



Les énergies  
renouvelables  
- VOLUME 3 -

# Bois-Energie et Biodiversité forestière



**Rédaction :** Marie MONMOUSSEAU, sous la coordination d'Alexis DUCOUSSO, président du groupe Forêt du Comité français de l'UICN, de Pauline TEILLAC-DESCHAMPS chargée de programme « Ecosystèmes » et Sébastien MONCORPS, directeur du Comité français de l'UICN.

**Remerciements :** Le Comité français de l'UICN remercie particulièrement :

- les personnes ayant relu attentivement ce travail : BOUGET Christophe (Irstea) - LANDMANN Guy (Ecofor) - RANTIEN Caroline (Ademe) - SEQUE-WEILL Alice (communes forestières) - MARCHAL Didier (ValBiom),
  - les membres du groupe de travail « Forêt » du Comité français de l'UICN, présidé par Alexis DUCOUSSO (FNE),
  - les participants des différents comités de pilotage : ANDRE Yann (LPO), ANNET Jimmy (MAAF), AUBRY Jérémy (Gondwana), AUDIGANE Nicolas (SER), BAKHACHE Christelle (GIP Ecofor), BERTRAND Olivier (SER), BOUGET Christophe (Irstea), CARRE Aurélien (UICN France), CASSOWITZ Laura (GDF-SUEZ), CHARLES André (DRAAF Auvergne), COURTECUISSÉ Régis (Société mycologique de France), DEBAIVE Nicolas (RNF), DEHEZ Joëffrey (Irstea), DELANGUE Justine (UICN France), GUERIN Christelle (GIP PN ECB), GUERIN André-Jean (MEDDE), GUILLE Sandrine (DATAR Alpes), JOLY Nicolas (CRPF PACA), KOLAR Igor (UICN France), LANDMANN Guy (GIP Ecofor), LEFEBVRE Etienne (MEDDE/ CGEDD), MAMBRINI Sophie (Véolia Environnement), MARSAUD Julie (FNE), MEURILLON Isabelle (GIP PN ECB), MOUSSET Jérôme (ADEME), NIVET Cécile (GIP Ecofor), NOTTEGHEM Patrice (ACUF), PAYEN Elodie (CIBE), PEGUIN Marion (UICN France), PIRASTRU Jean-Michel (PNR Alpilles), PRATZ Jean-Louis (FNE), RENTIEN Caroline (ADEME), SEQUE-WEILL Alice (FNCOFOR), THOMAS Marie (PNF), TROUVILLIEZ Jacques (MEDDE), VALLAURI Daniel (WWF)
- pour les nombreuses contributions qu'ils ont apportées.

**Citation de l'ouvrage :** UICN France (2015). Bois-énergie et biodiversité forestière. Paris, France.

**Dépôt légal :** Avril 2015 **ISBN** n° 978-2-918105-46-6 **Crédit photo de la couverture :** © Marie Monmousseau

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée. La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable du Comité français de l'UICN.

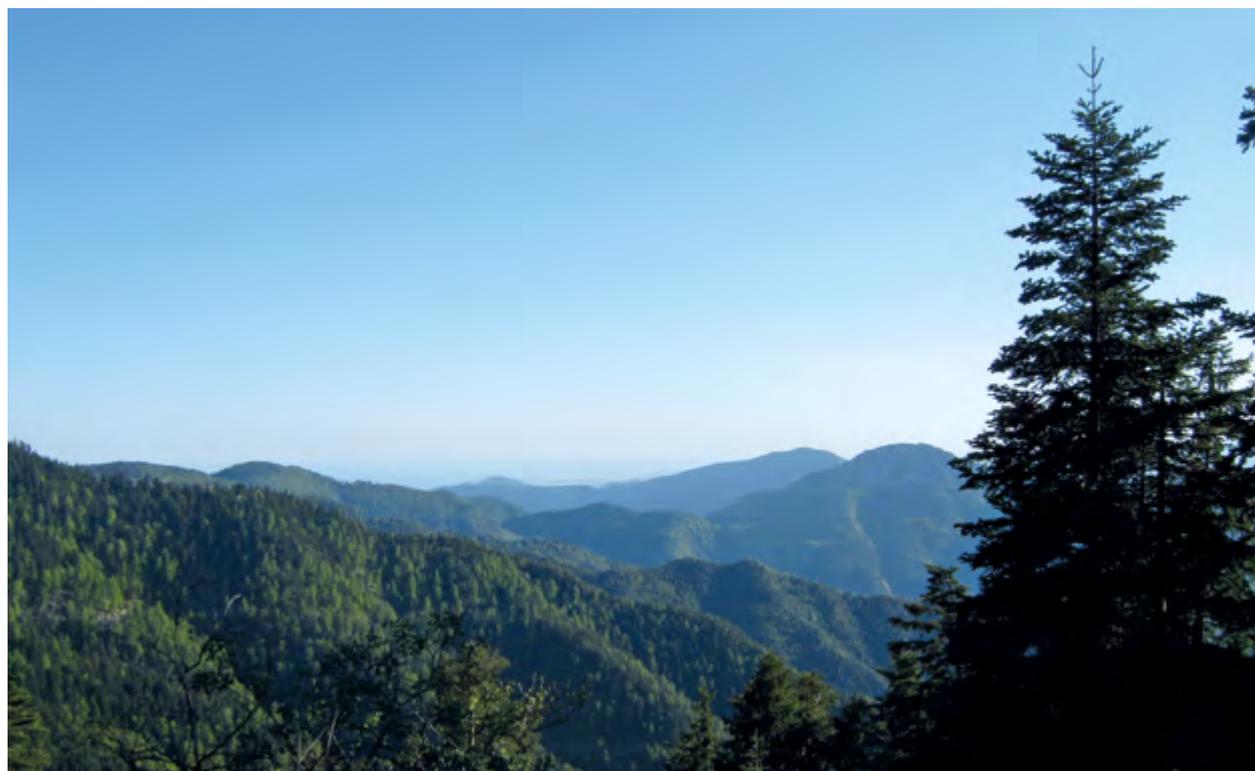
La présentation des documents et des termes géographiques utilisés dans cet ouvrage ne sont en aucun cas l'expression d'une opinion quelconque de la part du Comité français de l'UICN sur le statut juridique ou l'autorité de quelque Etat, territoire ou région, sous sur leurs frontières ou limites territoriales.

*Les opinions exprimées dans le présent rapport ne sont pas nécessairement le reflet de la position de chacun des membres du comité de pilotage ou des organismes partenaires de cette étude.*

**Cette publication a bénéficié du soutien de :**



# Sommaire



© Marie Monmousseau

• 3 •

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>Les forêts de France métropolitaine</b>	<b>6</b>
Etat des lieux .....	8
Leur gestion.....	10
<b>La biodiversité forestière</b>	<b>12</b>
Les écosystèmes forestiers.....	15
Gestion et conservation de la biodiversité en forêt .....	21
<b>Le bois-énergie</b>	<b>24</b>
Vision globale de la filière .....	26
La ressource disponible.....	27
Mécanismes de soutien à la demande de bois-énergie .....	29
<b>Interventions spécifiques à la production de bois-énergie</b>	<b>30</b>
Bois-énergie lié à la sylviculture orientée bois d'œuvre.....	33
Itinéraires spécifiques pour la production de bois-énergie .....	36
<b>Impacts potentiels sur la biodiversité</b>	<b>38</b>
Spécificités des forêts non exploitées.....	41
Exportation supplémentaire de bois, matière organique et minéraux.....	42
Fréquence des interventions, mécanisation et travail du sol .....	45
Modifications de la structure et de la composition du peuplement .....	47
<b>Conclusion</b>	<b>50</b>
<b>Notes</b>	<b>52</b>

# Introduction



Forêt mixte © Marie Monmousseau

■ Les changements climatiques sont un constat reconnu à l'échelle mondiale dont la cause principale est l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il s'agit notamment du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), émis en premier lieu par l'utilisation des combustibles fossiles<sup>1</sup>, « conventionnels » (pétrole, gaz, charbon) ou « non conventionnels » (schistes bitumineux, gaz de schiste, sables asphaltiques). De plus, leur exploitation se caractérise souvent par des impacts lourds sur les écosystèmes.

En réponse à ce constat, les énergies renouvelables (solaire, hydraulique, marine, éolien, biomasse et géothermie) sont de plus en plus mobilisées pour assurer un rééquilibrage des modes de production, et ainsi une meilleure protection de l'environnement, en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, en France, un des objectifs pour lutter contre le réchauffement climatique est d'atteindre 23 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie finale en 2020<sup>2</sup>. La France se mobilise également dans la transition énergétique, avec notamment un projet

de loi adopté par l'Assemblée nationale le 14 octobre 2014<sup>2</sup>.

Pour remplir cet objectif de 2020, la biomasse<sup>3</sup> (toutes sources confondues) serait le principal contributeur de la production de chaleur d'origine renouvelable, représentant, d'après les planifications nationales, plus de 83 % de la production. En revanche, elle ne représenterait que 10 % de la production d'électricité renouvelable<sup>4</sup>. Le Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables examine trois sources de biomasse (sylvicole ; agricole et pêche ; déchets) et retient une augmentation de la mobilisation de la ressource forestière de +2,8 à +5 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep), en se basant sur un potentiel disponible de 7,4 Mtep.

Cependant une augmentation des interventions et prélèvements en forêt pourrait avoir un impact sur la biodiversité, qu'il est particulièrement important de prendre en compte dans le contexte actuel de son érosion accélérée. En plus, l'augmentation et l'urbanisation de la population, avec l'expansion des villes, réduisent l'espace disponible pour les ressources naturelles.

Les ressources naturelles sont issues de processus bio-géo-chimiques (tels que les cycles d'éléments) qui ont lieu sur une échelle de temps longue, supérieure à l'échelle de temps de l'exploitation humaine de ces ressources. Ainsi, pour un développement durable des énergies renouvelables (répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins), il faut promouvoir des solutions systémiques intégrant tous les compartiments de l'environnement et préservant son fonctionnement à long terme.

Le Comité français de l'UICN encourage une transition vers des sources d'énergie durables, qui soit en cohérence avec les objectifs de conservation de la biodiversité. L'objectif de cette étude est de dresser un état des lieux au niveau national des connaissances de l'impact du développement du bois-énergie (une forme importante de la biomasse), dans le cadre d'un besoin croissant en énergies durables, sur les différents compartiments des écosystèmes forestiers, et donc d'évaluer la durabilité systémique de cette énergie.

Le bois-énergie comprend le bois bûche (commercialisé ou autoconsommé), ainsi que tous les coproduits du bois destinés à produire de l'énergie : liqueur noire, écorce, sciure, plaquettes forestières et plaquettes d'industrie, briquettes reconstituées et granulés, broyats de déchets industriels banals, bois en fin de vie, etc.<sup>5</sup> Cette étude se limite au bois-énergie issu directement de la forêt : les récoltes de bois-énergie hors forêt, tels que les haies bocagères, la filière déchets, les plaquettes industrielles, les sorties de scieries, etc., n'ont pas été traitées. De même, seules les forêts de France métropolitaine seront prises en compte. L'étude ne regardera pas l'alimentation de centrales de bois-énergie à partir de bois importé, pouvant impacter les forêts

des pays d'origine de ce bois. En outre l'aspect bilan carbone n'a pas été pris en compte, que ce soit le bilan carbone global de la filière bois-énergie ou l'impact de l'exploitation bois-énergie sur la capacité des forêts à stocker du carbone.

Ce travail dresse dans un premier temps un état des lieux des forêts et de leur biodiversité en France. Puis il développe les différentes sources et techniques utilisées pour récolter et développer le bois-énergie. La dernière partie de ce travail est consacrée aux impacts potentiels sur la biodiversité que le Comité français de l'UICN recommande de prendre en compte dans le cadre du développement du bois-énergie. ■

Une augmentation des interventions et prélèvements en forêt pourrait avoir un impact sur la biodiversité



Bois mort © Alexis Ducosso



# Les forêts de France métropolitaine

• 6 •



# Etat des lieux



Hêtraie sapinière © Alexis Ducouso

• 8 •

■ « La forêt est un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares, avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 mètres à maturité *in situ*, un couvert boisé de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. » Cette définition de la FAO, reprise en France par l'IGN, n'inclut pas les terrains boisés dont l'utilisation prédominante du sol est agricole ou urbaine<sup>6</sup>.

La surface de la forêt métropolitaine s'accroît fortement depuis la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, la surface boisée a été estimée entre 8,9 et 9,5 millions d'hectares (Mha) en 1830 par Cinotti (1996)<sup>7</sup>, alors qu'elle couvre maintenant 16,4 Mha, soit 30 % du territoire<sup>6</sup>. Cette augmentation est due entre autres aux travaux de boisement et à la Restauration des Terrains en Montagnes ainsi qu'à la diminution des pressions sur la forêt avec l'arrivée des concurrents du bois, tels que le charbon, et l'acier puis les plastiques et autres matériaux synthétiques<sup>8</sup>.

La forêt se répartit de façon hétérogène en France, avec des taux de boisement variant entre les départements (figure 1).

Elle est composée majoritairement de feuillus, qui couvrent 65 % de la superficie forestière. Près de la moitié des peuplements sont monospécifiques<sup>9</sup> et ceux à deux essences représentent presque un tiers. Les essences possédant le plus gros volume de bois vivant sur pied sont

pour les feuillus : les chênes pédonculé et rouvre, le hêtre et le châtaignier et pour les conifères : le sapin pectiné, l'épicéa commun, le pin sylvestre et le pin maritime. Les peupleraies, incluses dans les forêts, couvrent environ 1,2 % de l'ensemble de la forêt.<sup>6</sup>

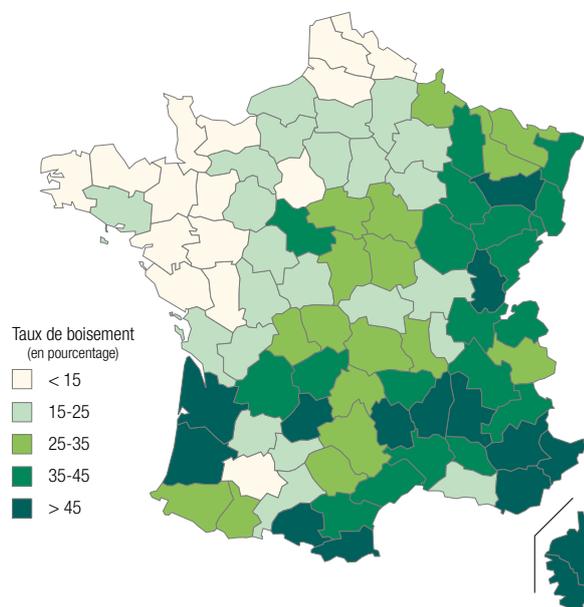


Figure 1 : Taux de boisement des départements. (IGN, 2013)

La France métropolitaine, à l'intersection de 4 grandes zones biogéographiques – atlantique, continentale, méditerranéenne et alpine – héberge des écosystèmes très variés du fait de ses variations géographiques, climatiques, géologiques, mais également des influences humaines<sup>10</sup>. Cette diversité peut être visualisée par les grandes régions écologiques (GRECO), au nombre de onze, liées au découpage macroclimatique, géologique et topographique de la France (figure 2a). A celles-ci se rajoute une douzième GRECO, constituée d'alluvions récentes, azonales, correspondant aux vallées des grands fleuves français et de leurs affluents<sup>11</sup>. Ces GRECO se décomposent en 91 sylvoécórégions (SER), définies « *comme la plus vaste zone géographique à l'intérieur de laquelle les facteurs déterminant la production forestière ou la répartition des habitats forestiers, varient de façon homogène entre des valeurs précises, selon une combinaison originale, c'est-à-dire différente de celles des SER adjacentes* »<sup>12</sup> (figure 2b).

Plus généralement, différents types de forêts peuvent se distinguer :

- › les forêts de plaine,
- › les forêts de montagnes (dans les 5 grands massifs montagneux),
- › les forêts littorales,
- › les forêts méditerranéennes.<sup>12</sup>

Les peuplements de feuillus se situent surtout dans les plaines ou à moyenne altitude, tandis que ceux de conifères se situent essentiellement en zone montagneuse, mais également dans le massif landais (grand massif de peuplements monospécifiques<sup>9</sup> de pin maritime) et dans les plantations assez récentes de l'ouest de la France. Les forêts du nord-est sont les plus diversifiées au niveau de la composition spécifique des peuplements<sup>6</sup>.

La forêt publique, relevant du régime forestier<sup>13</sup>, représente un quart des forêts métropolitaines, qui se répartit entre les forêts domaniales (1,5 Mha) et les autres forêts publiques, majoritairement communales (2,6 Mha)<sup>6</sup>. La forêt privée est donc majoritaire, mais elle est morcelée : 3,3 millions de propriétaires (d'après les données du cadastre en 2009)<sup>14</sup> se partagent 12,4 Mha, soit 75 % de la surface forestière<sup>6</sup>, avec les deux-tiers des propriétaires possédant une surface forestière inférieure à 1 ha.<sup>15</sup> ■

La forêt française est composée à 65% de feuillus

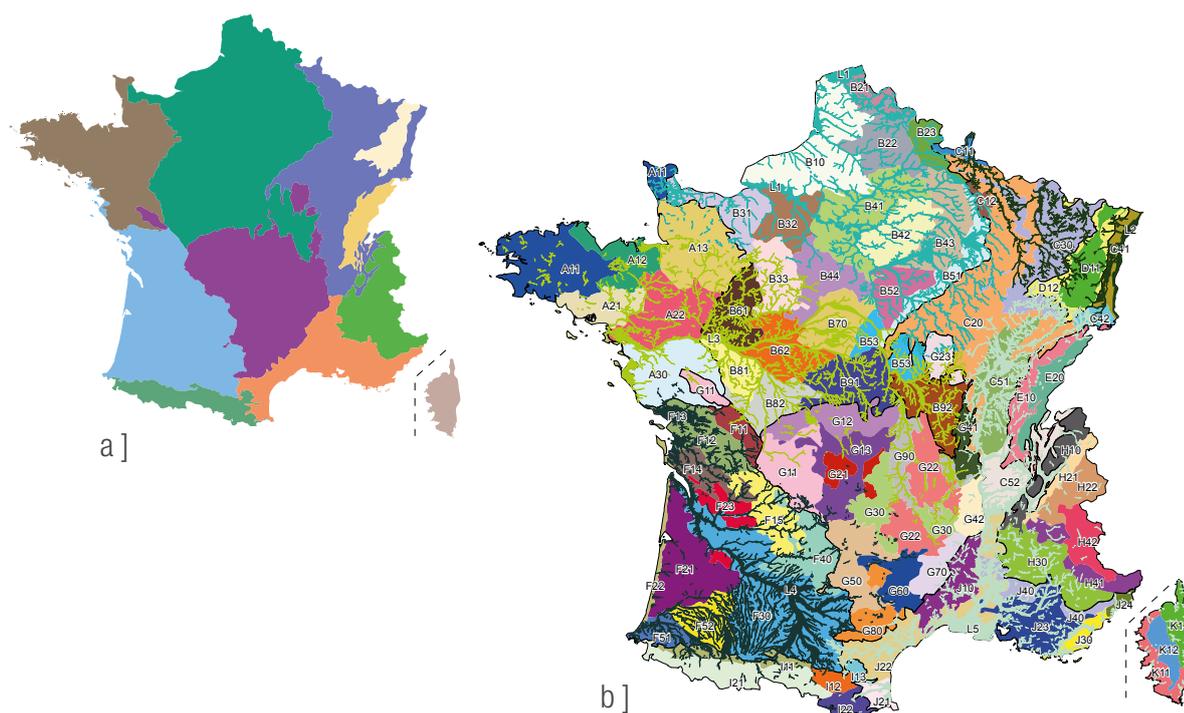


Figure 2 : a) Les grandes régions écologiques (GRECO) et b) les sylvoécórégions de la France. (IGN)

# Leur gestion



Hêtraie chênaie © Alexis Ducouso

■ La description, par l'inventaire forestier, de la forêt métropolitaine distingue 3 régimes de gestion : la futaie (régulière ou irrégulière), le mélange de futaie et de taillis, enfin le taillis, qui se répartissent sur toute la France (figure 3).

