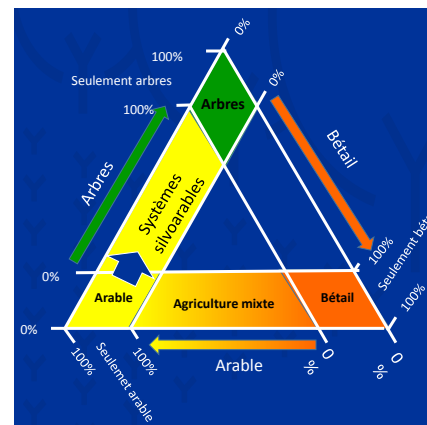
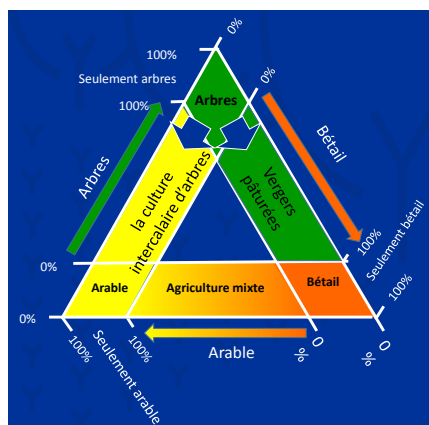
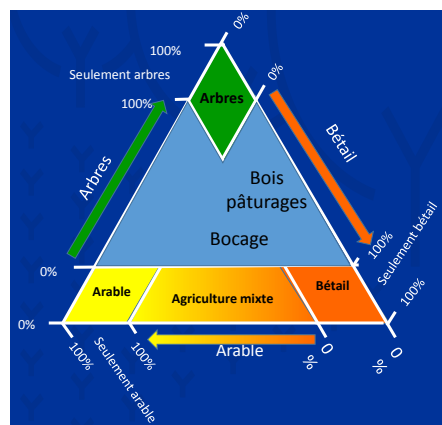


L'agroforesterie : une clé pour le développement de l'agro-écologie ?

Les systèmes agroforestiers traditionnels, combinant des pratiques agricoles et/ou pastorales à la gestion d'une végétation arborée pré-existante ou plantée, revêtent des formes très variées dans de nombreux agro-écosystèmes du monde tropical, méditerranéen et tempéré. Ces systèmes hérités du passé peuvent-ils avoir un intérêt aujourd'hui et sous quelle forme? Quels sont les mécanismes écophysologiques sous-jacents ? Quels sont les atouts de l'agroforesterie et les verrous à lever pour qu'elle se développe comme une pratique moderne et agro-écologique ?

Agroforesterie : de quoi s'agit-il ?

On peut définir simplement l'agroforesterie comme la pratique consistant à intégrer de manière délibérée la végétation ligneuse (arbres ou arbustes) dans des systèmes de production végétale (cultures) ou animale, afin de bénéficier au plan économique et environnemental des interactions résultant de cette intégration (fig. 1). On peut classer les principaux types de systèmes agro-forestiers rencontrés à partir des pratiques qui y sont observées : ❶ les systèmes traditionnels à forte valeur environnementale et culturelle : le bocage et ses haies plus ou moins arborées, souvent mis à mal par l'agriculture intensive et la mécanisation, ou encore les formations claires de chêne de la péninsule ibérique (dehesa, montado) ; ❷ les systèmes arborés à production de haute valeur (vergers pâturés) ; ❸ les systèmes agri-forestiers combinant arbres (souvent plantés en ligne) et cultures intercalaires ; ❹ les systèmes sylvopastoraux combinant arbres (fourragers ou non), production d'herbe et pâturage ; on peut y rattacher les bandes tampons arborées naturelles ou plantées le long des rives des cours d'eau, les séparant des cultures adjacentes, pour protéger la qualité de l'eau. Mais pourquoi des agriculteurs s'intéressent-ils à ces peuplements végétaux pluri-stratifiés ?



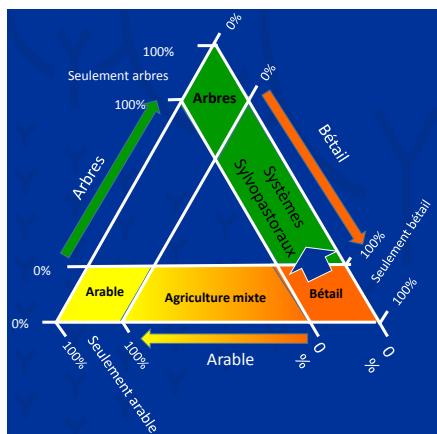
❶



❷



❸



4



Figure 1. Typologie simplifiée des systèmes agroforestiers en Europe

NB : comprendre le terme «arable» figurant dans les triangles comme «culture agricole»

Source : AGFORWARD 2015

Photos AGROOF

Compromis ou synergies entre productions et services écosystémiques : des mécanismes et un fonctionnement de mieux en mieux connus

Les systèmes agroforestiers sont des agrosystèmes hétérogènes conçus pour produire des biens et des services multiples. Leur fonctionnement dépend fortement des relations interspécifiques entre arbres et plantes herbacées. Ces interactions peuvent se décrire (fig.2) en termes de **compétition** (partage d'une ressource donnée mais de façon limitante pour chaque espèce), de **complémentarité** (meilleure utilisation de la ressource disponible) et de **facilitation** (augmentation de la ressource à partager). L'objectif pour un système agroforestier est donc d'**accroître la complémentarité et de générer la facilitation**. Dans la pratique, les cas d'interactions positives sont souvent observés. Dans les systèmes agroforestiers, les relations de complémentarité sont fortes. En effet les besoins des arbres et plantes herbacées sont souvent décalés dans le temps ou dans l'espace. Un bon exemple est le bilan d'utilisation de la lumière dans un système associant des arbres à feuilles caduques et des cultures d'hiver. La «plasticité» phénotypique et écophysologique des systèmes racinaires est cruciale en agroforesterie : on observe des systèmes racinaires plus profonds du fait de la **compétition**, capables d'exploiter complémentirement à la plante des ressources du sol (eau, azote). Cette complémentarité n'est cependant pas généralisable : elle dépend de la dynamique de remplissage des réserves du sol (régime pluviométrique). Un même système agroforestier peut donc être efficace dans un environnement pédoclimatique donné, et peu dans un autre. Les avancées dans le domaine de la modélisation biophysique des interactions permettent aujourd'hui de simuler le comportement des systèmes agroforestiers dans des contextes différents, et donc de raisonner le choix du système. Une mesure de l'efficacité globale est le LER (*Land Equivalent Ratio*) qui intègre l'ensemble de ces relations. Sans complémentarité ou facilitation, le LER est de 1. Les LER mesurés ou simulés en agroforesterie tempérée varient souvent entre 1.2 à 1.6, (gains de productivité de 20 à 60%) ce qui témoigne de fortes relations de complémentarité et de facilitation (fig. 3, page suivante). Cette efficacité est très supérieure à celle mesurée dans les mélanges de plantes herbacées. Ces gains de productivité montrent qu'il est possible d'allier services écosystémiques et production diversifiée (par exemple grain et bois).

