#).

Picard N. 2020 Cartographie de la dynamique forestière tropicale : quelles implications pour la gestion des forêts guyanaises ? Synthèse BGF 5, GIP ECOFOR, Paris, 6p. [Lien](#).

Picard N., Appora V., Landmann G. 2022 Programme de recherche « Biodiversité et gestion forestière » : bilan 1996-2018. GIP ECOFOR et Ministère de la transition écologique, Paris, 160 p. [Lien](#).

Puydarrieux P., Beyou W., Beaufaron G., Bruley E.,

Darses O., Degeorges P., Devaux J., Fiorina C., Kervinio Y., Sapijanska J., Maris V., Arnauld de Sarre X., Doussan I., Hervé-Fournereau N. 2017 EFESE : cadre conceptuel. Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, 88 p. [Lien](#).

Stratégie nationale bas carbone 2020 La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, [Lien](#).







ACADÉMIE
DES SCIENCES

23, quai de Conti - 75006 Paris
academie-sciences.fr