Le taillis est un peuplement (la plupart du temps feuillu) constitué de tiges issues de rejets de souche<sup>16</sup> et de drageons<sup>17</sup> du même âge et qui sont périodiquement coupés pour produire du bois de chauffage. La plupart des taillis a été converti en futaie au cours des décennies écoulées. La majorité des taillis subsistants sont plus ou moins vieilliss (ne font plus l'objet de coupes régulières). Ils couvrent encore environ 1,7 Mha<sup>18</sup>.

Le mélange de taillis et de futaie<sup>19</sup> de l'inventaire forestier combine taillis et futaie dans un peuplement composé de 2 étages. Ces peuplements sont issus du régime de taillis-sous-futaie originellement conçu pour produire du bois d'œuvre et du bois de chauffage. Suite au recul de ce dernier, les taillis et taillis-sous-futaie ont connu un vieillissement important et une accumulation considérable de bois sur pied. Malgré des transformations et

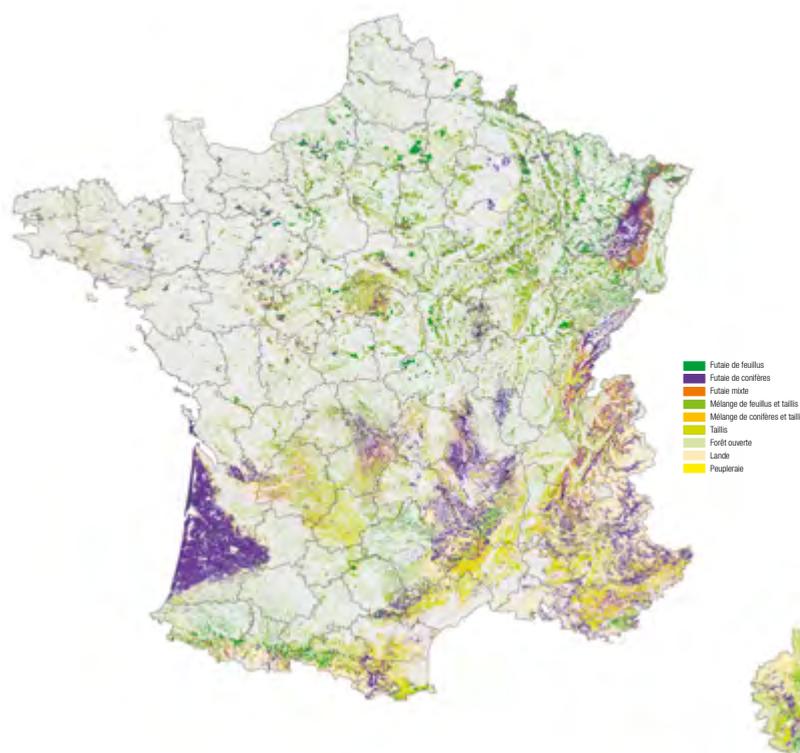


Figure 3 : Types de formation végétale décrits par structure et composition dominante. (IGN, 2006)

des conversions en futaie, les surfaces de peuplement issus de taillis-sous-futaie restent importantes, autour de 4,5 Mha<sup>15</sup>.

La futaie est un peuplement issu de graines ou de plants, comportant des arbres sensiblement du même âge pour la futaie régulière et de plusieurs classes d'âge pour la futaie irrégulière, respectivement autour de 7,8 et 0,7 Mha en France<sup>15</sup>. Il existe également des « futaies sur souche », pour des peuplements issus de taillis convertis en futaie. La production d'arbres de qualité pour le bois d'œuvre est l'objectif principal de la futaie.

Enfin, les forêts non destinées à la production de bois (entre 0,8 et 2 Mha<sup>15</sup>) sont des zones ayant un statut de protection ou des peuplements qui ne sont pas exploités, notamment pour des raisons d'accessibilité ou de productivité. Les forêts peuvent être protégées par divers outils de protection d'espaces naturels : les parcs nationaux, les zones Natura 2000, les réserves naturelles, les réserves forestières ou biologiques<sup>20</sup> (dont la réserve biologique intégrale permettant une libre évolution des habitats forestiers), etc.

La nature juridique de ces divers espaces naturels protégés est extrêmement variée. Les pratiques liées à la sylviculture y sont généralement réglementées, voire interdites pour les réserves biologiques intégrales. En fonction du statut de l'espace protégé, des dispositions légales peuvent par exemple réglementer les coupes et travaux sylvicoles, les soumettre à l'évaluation des incidences, ou interdire les prélèvements de bois lorsque le site accueille des milieux ou des espèces patrimoniales forestières. La construction de pistes forestières, qui peuvent être nécessaires, fait généralement l'objet d'une réglementation assez stricte au sein des espaces protégés<sup>21</sup>.

La loi d'orientation forestière de 2001 définit 4 catégories de documents de gestion<sup>22</sup>, dont les 3 dernières sont des documents de gestion durable reconnus pour les propriétaires privés<sup>23</sup> :

- › les documents d'aménagement : généralement le document de gestion en forêt publique ;
- › les plans simples de gestion (PSG) :
  - obligatoire pour les propriétés boisées dépassant le seuil de 10 à 25 ha selon les départements<sup>22</sup>.

- volontaire pour celles d'une surface supérieure à 10ha mais inférieure au seuil départemental ;

- › les codes de bonnes pratiques sylvicoles (CBPS) ;
- › les règlements types de gestion (RTG).

Les CBPS et RTG sont des outils essentiellement pour les propriétés inférieures à 25ha.

En 2010, la surface forestière française présentant un plan de gestion formel était de plus de 7 Mha, soit 45,1 % de la surface totale. En forêt publique, le taux de forêts aménagées était élevé (92,8 %), et quant aux forêts privées, 80,5 % des propriétaires devant présenter un plan simple de gestion en avaient un agréé<sup>24</sup>. En 2013, la surface forestière privée couverte par un document de gestion agréé représentait 30,40 % des forêts privées (tableau 1)<sup>24</sup>. Dans cette étude, la forêt privée a été chiffrée à 10,5 Mha. Cependant, une enquête menée par le SCEES en 1999 a évalué qu'un quart des propriétaires privés, détenant près de 60 % de la surface boisée, étaient intégrés dans un circuit de développement (recherchant de l'information ou ayant recours à une aide extérieure afin de mieux gérer leur patrimoine forestier)<sup>22</sup>.

Le code forestier français (article L.1) énonce que « [la politique forestière] a pour objet d'assurer la gestion durable des forêts » et que celle-ci « garantit leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour l'avenir, les fonctions économiques, écologiques et sociales pertinentes, aux niveaux local, national et international, sans causer de préjudices à d'autres écosystèmes ».

En France, le Plan Forestier National (2006-2015) affiche comme objectif de surface sous gestion durable, toutes forêts confondues, les deux tiers de la surface totale en 2015. A la pratique de la gestion durable se rajoutent des systèmes de certifications, dont le plus répandu en France est le Programme de Reconnaissance des Certifications Forestières (PEFC) qui concerne aujourd'hui, 67 % de la forêt publique et 20 % de la forêt privée<sup>25</sup>. On dénombre également 19 463 hectares certifiés selon le système Forest Stewardship Council (FSC)<sup>26</sup>. ■

En fonction du statut de l'espace protégé, des dispositions légales peuvent par exemple réglementer les coupes et travaux sylvicoles, les soumettre à l'évaluation des incidences, ou interdire les prélèvements de bois lorsque le site accueille des milieux ou des espèces patrimoniales forestières

Documents de gestion	Nombre	Surface (ha)
PSG + 25 ha	24 115	2 819 513
PSG volontaire	4 266	102
CBPS	23 450	240 736
RTG	1 906	25 545
<b>TOTAL</b>	<b>53 737</b>	<b>3 188 761</b>

Tableau 1 : Le nombre de propriétés privées possédant un document de gestion durable et la surface totale concernée (CNPf, 2013)



# La biodiversité forestière

• 12 •



La Convention sur la Diversité Biologique, adoptée lors du Sommet de la Terre de 1992, définit la diversité biologique comme la « *variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes* ». Autrement dit la biodiversité s'exprime à 3 niveaux : la diversité génétique (au sein des espèces), la diversité spécifique (entre espèces) et la diversité écosystémique ou écologique (des écosystèmes). Cette dernière comprend également la variété des groupes fonctionnels, l'écosystème étant défini comme « *le complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro-organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forment une unité fonctionnelle* <sup>27</sup> ».



Lézard vert © Alexis Ducouso

# Les écosystèmes forestiers



Bois morts, hêtraie sapinière © Alexis Ducouso

■ La forêt est organisée selon un axe vertical, par des strates de végétation, chacune constituant un habitat spécifique, caractérisée par une composition floristique, un microclimat et une luminosité propres<sup>28</sup>. Cette dimension verticale se décompose généralement en cinq : les strates muscinale, herbacée, arbustive et arborée, auxquelles se rajoute la strate racinaire. La strate muscinale est composée de mousses, lichens et champignons ; la strate herbacée de fougères, de plantes à fleurs et de graminées ; la strate arbustive d'arbustes ou de jeunes arbres et la strate arborée des houppiers des grands arbres<sup>29</sup>.

Dans cette étude, la forêt a été partitionnée en quatre strates – en regroupant ensemble les strates muscinale et herbacée, qui permettront de structurer les impacts potentiels du bois-énergie sur la biodiversité (notamment la diversité faunistique et floristique) associée à chacune d'elle, avant d'avoir une vision plus globale des impacts sur l'écosystème.

Les différents niveaux choisis sont (figure 4) :

- le sol ;
- la strate herbacée et muscinale ;
- la strate arbustive qui inclut le bois mort au sol ;
- la strate arborée ;
- et l'écosystème forestier dans son ensemble.

La diversité écosystémique, en considérant la diversité des habitats, peut être considérée à différentes échelles, en partant de la France avec une vision générale des différents écosystèmes forestiers jusqu'à un massif forestier en particulier, avec les milieux et les microhabitats associés.

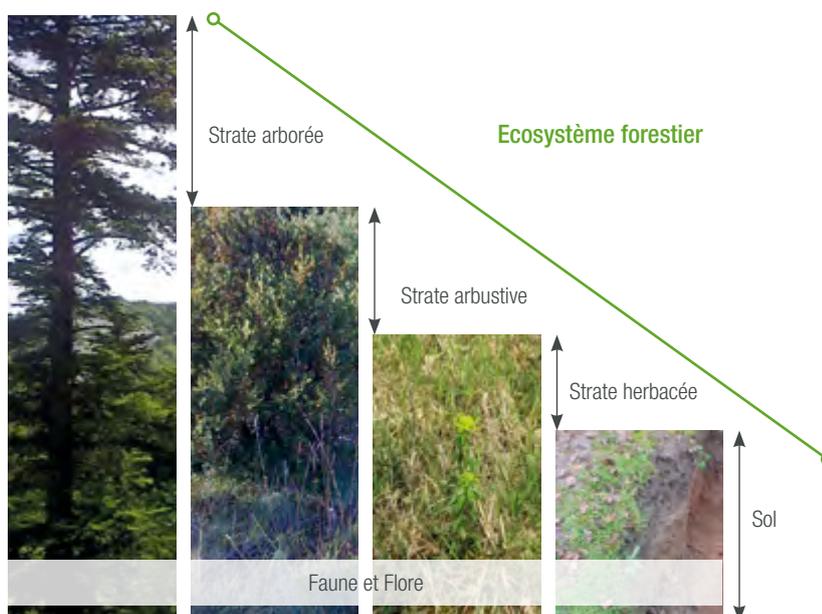


Figure 4 : Les différents niveaux de la forêt choisis pour décrire les impacts potentiels sur la biodiversité (© M. Monmousseau)

## Les biotopes

Une particularité des écosystèmes forestiers est la diversité des habitats que l'on peut y rencontrer : la forêt regroupe 66 % du nombre d'habitats de la classification européenne CORINE biotopes présents en France<sup>30</sup>. Ces biotopes identifiables, sont formés par la flore et la faune en liaison avec un certain environnement abiotique<sup>31</sup>. Dans la version française du manuel Corine biotopes<sup>31</sup> qui se limite aux seuls habitats présents sur le territoire français, les 5 grandes catégories de biotopes forestiers français sont :

- › les forêts caducifoliées<sup>32</sup> qui incluent entre autres, les hêtraies, frênaies, chênaies, etc. ;
- › les forêts de conifères, tels que les sapinières, les forêts de pins sylvestres, de pins noirs et de pins méditerranéens, etc. ;
- › les forêts mixtes : forêts et bois mixtes d'essences caducifoliés et de résineux en mélange ;
- › les forêts riveraines, forêts et fourrés très humides (végétation arborescente et arbustive des plaines inondables, des marais, des marécages et des tourbières) tels que les formations riveraines de saules, les forêts mixtes de chênes, d'ormes et de frênes des grands fleuves, etc. ;
- › les forêts sempervirentes<sup>33</sup> non résineuses (forêts méditerranéennes dominées par des feuillus sempervirents et sclérophylles<sup>34</sup>), tels que les forêts d'oliviers et de caroubiers, les forêts de chênes lièges, forêts de chênes verts, bois de houx, etc.

Outre la composition en habitats et en espèces dominantes, l'ancienneté d'une forêt conditionne sa biodiversité. L'ancienneté, défini ici comme la continuité de l'état boisé à travers l'histoire, semble être un critère déterminant du fonctionnement des écosystèmes forestiers actuels<sup>35</sup>. Une forêt est considérée comme ancienne si la continuité forestière du sol est assurée depuis plusieurs siècles, alors qu'une forêt récente l'est sur un sol anciennement cultivé : le sol a dans ce cas subi un changement d'usage<sup>36</sup>. Des différences prononcées dans la composition des plantes forestières ont été observées entre ces deux types de forêts<sup>37</sup>. Deux causes principales peuvent expliquer le maintien de ces différences floristiques. Tout d'abord, la flore forestière associée aux forêts anciennes a une capacité de colonisation limitée<sup>37</sup>, ce qui limite sa distribution et son abondance. La deuxième raison vient des modifications du sol induites par l'agriculture. Les propriétés des sols des forêts récentes favorisent alors certaines plantes compétitives rudérales telles que l'ortie et la ronce, alors que les espèces de forêt ancienne, ont un faible pouvoir compétitif et ont des difficultés à s'installer<sup>35</sup> ; l'effet de l'ancienneté du couvert forestier sur d'autres groupes de biodiversité plus ou moins dispersifs que la flore est en cours d'étude.

**A noter que les forêts anciennes n'ont pas forcément une richesse spécifique plus élevée que les forêts récentes, mais hébergent un plus grand nombre d'espèces floristiques forestières typiques<sup>37</sup>.**

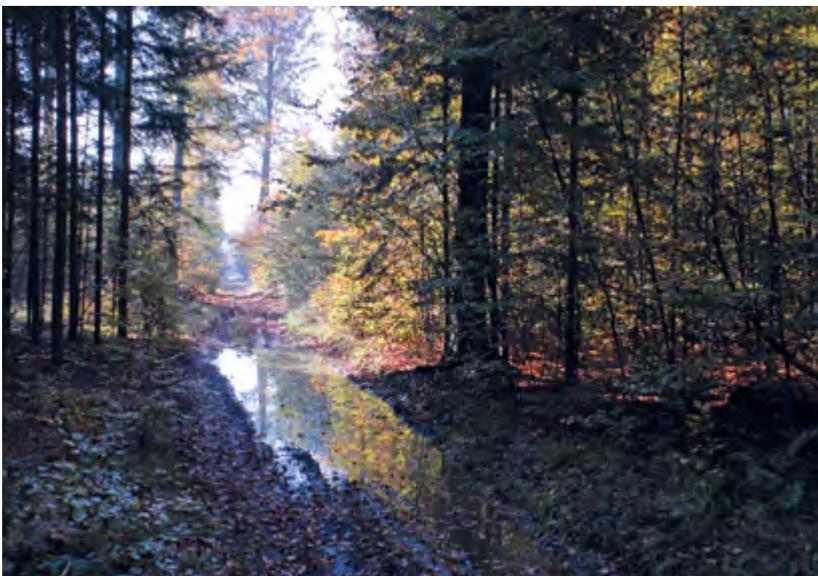
Enfin, il faut veiller à bien différencier le concept d'ancienneté avec celui de maturité : une forêt récente peut être mature (vieille – avec la présence de vieux arbres, accumulation de bois mort, etc.), de même qu'une forêt ancienne peut avoir un peuplement jeune<sup>35</sup>.

## Milieus associés

La forêt n'est pas composée uniquement d'espaces boisés, mais également de milieux « associés », qui peuvent être de différentes natures et inclure des milieux ouverts (trouées, pelouses calcaires, landes, lisières, etc.), des milieux humides ou aquatiques (tourbières, mares, étangs, sources, ruisseaux, ripisylves, etc.) et des milieux rocheux (falaise, barre rocheuse, éboulis, gros blocs, dalle, etc.)<sup>38, 39</sup>. Chacun de ces écosystèmes peut accueillir des assemblages d'espèces différents, et même parfois une biodiversité spécifique. Cette variété d'espèces apporte ainsi une biodiversité élevée à l'écosystème forestier, pouvant même contenir des espèces rares et menacées.

Les milieux ouverts accueillent entre autres des papillons de jour, des reptiles, des chauves-souris, des mammifères carnivores, des oiseaux et des ongulés qui les utilisent quotidiennement, notamment pour se nourrir. D'autres espèces les fréquentent seulement à un moment de leur cycle de vie, comme certains insectes<sup>38</sup>. Les espèces les plus emblématiques des pelouses calcaires intraforestières sont par exemple des orchidées, des oiseaux comme l'Engoulevent et l'Oedicnème criard, et des papillons comme le Flambé et les argus. Dans les landes sèches se trouvent des plantes telles que la Bruyère ciliée, l'Orchis des bruyères et le Glaïeul d'Illyrie, de même que des reptiles tels que le Lézard vivipare, la Vipère péliade, et des oiseaux comme la Fauvette pitchou, l'Hypolaïs polyglotte et le Circaète Jean le Blanc<sup>39</sup>.

Les milieux aquatiques présents en forêt permettent l'accueil d'une biodiversité riche. En effet, un certain nombre d'espèces de la faune forestière dépendent de la présence d'étendues d'eau, pour des besoins liés à la consommation d'eau, à la reproduction, à l'alimentation et à la protection. L'eau peut également permettre le développement de certains végétaux sensibles au stress hydrique.



Hêtraie spinière © Alexis Ducouso



Milieu ouvert associé à la forêt © Alexis Ducouso

Le plus grand nombre et la plus forte diversité de microhabitats se trouvent sur les très gros arbres, du fait de leur grande dimension et de leur âge avancé.

Enfin, à cette biodiversité se rajoute les espèces qui passent l'intégralité ou l'essentiel de leur vie dans l'eau (poissons, phytoplancton, crustacés, insectes, végétaux, etc.)<sup>38</sup>. Sphaignes, droséra (plantes carnivores), Courlis cendré, Hibou des marais, Azuré des mouillères, Vison d'Europe et Loutre sont autant d'espèces qui vivent dans les tourbières. Les mares sont l'habitat privilégié des amphibiens et reptiles (tritons, grenouilles, serpents, cistudes), des odonates (libellules), des insectes aquatiques (coléoptères tels que dytiques, notonectes...) et de certains oiseaux (canards, poules d'eau, etc.). Elles sont également l'habitat d'espèces végétales aquatiques : roseaux, potamots, iris des marais, iris faux acore, nénuphars<sup>39</sup>.