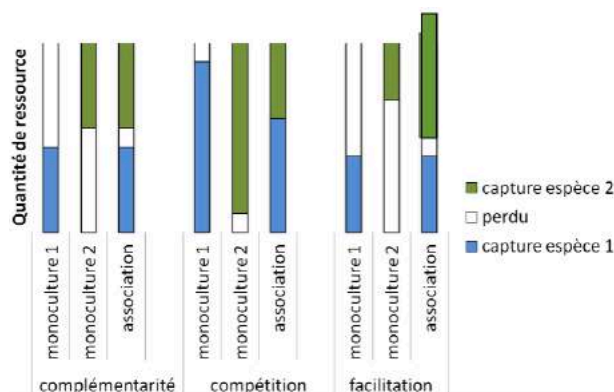
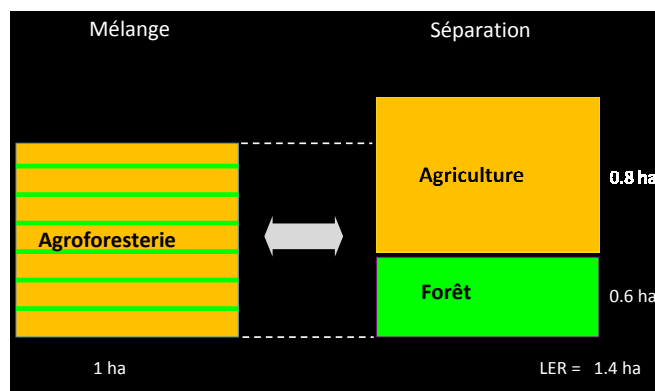


Figure 2. Comparaison de la capture d'une ressource (eau, azote) par deux espèces (exemple : arbres et plantes) cultivées séparément et en mélange (source Dupraz, 2015).

L'agroforesterie : un levier potentiel d'intensification écologique

Les systèmes pluristratifiés bien conçus présentent, par rapport aux cultures pures, de nombreux avantages en termes de services écosystémiques. On peut en donner des exemples à partir de la typologie

Figure 4. Efficacité des interactions entre strates : le LER - à gauche : parcelle de 1 ha combinant culture et arbres ; si ces productions étaient séparées (à droite), il faudrait 1,4 ha de terrain pour obtenir la même biomasse (grains et bois) - Source : Dupraz, 2015



proposée par le *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) et précisée dans la fiche 8.01. Concernant les **services d’approvisionnement**, ces systèmes offrent une **diversification** des productions (exemple, bois et céréales, ou bois et viande). Des **services de support** sont également assurés à travers : i) la **production primaire** et ses composantes : exportation, immobilisation et litière ; ii) le **cycle des nutriments** : les arbres participent par leur racines profondes et leurs associations symbiotiques à l’altération de la roche-mère, à l’extraction et à la remontée des éléments minéraux ; le profil hydrique du sol est également exploité plus complètement, et l’eau extraite en profondeur la nuit est élevée vers la surface du sol (effet «ascenseur hydraulique») ; iii) l’effet sur la **biodiversité** avec éventuellement une influence positive sur le contrôle des bio-agresseurs par une faune auxiliaire, et sur le cortège des pollinisateurs des cultures, hébergés par les arbres. À l’échelle du paysage, les systèmes agroforestiers viennent compléter la fonctionnalité écologique d’autres éléments boisés : linéaires, bosquets, petites forêt paysannes. Les systèmes agroforestiers offrent également de nombreux **services de régulation**. Concernant l’influence sur le **micro-climat**, le couvert arboré contribue au «cooling» de la parcelle par la réflexion de la radiation solaire (albedo) et la transpiration des arbres, la baisse de l’évaporation du sol et la hausse du taux d’hygrométrie. Les arbres participent aussi à l’**atténuation de l’effet de serre** par la séquestration du carbone dans la biomasse aérienne et racinaire, et dans le sol. Les arbres lorsqu’ils sont plantés en courbes de niveau permettent également le contrôle du ruissellement et de l’érosion du sol, et contribuent au cycle de l’eau par leur transpiration. On peut citer enfin les **services sociétaux**, certains systèmes agroforestiers ayant une fonction patrimoniale marquée.



Figure 5. Effet sur le micro-climat (Source : Dupraz)

Il convient de garder présent à l’esprit le caractère dynamique d’un système agroforestier du fait de la croissance des arbres. Certains des effets environnementaux mentionnés ci-dessus vont donc évoluer dans le temps. La compétition pour la lumière des arbres avec la strate cultivée est le cas le plus connu. On peut la limiter par réduction de la densité des arbres pour en conserver en fin de cycle entre 50 et 100/ha selon les essences et la fertilité du sol, et/ou réduire la surface en culture, ce qui conduit à un sacrifice de revenu à court terme.

Les systèmes agroforestiers : quel développement ? quels freins et verrous à lever ?

Les calculs économiques montrent que dans un système agroforestier performant, les parcelles agroforestières ont une rentabilité comparable à celle des parcelles agricoles. Elles permettent à la fois de maintenir un revenu annuel grâce aux cultures intercalaires, et de constituer un capital de valeur (par exemple bois de noyer), avec toutefois des problèmes de trésorerie rencontrés à certaines périodes. Pour

autant, l'implantation de tels systèmes est lente (on compte en France moins de 2.000 ha conduits en agroforesterie «moderne») pour plusieurs raisons :