Une biodiversité spécifique est associée aux milieux rocheux, qui est adaptée à cet habitat particulier : des végétaux dits « chasmophytiques » se développent dans les microfissures des roches, des mousses et lichens, des oiseaux nichant dans les falaises (Faucon pèlerin, Grand-duc, Hirondelle de rocher, etc.), des amphibiens, des arthropodes et des mollusques très spécialisés. On y trouve également certaines espèces forestières plus ubiquistes tels que les Rhinolophes (espèce de chauves-souris), des micro-mammifères (notamment le Loir gris) et de nombreux arthropodes de milieux ouverts et forestiers, qui dépendent de ces habitats pour hiberner<sup>38</sup>.

### Microhabitats liés à la forêt

Dans les espaces boisés, on trouve également des microhabitats, ou habitats de petites dimensions, tels que ceux liés au bois mort. **Le bois mort existe sous trois formes principales : les débris grossiers, les menus bois au sol (bois inférieur à 7cm de diamètre) et les chandelles, qui sont des arbres morts debout.** Se rajoute également à ces bois morts, une catégorie particulière qui résulte directement de l'exploitation forestière : les souches. Les espèces saproxyliques sont des organismes associées au bois mort. Elles sont définies comme « des espèces impliquées dans ou dépendantes du processus de décomposition fongique du bois, ou des produits de cette décomposition »<sup>40</sup>. Les organismes saproxyliques dépendent donc du bois mort ou dépérissant pendant au moins une partie de leur cycle de vie. Il existe de nombreuses espèces saproxyliques de champignons, coléoptères, diptères, bryophytes et lichens<sup>41</sup>. **Le bois mort joue ainsi un rôle important en hébergeant près de 25 % de la biodiversité forestière**<sup>42</sup>. Cependant, la composition des communautés saproxyliques dépend des caractéristiques propres des pièces de bois mort, tels que leur diamètre, l'essence, et le stade de décomposition, ainsi que des conditions environnementales (ensoleillement, humidité du sol, accumulation locale de bois mort)<sup>43</sup>.



Sol brun © Alexis Ducouso

D'autres microhabitats jouant un rôle important pour la biodiversité sont présents sur certains arbres, vivants ou morts, tels que des cavités, fentes, écorces décollées, dendrotelmes (cavités remplies d'eau au moins à une période de l'année), qui offrent des refuges, des lieux de reproduction, d'hibernation et de nutrition pour de nombreuses espèces<sup>44</sup>. Par exemple, les pics, mésanges, chouettes, murins, noctules, araignées et guêpes sont des espèces associées aux cavités<sup>44</sup>. Ces microhabitats peuvent être créés par des animaux, comme des pics, des champignons, ou suite à un dommage causé par la chaleur, le vent ou un éclair<sup>45, 46</sup>. Le plus grand nombre et la plus forte diversité de microhabitats se trouvent sur les très gros arbres, du fait de leur grande dimension et de leur âge avancé<sup>44</sup>. Les gros arbres fournissent entre autres une hétérogénéité élevée d'habitats pour les coléoptères, permettant à de nombreuses espèces spécialistes de les occuper en même temps<sup>47</sup>. Leur houppier offre également de vastes plateformes pour la faune, que les mammifères arboricoles et les oiseaux affectionnent pour chasser, faire leur nid, se déplacer ou se reposer<sup>44</sup>.

Il est important de souligner qu'on estime que deux-tiers des espèces associées aux arbres dans les forêts à dynamique naturelle ne sont présentes qu'après l'âge d'exploitabilité, notamment dans les microhabitats liés à la sénescence des arbres<sup>42</sup>.

## Le sol

Une composante essentielle du fonctionnement de l'écosystème forestier est le sol. Le sol est la couche superficielle des surfaces continentales, formée par l'altération de la roche sous-jacente sous l'action du climat et des organismes vivants, et qui résulte d'une évolution lente (de plusieurs millénaires à plusieurs centaines de millénaires). Les sols sont le produit et le support du développement de la végétation, et constituent leur réservoir d'eau et d'éléments nutritifs<sup>48</sup>. En effet, en tant qu'interface, le sol participe à la régulation du régime de l'eau et de sa qualité et recycle les matières organiques (matière fabriquée par les êtres vivants végétaux, animaux, ou micro-organismes). De même, il constitue un mail-

lon central dans la régulation des grands cycles planétaires (carbone, azote) et assure ainsi des fonctions essentielles dans la régulation des gaz à effet de serre : il peut accumuler du carbone et atténuer les émissions de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère<sup>48</sup>.

Le sol abrite également un immense réservoir de biodiversité<sup>48</sup>, avec plus de 25 % des espèces animales et végétales actuellement décrites<sup>49</sup>. Cette biodiversité regroupe l'ensemble des formes de vie qui présentent au moins un stade actif de leur cycle biologique dans les sols<sup>49</sup>. Les organismes du sol sont généralement subdivisés en plusieurs groupes, en fonction de leur taille :

- › la microflore (bactéries, champignons et algues)
- › la microfaune, visible au microscope (protozoaires, nématodes)



Profil de sol © Alexis Ducouso

- › la mésofaune, visible à la loupe (acariens, collemboles)
- › la macrofaune, visible à l'œil nu (vers de terre, termites, fourmis, larves d'insectes)
- › la mégafaune (taupe, crapauds, serpents)

Ces organismes ont différentes fonctions (figure 5) et peuvent également être regroupés selon leurs rôles<sup>49</sup> :

- › les ingénieurs physiques de l'écosystème qui renouvellent la structure du sol, créent des habitats pour les autres organismes et régulent la distribution spatiale des ressources en matière organique ainsi que le transfert d'eau : vers de terre, fourmis, termites ;
- › les régulateurs qui contrôlent la dynamique des populations des micro-organismes du sol et agissent sur leur activité : nématodes, collemboles et acariens ;
- › les ingénieurs chimistes qui assurent la décomposition de la matière organique en éléments nutritifs facilement assimilables par les plantes et qui sont responsables de la dégradation des polluants organiques : principalement les micro-organismes (bactéries et champignons microscopiques).

Les champignons sont des organismes particulièrement importants dans les sols forestiers, étant capables de décomposer les substances, tels que le bois, et dont seuls certains peuvent entièrement dégrader la lignine (une des composantes du bois qui lui confère sa rigidité). De plus, certains champignons ont un rôle de symbiotes avec les arbres (mycorhizes) et forment avec les racines une relation mutuelle de dépendance bénéfique : le champignon augmente la surface d'absorption de la racine et ainsi sa capacité d'absorber des minéraux, en échange d'un partage des nutriments produits par la plante hôte<sup>50</sup>.

## Les espèces

En plus de toute la biodiversité présente dans le sol, il existe différentes espèces présentes ou fréquentant la forêt. Bien que le nombre d'espèces dans une forêt dépende de plusieurs facteurs (dont le type de forêt, la qualité de la gestion et la surface considérée), quelques grandes lignes relatives à la biodiversité d'une forêt tempérée ont pu être tirées dans une étude de 2009<sup>51</sup>. Ainsi, une forêt de petite surface (jusqu'à 300 ha) accueillerait un nombre d'espèces supérieur à 5 000,



Figure 5 : Les fonctions de la faune du sol. Les flèches oranges signifient « qui est mangé par ». (Amélie Rochedreux (GIP BE), Bretagne-Environnement).

tandis qu'une grande forêt accueillerait plus de 10 000 espèces, **la faune représentant plus des deux-tiers des espèces, elle-même composée à plus de 90 % par des insectes. La diversité des végétaux compterait pour environ 10 à 20 % des espèces et les derniers 15 à 30 % des espèces représenteraient la diversité des autres formes de vie, principalement des champignons**<sup>51</sup>.

En France métropolitaine, 137 espèces d'arbres peuvent être rencontrées en forêt, dont 54 espèces sont exotiques<sup>52</sup>. **Les chênes sessile, pédonculé, et vert, le sapin pectiné et le pin maritime sont des espèces autochtones**, alors que les espèces comme le sapin de douglas, le robinier et le chêne rouge sont des espèces exotiques, mais qui peuvent être considérées comme acclimatées (i.e. introduites depuis suffisamment de décennies pour avoir démontré leur bonne adaptation aux conditions de milieu et de climat qui prévalent en France et qui peuvent se reproduire naturellement en forêt, sans intervention de l'homme). D'autres arbres exotiques comme le pin à encens, le cèdre du Liban, le mimosa et le platane sont plus rarement rencontrés en forêt<sup>52</sup>. **Le nombre moyen d'espèces d'arbres forestiers observées sur un point d'inventaire (IGN) est de 5,8, alors qu'il est de 6,8 pour les essences arbustives.**

Le sol abrite également un immense réservoir de biodiversité, avec plus de 25 % des espèces animales et végétales actuellement décrites



Chevreuil © Alexis Ducouso

Il varie entre 0 et 28 sur l'ensemble de la France<sup>53</sup>. 24 % des espèces de plantes vasculaires (*pourvues de vaisseaux par lesquels circule l'eau puisée par les racines*) de France métropolitaine sont fréquemment présentes en forêt. De plus, il semblerait qu'une forte proportion de bryophytes (mousses), champignons et lichens soit strictement forestière, mais il manque des données à ce sujet<sup>54</sup>. Les bryophytes, ou mousses, sont des végétaux terrestres sont caractérisés par l'absence de système vasculaire et ne disposent donc pas de racines<sup>55</sup>. Les lichens sont des organismes composites qui associent plantes et mycètes (champignons) en un partenariat mutuellement bénéfique appelé symbiose.

**La biodiversité végétale des forêts est non seulement liée à la diversité des espèces qui les composent mais aussi à la variabilité de leurs caractéristiques, qui leur permettent de s'adapter à des conditions environnementales variées.** Par exemple, les espèces sciaphiles tolèrent bien l'ombre alors que les espèces héliophiles ont besoin de milieux ensoleillés.

Au cours du temps la végétation forestière évolue, c'est la sylvigénèse. Les espèces dites « pionnières » sont capable de coloniser les milieux après une perturbation (coupe forestière, chablis, incendie, etc.). Ce sont les premières espèces à se développer dans des conditions abiotiques généralement peu favorables. Le développement de ces espèces pionnières permet le maintien de l'humidité dans le sol, de nutriments, l'enrichissement en matière organique et par voie de conséquence, le développement de nouvelles espèces. Les espèces se succèdent ainsi les unes aux autres en fonction des modi-

fications des conditions abiotiques qu'ont entraînées les précédentes. Ainsi, aux espèces pionnières succèdent les postpionnières<sup>56</sup>, puis les dryades<sup>57</sup>. Dans l'écosystème forestier, les bouleaux, saules et peupliers sont des arbres pionniers ; les chênes, tilleul, charme, sorbiers des espèces post-pionnières ; et les dryades sont par exemple le hêtre, sapin pectiné, épicéa commun et l'if<sup>58</sup>.

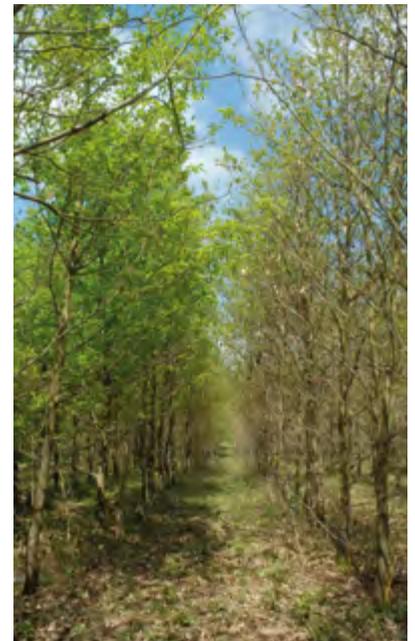
Les forêts hébergent également une faune très diversifiée dont certaines espèces sont strictement forestières. A ces espèces s'ajoutent des espèces non inféodées (i.e. qui ne sont pas strictement liées) à la forêt mais la fréquentant de manière régulière ou saisonnière. Cet ensemble forme les espèces fréquemment présentes en forêt. Ainsi 60 % des mammifères (73 espèces), 42 % des oiseaux nicheurs (120 espèces), 27 % des reptiles (11 espèces), 32 % des amphibiens (13 espèces) et 28 % des insectes (estimé à 10 000 espèces) de France métropolitaine sont des espèces fréquemment présentes en forêt. Parmi cette faune, 38 espèces de mammifères, 55 espèces d'oiseaux nicheurs et 3 espèces d'amphibiens sont strictement forestières<sup>54</sup>

## Biodiversité génétique

Une autre composante de la biodiversité en forêt est la diversité génétique, diversité liée à la différence entre les individus d'une même espèce. **Cette diversité joue un rôle primordial dans l'évolution des essences forestières** : elle est le socle de l'évolution des arbres et donc des forêts depuis des millénaires, en réaction aux changements et aux conditions biotiques et abiotiques de leur environnement, accumulant ainsi un stock unique et irremplaçable de ressources génétiques forestières. **C'est grâce à la variabilité génétique qui existe entre les individus que les essences forestières sont capables de s'adapter à de nouvelles conditions climatiques**<sup>59</sup>. En outre, en tant qu'espèces ligneuses longévives (espèces ayant une longue durée de vie et dont la stratégie de reproduction est basée sur le long terme), les arbres confèrent à la forêt une diversité génétique plus importante que d'autres formes de vies. Comparativement, la diversité génétique moyenne des espèces ligneuses est respectivement 15 %, 42 % et 55 % plus élevée que celle des espèces an-

nelles, des herbacées pérennes et des espèces ligneuses qui ont une durée de vie courte<sup>60</sup>.

La diversité génétique peut être influencée par quatre facteurs d'évolution des ressources génétiques : la mutation, la dérive génétique, les flux de gènes et la sélection. Excepté la mutation, ces facteurs peuvent être influencés par les hommes, qui ont alors un rôle à jouer dans la diversité génétique, notamment sur celle des arbres, qui sont des espèces peu manipulées. Par exemple, le choix du nombre de reproducteurs peut influencer la dérive génétique (évolution des structures génétiques d'une population causée par des phénomènes aléatoires). De même, les flux de gènes (les échanges d'allèles entre différentes populations) peuvent être influés par les plantations et la gestion des pollinisateurs et des agents de dispersion des graines (renard, belette, rongeurs, etc.).



Test de variabilité génétique en forêt de Sillegny ; décalage phénologique entre deux populations © Alexis Ducouso

Le maintien de la diversité génétique au sein de l'ensemble des espèces végétales et animales forestières, et donc d'un suffisamment grand nombre d'individus, est la condition *sine qua non* au maintien de capacités d'adaptation à des conditions environnementales changeantes dont nous ne savons encore rien aujourd'hui. ■

# Gestion et conservation de la biodiversité en forêt



• 21 •

Nichoirs © Christophe Bouget

## Que protéger et comment conserver la biodiversité ?

Si l'objectif du développement est la prospérité économique et sociale, celui de la conservation est le maintien de la capacité de la Terre d'assurer aussi bien le développement durable de l'humanité que la pérennité de toute vie. Le développement et la conservation nous sont aussi nécessaires l'un que l'autre pour survivre et pour assumer notre responsabilité de garants des ressources naturelles pour les générations à venir<sup>61</sup>.

La forêt abrite une grande variété d'habitats et d'espèces de faune et de flore, mais est également le lieu d'expression d'une forte variabilité génétique au sein des espèces forestières.

Historiquement la conservation de la nature se focalisait uniquement sur les espèces emblématiques et menacées d'extinction et qu'il fallait donc protéger

d'urgence. La protection de leur habitat n'a été intégrée à la conservation de la nature qu'à partir de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. La conservation de la biodiversité était alors le reflet d'une volonté de protéger les espèces et les espaces vulnérables en écho à une vision morale, éthique et esthétique du lien entre l'homme et la nature. En effet, la préservation de la biodiversité peut être motivée par des valeurs éthiques, de respect de la vie sous toutes ses formes, et/ou de protection du plus faible (espèces vulnérables) ainsi que par des valeurs culturelles, spirituelles et patrimoniales associées aux espèces et aux paysages (notion de patrimoine naturel). On parle alors de valeur intrinsèque de la biodiversité. Cette vision peut être reliée à la figure de John Muir (1838-1914), qui soutenait que la nature mérite d'exister pour elle-même, indépendamment de son utilité pour les humains.

|| Environ 2/3 des espèces associées aux arbres ne sont présents qu'après l'âge d'exploitabilité, notamment dans les microhabitats liés à la sénescence

**La conservation de la biodiversité ne peut cependant pas se faire en se focalisant uniquement sur une ou plusieurs « espèces-cibles », sans prendre en compte le fonctionnement de l'écosystème entier.** Ainsi, auparavant lorsque l'on voulait protéger une espèce herbivore par exemple, le nombre de prédateurs était réduit. Ceci a eu souvent un effet imprévu car l'espèce protégée s'est mise à avoir une explosion démographique entraînant un surpâturage qui provoque alors un écroulement durable des populations.

Les espèces interagissant entre elles et avec leur milieu, une vision plus holistique de l'environnement est nécessaire. La forêt est un écosystème complexe, dont le fonctionnement est régi par des interactions entre de nombreux organismes vivants, dont la présence est indispensable. La vision actuelle de protection de la nature intègre désormais les interactions et le fonctionnement des communautés d'espèces, des groupes fonctionnels et des écosystèmes.

Ainsi la conservation de la nature doit permettre de gérer durablement toutes les ressources naturelles. Pour cela, il est indispensable d'intégrer toutes les composantes nécessaires au bon fonctionnement des écosystèmes: les espèces, leur milieu mais aussi les interactions entre les espèces et leurs capacités de déplacement.



Protection d'une fourmilière © Alexis Ducouso

A cette volonté de protection de la nature pour sa valeur intrinsèque, s'est ajouté récemment de nouveaux arguments, issus d'une vision plus anthropocentrée et utilitariste de l'environnement. Ainsi, Gifford Pinchot (1865-1946) prônait la conservation des forêts avec une gestion pragmatique, pour l'utilisation humaine. La forêt et la biodiversité qui la constitue permettent en effet de fournir des services écosystémiques, qui sont les bénéfices que l'Homme peut tirer des processus biologiques. Cette notion de service écosystémique met en valeur l'utilité de la nature pour l'Homme et sa dépendance

vis-à-vis du fonctionnement des écosystèmes.

Ces services écosystémiques se répartissent en 4 catégories (figure 6) :

- › les services de support : à la base de l'ensemble des services car ils permettent le maintien du fonctionnement de l'écosystème. La forêt joue par exemple un rôle fondamental dans le cycle des nutriments, et dans la formation et le maintien des sols.
- › les services d'approvisionnement correspondent à la production de biens, tels que le bois d'œuvre, le bois-énergie,

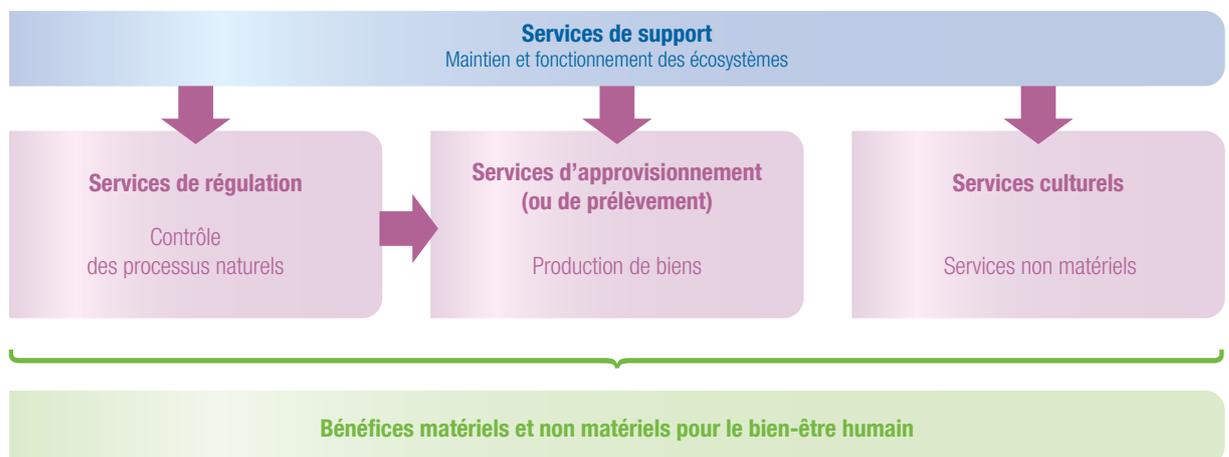


Figure 6 : Classification fonctionnelle des services écologiques (UICN France (2012). Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France – volume 1 : contexte et enjeux. Paris, France.)

mais également d'autres produits non ligneux comme les ressources alimentaires, les produits textiles, etc.

- › les services de régulation sont responsables du contrôle des processus naturels. Les forêts sont entre autres des acteurs dans la régulation de l'érosion, du climat global et local et de la qualité de l'eau et de l'air.
- › les services culturels sont des services non matériels, obtenus par exemple à travers l'enrichissement spirituel, scientifique, artistique et les loisirs.

### Une forêt plutôt préservée mais qui subit des pressions

**Les 5 principales pressions pesant sur la biodiversité sont la perte et la détérioration des habitats** (du fait de l'urbanisation, de l'aménagement du territoire, des pratiques agricoles et sylvicoles, etc.), **le réchauffement climatique, la pollution, la surexploitation des ressources et les espèces exotiques envahissantes**. La biodiversité forestière est affectée par ces différentes pressions. Certains éléments de la situation forestière sont a priori favorables à la biodiversité, tandis que d'autres seraient a priori défavorables.

Les éléments a priori favorables incluent l'expansion de la forêt (forte augmentation de la surface forestière depuis la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle), une forêt où les essences résineuses et exotiques

ne sont pas majoritaires (92 % des peuplements ont une essence principale indigène), des peuplements relativement mélangés (une moyenne de 4,7 d'essences recensables) et une régénération naturelle plus développée (71 % de la surface régénérée) que celle artificielle<sup>62, 63</sup>.

Les éléments a priori défavorables à la biodiversité seraient une forêt plus artificielle (les plantations représentent à l'heure actuelle 12 % de la surface forestière), mais avec une surface de forêts « non perturbées » depuis 50 ans estimée à seulement 30 000 ha (évaluation délicate qui n'a pu être mise à jour). De même, les forêts métropolitaines ont une faible proportion bénéficiant d'une protection forte de la biodiversité conformément aux recommandations d'inventaire de la Conférence Ministérielle pour la Protection des Forêts en Europe : 1,3 % de la surface boisée<sup>62, 63</sup>.

En France métropolitaine, les forêts ne sont pas épargnées par le déclin général des espèces et de leur diversité génétique. En effet, 7 % des mammifères et amphibiens forestiers, 9 % des reptiles et 16 % des oiseaux forestiers nicheurs sont menacés<sup>54</sup>, d'après les listes rouges réalisées selon les critères de l'UICN de 2008 et 2009. Pour les organismes saproxyliques, il est estimé au niveau européen que 20 à 50 % de ces espèces sont menacées d'extinction<sup>54</sup>. ■

**En France métropolitaine, les forêts ne sont pas épargnées par le déclin général des espèces et de leur diversité génétique**

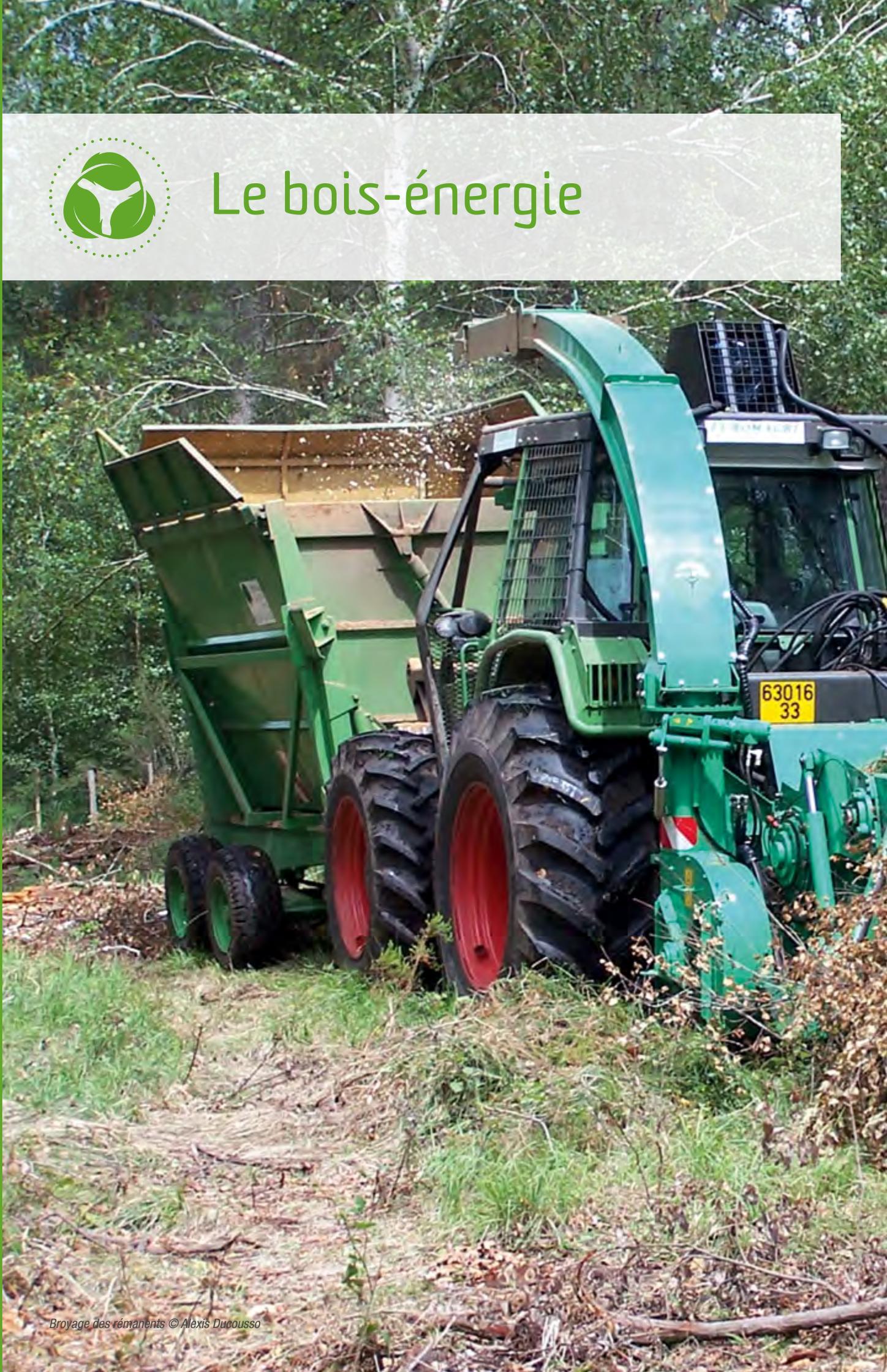


Tempête Klaus © Alexis Ducouso



# Le bois-énergie

• 24 •





# Vision globale de la filière



Vision globale de la filière © forestenergy.org

■ Pour mieux comprendre comment le développement du bois-énergie peut affecter la biodiversité forestière, la filière

et les différentes techniques utilisées pour obtenir du bois-énergie seront tout d'abord décrites.

La filière forêt-bois comprend l'ensemble des activités et acteurs de la production et de la transformation du bois et des

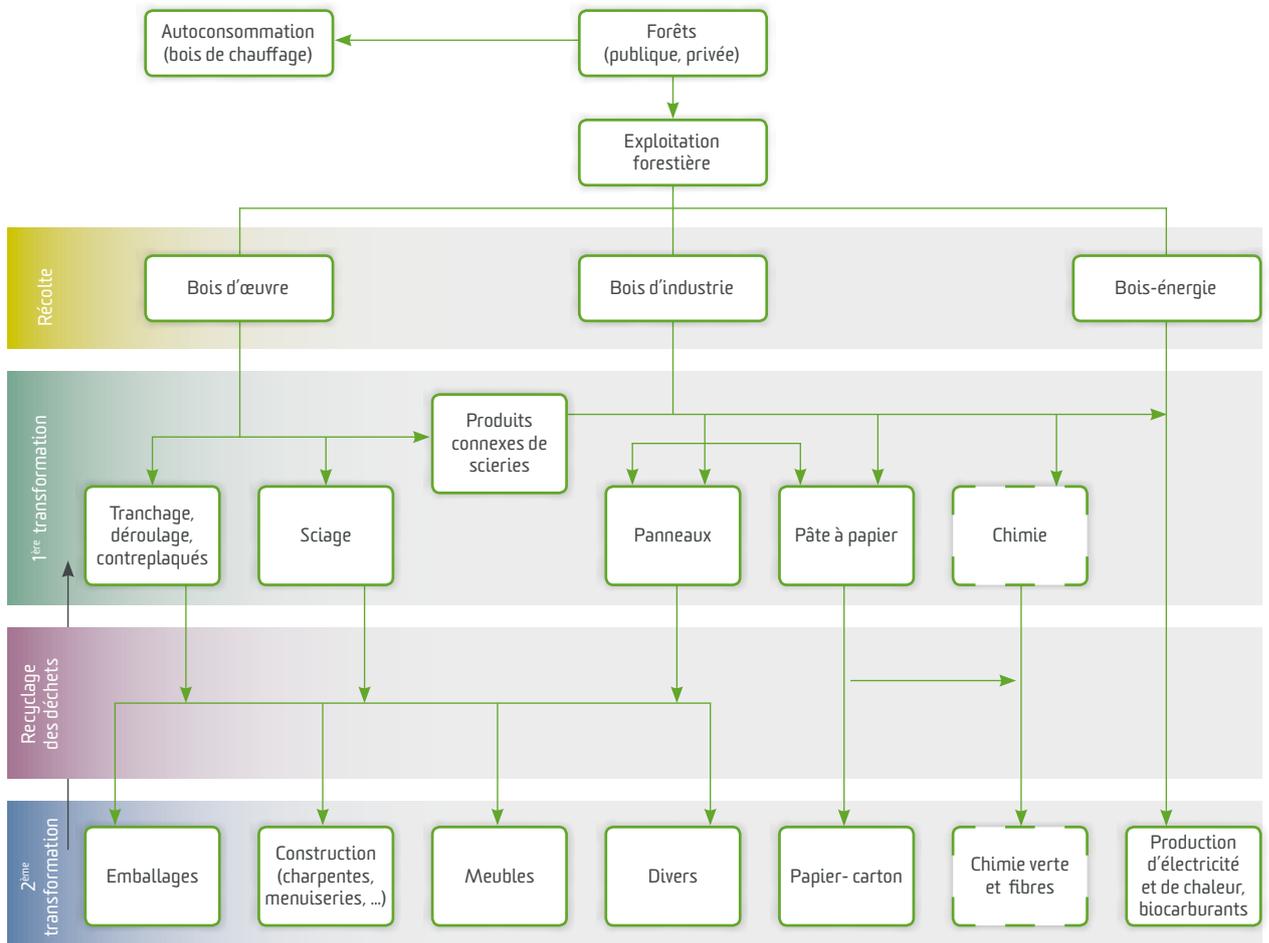


Figure 7 : Schéma de la filière forêt-bois (MAAPRAT, Agreste Forêt - Bois Mémento, 2012)

produits du bois. On distingue trois principaux usages du bois (figure 7) :

- › Le bois d'œuvre (BO) lié à la construction, l'habitat, l'ameublement et l'emballage ;
- › Le bois industrie ou de trituration (BI) : pâtes à papier (industrie papetière) et panneaux pouvant servir à l'ameublement et la menuiserie<sup>64</sup> ;
- › Le bois-énergie (BE) existe sous différentes formes qui inclut des combustibles issus de :
  - la forêt : bois-bûche, plaquette forestière (déchetage de petits arbres, rémanents et souches)
  - l'industrie (granulés, écorces, sciures, plaquettes industrielles, briquettes/buchettes)
  - la filière déchets (broyats de déchet industriel banal ou bois de rebut : caeots, palettes, etc.)

La consommation de bois-énergie en France serait autour de 40 Mm<sup>3</sup>/an dont 26 Mm<sup>3</sup> prélevés en forêt<sup>65</sup> (bûches et plaquettes forestières) et 15 Mm<sup>3</sup> issus de sous-produits de l'industrie du bois,

de la filière des déchets et d'exploitation rurale<sup>66</sup>. La consommation primaire (en Mtep) de bois-énergie concerne d'abord le secteur domestique, avec une consommation de 33,8 Mm<sup>3</sup> de bois total en 2012<sup>63</sup>, puis le secteur industriel et enfin le secteur tertiaire et collectif<sup>67</sup>.

La biomasse est le principal contributeur prévu pour la chaleur d'origine renouvelable à horizon 2020, dont une partie viendrait de la forêt. Le volume de bois sur pied de la forêt est de 2,5 milliards m<sup>3</sup>. La production biologique annuelle s'élève à 89,3 Mm<sup>3</sup> en moyenne sur la période 2003-2011, tandis que le volume annuel des prélèvements s'élève à 42,3 Mm<sup>3</sup> ( $\pm 2,7$  Mm<sup>3</sup>) en moyenne sur les années 2005-2011<sup>68</sup>, donnant un taux de prélèvement moyen autour de 47 % pour les trois filières.

Ces filières sont fortement liées les unes aux autres. Le terme « bois lié » englobe les bois d'industrie et les bois d'énergie (BIBE) qui dépendent de la récolte du bois d'œuvre<sup>69,70</sup>. ■

Les trois principaux usages du bois sont le bois d'œuvre, le bois industrie ou de trituration et le bois-énergie

## La ressource disponible



Forêt de conifères © Marie Monmousseau

■ Dans les études évaluant la disponibilité de bois forestiers pour l'énergie, la biomasse récoltable en forêt est divisée selon différents compartiments de l'arbre nommés en fonction de leur valorisation potentielle et définis par des caracté-

ristiques dimensionnelles (diamètre) et physiques (qualité du bois). Ces compartiments (figure 8) sont les suivants<sup>69</sup> :

- › l'usage potentiel « Bois d'Œuvre » (BO) qui est l'ensemble de la biomasse dont la qualité permet un usage en bois d'œuvre.

- › l'usage potentiel « **Bois Industrie et Bois Energie** » (BIBE) qui inclut la biomasse de la tige dans les bois supérieurs à 7cm de diamètre non valorisable en bois d'œuvre et la biomasse des branches supérieures à 7cm de diamètre. Cette biomasse peut être valorisée sous des formes industrielles et énergétiques.
- › le compartiment des **Menus Bois** (MB) est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm et qui est potentiellement valorisable en énergie.

La récolte du bois-énergie forestier (BIBE et MB) dépend de la disponibilité de la ressource, mais également de contraintes de nature technique, environnementale, économique ou réglementaire. Par exemple, l'accessibilité à la ressource, la fertilité du site, les coûts de l'exploitation, les prix de revient et les sites protégés sont autant de facteurs pouvant moduler l'exploitation de la ressource théoriquement disponible. Enfin, il faut également prendre en compte la ressource déjà mobilisée pour connaître la disponibilité supplémentaire, qui serait celle potentiellement utilisable si une augmentation de la récolte de bois-énergie est mise en place.

Le Ministère de l'agriculture et l'ADEME ont commandité deux études nationales de disponibilité de bois forestiers pour l'énergie :

- › Une première étude a été menée par l'IFN et l'Irstea. L'exploitabilité a été évaluée en fonction de l'accessibilité, de la distance de débardage et de la nature de terrain. La disponibilité supplémentaire a été estimée à 28 Mm<sup>3</sup>/an de bois industrie et bois-énergie (BIBE) et, en prenant en compte la sensibilité des sols à l'exploitation, l'étude parvient à une disponibilité de 8 Mm<sup>3</sup>/an pour les menus bois (MB).
- › L'étude commanditée par l'ADEME, réalisée par IFN, Solagro et FCBA<sup>69</sup> s'est intéressée à l'ensemble des combustibles bois issus de la forêt, des peupleraies, des haies et d'autres ressources ligneuses (vignes, vergers, arbres urbains, souches forestières). La disponibilité supplémentaire a été estimée à 12 Mm<sup>3</sup>/an de BIBE et 7,3 Mm<sup>3</sup>/an de MB. La disponibilité additionnelle de BIBE se trouve pour l'essentiel en forêt (95 %). Les disponibilités supplémentaires se situent le



Figure 8 : Localisation des compartiments de biomasse dans l'arbre. (FCBA, IFN, Solagro, 2009)

long d'un axe allant de Midi-Pyrénées à la Lorraine en passant par la région Centre. A contrario, les régions PACA, Corse, Basse-Normandie et Nord-Pas-de-Calais ne semblent pas présenter de disponibilités supplémentaires.

**Mais ce volume reste théorique** dans la mesure où l'étude n'a pas pris en compte la dispersion des parcelles et le morcellement des propriétés, ni d'autres facteurs limitant (comme la faible rémunération qui peut décourager les propriétaires, ou encore l'attachement des propriétaires à la valeur patrimoniale de leur forêt plutôt qu'à sa valeur économique). Une autre limite à cette étude est le fait que les valeurs ont été obtenues avec les chiffres de l'IFN antérieurs à 2011 et devraient donc être revus puisque la méthode d'évalua-

tion de l'IFN a été modifiée. Une mise à jour des études nationales de 2009 est d'ailleurs prévue sous la forme d'une étude de disponibilité en bois d'origine forestière en France métropolitaine aux horizons 2020 et 2030 (projet en cours).

**La présente étude se concentre sur le bois-énergie venant de la forêt**, mais celui-ci peut également être issu de l'industrie et de la filière déchets, tel que décrit plus haut. A ces sources se rajoutent également les haies et les peupleraies, où se trouvent respectivement 4 % et 1 % de la disponibilité additionnelle de BIBE. Elles peuvent toutefois constituer des gisements d'intérêt au niveau local, en appoint et dans des circuits courts pour les peupliers<sup>70</sup>. ■

# Mécanismes de soutien à la demande de bois-énergie



Bryophyte sur tronc © Alexis Ducouso

■ Les mécanismes de soutien au bois-énergie diffèrent selon les utilisateurs.

Pour les particuliers, des crédits d'impôts sont proposés lors de l'achat d'un appareil à bois ou lors d'un remplacement par des équipements plus performants.

Pour les chaudières industrielles et collectives, différents programmes existent :

Début 2007, le programme « 1 000 chaufferies bois pour le milieu rural » a été lancé à l'initiative des communes forestières (FNCOFOR), en accord avec l'ADEME. Le programme a prévu l'assistance aux maîtres d'ouvrage pour permettre l'installation de 1 000 nouvelles chaufferies bois d'ici à 2012, et a développé un outil particulier « le plan d'approvisionnement territorial » permettant d'évaluer la potentialité de la récolte possible en particulier en forêt publique.

En 2009, le Fonds Chaleur a été créé pour aider financièrement au développement

de la production de chaleur à partir des énergies renouvelables. Dans le cadre de ce fonds, l'ADEME lance les appels à projets intitulés « BCIAT » (Biomasse Chaleur Industrie, Agriculture et Tertiaire), au nombre de 6 à ce jour entre 2009 et 2014. Pour les installations inférieures à 1Ktep et par conséquent non-éligibles aux appels à projets BCIAT, le Fonds Chaleur a assuré le financement des installations supérieures à 100 tep/an.