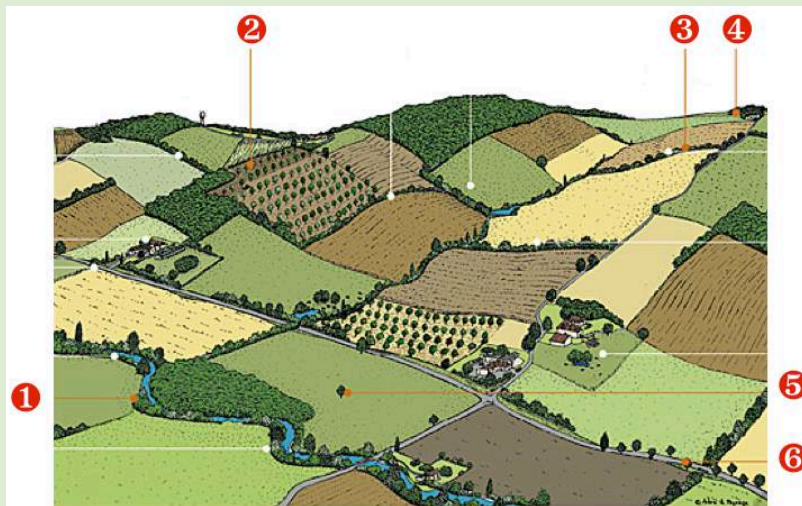
a) un profond clivage historico-culturel entre agriculteurs et forestiers, amplifié par l'intensification de l'agriculture et sa mécanisation, même si leurs relations hier conflictuelles se sont aujourd'hui apaisées.

b) la décision de planter des arbres concerne le **long terme** (plusieurs dizaines d'années) ; elle demande de prévoir l'évolution du système de production et de parier sur sa position vis-à-vis des marchés et de la politique agricole, mais aussi de prendre en compte les effets du changement climatique ; elle peut affecter des éléments structurels de l'exploitation (parcellaire) mais aussi l'équipement (traitements, fertilisation, irrigation) ; enfin, elle **requiert un statut foncier stable** jusqu'à l'exploitation des arbres.

c) La crainte que la plantation d'arbres sur les terres agricoles ne mette en cause l'éligibilité des parcelles aux primes de la politique agricole commune européenne. Ce motif, très fondé jusqu'en 2012, est aujourd'hui obsolète (en respectant un seuil maximum d'arbres fixé à 100 arbres/ha en France) mais reste vivace chez les exploitants.

d) les connaissances sur les systèmes agroforestiers sont en deçà des attentes des exploitants, **retardant leur acceptabilité** et leur adoption. Plusieurs verrous existent : (i) les leviers agrotechniques et génétiques pour améliorer les productivités conjointes des arbres et des cultures associées ; le pilotage plus complexe des systèmes agroforestiers par rapport aux cultures pures ; (ii) la quantification des propriétés de : résilience, efficacité, et autonomie, face à la diversité des situations agricoles françaises impliquant d'étudier de nombreuses combinaisons "systèmes agroforestiers/systèmes de culture et d'élevage * pédoclimat * intrants" ; (iii) la mobilisation de ces connaissances dans des analyses socio-économiques permettant de fonder des politiques et des conseils adaptés aux spécificités des territoires ; (iv) la question du manque de soutiens financiers nationaux et européens à l'agroforesterie ; de nouvelles dispositions (aides à la plantation d'arbres) viennent de corriger ce handicap.

L'agro-écologie est aujourd'hui au cœur d'enjeux sociétaux. Elle devrait ne pas limiter son domaine d'action à l'agriculture mais intégrer l'ensemble des composantes des paysages ruraux, dont les arbres, tant pour leurs fonctions écologiques, que pour les ressources qu'ils



procurent et leurs valeurs sociales (fig 6). L'agroforesterie peut être l'un des maillons de cette transition agro-écologique.

Figure 6. Paysage rural complexe 1. ripisylve - 2. parcelle agroforestière - 3. haie - 4. bosquet - 5. arbre isolé - 6. alignement -
Source : arbre & paysage 32

Ce qu'il faut retenir

- À côté des systèmes agroforestiers traditionnels, des modèles agroforestiers modernes et performants sont mis au point
- Leur fonctionnement écophysiologique et agronomique est de mieux en mieux connu, ainsi que leurs performances économiques
- L'agroforesterie est l'une des voies de l'intensification agroécologique
- Toutefois, son développement est encore freiné par des verrous juridiques, financiers, biotechniques et la complexité de sa gestion

Des forêts adaptées aux milieux et aux usages : qu'apporte la génétique ?

Les espèces d'arbres forestiers présentes en France, 140 environ dont 79 indigènes, recèlent une diversité génétique très importante. L'organisation de ce patrimoine génétique, son évolution, sa transmission sont de mieux en mieux connues. La création de variétés forestières améliorées et la conservation des ressources génétiques forestières en bénéficient et progressent rapidement. Ces actions sont une pièce essentielle de la gestion forestière durable dans un contexte marqué par la recherche de forêts à la fois plus résilientes vis-à-vis des conditions changeantes d'environnement biotique et abiotique (climat), et plus aptes à soutenir une économie fondée sur le vivant (bio-économie).

La domestication des arbres forestiers : une longue histoire limitée à quelques espèces

Même si les hommes ont appris depuis longtemps à utiliser et multiplier certains arbres (cryptomerias pour leur bois au Japon dès le Moyen-âge, en France chênes pour leurs glands doux comestibles et châtaigniers « arbres à pain » ...), la plupart des espèces d'arbres forestiers présentent une diversité génétique principalement modelée par leur histoire évolutive (migrations, effets de fondation, adaptation par sélection naturelle). La « domestication », création par l'homme de variétés reproductibles adaptées à ses besoins, n'a commencé que pour quelques dizaines d'espèces dans le monde, une dizaine en France.

Le patrimoine génétique des arbres forestiers est de mieux en mieux connu

La variabilité entre provenances

Les aires des espèces d'arbres forestiers peuvent être très étendues : on trouve par exemple le pin sylvestre de l'Espagne à la Mandchourie. Les conditions de milieu rencontrées par les populations d'une même espèce peuvent ainsi être très différentes : durée de la saison de végétation, pluviosité, caractéristiques du sol par exemple. Après Duhamel du Monceau (1700-1782), la mise en évidence de populations d'arbres adaptées, grâce à la sélection naturelle, aux spécificités de leur milieu d'origine a permis la définition du concept de « région de provenance ». Des expériences internationales à vaste échelle, coordonnées par l'IUFRO (Union internationale des organismes de recherche forestière) depuis les années 1930, ont permis de découvrir l'amplitude et les patrons d'organisation spatiale de la variabilité génétique de nombreuses espèces forestières et de préciser ainsi le choix des sources de graines.