Afin de développer des installations produisant conjointement de l'électricité et de la chaleur (cogénération), des programmes pluriannuels électricité/cogénération ont été mis en place pour la période 2007-2015. Ils sont portés par le Ministère en charge de l'Ecologie, à travers la Commission de régulation de l'énergie « CRE ». Plusieurs appels d'offres CRE pour les cogénérations biomasse ont ainsi été lancés entre 2003 et 2011. ■

“ La présente étude se concentre sur le bois-énergie venant de la forêt, mais celui-ci peut également être issu de l'industrie et de la filière déchets



# Interventions spécifiques à la production de bois-énergie

• 30 •



Dans le cadre de cette étude nationale, deux catégories d'interventions liées au bois-énergie ont été distinguées. La première intègre les opérations intégrées ou « ajoutées » à une sylviculture orientée bois d'œuvre. La deuxième prend en compte les itinéraires adaptés à la production de bois-énergie (dédiés en partie ou entièrement).

Plus globalement, **les itinéraires sylvicoles peuvent différer entre eux, en fonction de différents paramètres**, tels que par les espèces plantées, les objectifs, les travaux de préparation du terrain, le type de régénération, la densité initiale du peuplement, les travaux d'entretien et/ou la durée de rotation. Quelques exemples sont présentés dans le tableau 2, avec des estimations (de différentes sources<sup>71, 72, 73, 74, 75</sup>) de la durée de rotation, les densités initiales et finales du peuplement de différentes espèces, qui peuvent dépendre des stations. Le hêtre et les chênes sessile et pédonculé sont notamment utilisés pour le bois d'œuvre, mais également pour le bois d'industrie et/ou le bois de chauffage ; le sapin pectiné, le douglas et le pin maritime peuvent servir pour du bois d'œuvre ou du bois d'industrie, le peuplier et l'eucalyptus sont cultivés pour faire respectivement du bois d'œuvre et du bois d'industrie, ou alors du bois-énergie (en faible proportion pour l'instant). A noter que les estimations de densité initiale correspondent à des régénérations artificielles sous forme de plantation, et non à une régénération naturelle.

Espèce	Révolution (ans)	Densité initiale de plantation (plants/ha)	Densité finale (arbres/ha)
Chêne sessile	180 - 250 <sup>1</sup>	1100 - 2500 <sup>3</sup>	80 - 100 <sup>1</sup>
Chêne pédonculé	90 - 110 <sup>1</sup>	1100 - 1500 <sup>3</sup>	60 - 80 <sup>1</sup>
Hêtre	80 - 150 <sup>1</sup>	1600 <sup>3</sup> - 5000	60 - 80 <sup>3</sup>
Sapin pectiné	80 - 120 <sup>1</sup>	1600 - 2200 <sup>3</sup>	250 - 300 <sup>3</sup>
Douglas	40 - 80 <sup>1</sup>	800 - 1100 <sup>1</sup>	200 - 250 <sup>1</sup>
Pin maritime	25 - 80 <sup>1</sup>	1250 - 1600 <sup>1</sup>	300 <sup>4</sup>
Peuplier	13/15 <sup>2</sup> - 20 <sup>1</sup>	156 - 205 <sup>1</sup>	156 - 205
<i>biomasse</i>	5 - 10 <sup>1</sup>	jusqu'à 3000 <sup>1</sup>	jusqu'à 3000
Eucalyptus	10 - 12 <sup>5</sup>	1250 <sup>5</sup>	1250
<i>en TTCR</i>	3 ou 7 <sup>5</sup>	2500 ou 5000 <sup>5</sup>	2500 ou 5000

Tableau 2 : Estimations de la durée de révolution, de la densité initiale de plantation et de la densité de fin de révolution de différentes espèces. (<sup>1</sup>Guyon, <sup>2</sup>Bertholet, <sup>3</sup>CRPF Lorraine Alsace, <sup>4</sup>ONF, <sup>5</sup>Fondation TUCK et al.)

# Bois-énergie lié à la sylviculture orientée bois d'œuvre



Stockage de bois d'œuvre © Alexis Ducouso

■ Traditionnellement, seul le tronc (bille et surbille) est destiné à la filière bois d'œuvre, comme indiqué dans la figure 8. Le reste des bois de diamètre supérieur à 7 cm est récolté pour un autre usage, qui peut être industriel ou énergétique (bois bûche notamment). Cette pratique est bien implantée, cependant la concurrence entre ces deux usages pourrait s'accroître, avec l'augmentation possible du prix du bois-énergie, ou au contraire s'affaiblir si la demande pour le bois industrie baisse.

## Les rémanents

Les rémanents, définis comme l'ensemble des éléments qui restent sur le parterre de coupe après exploitation, représentent la part de la production qui n'entre pas en conflit d'usage avec l'industrie ou le bois d'œuvre. Au sens strict, il s'agit principalement des menus bois (bois inférieur à 7 cm de diamètre), mais également des branches plus larges non valorisées, des chutes et rebus divers, voire des petits arbres de diamètre non marchand cou-

pés pour raison sylvicole. Le sens élargi associe les souches et le feuillage (susceptibles d'être exportés dans certaines conditions)<sup>76</sup>.

Par le passé, les rémanents forestiers étaient ramassés abondamment par les particuliers en tant que ressource énergétique, mais la pratique s'est fortement réduite, avec l'arrivée d'autres sources d'énergies, bien que ponctuellement un usage intense puisse subsister<sup>76</sup>. Un regain d'intérêt pour leur mobilisation apparaît depuis quelques années avec le développement des énergies renouvelables, dont le bois-énergie.

La récolte des rémanents au sens strict (menus bois et autres éléments au sol) peut être faite de deux façons : en vrac ou par fagotage. L'exploitation en elle-même diffère avec la mise en place d'un abatage directionnel qui permet de regrouper au mieux les troncs et branches qui seront mobilisées<sup>77</sup>. Les autres chaînons de la récolte sont le débardage (transport du bois en forêt, en général jusqu'au point de

|| Traditionnellement, seul le tronc (bille et surbille) est destiné à la filière bois d'œuvre



Figure 9 : Fagotage des rémanents. (Atlanbois, 2011)

chargement du camion<sup>78</sup>), le déchetage (broyage) et le transport, qui peuvent être réalisés dans des ordres différents. Ainsi, il est possible de broyer sur coupe et d'ensuite débarder la plaquette.

La récolte en vrac concerne notamment les fractions de bois les plus longues, qui sont mises en tas avec la possibilité de les laisser ressuyer, opération visant à diminuer la quantité d'eau contenue dans le bois<sup>79</sup>. Ce ressuyage peut se faire sur la parcelle, permettant de limiter l'exportation des minéraux avec la chute d'une partie des feuilles ou aiguilles, écorces et brindilles<sup>79</sup>, ou alors en bord de route, et ce pendant quelques mois (4 à 8 mois<sup>79</sup>) avant que les bois ne soient broyés en plaquette puis évacués. Il y a également la possibilité que les rémanents soient transformés en plaquette puis mis à sécher en tas. Pour le fagotage, une machine spécifique est nécessaire pour créer sur coupe des fagots (faisceaux de branchages), compactant ainsi les rémanents, ce qui diminue leur volume et facilite leur exploitation (figure 8)<sup>79</sup>. Le déchetage peut se faire après le fagotage, le débardage et le transport<sup>79</sup>. Les branches doivent

être récoltés rapidement après la coupe (immédiatement ou dans les 3 mois), de façon à ce que les branches ne soient pas trop sèches pour faciliter le compactage et le « ficelage » du fagot ; il faut ensuite évacuer les fagots des parcelles dans les 6 mois<sup>80</sup>. D'après des observations sur des chantiers d'exploitation en France, les pertes d'exploitation des rémanents serait entre 40-60 % pour les branches de résineux et 50-70 % pour les feuillus. Pour les souches de résineux, le taux de rendement de récolte serait entre 50-70 %<sup>76</sup>.

La récolte des souches, qui sont difficiles à traiter en raison de la présence conséquente de terre, sable et de cailloux, est relativement rare en France, excepté dans la région Aquitaine. Elle peut se faire dans des situations de défrichage pour la création d'une route ou d'un chemin de fer, dans les parcs et jardins et en cas de tempête. Par ailleurs, des chaudières spécifiques (à lit fluidisé) sont nécessaires pour limiter le processus de vitrification<sup>81</sup> : la terre et surtout le sable présents dans les souches se déposent dans le foyer de la chaudière, fondent et se solidifient, créant des problèmes de colmatage.



Broyage de rémanents © Marie Monmousseau

Dans les Landes de Gascogne, l'extraction des souches intervient après la coupe rase des plantations de pins. Le phénomène de récolte des souches s'est accéléré depuis la tempête Klaus de 2009<sup>81</sup>. L'extraction est facilitée par la présence de sols sableux et par la mise en place d'outils spécifiques (figure 10), qui prélèvent et fragmentent la souche, après avoir effectué un détourage<sup>82</sup>. Le trou est ensuite rebouché et les morceaux de souche sont laissés en tas ou en cordons<sup>83</sup> sur la parcelle plusieurs mois (aux alentours d'un an<sup>84</sup>) pour un ressuyage et un dessablage naturels. D'un point de vue économique, l'extraction des souches offrirait un revenu et permettrait également la réduction des coûts de reboisement, en facilitant certaines étapes, comme la plantation<sup>85</sup>.



Figure 10 : Pelle équipée d'un outil d'extraction de souches © M. Monmousseau

Une autre technique permettant d'extraire une partie de la souche est le carottage, qui consiste à forer la souche avec une scie cloche (figure 11) pour obtenir le cœur de souche, tout en laissant les racines dans le sol. Néanmoins cette technique, utilisée en Italie, est encore expérimentale en France<sup>86</sup>.



Figure 11 : Pelle équipée de l'outil d'extraction de cœurs de souches (Forêt Logistique Conseil)

## Les petits bois inutilisés par l'industrie

La valorisation du bois en énergie, en apportant une ressource financière supplémentaire, permettrait peut-être une augmentation de la rentabilité de certaines opérations d'amélioration d'un peuplement d'une sylviculture classique. Ces opérations pourraient alors se généraliser et éventuellement être réalisées de façon plus précoce.

Le **cloisonnement** est une ouverture plus ou moins large dans les peuplements permettant de créer des voies de circulation, l'organisation des coupes et travaux ainsi que la sortie des produits<sup>87</sup>. Il existe des cloisonnements sylvicoles, facilitant la pénétration dans le peuplement lors de travaux de dégagements manuels et d'entretiens de jeunes peuplements, et des cloisonnements d'exploitation, qui canalisent les engins lors des coupes de bois, permettant de limiter le tassement du sol<sup>88</sup>. En fonction de la faisabilité technique et de la rentabilité, il serait peut-être possible de récolter les semis habituellement broyés au sol lors de la création des cloisonnements sylvicoles pour les valoriser en énergie. Si les cloisonnements d'exploitation ont besoin d'être créés, ils pourraient peut-être être réalisés plus tôt. Cependant la quantité de biomasse liée à ces opérations est très faible.

Le **dépressage** est une éclaircie de jeunes semis, plants et/ou rejets en densité trop forte sans récupération d'aucun produit commercialisable<sup>89</sup>, qui élimine les essences non dédiées et favorise la croissance en diamètre du tronc et le développement du houppier<sup>90</sup>. Le dépressage est alors un investissement, qui n'est pas forcément mis en place par tous les gestionnaires. D'ailleurs il n'est pas systématiquement réalisé, mais effectué dans des cas bien précis, lorsque son utilité a été diagnostiquée<sup>90</sup>. Accessoirement, les produits de cette opération pouvaient être laissés sur place. Avec la valorisation énergétique, un débouché apparaît pour les produits du dépressage, qui pourrait alors devenir une opération blanche pour le propriétaire (coût zéro) et être réalisée sur plus de parcelles forestières. Cependant le volume de biomasse associé à ces opérations est faible et la diminution de la matière minérale du sol liée à ces opérations les rend extrêmement peu ren-

tables. Une augmentation de la densité en plantation pour forcer un dépressage pourrait peut-être se développer. En revanche, avec ce débouché bois-énergie, le terme dépressage ne conviendrait plus, les arbres étant désormais commercialisables. Ce serait alors une sorte « de pré-éclaircie initiale » ; une éclaircie étant une coupe généralement sélective réduisant le nombre d'arbres et portant sur les produits marchands<sup>89</sup>. Les **éclaircies** ayant déjà des débouchés, la valorisation énergétique pourrait se rajouter aux filières bois d'œuvre et bois d'industrie, rentrant alors en concurrence avec ces filières, et plus particulièrement avec le bois industrie (en fonction du prix du bois-énergie).

## Bois issus de peuplements dépérissant et/ou vieillissant

Les bois issus de peuplements dépérissant suite à des événements climatiques (tempête, incendie, gel) ou des problèmes phytosanitaires (ex. scolytes) ne sont pas forcément valorisables dans les filières traditionnelles (bois d'œuvre et bois d'industrie). Certains peuplements, comme les taillis, peuvent également être vieillissants et avoir été sous-exploités pendant une certaine période. Le débouché bois-énergie pourrait apporter l'opportunité de valoriser ces sites et de les remettre en production, amenant alors une augmentation probable des coupes rases<sup>91</sup> de ces peuplements. Cette source de bois-énergie est en forte hausse.



Vieille forêt © Alexis Ducousso

Finalement la filière bois-énergie apporterait également la possibilité de sortir des arbres morts, en fonction de la faisabilité technique, liée à l'état de dégradation du bois. ■

Les bois issus de peuplements dépérissant suite à des événements climatiques ou des problèmes phytosanitaires ne sont pas forcément valorisables dans les filières traditionnelles

# Itinéraires spécifiques pour la production de bois-énergie



*Pinus pinaster* © Alexis Ducouso

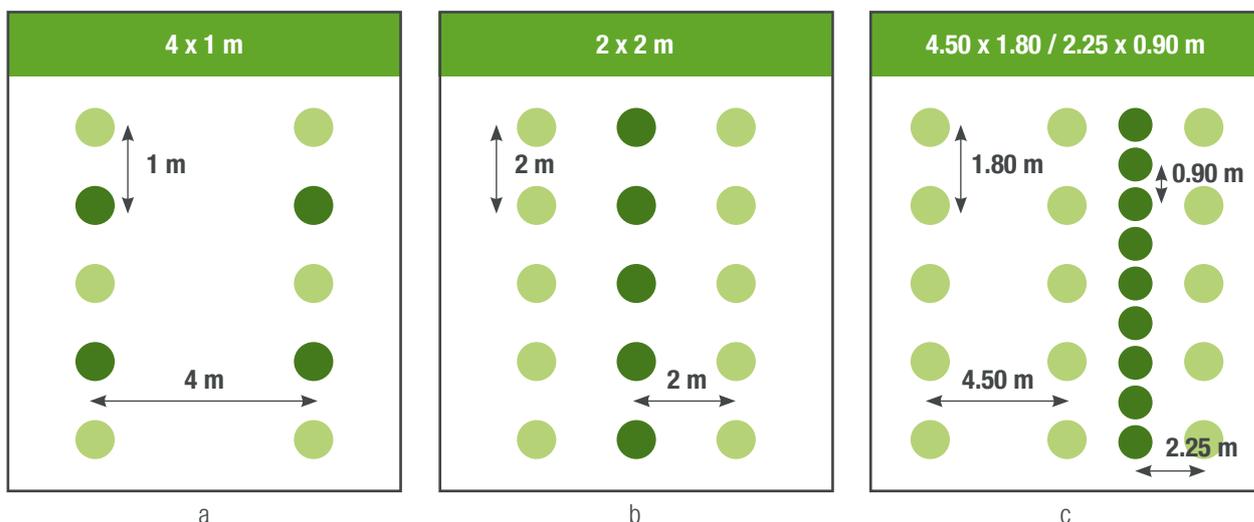
■ Il existe différents itinéraires sylvicoles dédiés, entièrement ou partiellement, à la production de bois-énergie. Ces itinéraires se distinguent par une intensification de la sylviculture. Un nouveau manuel paru en octobre 2014 retrace l'ensemble des principaux itinéraires de production de chantiers de plaquettes forestières<sup>92</sup>.

## Itinéraire semi-dédié

Un itinéraire sylvicole semi-dédié repose sur un peuplement à plus forte densité dont la partie constituée par les arbres surnuméraires est utilisée lors d'un dépressage pour produire du bois-énergie, tandis que le reste du peuplement suivra

un itinéraire classique, avec un objectif de production de bois similaire à un itinéraire traditionnel<sup>93</sup>. Pour avoir une densité initiale doublée lors du reboisement plusieurs options existent : le doublement du nombre de pieds par ligne de plantation (figure 12a) ou du nombre de lignes (figure 12bc). Dans le premier cas

Figure 12 : Exemples de dispositions de peuplements semi-dédiés (CAFSA, 2008)



les arbres des deux filières sont présents dans une même rangée, et dans le deuxième cas les lignes rajoutées sont récoltées au bout de 8-9 ans (dans le cadre du pin maritime).

### Itinéraire dédié

Un itinéraire dédié comprend un peuplement entièrement consacré au bois-énergie. Celui-ci serait plus dense et aurait une rotation plus courte qu'un itinéraire classique. Par définition, la totalité de la biomasse (sauf le feuillage) est récoltée dans ces itinéraires.

Les itinéraires dédiés, plus intensifs, sont les taillis à courte et à très courte rotation (TCR et TTCR). Ce sont des cultures intensives de peuplements très denses d'espèces à croissance rapide et rejetant de souche (ex. robinier, peuplier, saule et eucalyptus), qui sont récoltés à des intervalles fréquents. Pour les TCR, la densité tourne autour de 1 000 et 4 000 arbres/ha et les rotations durent de 7 à 8 ans. Les TTCR ont une densité plus forte (10 000 à 15 000 arbres/ha), et la durée entre deux récoltes varie entre 2 ou 3 ans, avec une durée de vie moyenne

aux alentours de 25 ans<sup>94</sup>. Ces cultures impliquent généralement l'utilisation d'un matériel génétique performant et de méthodes culturales intensives.

Ces itinéraires semblent pour l'instant peu pratiqués, bien que des modalités intermédiaires entre les TCR et la futaie intensive soient expérimentées sur Pin maritime en Aquitaine<sup>95</sup>. Il s'agit de peuplements denses, récoltés à intervalles plus fréquents qu'en futaies classiques.