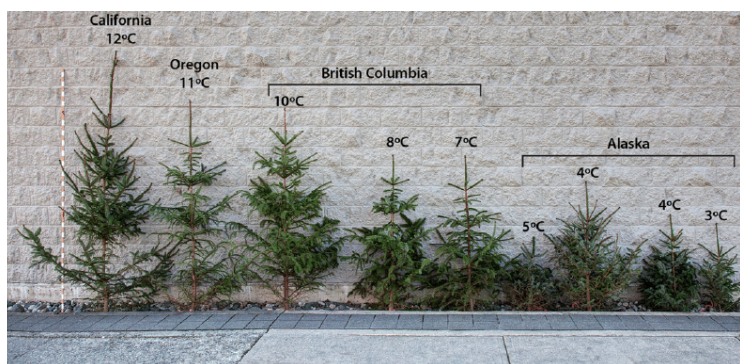


Figure 1. Exemple de variabilité génétique clinale chez l'Epicéa de Sitka (originaire de la Côte Pacifique nord-américaine) pour la hauteur à 8 ans mesurée dans une plantation comparative de provenances située à Vancouver (Canada). Chaque arbre est représentatif de la moyenne de la population à laquelle il appartient. Les populations (provenances) ont été échantillonnées le long d'un gradient latitudinal se superposant à un gradient de température moyenne annuelle. La croissance en hauteur montre une décroissance régulière du sud au nord selon la température moyenne annuelle et la latitude. (Source : Mimura et Aitken, 2007)

Provenance : population d'arbres caractérisée par sa localisation géographique où les arbres sont supposés se reproduire entre eux aléatoirement - **Région de provenance** : territoire au sein duquel les conditions écologiques (climat, types de sols ...) sont relativement homogènes. Les provenances d'une même région de provenance sont considérées comme globalement adaptées aux mêmes types de milieux.

La variabilité individuelle

Le régime de reproduction allogame (la fécondation est préférentiellement croisée) de la très grande majorité des espèces forestières et la très grande taille de leurs populations favorisent le maintien d'une très grande variabilité génétique et phénotypique entre arbres d'une même provenance. Les caractères d'intérêt pour l'adaptation et la productivité sont souvent gouvernés par de nombreux gènes et présentent une variation continue. Les travaux de recherche conduits depuis les années 1960 sur de nombreuses espèces en utilisant les méthodes de la génétique quantitative ont permis d'évaluer la variabilité génétique et l'héritabilité (part des facteurs génétiques dans la variation de l'expression d'un caractère phénotypique mesurable) de très nombreux caractères. Cette héritabilité, clé de la sélection, peut être forte (par exemple pour la précocité de débournement au printemps et la densité du bois), moyenne (souvent pour la croissance en hauteur) ou faible (par exemple pour la rectitude du fût).



Figure 2. Exemple de variabilité génétique entre individus (clones) : sensibilité à la rouille foliaire du peuplier - les individus de gauche défeuillés ou aux feuilles brunes appartiennent tous au clone Beaupré très sensible aux variants du champignon pathogène porteur de la virulence 7, très fréquente en Europe. A droite, les individus du clone I-214, résistant à ces mêmes variants portent tous des feuilles encore bien vertes, pas ou très peu attaquées. - Source : J. Pinon

L'équation de base en génétique quantitative : $P = G + E + G \times E$ avec : i) P : phénotype (observé) ; ii) G : génotype (transmis) ; iii) E : effet de l'environnement (sol, climat), dont la sylviculture ; iv) G x E : interaction entre le génotype et l'environnement. L'évaluation des effets génétiques suppose celle des effets environnementaux : cela n'est possible qu'en dispositif expérimental. La proportion de variance phénotypique expliquée par des différences de nature génétique permet d'estimer l'héritabilité du caractère.

La révolution du déchiffrement de l'ADN

En moyenne, les arbres forestiers présentent une plus grande diversité génétique que les autres organismes vivants. Cette diversité est interprétée comme un facteur essentiel de la résistance des arbres et des peuplements à de nombreux aléas, rendue nécessaire par leur longévité. A partir des années 1970, la découverte de marqueurs liés à l'activité des variantes (allèles) de certains gènes a ouvert l'essor de la génétique des populations : les connaissances en matière de diversité, dispersion, etc., se sont accrues. Depuis 1990, l'accès à l'ADN résultant des progrès de la biologie moléculaire a permis d'accéder à un nombre beaucoup plus élevé de gènes. Des cartes génétiques, localisant les gènes sur les chromosomes, ont été établies pour quelques espèces majeures d'arbres forestiers, notamment de peuplier, d'eucalyptus et de chêne chez les feuillus, pour l'épicéa commun et le pin maritime chez les conifères. Une importante diversité a aussi été découverte sur les parties non codantes des chromosomes, et sur l'ADN non inclus dans le noyau (chloroplastes, mitochondries). L'analyse désormais possible à faible coût des différentes variantes de l'ADN fournit de nouveaux outils pour étudier la diversité génétique aux différents niveaux (entre espèces, entre provenances, entre individus). Elle permet de suivre la dispersion des gènes lors de la reproduction sexuée (par le pollen ou les graines). Elle débouche aussi sur de nouvelles méthodes de sélection combinant des informations phénotypiques et des informations génétiques, du niveau du gène à l'ensemble du génome.

Une action publique équilibrant amélioration et protection

Pour le ministère chargé des forêts, la diversité génétique des arbres forestiers est un patrimoine à préserver pour assurer la stabilité et la capacité d'évolution des forêts, et à valoriser par la création de variétés améliorées répondant mieux aux besoins de la société (cf bibliographie 1). L'action de ce ministère comporte deux politiques étroitement coordonnées. La politique de **conservation** est suivie depuis 1991 par la Commission Nationale des Ressources Génétiques Forestières. Reconnue d'intérêt général, adossée au programme européen EUFORGEN, elle concerne aujourd'hui une quinzaine d'espèces. Elle a conduit à la création de collections gérées de manière délocalisée (*ex situ*) pour un petit

nombre d'espèces ou provenances très menacées (cf *bibliographie 2*). Dans la majorité des cas, elle repose sur la préservation de populations dans leur environnement forestier (on parle de « conservation *in situ* dynamique »).

La politique **d'amélioration des matériels forestiers de reproduction** (graines et plants) a débuté dans les années 1970 en application de la directive européenne 66/404. Elle s'applique en 2017 à 66 espèces. Elle s'appuie sur une réglementation qui distingue quatre catégories de matériels forestiers de reproduction correspondant à des niveaux croissants de connaissance sur l'origine de ces matériels et sur leur niveau de performances pour les caractères d'intérêt. Chaque catégorie est reconnaissable à la couleur de ses étiquettes : **Identifiée, Sélectionnée, Qualifiée, Testée** (cf *bibliographie 3*).