**D'après le projet RESOBIO<sup>96</sup>, les principales sources pour la production de plaquettes sont actuellement les premières éclaircies et les coupes finales de futaie (grosses branches). La mobilisation de (vieux) taillis et taillis-sous-futaie constitue une troisième source, actuellement en progression. Enfin, la part de menus bois est très faible (estimée par les producteurs de plaquettes au niveau national entre 5 et 10 % en volume). Cependant il convient de mettre en perspective ce volume de menus bois exportés en regard du menu bois maintenu sur place. ■**

**Un itinéraire sylvicole semi-dédié repose sur un peuplement à plus forte densité**





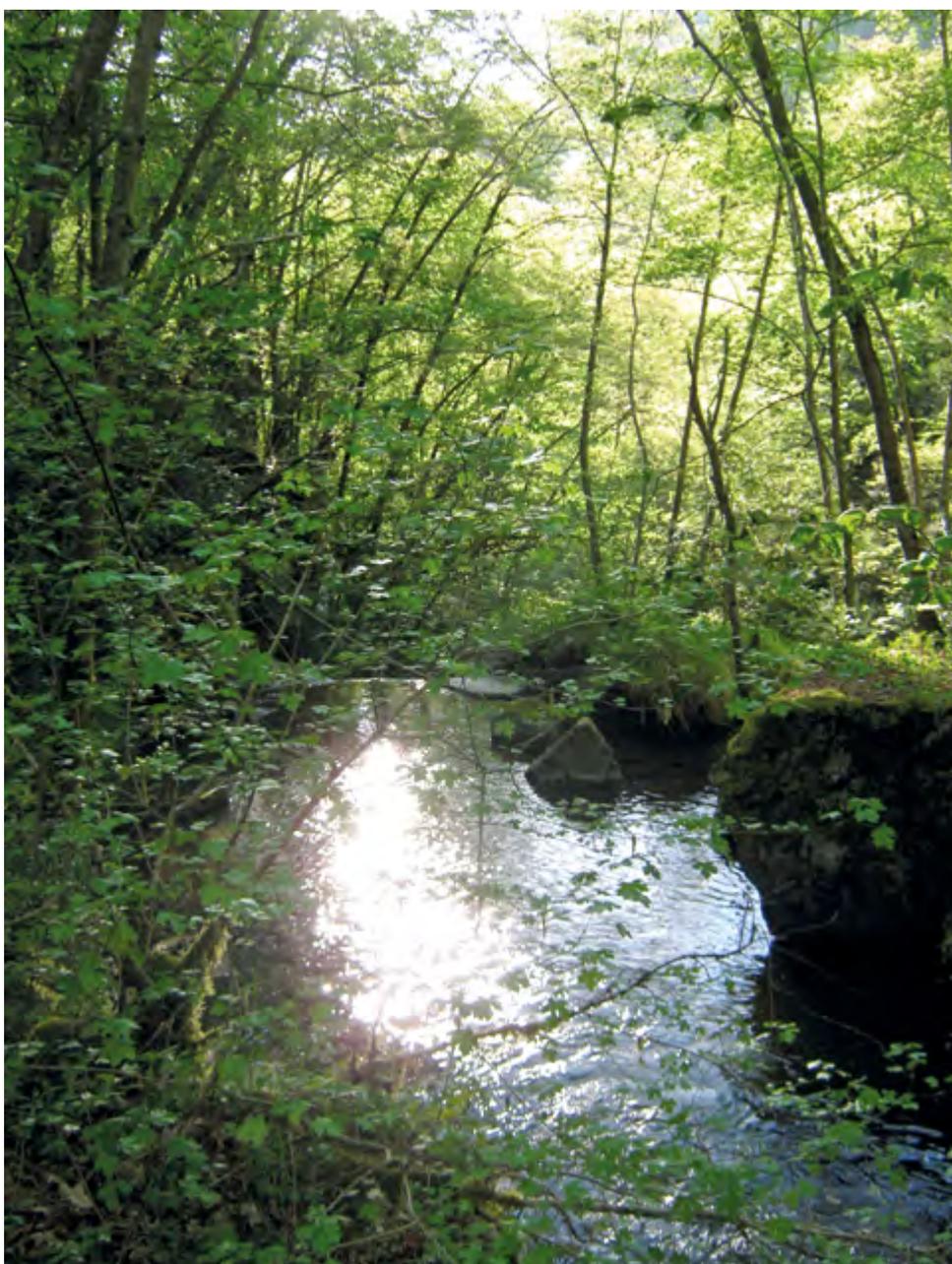
# Impacts potentiels sur la biodiversité



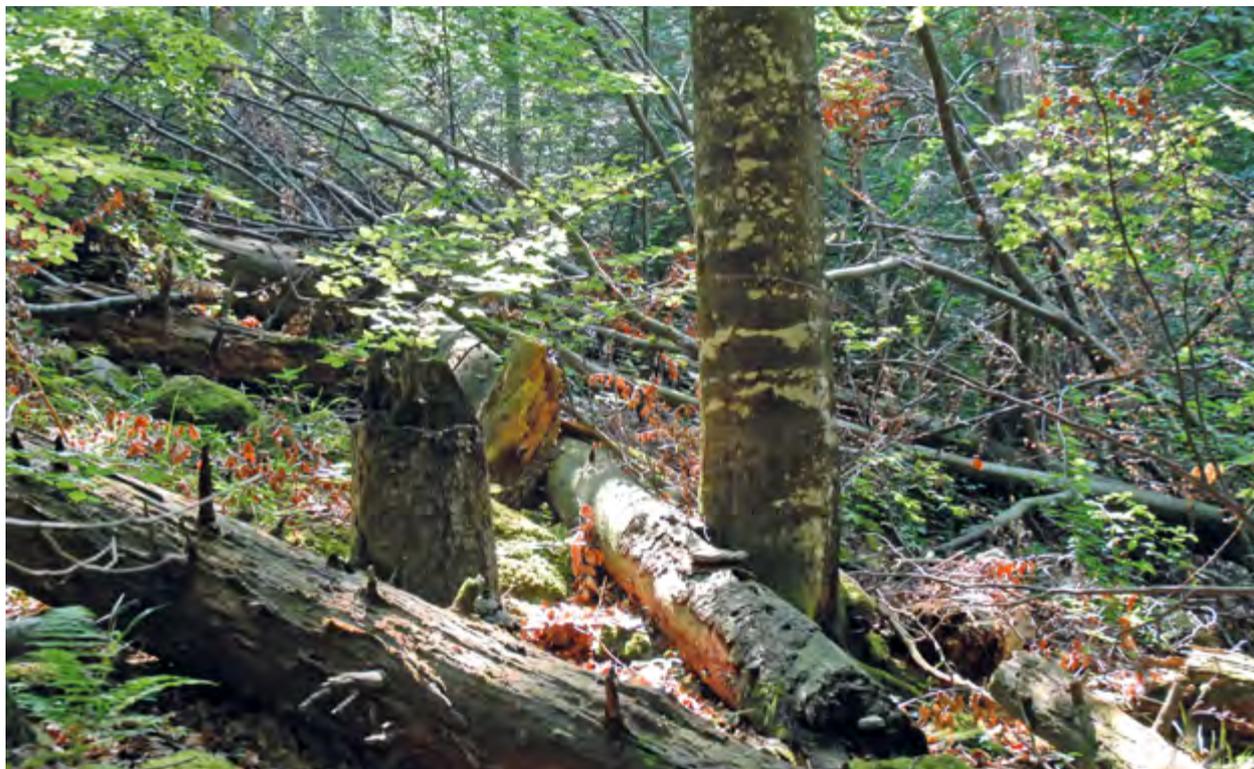
La seconde partie de cette étude vise à faire un état des lieux des impacts locaux potentiels (positifs et négatifs) du développement du bois-énergie sur la biodiversité des forêts de France métropolitaine. Ceux-ci seront répartis en quatre grandes catégories, représentant les impacts induits par les pratiques additionnelles liées à la production de bois-énergie par rapport à une sylviculture classique orientée vers le bois d'œuvre :

- › Spécificités des forêts non exploitées ;
- › Récolter plus : l'exportation supplémentaire de bois, matière organique et minéraux ;
- › Augmentation de la fréquence des interventions ;
- › Modifications de la structure et de la composition des peuplements ;

Dans chacune de ces catégories, les impacts seront déclinés pour chaque strate de la forêt (sol, strates herbacée, arbustive et arborée) puis à l'échelle de l'écosystème.



# Spécificités des forêts non exploitées



Hêtraie sapinière dinarique ; Rajhenavski © Alexis Ducouso

■ Cette catégorie d'impacts rend compte de l'exploitation de peuplements peu ou non exploités depuis une certaine période, de façon volontaire ou non, et qui seraient remis en production.

**La richesse des espèces animales et végétales est plus faible dans les forêts exploitées que dans les forêts non exploitées, bien que les résultats diffèrent pour certaines espèces<sup>97</sup>.** Ainsi, une étude récente menée par l'Irstea a conclu qu'en Europe la richesse spécifique des mousses, des lichens, des coléoptères saproxyliques et dans une moindre mesure des champignons est moins forte dans les forêts exploitées. Par contre, les espèces pionnières de plantes à fleurs et de fougères peuvent être favorisées par des coupes qui leur procurent de l'espace et du soleil. Les différents types de forêts non exploitées représentent un intérêt fort pour la biodiversité : par exemple, les taillis vieillissants, riches en gaules sèches et perches mortes sur pied, ont une haute valeur écologique. Les forêts de montagne non exploitées, aux nombreux microhabitats naturels favorables à la biodiversité, sont des refuges d'espèces boréo-alpines à forte valeur patrimoniale<sup>97</sup>.

Dans le cadre du développement du bois-énergie, certains peuplements d'âges et d'essences variés pourraient être remplacés par des peuplements plus homogènes avec des rotations plus courtes. Cette substitution induirait une modification de l'écosystème tout entier, si ce n'est son altération complète. Les peuplements non exploités présentent une biodiversité caractéristique, liée à l'absence d'exploitation. Leur exploitation pour le bois-énergie altèrera de manière importante cette biodiversité liée notamment aux vieux peuplements, à la présence de bois mort et de microhabitats. On sait également que la recolonisation par les organismes forestiers est plus lente que la restauration de la capacité d'accueil des peuplements<sup>98</sup>.

**La substitution d'habitat modifiera les conditions environnementales pour la végétation des strates herbacées et arbustives, influençant alors leur composition, de même que la faune associée.** Les composantes physico-chimiques et biologiques du sol en seront également affectées. Une perte de biodiversité spécifique à l'ancien peuplement pourrait ainsi avoir lieu. Certaines espèces pourront disperser et s'installer dans d'autres

|| Dans le cadre du développement du bois-énergie, certains peuplements d'âges et d'essences variés pourraient être remplacés par des peuplements plus homogènes avec des rotations plus courtes.

peuplements forestiers convenant à leurs exigences écologiques, mais l'installation d'espèces avec un faible pouvoir de dispersion ou de colonisation sera fortement impactée par la fragmentation du paysage.

Pour les peuplements les plus âgés, l'impact de l'exploitation est similaire à la régression des stades les plus âgés dû à un raccourcissement de la révolution, avec la perte des vieux et gros arbres et

des bois mort debout, et de la biodiversité associée. ■

## Exportation supplémentaire de bois, matière organique et minéraux



Rémanents prêts pour l'exportation © Alexis Ducouso

■ Par exportation, on entend ici l'action de sortir un élément de la forêt. Cela concerne le bois sous toutes ses formes (tronc, branches et racines) et, dans certains cas, le feuillage. Le bois est composé majoritairement de matière organique (matière fabriquée par les êtres vivants végétaux, animaux, ou micro-organismes) et également de matières minérales (corps inorganiques). La concentration en éléments exportables est variable selon les compartiments de l'arbre.

Dans une sylviculture classique, dédiée au bois d'œuvre, des prélèvements supplémentaires peuvent être réalisés dans le but de fournir du bois-énergie avec la mobilisation de nouveaux compartiments

comme les rémanents, les souches et des petits bois inutilisés par l'industrie.

L'impact de la récolte des rémanents sur le volume de bois mort est plus complexe qu'il ne semble au premier abord. En effet, bien qu'il paraisse logique que le bois mort diminue en volume avec l'exportation des rémanents, une partie des rémanents générée par les opérations de récolte finale n'est pas récoltée. Cette fraction se rajoute au compartiment préexistant, qui peut cependant subir des pertes liées au passage d'engins d'exploitation, notamment les morceaux en cours de décomposition<sup>97</sup>. Deux études, une estonienne et une américaine, ont établi des bilans de matière détaillés<sup>99, 100</sup>. Elles ont observé que les

volumes de bois mort au sol après récolte pouvaient être un peu plus faibles que ceux avant coupe ou plus importants, impliquant une continuité quantitative du substrat bois. **En revanche le profil du bois mort est susceptible d'être affecté par ces opérations avec un appauvrissement des débris grossiers qui sont majoritairement récoltés, et un enrichissement en débris fins<sup>97</sup>.**

Les impacts potentiels liés à une exportation supplémentaire peuvent également apparaître dans les itinéraires dédiés au bois-énergie avec la récolte d'arbres entiers, voire d'un plus grand nombre d'arbres et d'arbres plus jeunes (par rapport à une sylviculture bois d'œuvre).

## SOL

Le bois mort au sol constitue un habitat essentiel pour de nombreux micro-organismes, notamment fongiques et bactériens, de même qu'un habitat pour les organismes saprophytes et les cortèges ectomycorrhiziens dans les forêts matures. Il a également un rôle de rétention de l'humidité et d'accumulation d'éléments minéraux comme l'azote et le phosphore<sup>97</sup>, indispensables à toutes les formes de vie végétales de la forêt.

Plusieurs études dans des forêts boréales ont observé les impacts de l'exportation des rémanents sur la faune et flore du sol. Cette exportation supplémentaire joue notamment sur l'abondance des espèces, avec des **chutes d'abondance observées pour des collemboles, acariens, insectes prédateurs, diptères, mais aussi des communautés fongiques (saprophytes et symbiotiques), ainsi que la méso-faune du sol (macroarthropodes et enchytréides), dont 2 espèces de vers de terre épigés**<sup>97</sup>.

Dans une autre étude ce n'est pas une baisse de l'abondance mais **des changements de cortèges symbiotiques au sein des communautés ectomycorrhiziennes qui ont été observés**<sup>101</sup>. La localisation des rémanents joue un rôle sur la distribution spatiale de la méso- et macrofaune du sol<sup>97</sup>.

Une particularité des sols forestiers est la présence de souches issues de l'exploitation. Les souches, qui font partie des débris grossiers de bois des forêts exploitées, forment un substrat favorable aux organismes associées à ces débris, tels que certains insectes saproxyliques. Elles accueillent également des espèces rares et des ennemis naturels de scolytes<sup>102</sup> et semblent importantes pour les lichens dont certains sont rares<sup>103</sup>. La composition des communautés de décomposeurs de la matière organique du sol est peu affectée par leur exportation par contre les effectifs diminuent considérablement à cause des modifications de la structure des sols<sup>97</sup>.

Les souches sont présentes dans la plupart des stades de peuplement et à tous les stades de décomposition, ce qui assure une continuité spatiale et temporelle de ces substrats<sup>97</sup>. Cette présence continue leur confère un rôle d'habitat

de substitution dans le paysage forestier. Les souches de Pin maritime dans les Landes de Gascogne, agissent comme des concentrateurs locaux de biodiversité et peuvent être considérées comme des substrats de substitution pour la faune actuelle des grumes<sup>103</sup>.

## STRATE HERBACÉE

Les menus bois au sol agissent comme une couche protectrice du sol, en créant un microclimat à une échelle très locale. Ils forment également un effet « paillis » qui limite l'expression de la diversité des flores vasculaires. L'exportation de ces bois impacte la végétation herbacée profitera aux espèces de milieux ouverts, souvent extra-forestières<sup>97</sup>. La présence de flore des milieux ouverts pourrait cependant avoir un effet positif sur certaines espèces comme les papillons. Les bryophytes vont en revanche souffrir de cette situation par une réduction de la disponibilité d'habitats et une protection moindre contre les extrêmes microclimatiques, réduisant leur diversité<sup>95</sup>.

Même si la littérature n'est pas unanime, **les rémanents protègent les espèces végétales contre la prédation par les grands herbivores sauvages. Leur présence permet aux espèces les plus affectées par l'herbivorie de se maintenir, tandis que dans les zones de récolte, les espèces tolérantes colonisent largement les communautés**<sup>97</sup>.

L'exportation des éléments minéraux liée à la récolte des rémanents peut modifier les paramètres physico-chimiques des sols et impacter ainsi la composition des espèces végétales, en fonction de la richesse chimique de la zone : certaines espèces ne se maintiennent pas tandis que d'autres trouvent des conditions favorables<sup>97</sup>.

## STRATE ARBUSTIVE

Les bois morts servent de substrat de vie pour des espèces saproxyliques pendant au moins une partie de leur cycle de vie.

La composition de ces communautés saproxyliques dépend des caractéristiques propres aux morceaux de bois, tels que leur diamètre, l'essence, et le stade de décomposition, ainsi que des conditions environnementales (ensoleillement,

**Des prélèvements supplémentaires peuvent être réalisés dans le but de fournir du bois-énergie avec la mobilisation de nouveaux compartiments comme les rémanents, les souches et des petits bois inutilisés par l'industrie.**

humidité du sol, accumulation locale de bois mort)<sup>104</sup>.

Les rémanents et les souches sont souvent stockés sur la parcelle ou aux alentours, pour un ressuyage. Ces amas de bois en stockage, en concentrant les molécules aromatiques dégagées par les morceaux de bois, renforcent leur attirance pour les insectes<sup>97</sup>. Ils peuvent alors constituer un piège écologique si la progéniture des différents organismes reproducteurs attirés est ensuite détruite lors de la combustion avant leur émergence du substrat<sup>105</sup>. Si ces espèces préfèrent ces agrégations aux habitats originaux, isolés dans les parcelles, leur risque d'extinction est d'autant plus grand<sup>97</sup>. En Suède, une étude a observé que les piles de souches avaient constitué un piège écologique majeur pour quatre espèces de coléoptères saproxyliques<sup>104</sup>. La période de l'extraction des souches pourrait aussi avoir une influence, si cette dernière est effectuée avant ou après la saison de vol des insectes colonisant les souches<sup>104</sup>.

**Les bois morts font également partie des abris utilisés par plusieurs groupes d'espèces.** Beaucoup d'espèces de l'herpétofaune (reptiles et amphibiens), par exemple, utilisent les débris grossiers comme des sites de reproduction, d'alimentation et de thermorégulation (permettant à un organisme de garder une température constante)<sup>106</sup>. Les bois morts sont aussi utilisés par des espèces d'arthropodes rampants au sol, des rongeurs, certains oiseaux nicheurs

et même certains mustélidés<sup>97</sup>. Ces possibilités d'abris pourraient diminuer avec la récolte du bois mort. Des études ont montré un déclin de salamandres et de grenouilles des bois suite à la récolte des menus bois<sup>107</sup> ainsi qu'une forte sensibilité des communautés d'araignées<sup>108</sup>.

Les gestionnaires et propriétaires s'inquiètent des risques éventuels de contagion et notamment sur le rôle du bois mort comme refuge des pathogènes et ravageurs<sup>109</sup>. **L'abondance des insectes ravageurs n'augmente pas avec le volume de bois mort total**, exception faite d'apports massifs de bois mort lors de chablis majeurs. Par contre, le maintien des rémanents et souches en forêt peut accroître les risques de transmissions de certains pathogènes dans des contextes bien connus (scolytes et champignons pourridés racinaires)<sup>97</sup>.

## STRATE ARBORÉE

**La récolte des rémanents peut influencer l'exportation de nutriments, et donc la fertilité du sol, mais peut également induire une baisse des performances de croissance des arbres<sup>97</sup>.** En effet, l'exportation de nutriments est très fortement augmentée par leur récolte, et plus il y a de compartiments exportés (branches, feuillage, souches), moins le sol est alimenté en nutriments. Cette diminution sera d'autant plus forte lors d'une exportation du feuillage et chez les peuplements jeunes<sup>97</sup>. **L'opération du ressuyage des rémanents sur la**

**parcelle est un moyen de limiter l'exportation des minéraux**, en permettant à une partie du feuillage, des écorces et brindilles de tomber au sol et aux minéraux d'être lessivés dans le sol<sup>110</sup>.

On évalue mal l'effet de l'exportation des rémanents sur le réseau trophique ; certains organismes se nourrissent de ceux dépendant du bois mort ou ceux l'utilisant comme abri. Ainsi, les communautés d'oiseaux sont impactées par la récolte des débris grossiers et des chandelles, tant au niveau de l'abondance des populations que pour la richesse en espèces. Des études ont également montré que la présence des rémanents augmente la valeur des milieux comme aires de chasse pour les mammifères carnivores et probablement les chauves-souris. Cependant, l'extraction d'une partie de ces rémanents, en rendant les proies plus visibles pour les rapaces, faciliterait leur alimentation<sup>97</sup>.

## ECOSYSTÈME

**L'exportation supplémentaire de bois, et ainsi de matière organique et de minéraux, semble donc avoir des impacts potentiels sur les différentes strates de la forêt, et donc au niveau de l'écosystème forestier dans sa globalité.** La récolte des rémanents et des souches pourrait ainsi diminuer la disponibilité et la diversité des habitats et de la biodiversité associée au bois mort, ce dernier hébergeant près de 25 % de la biodiversité forestière. Ces conséquences en cascade pourraient modifier la composition faunistique de la forêt par répercussion sur le réseau trophique mais également la composition floristique en favorisant une flore de milieux ouverts, extra-forestière, et la biodiversité associée.

Cette exportation supplémentaire peut également avoir un impact sur la fertilité du sol, qui dépendra des compartiments récoltés et qui peut être atténué par le ressuyage (séchage) des rémanents sur la parcelle. La sensibilité du sol a également un rôle à jouer sur l'importance des conséquences de l'exportation sur sa fertilité. ■



Feuilles © Marie Monmousseau

# Fréquence des interventions, mécanisation et travail du sol



Multiplication des interventions © Marie Monmousseau

■ La récolte du bois-énergie entraîne une augmentation des interventions aussi bien dans le cadre d'une sylviculture orientée bois d'œuvre que pour les itinéraires adaptés à la production de bois-énergie. Cette augmentation du nombre et de types d'interventions peut être due à l'utilisation de machines additionnelles et à la mise en place de nouvelles opérations (travail du sol, amendement, etc.). La récolte des rémanents et des souches après une sylviculture orientée bois d'œuvre inclut l'utilisation de machines additionnelles et/ou de passages supplémentaires, et certaines méthodes culturales peuvent être utilisées pour les peuplements dédiés, notamment pour les taillis à très courte rotation présents plutôt sur des espaces en déprise agricole.

Une des opérations qui peut être nécessaire à la préparation du terrain, est le travail du sol. Cette opération permet en effet de faciliter la plantation et d'améliorer l'enracinement des plants<sup>111</sup>. Le travail du sol peut être mis en place dans le cas d'orniérage (déformation du sol causée par le passage de roues) ou d'exploitation de souches<sup>97</sup>.

Un amendement du sol peut être mis en place pour maintenir la fertilité du sol ou augmenter la production du peuplement dans le cadre d'itinéraires dédiés par exemple, ou pour compenser une exportation assez forte d'éléments minéraux. Une autre possibilité serait le retour des cendres de bois brûlés pour le bois-énergie, ramenant les minéraux exportés, excepté l'azote.

Un passage plus fréquent d'engins peut, en fonction du type de sol et de son état hydrique au moment du passage des engins, accroître les risques d'un tassement du sol. En effet cette pratique compacte le sol, ce qui réduit sa porosité, et limite ainsi l'aération des sols. L'infiltration de l'eau est alors limitée et, in fine, diminue la réserve utile. Le sol est également soumis à un tassement plus fort quand le bois mort est récolté, diminuant la protection physique du sol<sup>97</sup>.

## SOL

**Le tassement, à court et moyen terme, limite l'activité biologique des sols.**

Ceci impacte les communautés végétales

|| Le travail du sol nuit fortement aux espèces de faune du sol impliquées dans la décomposition de la matière organique

et de faune du sol<sup>97, 112</sup>. Les communautés fongiques du sol (saprophytes et symbiotiques) sont bien plus sensibles au tassement et au retrait des rémanents que les bactéries et présentent des baisses significatives d'abondance par rapport aux sites où les rémanents sont laissés sur place<sup>97</sup>.

Le travail du sol contribue à un mélange entre les différents horizons du sol, et remonte notamment les horizons minéraux en surface. Hors ce milieu est plutôt hostile pour les décomposeurs du sol, qui risquent de souffrir de cette action<sup>97</sup>. Ainsi, en Scandinavie, les enchytréides (un groupe impliqué dans les processus de décomposition de la matière organique) sont très affectés par la mise en exposition des horizons minéraux, conséquence directe de l'extraction des souches<sup>113</sup>. Des hypothèses semblables sont émises pour les nématodes et microarthropodes du sol<sup>97</sup>. Il faut cependant noter que ces résultats sont obtenus dans des contextes de forêt boréale.

### STRATE HERBACÉE

**Le tassement, en réduisant la porosité du sol, peut affecter la croissance des plantes et limiter la régénération de certaines espèces<sup>114</sup>.** Le nombre d'espèces est peu affecté, mais la répartition d'abondance entre les espèces change : certaines espèces très recouvrantes et/ou adaptées à l'hypoxie pouvant être favorisées, d'autres étant à l'inverse sensibles au tassement.

Le travail du sol induit la « destruction » de la végétation existante, qui repartirait alors de zéro. Cependant, cette opération peut favoriser la germination de certaines plantes<sup>97</sup>. La banque de graines, qui est le stock de graines dormantes, c'est-à-dire attendant les bonnes conditions environnementales pour germer, s'en trouve également activée<sup>97</sup>.

L'élimination des végétaux existants par un travail du sol pourrait aussi impacter les organismes qui les utilisaient comme substrat de vie, ou comme lieu de ponte (macrofaune du sol notamment). Cela pourrait également impacter certains insectes, dont les papillons, pour la recherche de nourriture.

De manière générale, la fréquence accrue des interventions favorise les espèces pionnières (qui colonisent rapidement après une perturbation) et impacte donc les autres espèces qui succèdent à ces stades pionniers.

### STRATE ARBUSTIVE

Le passage additionnel de machines augmente le risque de fragmentation des rémanents en débris plus fin ainsi que l'incorporation de petit bois mort dans le sol<sup>97</sup>, ce qui impacterait la composition de la strate arbustive<sup>114</sup>.

### STRATE ARBORÉE

Généralement, le travail du sol stimule le système racinaire, cependant il peut y avoir des cas où le développement des racines est affecté par une « semelle de labour » à laquelle elles se heurtent, ou par la fente de sous-solage qu'elles vont suivre<sup>110</sup>.

## ECOSYSTÈME

**Une augmentation de la fréquence des interventions joue notamment sur le risque de tassement du sol, qui a des répercussions sur l'écosystème forestier avec une activité microbienne moindre, une modification des flux d'eau et un impact sur la végétation.**

Ce tassement pourrait cependant être cantonné aux opérations de cloisonnement d'exploitation.

Un autre aspect est le dérangement de la faune, corrélé plus particulièrement à l'époque des travaux, par rapport au calendrier de reproduction et de nidification de la faune sauvage<sup>114</sup>. ■



Hêtre mort présentant de nombreux micro-habitats © Christophe Bouget

# Modifications de la structure et de la composition du peuplement



Pinède © Alexis Ducouso

■ L'exploitation d'une forêt pour la production de bois-énergie peut induire des modifications de la structure et de la composition des peuplements exploités, par rapport à une sylviculture classique sans valorisation de bois-énergie. Cela inclut les espèces plantées, la densité du peuplement, les opérations faites dans le peuplement et la durée de la révolution. Ces changements existent notamment dans les itinéraires spécifiques au bois-énergie, mais peuvent également inclure certaines opérations sylvicoles influencées par la valorisation possible en bois-énergie dans des itinéraires classiques.

## SOL

Dans les itinéraires dédiés et semi-dédiés, une rotation raccourcie implique la récolte d'une partie ou de la totalité de peuplements jeunes, ce qui augmente l'exportation des minéraux<sup>97</sup> et impacte la fertilité du sol, de même que la flore (voir impacts « exportation supplémentaire de bois, minéraux et matière organique »).

Les impacts seraient alors comparables à ceux générés par l'exportation de petits bois non récoltés auparavant.

La plantation d'espèces exotiques pourrait affecter la faune et la flore du sol. En effet, en sols tropicaux, une étude a pu montrer que le développement d'*Eucalyptus camadulensis*, en dehors de son aire d'origine, a modifié la communauté bactérienne du sol structurellement et fonctionnellement<sup>116</sup>.

## STRATE HERBACÉE

Une densité d'arbres plus forte pourrait influencer la composition du sous-bois, par exemple en augmentant l'abondance des sciaphiles, qui se développent bien à l'ombre. Une plantation trop dense pourrait même limiter le développement de la végétation des sous-bois. De plus, dans le cas d'utilisation d'espèces d'arbres exotiques, il a été montré que la biodiversité associée à ces peuplements est généralement plus faible<sup>117</sup>.

|| L'implantation d'espèces exotiques amène la question du risque d'invasion biologique de ces espèces

## STRATE ARBUSTIVE ET ARBORÉE

**La coexistence de différentes classes d'âge de taillis dans le paysage forestier favorise la diversité de certaines espèces**<sup>118, 119</sup>. En effet, certaines espèces de papillons de jour et de nuit sont liées à la présence de différents stades d'âge d'un taillis. Un raccourcissement des rotations dans le cadre d'une exploitation pour le bois-énergie conduirait alors à un décalage des classes d'âge vers un rajeunissement des peuplements. Les espèces de faune et de flore liées à la présence de différents stades d'âges au sein d'un même peuplement seraient alors impactées par une modification de la composition de ces derniers.

Les opérations réalisées dans le peuplement, permettant d'obtenir du bois-énergie, pourrait réduire la densité des arbres et ainsi apporter de la lumière au sol. Celle-ci pourrait permettre l'établissement de plusieurs strates végétales<sup>120</sup>.

**Le raccourcissement des durées révolution entraîne une régression des stades plus âgés, et donc une régression des vieux et gros arbres et des bois mort debout, riches en biodiversité du fait des nombreux microhabitats associés (cavités, fentes, bois mort, etc.)**<sup>121, 122, 123</sup>.

## ECOSYSTÈME

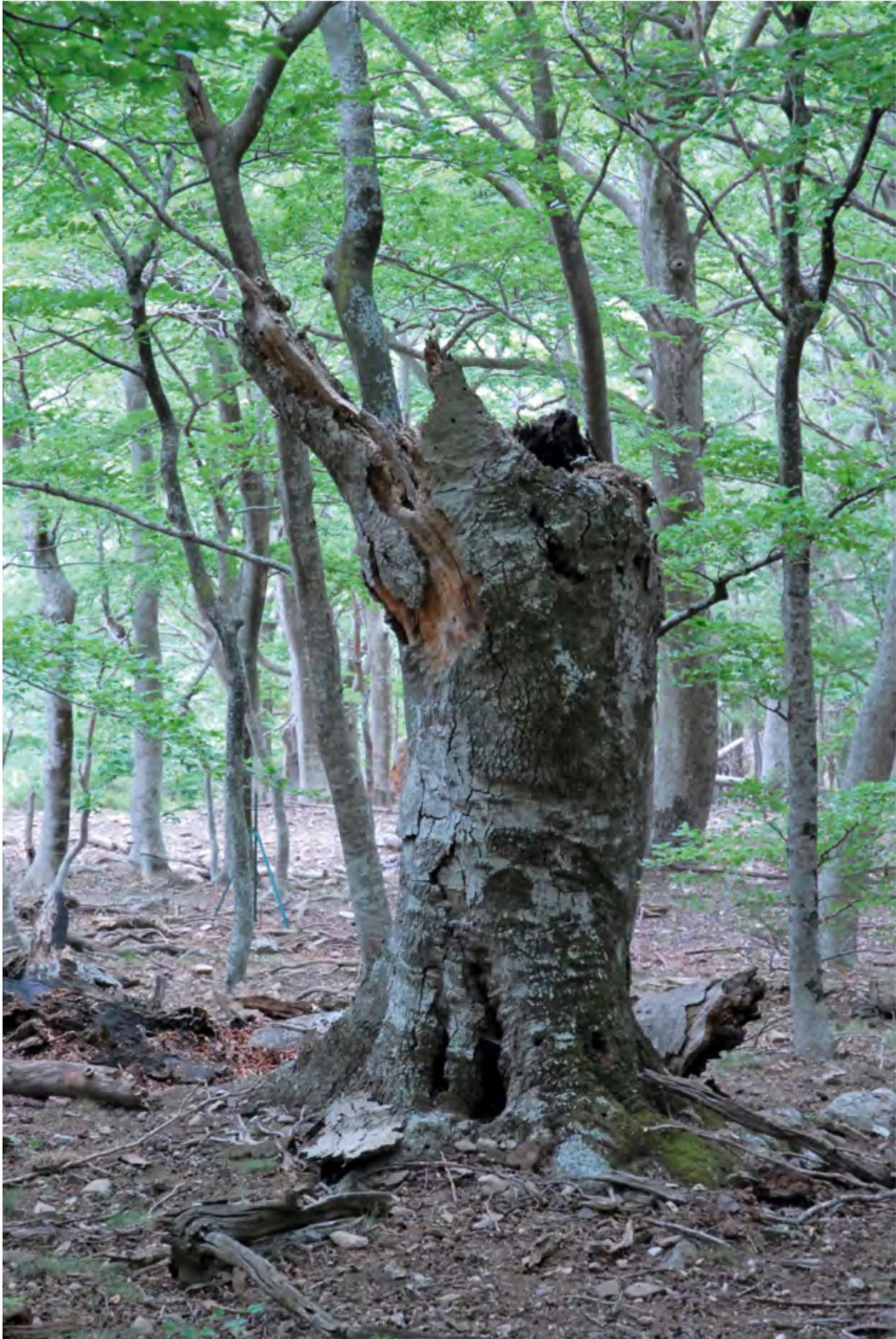
**L'implantation d'espèces exotiques amène la question du risque d'invasion biologique de ces espèces, qui pourraient remplacer les espèces autochtones, en général associées à une biodiversité caractéristique et plus variée.** De plus, leur place dans le fonctionnement des écosystèmes pourrait influencer les services rendus par ces écosystèmes.

Dans une certaine mesure, les opérations réalisées dans le peuplement pourraient permettre la création de milieux ouverts

intraforestiers ou la réouverture de milieux, qui hébergent une biodiversité variée et parfois spécifique.

Cependant, des changements de densité ou d'essences semblent avoir un effet significatif sur la composition du sous-bois, et pourraient donc impacter la totalité de l'écosystème forestier et son fonctionnement. A cela se rajoute l'effet des révolutions plus courtes qui diminuent la présence des microhabitats, notamment dans les gros arbres et arbres âgés, qui hébergent une biodiversité variée. ■





# Conclusion



Forêt mixte © Marie Monmousseau

■ Le développement du bois-énergie peut affecter la biodiversité forestière de manière différente selon les modes d'exploitation mis en œuvre pour sa production.

**D'une part, certains peuplements non exploités depuis plusieurs décennies pourraient se voir profondément transformés par leur remise en exploitation pour la production de bois-énergie. Cette substitution induirait une modification de l'écosystème tout entier, plus forte en fonction de l'âge du peuplement substitué. En effet, la richesse des espèces animales et végétales est plus faible dans les forêts exploitées que dans les forêts non exploitées.**

**D'autre part, pour les forêts régulièrement exploitées,** les impacts de la production de bois-énergie seront liés à l'exportation supplémentaire de bois, matière organique et minéraux, une augmentation de la fréquence et des modalités d'intervention, ainsi qu'aux modifications potentielles de la structure et de la composition des peuplements.

Le bois mort au sol constitue un habitat essentiel pour de nombreux organismes dans les forêts matures. **L'exportation supplé-**

**mentaire de bois,** la réduction de la rétention de bois mort et donc des nutriments associés à sa décomposition aura un **impact sur la fertilité du sol** et peut donc induire **une baisse des performances de croissance des arbres.** L'exportation supplémentaire de bois, et ainsi de matière organique et de minéraux, a en outre des impacts potentiels sur les différentes strates de la forêt, ce qui peut avoir des répercussions sur l'écosystème forestier dans sa globalité. La récolte des rémanents et des souches pourrait non seulement avoir un impact sur la fertilité du sol, mais aussi **diminuer la disponibilité et la diversité des habitats et de la biodiversité** associée au bois mort, ce dernier hébergeant près de 25 % de la biodiversité forestière.

**La récolte du bois-énergie peut entraîner une augmentation, en nombre et/ou en fréquence, des interventions** aussi bien dans une sylviculture orientée bois d'œuvre que pour les itinéraires dédiés à la production de bois-énergie. Une augmentation de la fréquence des interventions accroît le risque de tassement du sol, ce qui a des répercussions sur l'écosystème forestier avec une activité microbienne moindre, une modification des flux d'eau et un impact sur la végétation. Le passage additionnel de machines

augmente en outre le dérangement de la faune présente en forêt.

L'exploitation d'une forêt pour la production de bois-énergie peut induire des **modifications de la structure et de la composition des peuplements exploités,** notamment en ce qui concerne les espèces plantées, la densité du peuplement, les opérations faites dans le peuplement et la durée de la révolution.

La plantation d'espèces exotiques pourrait d'une part, réduire la faune et la flore du sol et d'autre part augmenter l'exposition des écosystèmes au risque d'invasion biologique. **De plus, les espèces d'arbres exotiques sont généralement associées à une biodiversité plus faible.** En effet, l'introduction d'espèces exotiques conduit généralement à l'installation de cortèges d'espèces généralistes et donc à une homogénéisation biotique à large échelle. Enfin, leur place dans le fonctionnement des écosystèmes pourrait influencer les services rendus par ces écosystèmes. En outre, des changements de densité ou d'essences semblent avoir un effet sur la composition du sous-bois, et pourraient donc aussi avoir indirectement un impact sur la biodiversité.

**Enfin, le raccourcissement de la révolution entraînerait une régression des stades plus âgés, et donc une régression des vieux et gros arbres et des bois mort debout, riches en biodiversité.**

Ces impacts du développement du bois-énergie sur la biodiversité forestière ne prennent pas en compte l'impact du développement de cette filière sur la biodiversité en dehors de la forêt, en France ou à l'étranger. En effet les récoltes de bois hors forêt (haies bocagères, filière déchets, plaquettes industrielles, sorties de scieries, etc.) n'ont pas été traitées, ni l'importation de bois pour l'alimentation de certaines grandes centrales. Cette étude n'intègre pas non plus l'impact de cette nouvelle filière sur la dynamique paysagère de la biodiversité forestière ni sur la portée à long terme des modifications de structure et de composition des peuplements forestiers français.

D'autres aspects du bois-énergie n'ont pas été traités dans ce travail et méritent des études dédiées à ces sujets tels que **l'impact carbone global de cette filière. Un des points de vue sur le sujet du bois sous la forme de bois d'œuvre plutôt que de bois-énergie, le bois d'œuvre stockant du carbone pendant une durée plus longue que pour le bois-énergie.** Par ailleurs, le bois-énergie a un faible pouvoir calorifique, ce qui nécessiterait une plus grande quantité de matière pour une même quantité d'énergie produite. La question de l'approvisionnement se pose alors. Un autre point de questionnement est l'efficacité de la transformation énergétique. Le bois-énergie peut en effet servir sous plusieurs formes : soit uniquement pour le chauffage, soit pour une valorisation seulement en électricité ou encore la combinaison des 2, appelée cogénération. L'efficacité énergétique étant la plus forte pour le chauffage, puis la cogénération et enfin l'électricité, les centrales produisant uniquement de l'électricité ne constituent pas la meilleure façon d'utiliser la ressource bois.

Enfin, lors de l'installation de projets d'unités de transformation du bois en énergie, les études d'impacts des projets d'implantation de ces chaudières ne regardent pas les impacts sur les forêts, se concentrant exclusivement sur les

impacts immédiats du « site de l'installation ». Il manque alors la vision globale de la filière et de ses impacts sur la biodiversité à tous les stades de la production d'énergie. En effet, bien qu'il soit important de prendre en compte les impacts de la construction d'une chaudière, l'existence même de cette installation engendrera des impacts sur les forêts et tous les sites d'approvisionnement.