Ces politiques complémentaires prennent toutes deux en considération la diversité génétique : elle doit être maximale dans les unités de conservation, forte dans les variétés améliorées. Les ressources naturelles servent de matériel de base aux programmes d'amélioration. Certains supports de gestion sont communs : peuplements, vergers-à-graines ou variétés à plusieurs clones pouvant participer à la fois à la conservation et à la production commerciale de matériels de reproduction.

A chaque espèce son approche selon sa biologie et son importance écologique et économique

L'objectif de **conservation** est prioritaire pour quelques espèces : pour des raisons sanitaires pour les ormes décimés par la graphiose et les frênes communs fortement impactés par l'arrivée récente de la chalarose, ou pour des espèces d'intérêt particulier : cormier, alisier de Fontainebleau, pin de Salzmann . Dans le cas général, programme de conservation et réglementation des matériels forestiers de



Figure 3. Filets au sol pour la récolte de faînes en peuplement porte-graines de hêtre (ONF)

reproduction sont articulés. Pour 23 espèces sociales, un important ensemble de peuplements porte-graines (fig. 3), couvrant tout l'éventail écologique de leur aire de distribution structuré en régions de provenance, a été mis en place : au total environ 1 400 peuplements pour 61 000 ha. Ces peuplements constituent la source unique de semences en catégorie sélectionnée pour quelques grandes espèces sociales (sapin pectiné, chênes, hêtre, érables, ...). Dans le cas du cèdre, certains de ces peuplements sont inscrits dans la catégorie testée. Certains peuplements porte-graines ou écotypes particuliers sont inclus dans le réseau de conservation *in situ* de leur espèce : chêne sessile, hêtre, merisier, épicéa commun, sapin pectiné, pin maritime, pin sylvestre.

Pour dix espèces très utilisées en reboisement, une ou plusieurs **variétés ont été créées à partir de sélections individuelles** : frêne commun, merisier et cormier chez les feuillus, pin maritime, douglas, pin sylvestre, pins laricio de Corse et de Calabre, épicéa commun, mélèze d'Europe, sapin de Bonnmüller chez les conifères. La sélection a le plus souvent été opérée sur des critères d'adaptation (débourrement végétatif), sur la croissance, mais aussi sur la forme (rectitude du fût, branches). Ces variétés sont produites en vergers à graines (fig.4) de catégorie Qualifiée ou Testée. Certains de ces vergers assurent une large part de la consommation nationale de semences : 100 % pour le douglas, 80 à 90 % pour le pin maritime. Pour ce dernier les variétés actuellement diffusées apportent un gain de production de bois de l'ordre de 25% par rapport à une variété non améliorée. La création de nouvelles variétés se poursuit pour le pin maritime et le douglas ; elle est envisagée pour le cèdre, le sapin de Céphalonie, le robinier et plusieurs feuillus.

Qu'est-ce qu'un verger à graines ?

Plantation d'arbres sélectionnés, maximisant leurs possibilités de s'interféconder et gérée pour produire à faible coût les graines d'une variété améliorée.

Qu'est-ce qu'un clone ?

Ensemble constitué par un individu initial et toutes les copies génétiquement identiques qui en sont obtenues par multiplication végétative

Au sein des genres Peuplier, Noyer et Mélèze, les améliorateurs exploitent la vigueur que possèdent souvent les hybrides inter-spécifiques, dont certains peuvent aussi combiner des caractères intéressants séparés dans les espèces parentes. Chez le noyer et le mélèze les variétés améliorées sont multipliées par reproduction sexuée en vergers à graines. Chez le Peuplier, les individus sélectionnés sont propagés par bouturage (clones).

La longévité des arbres forestiers : un défi ardu pour le généticien.

Il doit en effet, autant que possible, armer les peuplements d'arbres cultivés contre les divers aléas qu'ils subiront pendant leur vie (sécheresses, tempêtes, fortes gelées et canicules, attaques parasitaires ...). Il doit évaluer le plus tôt possible des caractères qui s'expriment souvent à l'âge adulte (20 ans ou plus dans le cas des propriétés du bois). Compte-tenu du long intervalle de génération, il cherche à obtenir en une seule étape un gain génétique significatif sur différents caractères qui peuvent être parfois antagonistes (exemple : tardiveté du débourrement végétatif et densité du bois chez l'épicéa commun).



Figure 4. Verger à graine de clones de douglas de la Luzette (Lot) (photo : J.C. Bastien)

Le sylviculteur : un gestionnaire de patrimoine génétique

Les peuplements issus de variétés améliorées, et ceux renfermant des ressources génétiques à conserver requièrent une conduite appropriée (installation, éclaircies, régénération...). Plus généralement, le sylviculteur doit être formé pour appliquer les bonnes méthodes qui valoriseront et préserveront au mieux le patrimoine génétique de ses arbres.

Le défi du changement climatique

Une bonne gestion de la diversité génétique disponible entre les espèces forestières et en leur sein sera indispensable dans le contexte du changement climatique : Comment bien assurer la conservation (*in situ* et *ex situ*) des ressources génétiques ? Faut-il introduire de nouvelles espèces ou origines ou favoriser de nouveaux individus, espèces, ou hybrides pouvant contribuer à l'adaptation des forêts ? Faut-il « assister » la migration des espèces vers le nord ou en altitude ? Comment doser les caractères à retenir pour les nouvelles variétés cultivées ? Comment guider les utilisateurs de cette diversité génétique pour accroître la résilience des forêts et maintenir leur niveau de productivité ? (cf. fiches N° 6-03, 6-04 et 6-08).

Pour en savoir plus

1 : code forestier, notamment L 112-1 et titre V, chapitre III

2 : <http://agriculture.gouv.fr/la-politique-nationale-de-conservation-des-ressources-genetiques-forestieres>

3 : <http://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-reglementation-contrôle-et-certification>

4 : Ministère de l'agriculture et IRSTEA, 2017 : Graines et plants forestiers : conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières.

Ce qu'il faut retenir

- Chez les arbres forestiers la diversité génétique est élevée à tous les niveaux : espèce, provenance, individu.
- Les outils de la génétique quantitative et d'analyse de l'ADN permettent d'étudier comment cette diversité est organisée, et comment elle est transmise au fil des générations.
- La France s'est dotée de politiques publiques efficaces et cohérentes de préservation et d'utilisation de la diversité génétique forestière.
- Le sylviculteur doit prendre en compte le patrimoine génétique des arbres de sa forêt.
- Les variétés améliorées d'arbres forestiers font preuve d'une bonne adaptation à des milieux diversifiés et apportent des gains significatifs pour la croissance et d'autres caractères économiquement importants.
- Une gestion raisonnée de la diversité génétique naturelle et créée par l'homme est indispensable pour adapter au mieux les forêts au changement climatique annoncé.

Les technologies d'observations à distance : quels usages pour la forêt ?

L'observation directe des forêts et de leurs évolutions est complexe du fait de l'étendue de leur surface, et de leur situation en zones de relief ou d'accès difficiles. Satellites, avions, drones, capteurs optiques, RADAR, LiDAR, les moyens d'observation de la terre (et donc de la forêt) à distance sont de plus en plus nombreux. Quelles données fournissent-ils ? Quelles informations la foresterie peut-elle en tirer ? Au-delà de projets de recherche souvent très prometteurs, quelles sont actuellement les applications opérationnelles ? Cette fiche propose un bref état des lieux sur le sujet dans le contexte français.

Des capteurs multiples et des moyens d'acquisition variés

Les capteurs de télédétection mesurent la réflexion ou l'émission du rayonnement électromagnétique. Les capteurs optiques exploitent le rayonnement solaire du visible jusqu'au moyen infrarouge, les capteurs RADAR mesurent la réflexion d'un signal RADAR (micro-ondes), les capteurs LiDAR exploitant quant à eux la réflexion d'un faisceau laser. Selon leur nature, ces capteurs sont sensibles à des informations comme la proportion de couvert végétal, son activité chlorophyllienne, son état hydrique, la structure de sa surface, ou encore à la biomasse ou au volume des végétaux. Certains capteurs (LiDAR, photographies aériennes stéréoscopiques) permettent en outre d'accéder au relief de la surface de la canopée ou même au relief du terrain sous les arbres (LiDAR, RADAR).

La finesse géométrique ou *résolution* des images des images de satellite peut varier de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de centimètres, alors que les images acquises par avion, hélicoptère, ULM ou drone fournissent des images de 50 cm à quelques centimètres de résolution. La répétitivité des acquisitions de données est un élément important. Les satellites sont programmés pour survoler chaque point du territoire de manière régulière, tous les 10 à 26 jours selon les satellites. Certains capturent une image à chacun de leur passage, fournissant ainsi une couverture exhaustive du territoire (cas de Landsat et de Sentinel). La régularité de cette couverture temporelle dépend toutefois des conditions météorologiques. L'ennuage est un facteur très limitant pour obtenir des images dans le domaine optique ; inversement les capteurs RADAR peuvent « voir » à travers les nuages. D'autres systèmes n'enregistrent des données que sur programmation spécifique, comme les satellites Spot 6/7 ou les satellites à résolution fine comme Pléiades. Ils peuvent ainsi couvrir une zone d'étude « à la demande », mais aussi orienter leur visée pour réaliser des images stéréoscopiques

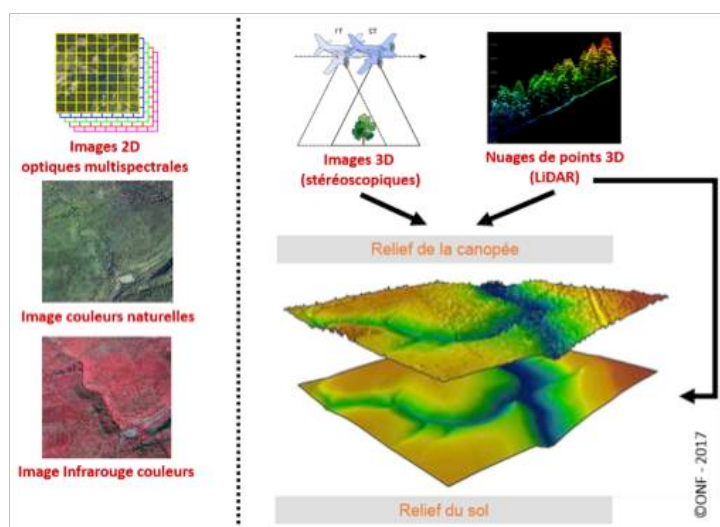


Figure 1. Données 2D et 3D obtenues par télédétection : à gauche images 2D multispectrales ; à droite données 3D issues de photographies stéréoscopiques ou de LiDAR qui permettent de décrire le relief de surface de la canopée ; le LiDAR permettant en plus d'obtenir le relief du sol sous la canopée.

Transformer les données de télédétection en informations utiles

Les données de télédétection les plus courantes sont des images en 2D. D'autres se présentent sous forme de données 3D [fig. 1] : représentation de la surface de la canopée issue d'images stéréoscopiques acquises par avion ou satellite; nuages de points LiDAR correspondant à la localisation des éléments qui ont été impactés et ont réfléchi le rayon laser. Mais en elles-mêmes, ces données brutes sont « muettes » : leur transformation en information utile pour la gestion forestière nécessite donc une étape **d'analyse**.

L'analyse peut être simplement visuelle : c'est la photointerprétation. L'Inventaire Forestier National (désormais l'IGN) établit ainsi la carte des principales espèces forestières, à partir de photographies aériennes. L'opérateur s'appuie sur sa connaissance de la forêt et de la région à cartographier. Il effectue également de nombreux contrôles sur le terrain, afin de faire le lien entre la nature du peuplement forestier et l'image.

Mais les données numériques sont surtout exploitées par des procédures de calculs : traitement d'images, traitement du signal, analyse de la géométrie 3D des nuages de points LiDAR. Si certaines procédures d'analyses sont déjà bien connues, d'autres sont en plein développement grâce à la recherche, notamment pour l'analyse de données LiDAR, d'images à très fine résolution ou de données stéréoscopiques. Ces procédures reposent généralement sur l'établissement de relations mathématiques entre d'une part des informations de terrain et d'autre part des informations extraites des données de télédétection sur les mêmes zones. Elles intègrent également des données existantes et des connaissances expertes. Ainsi, même si la télédétection permet d'observer à distance, les informations de terrain sont indispensables à son utilisation !

Quelques exemples d'utilisation de la télédétection en foresterie

Les premières applications ont exploité la capacité de la télédétection à observer et suivre de grands territoires souvent peu accessibles : détection et suivi de déforestation en zone tropicale, cartographie de défoliations massives en Amérique du Nord. Pour la forêt française tempérée, les applications se développent surtout depuis l'apparition de données à résolution fine : en effet, dans le contexte d'une forêt très mélangée et variée, gérée intensivement, et relativement aisée d'accès, l'utilisation des satellites à résolution trop « grossière » n'était pas suffisante.