**Le Comité français de l'UICN soutient le développement des énergies renouvelables, et notamment du bois-énergie, dans le cadre d'une transition énergétique plus durable et de la lutte contre les changements climatiques. Cependant, afin de préserver la biodiversité forestière et la multifonctionnalité des espaces forestiers, ce développement doit se faire dans une logique de gestion durable des forêts prenant en compte l'ensemble des impacts décrits dans cette étude et respectant a minima les points suivants :**

- › Eviter au maximum l'exploitation de peuplement jusqu'alors non exploités
- › Ne pas s'engager vers une exportation de bois trop importante conduisant à un appauvrissement en matière minérale et organique des sols forestiers ainsi qu'à une surexploitation des différentes catégories de bois mort
- › Eviter d'augmenter les interventions en forêt, leur mécanisation et le travail du sol
- › Bannir la modification des peuplements comme l'introduction de nouvelles espèces ou une augmentation radicale de la densité des peuplements. ■

**Le développement du bois-énergie ne doit pas engendrer une sur-exportation des bois morts, ni une augmentation des interventions et éclaircies en forêt. La modification profonde des peuplements (espèces exotiques, très forte densité ; etc.) aura des conséquences négatives sur la stabilité à long terme de forêts.**



*Salamandra salamandra* © Alexis Ducousso

# Notes

- 1 GIEC, 2013: Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- 2 Site du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie : <http://www.developpement-durable.gouv.fr>
- 3 Biomasse : « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers » (article L211-2 du code de l'énergie)
- 4 Plan d'action national en faveur des énergies renouvelables. Période 2009-2020. En application de l'article 4 de la directive 2009/28/CE de l'Union européenne
- 5 Repères -Chiffres clés des énergies renouvelables. Édition 2013 (CGDD)
- 6 © IGN 2013 : La forêt en chiffres et en cartes. Le Mémento. Édition 2013.
- 7 Cinotti B. 1996. Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle. Rev. For. Fr. XLVIII (6)
- 8 Site du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie : [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- 9 Peuplement monospécifique : peuplement pour lequel une essence représente plus des trois-quarts du couvert des arbres (IGN)
- 10 Muséum national d'Histoire naturelle [Ed]. 2003-2013. Inventaire national du Patrimoine naturel, site Web : <http://inpn.mnhn.fr>. Le 30 juin 2014
- 11 Le site internet de l'inventaire forestier : <http://inventaire-forestier.ign.fr>
- 12 Persuy A., 2008. La forêt naturelle. Editions Belin.
- 13 Le régime forestier est l'ensemble des règles de gestion définies par le Code forestier et mises en œuvre par l'Office national des forêts. (site internet INSEE)
- 14 Agreste. Filière Forêt – Bois. Mémento 2012
- 15 GraphAgri Bois - édition 2013. La forêt et les industries du bois 2013
- 16 Rejet de souche : tige née d'une souche après la coupe de l'arbre qu'elle supportait (Lanier. Précis de Sylviculture. 2<sup>e</sup> édition)
- 17 Drageon : rejet émis par une racine superficielle (CRPF Pays-de-la-Loire et CRPF Bretagne)
- 18 Résultats d'Inventaire Forestier. Résultats Standards (campagnes 2008 à 2012). Tome national version régions administratives
- 19 Mélange de futaie et de taillis : taux de couvert relatif du taillis et taux de couvert relatif de la futaie tout deux supérieurs ou égaux à 25 % (IGN)
- 20 Site du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie : <http://www.developpement-durable.gouv.fr>
- 21 Landmann G., Gosselin F., Bonhême I. (coord.), 2009. Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEDDEM-Ecofor, 210p. ([www.gip-ecofor.org](http://www.gip-ecofor.org)) – Chapitre 13
- 22 Inventaire Forestier National. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Édition 2010
- 23 Le programme forestier national 2006-2015
- 24 Centre National De La Propriété Forestière. Rapport d'activités 2013 (version 23/05/14)
- 25 Site PEFC France : <http://www.pefc-france.org>
- 26 © FSC Facts and Figures. December 2013
- 27 Convention sur la Diversité Biologique, Sommet de la Terre, 1992
- 28 Emberger C., Larrieu L., Gonin P. : 2013 - Dix facteurs clés pour la diversité des espèces en forêt. Comprendre l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP). Document technique. Paris : Institut pour le développement forestier, mars 2013, 56 p.
- 29 Site internet de l'ONF : [www.onf.fr](http://www.onf.fr) (Le monde des grands végétaux)
- 30 Rameau, J.C., Gauberville, C., Drapier, N. 2000 Gestion forestière et diversité biologique : identification et gestion intégrée des habitats et espèces d'intérêt communautaire. Paris 119p.
- 31 Bissardon M., Guibal L., Rameau J.-C. 1997. Corine biotopes, version original, types d'habitats français. ENGREF-ATEN, 175 p.
- 32 Forêts caducifoliées : regroupant des arbres possédant des feuilles qui tombent à la mauvaise saison
- 33 Sempervirent : arbres au feuillage persistant
- 34 Sclérophylle : se dit des végétaux adaptés à la sécheresse (sclérophyte) dont les feuilles sont coriaces
- 35 Dupouey J.-L., Sciama D., Koerner W., Dambriane E., Rameau J.-C. 2002. La végétation des forêts anciennes. Rev. For. Fr. LIV - 6
- 36 Présentation de Guillaume Decocq. L'ancienneté de l'état boisé et la biodiversité forestière. Manifestation ECOFOR 2011 : Connaissance et cartographie des forêts anciennes
- 37 Hermy, M. and Verheyen, K. 2007. Legacies of the past in the present-day forest biodiversity: a review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity. Sustainability and Diversity of Forest Ecosystems. p 361-371
- 38 Larrieu L., Gonin P. 2008. L'indice de biodiversité potentielle (IBP): une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. Rev. For. Fr. LX - 6.

- 39 Centre régional de la propriété forestière – Poitou-Charentes. Guide de gestion des milieux naturels associés à la forêt.
- 40 Alexander, K.N.A., 2008. Tree biology and saproxylic coleoptera: issues of definitions and conservation language. *Revue d'Ecologie (Terre Vie)*, 63, p.1-7
- 41 Landmann G., Nivet, C. (coord.) 2013. Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Angers : ADEME, Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 248 p.
- 42 Bouget, C. 2007. Enjeux du bois mort pour la conservation de la biodiversité et la gestion des forêts. *Rendez-Vous Techniques ONF*, n° 16, printemps 2007, pp. 55-59.
- 43 Bouget, C., A. Lassauce, and M. Jonsell. 2012. Effects of fuelwood harvesting on biodiversity — a review focused on the situation in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 42,1421-1432.
- 44 Emberger C., Larrieu L., Gonin P. 2013. Dix facteurs clés pour la diversité des espèces en forêt. Comprendre l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP). Document technique. Paris : Institut pour le développement forestier, mars 2013, 56 p.
- 45 Regnery B., Couvet D., Kubarek L., Julien J-F., Kerbiriou C. 2013. Tree microhabitats as indicators of bird and bat communities in Mediterranean forests. *Ecological Indicators* 34 : 221-230.
- 46 Cockle K., Martin K., Wesolowski T. 2011. Woodpeckers, decay, and the future of cavity-nesting vertebrate communities worldwide. *Front Ecol Environ* 2011; 9(7): 377–382
- 47 Kolström M., Lumatjärvi J. 2000. Saproxylic beetles on aspen in commercial forests : a simulation approach to species richness. *Forest Ecology and Management* 126 (2000) 113-120
- 48 Gis Sol. 2011. Synthèse sur l'état des sols de France.
- 49 Programme GESSOL. 2010. La vie cachée des sols. L'élément essentiel d'une gestion durable et écologique des milieux
- 50 S. Jeffery, C. Gardi, A. Jones, L. Montanarella, L. Marmo, L. Miko, K. Ritz, G. Peres, J. Römbke and W. H. van der Putten (eds.), 2010, *European Atlas of Soil Biodiversity*. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg. © European Union, 2010
- 51 Vallauri D. et Neyroumande E. « Les forêts françaises : une biodiversité à la fois riche et menacée ». *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 2009/1 n°53, p.75-81.
- 52 Richard A. et Pierre Bouillon, MAAF. Tome 1 : La France Métropolitaine. Rapport de la France pour l'état des ressources génétiques forestières dans le monde (FAO). 1<sup>ère</sup> édition – 21 Mars 2014
- 53 Site internet de l'inventaire forestier : <http://inventaire-forestier.ign.fr> (Richesse et diversité)
- 54 Gosselin M. et Paillet Y. 2010. Mieux intégrer la biodiversité dans la gestion forestière. Guide pratique (France métropolitaine).
- 55 Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G., Gauberville G. 2008. Flore forestière française : guide écologique illustré. Tome 3 : région méditerranéenne. Institut pour le développement forestier.
- 56 Postpionnier : qualifie une essence photophile intervenant dans les successions végétales après les essences pionnières (Rameau et al. 1989. Flore forestière française)
- 57 Dryade : Essence sciaphile à longue durée de vie (Rameau et al. 1989. Flore forestière française)
- 58 Rameau J.-C., Mansion D., Dumé G. 1989. Flore forestière française, guide écologique illustré.
- 59 FAO - Commission des ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture. Ressources génétiques forestières. Des solutions pour la gestion
- 60 Hamrick J. L., Godt M. J. W., Sherman-Broyles S. L. 1992. Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species. *New Forests* 6 : 95-124.
- 61 UICN, PNUE, WWF, FAO, UNESCO. (1980). Stratégie mondiale de la conservation. La conservation des ressources vivantes au service du développement durable. UICN, Gland, Suisse, 64 p.
- 62 Landmann G., Gosselin F., Bonhême I. (coord.), 2009. Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEDDEM-Ecofor, 210p. ([www.gip-ecofor.org](http://www.gip-ecofor.org))
- 63 Inventaire Forestier National. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Edition 2010
- 64 Site internet du Comité National pour le Développement du Bois (CNDB) : [www.cndb.org](http://www.cndb.org)
- 65 Solagro Biomasse Normandie, BVA et Marketing freelance. Etude sur le chauffage domestique au bois : marchés et approvisionnement. 2013
- 66 Inventaire forestier national. Lettre IF n°9. 2005. Bois-énergie : les forêts ont de la ressource !
- 67 Repères - Chiffres clés des énergies renouvelables. Édition 2013 (CGDD)
- 68 © IGN 2013 : La forêt en chiffres et en cartes. Le Mémento. Edition 2013.
- 69 Inventaire Forestier National (IFN), avec l'Institut Technique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA) et l'association SOLAGRO. Rapport final Novembre 2009. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020
- 70 Convention Cemagref /IFN/DGFAR. Rapport final novembre 2009. Évaluation des volumes de bois mobilisables à partir des données de l'IFN « nouvelle méthode » Actualisation 2009 de l'étude « biomasse disponible » de 2007
- 71 Jean-Paul Guyon. 1996. Références Forêt. Edition Synthèse Agricole
- 72 Alain Berthelot. AFOCEL. La culture du peuplier en France
- 73 CRPF Lorraine-Alsace. 2005. Fiches Chêne pédonculé, Hêtre et Sapin pectiné

- 74 ONF – Direction Territoriale Sud-Ouest. Décembre 2003. Guide de sylviculture du pin maritime de lande.
- 75 Fondation Tuck. Enerbio. FCBA. L'Eucalyptus. Espèces ligneuses pour la production de biomasse
- 76 Landmann G., Nivet., C. (coord.) 2013. Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Angers : ADEME, Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 248 p.
- 77 Mémento aquitain du bois énergie. Mai 2013. Techniques de mobilisation du bois-énergie en Aquitaine. Synthèse n°10.
- 78 Site internet du CRPF Limousin – Lexique forestier
- 79 Atlanbois. 2011. Production de plaquettes forestières en Pays de la Loire. Rapport final.105p.
- 80 Fraysse J.Y. 2005. Valorisation énergétique de gisements inexploités de biomasse en Finlande. Informations-Forêt, 2005, N° 1 (Fiche 705), 6 p. AFOCEL.
- 81 Deuffic P. Thèse 2012. Produire et discuter des normes environnementales. Écologues et forestiers face à la biodiversité associée au bois mort
- 82 Le détournage : réduction du nombre de racines latérales. (Fiche produit CAFSA. 2008. Le process de valorisation des souches en bois-énergie)
- 83 Aide-mémoire du Sylviculteur des Landes de Gascogne. CRPF Aquitaine. Mise en cordons des souches. Décembre 2010
- 84 Cordero-Debets. 2014. Communication personnelle
- 85 Mémento aquitain du bois énergie. Juin 2013. La place de la production de biomasse dans les sylvicultures actuelles. Synthèse n°5.
- 86 Emeyriat R., Cloarec S., Castagnet C., Husson H., Liarcou J-R., Padovani D., Rault M. et Moreau J. Mars 2014. Projet expérimental d'une chaîne d'extraction de cœurs de souches pour un usage énergétique. Rapport final.
- 87 Lanier L. 1994. Précis de Sylviculture. 2<sup>e</sup> édition. ENGREF Nancy.
- 88 Fiche CRPF d'Ile de France et du Centre. Décembre 2012. Les cloisonnements en forêt.
- 89 Site internet du CRPF Limousin – Lexique forestier
- 90 ONF. Fiche technique. Travaux forestiers. Dépressage des jeunes peuplements.
- 91 Coupe rase : coupe en une seule fois de la totalité du peuplement (CRPF Pays de la Loire – CRPF Bretagne. Lexique des termes forestiers usuels.)
- 92 Bois énergie - L'approvisionnement en plaquettes forestières ; Rémi Grovel, François Pasquier, Tammouz Eñaut Helou, Didier Barthelet, Éric Boittin ; ed. Sciences
- 93 Fiche produit CAFSA. Juin 2008. Peuplements semi-dédiés
- 94 IBIS (Intégrer la Biodiversité dans les Systèmes d'exploitations agricoles). Pratiques n°12. Taillis à courte ou très courte rotation (TTCR) : gestion des pratiques d'implantation.
- 95 Mémento aquitain du bois énergie. Juin 2013. Des sylvicultures nouvelles pour la production de biomasse. Synthèse n°7.
- 96 Landmann G., Nivet., C. (coord.) 2013. Projet Resobio. Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité. Angers : ADEME, Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 248 p.
- 97 Paillet Y., Bergès L., Hjältén J., Odor P.4, Avon C., Bernhardt-Römermann M., Bijlsma R.-J.6, De Bruyn L., Fuhr M., Grandin U., Kanka R., Lundin L., Luque S., Magura T., Matesanz S., Mészáros I.13, Sebastià M.-T., Schmidt W., Standovár T., Tóthmérész B., Uotila A., Valladares F., Vellak K. and Virtanen R. 2010. Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation Biology* 24 :1, pp101-112
- 98 Bouget, C., Parmain, G., Gilg, O., Noblecourt, T., Nusillard, B., Paillet, Y., Pernot, C., Larrieu, L., Gosselin, F., 2014. Does a set-aside conservation strategy help the restoration of old-growth forest attributes and recolonization by saproxylic beetles? *Animal Conservation*, 17, 4: 342–353
- 99 Littlefield, C.E. & Keeton, W.S., 2012. Bioenergy harvesting impacts on ecologically important stand structure and habitat characteristics. *Ecological Applications*, 22(7), 1892-1909.
- 100 Löhmus, A., Kraut, A. & Rosenvald, R., 2013. Dead wood in clearcuts of semi-natural forests in Estonia: site-type variation, degradation, and the influences of tree retention and slash harvest. *European Journal of Forest Research*, 1-15.
- 101 Walker J. K. M., Ward V., Paterson C., Jones M. D., 2012. Coarse woody debris retention in subalpine clearcuts affects ectomycorrhizal root tip community structure within fifteen years of harvest. *Applied Soil Ecology* 60, 5-15
- 102 Brin A., Bouget C., Valladares L. and Brustel H., 2013. Are stumps important for the conservation of saproxylic beetles in managed forests? - Insights from a comparison of assemblages on logs and stumps in oak-dominated forests and pine plantations. *Insect Conservation and Diversity* 6, 255-264
- 103 Caruso, A. 2008. Lichen diversity on stems, slash and stumps in managed boreal forests: impact of whole-tree harvest. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* vol. 2008:3. PhD thesis. Dept. of Ecology, Faculty of Natural resources and agricultural sciences, SLU, Sweden.
- 104 Bouget, C., A. Lassauce, and M. Jonsell. 2012. Effects of fuelwood harvesting on biodiversity — a review focused on the situation in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 42,1421-1432
- 105 Victorsson J. and Jonsell M. 2013. Ecological traps and habitat loss, stump extraction and its effects on saproxylic beetles. *Forest Ecology and Management* 290 : 22-29.
- 106 Whiles M. R. and Grubaugh J. W. 1996. Importance of coarse woody debris to southern forest herpetofauna. In : Mc-Minn J. W., Crossley D.A. Jr. (Eds), *Biodiversity and Coarse Woody Debris in Southern Forests*. Proc. Work. Coarse Woody Debris in S. For : Effects on Biodiversity. U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. SE-94, pp. 94-100

- 107 Donner D. M., Ribic C. A., Zalesny R. S., St. Pierre M., Eklund D., 2012. Impacts of harvesting forest residues for bioenergy on nutrient cycling and community assemblages in northern hardwood forests, Wisconsin. 44p. Rapport Final, Environmental and economic research and development program
- 108 Castro A., D. H. Wise. 2009. Influence of fine woody debris on spider diversity and community structure in forest leaf litter. *Biodiversity and Conservation* 18, 3705-3731
- 109 Deuffic P., Lyser S., 2012. Biodiversity or bioenergy: is deadwood conservation an environmental issue for French forest owners? *Canadian Journal of Forest Research* 42,1491-1502
- 110 Atlanbois. 2011. Production de plaquettes forestières en Pays de la Loire. Rapport final.105p
- 111 Grandjean P. 2009. Le décompactage du sol avant plantation : une technique garantissant reprise et croissance des plants. *Rendez-vous Techniques* N. 25-26 été-automne 2009
- 112 Bouget, C., A. Lassauce, and M. Jonsell. 2012. Effects of fuelwood harvesting on biodiversity — a review focused on the situation in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 42,1421-1432
- 113 Kataja-aho S., Fritze H., Haimi J., 2011. Short-term responses of soil decomposer and plant communities to stump harvesting in boreal forests. *Forest Ecology and Management* 262, 379-388.
- 114 FERIC (Institut canadien de recherches en génie forestier). La prévention des dommages au sol durant les opérations de récolte. Guide du superviseur de terrain.
- 115 Landmann G., Gosselin F., Bonhême I. (coord.), 2009. Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEDDEM-Ecofor, 210p. ([www.gjp-ecofor.org](http://www.gjp-ecofor.org))
- 116 Kisa, M., Sanon, A., Thioulouse, J., Assigbetse, K., Sylla, S., Spichiger, R., Dieng, L., Berthelin, J., Prin, Y., Galiana, A., Lepage, M. & Duponnois, R. 2007. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can counterbalance the negative influence of the exotic tree species *Eucalyptus camaldulensis* on the structure and functioning of soil microbial communities in a sahelian soil, *FEMS Microbiology Ecology*, 62 (1), p. 32-44
- 117 Speight M. R. and Wainhouse D. 1989. *Ecology and Management of Forest Insects*. Clarendon Press. Oxford
- 118 Broome A., Clarke S., Peace A., Parsons M. 2011. The effect of coppice management on moth assemblages in an English woodland. *Biodivers Conserv* 20 : 729-749
- 119 Fartmann T., Müller C., Poniatowski D. 2013. Effects of coppicing on butterfly communities of woodlands. *Biological Conservation* 159, p. 396-404
- 120 ONF. 2011. Aménagements cygénétiques : Prise en compte de la grande faune dans la gestion forestière.
- 121 Emberger C., Larrieu L., Gonin P. : 2013 - Dix facteurs clés pour la diversité des espèces en forêt. Comprendre l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP). Document technique. Paris : Institut pour le développement forestier, mars 2013, 56 p.
- 122 Lassauce, A., Larrieu, L., Paillet, Y., Lieutier, F., Bouget, C., 2013. The effects of forest age on saproxylic beetle biodiversity: implications of shortened and extended rotation lengths in a French oak high forest. *Insect Conservation and Diversity*. 6, 3, 396–410.
- 123 Lassauce, A., Anselle, P., Lieutier, F., Bouget, C. 2012. Overmature coppices enhance saproxylic beetle biodiversity: a case study in French deciduous forests. *Forest Ecology and Management*, 266: 273-285.)