Figure 2. Suivi des trouées d'exploitation forestières en forêt Guyanaise, sur une image Pléiades : les trouées apparaissent en couleur claire.

Contient des informations © CNES – IGN 2014 – distribution Airbus DS / France – tous droits réservés.

En Guyane, la télédétection a naturellement trouvé sa place, dans un territoire très vaste, difficile d'accès et porteurs de très nombreux enjeux. Ainsi, depuis 2008, l'ONF, le CIRAD et le Parc Amazonien ont mis en place un observatoire des activités minières pour le suivi des exploitations aurifères légales et la détection de l'orpaillage illégal. L'observatoire repose sur l'utilisation d'images de satellites optiques (Spot, Landsat, Sentinel), pour détecter les déboisements, mais aussi la turbidité des eaux des rivières causée par les exploitations minières. A plus fine échelle, les images Pléiades sont utilisées pour cartographier et suivre les trouées d'exploitations forestières. [fig. 2]. Au niveau international, les images de satellites sont régulièrement utilisées pour le suivi de la déforestation et leurs résultats sont utilisés en appui à la définition de politiques forestières ou de démarches de certification. En zone tropicale, les images RADAR, non sensibles aux nuages se révèlent alors précieuses.

Les services de la Défense des Forêts contre les Incendies se sont appropriés depuis de nombreuses années les données de télédétection. Ils établissent notamment des cartes de combustibilité des couverts végétaux réalisées à partir d'images satellites de résolution variant entre 5 et 30m et de cartes d'occupation du sol ou de cartes forestières existantes.

Ces cartes peuvent être ensuite utilisées dans des analyses de la sensibilité au feu, par croisement avec des indices bioclimatiques (pente, ensoleillement) et des indices de sécheresse. Mais l'utilisation la plus connue dans le domaine des incendies de forêt est sans doute la cartographie des feux et de leur sévérité, à partir d'une comparaison d'images de satellites avant / après incendie [fig. 3] : la répétitivité du passage des satellites et de l'acquisition des images sont ici des atouts essentiels.

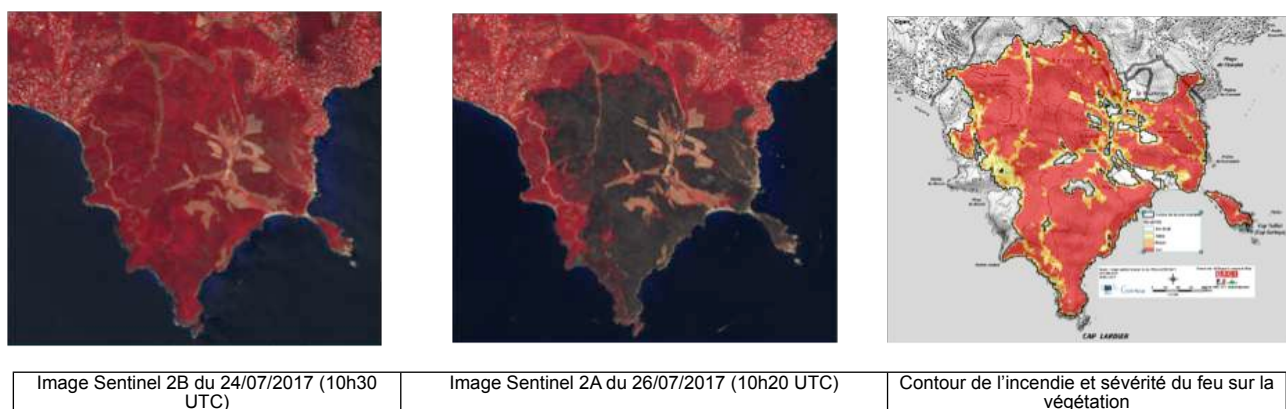


Figure 3. Cartographie du contour et de la sévérité l'incendie du 24/07/2017 sur le site de la Croix-Valmer (Var) réalisée par le service DFCI de l'ONF, à partir de deux images Sentinel très proches de l'incendie : une image acquise le matin même (avant le début de l'incendie) et une autre image acquise deux jours après l'incendie. *Données Copernicus Sentinel-2 2017.*

Les images de satellites ont également démontré leur utilité pour l'évaluation des impacts de tempêtes. Lors des tempêtes de 1999, l'IFN a mis au point une démarche d'analyse d'images de satellites également basée sur la comparaison d'images à résolution décimétrique (Spot) avant / après tempête. Cette méthode a été améliorée et utilisée après la tempête Klaus de 2009 sur le massif landais et serait reproductible en cas de nouvel événement majeur, notamment grâce aux images Sentinel-2. A une échelle plus locale, l'ONF a utilisé à titre expérimental des images plus fines (Pléiades à résolution métrique) pour la cartographie de chablis sur le massif de Clairvaux, dans l'Aube. [fig. 4].



Figure 4. Détection de dégâts de tempête à partir de la comparaison entre une photographie aérienne avant tempête (BDOrtho® IGN) et une image Pléiades après tempête. Contient des informations © CNES –2014 – distribution Airbus DS / France – tous droits réservés.

L'utilisation de la télédétection pour la **connaissance et le suivi de la ressource forestière** est quant à elle en plein essor. En complément des statistiques nationales de l'IFN et des descriptions locales réalisées pour les plans de gestion forestiers, la télédétection peut désormais apporter des informations cartographiques quantitatives sur les forêts. Ainsi, sur le massif Landais, une méthode de cartographie annuelle des coupes, développée par l'INRA en 1993, reprise et améliorée par l'IFN, a permis de détecter les coupes rases sur près d'un million d'hectares, de 1984 à 2008.

Les nouvelles données 3D à fine résolution, offrent désormais la possibilité d'accéder à **une information sur la ressource sur pied, à l'échelle des parcelles forestières**. Ainsi, les données LiDAR permettent d'accéder à des informations dendrométriques comme la hauteur dominante, la surface terrière ou le volume. La qualité des informations obtenues a conduit l'ONF à initier des projets pré-opérationnels pour utiliser ces données pour les plans de gestion forestiers, en fournissant des cartes quantitative de variables dendrométriques (par ex. hauteur dominante, surface terrière). [fig. 5].

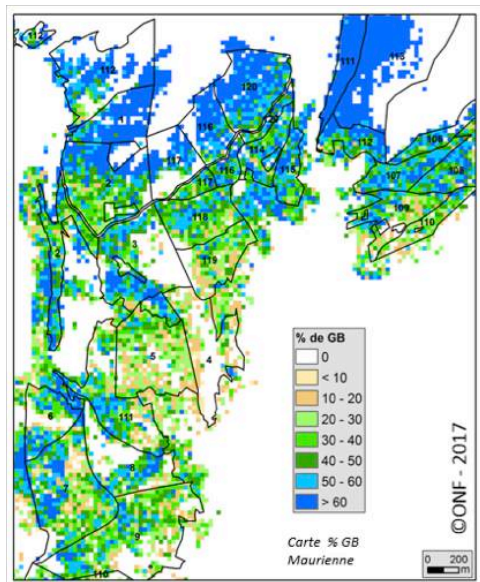


Figure 5. Carte du pourcentage de gros bois issue de l'analyse de données LiDAR, secteur de la Maurienne : calcul réalisé par l'ONF dans le cadre de la révision de l'aménagement forestier. La carte montre la variabilité entre les parcelles et à l'intérieur des parcelles.

Mais bien avant son utilisation pour l'analyse du couvert forestier, le LiDAR a été utilisé pour sa capacité à « traverser » la canopée, offrant ainsi une description fine du relief du sol. Ces **cartes de relief très précises** sont largement utilisées pour la détection de vestiges archéologiques. En gestion forestière, cette description du relief est essentielle en zone de montagne pour compléter et

améliorer l'inventaire de la desserte, cartographier l'exploitabilité des peuplements et aider à l'implantation de nouvelles routes, pistes ou lignes de câble. En Guyane, les cartes du relief issues de LiDAR aérien sont utilisées pour optimiser le réseau de routes et de pistes forestières [fig. 6]. La télédétection apporte alors un double avantage : économies importantes, en limitant les prospections sur le terrain, et réduction de l'impact de la desserte sur les sols et les peuplements forestiers.

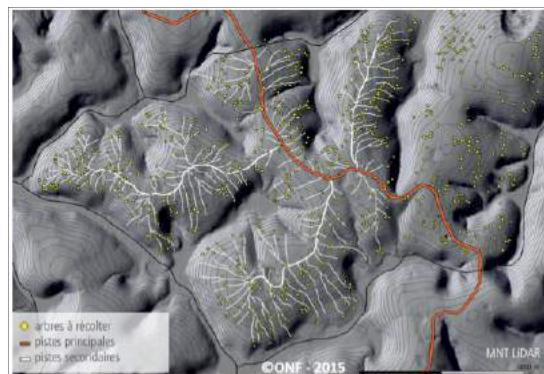


Figure 6. Carte du relief issue de LiDAR en Guyane, avec tracé automatique des pistes et routes d'exploitation à partir du relief et de la localisation des arbres (source ONF)

Une technologie en évolution constante

Les données et les moyens d'acquisition ne cessent de se développer. Les nouveaux moyens d'acquisition de données tels les drones, offriront à court terme une solution intéressante pour observer très précisément des surfaces de quelques dizaines d'hectares. A des altitudes bien plus élevées, la résolution de certaines images de satellites ne cesse de progresser, devenant désormais équivalente à celles des photographies aériennes. D'autres systèmes satellitaires comme les Sentinel du programme européen Copernicus permettent désormais de couvrir en routine l'ensemble du globe tous les 5 jours avec des pixels de 10-20m.

Enfin, les capteurs fourniront dans un avenir proche des données de plus en plus riches et de plus en plus intéressantes : capteurs hyperspectraux utilisables pour apprécier la richesse en espèces, satellite RADAR Biomass dédié au suivi de la biomasse forestière sur l'ensemble du globe.

Technologie prometteuse dès la mise en service des premiers satellites, la télédétection rend désormais des services opérationnels, fruits des travaux de recherche et de R&D engagés il y a plusieurs dizaines d'années. Les nouvelles données offriront de nouvelles solutions pour répondre aux enjeux croissants du suivi et de la gestion des forêts : l'utilisation de ces nouvelles données plus riches, plus fréquentes, plus détaillées, et leur couplage avec des données de terrain, d'autres bases de données ou d'autres types de données de télédétection constitue les prochains challenges de la communauté scientifique.

Ce qu'il faut retenir

- Les technologies de télédétection sont nombreuses, les moyens d'acquisition très variés et ne cessent d'évoluer.
- Les données disponibles deviennent de plus en plus pertinentes pour l'étude et le suivi des forêts, de l'échelle mondiale à l'échelle locale.
- La conversion de ces données en informations utiles nécessite leur combinaison avec des informations de terrain ou d'autres données de référence.
- Les applications opérationnelles sont de plus en plus nombreuses, pour le suivi des forêts tropicales, la prévention et l'évaluation des risques, et la gestion forestière.
- Les données 3D issues du LiDAR aérien et des photographies aériennes stéréoscopiques offrent des perspectives particulièrement intéressantes pour la connaissance des peuplements forestiers.

Recommandations : voir aussi la fiche 1.10

Une récolte accrue de bois est-elle raisonnablement possible ?

La transition vers la croissance verte, fondée en partie sur un rôle accru de la bio-économie, implique l'utilisation accrue d'une biomasse ligneuse, produite de manière durable. Dans quelle mesure et à quelles conditions, les forêts françaises, compte-tenu de leurs caractéristiques et de leur diversité éco-régionale, peuvent-elles procurer ce supplément de volume de bois ?

Quels volumes de bois dans les forêts françaises ? Annuellement, quel est le niveau de récolte par rapport à leur accroissement ?

Comme pour toute utilisation de ressources renouvelables, il faut s'interroger sur la question des **stocks** et des **flux**. Dans le cas des forêts, les stocks sont constitués par le volume sur pied. Les flux sont constitués d'une part par l'accroissement biologique naturel des arbres du fait de la photosynthèse, d'autre part, et en sens inverse, par les prélèvements ou récoltes de bois. Dans le cadre d'une gestion durable à l'échelle d'une forêt ou d'un massif forestier, les prélèvements ne peuvent excéder en moyenne les accroissements annuels, ce qui aboutirait à une décapitalisation progressive du stock, donc du volume sur pied. À l'échelle régionale ou nationale, on peut agréger les données de : volume sur pied, accroissement biologique et prélèvements par récolte. Le volume d'un arbre est mesuré de façon conventionnelle selon la méthode décrite dans la figure 1. On peut noter que cette convention (ne prenant en compte que les diamètres supérieurs à 7 cm) se traduit par une sous-estimation du volume réel.

Le stock ou **volume sur pied** des forêts françaises de métropole est estimé à 2,6 milliards de mètres cubes. L'**accroissement annuel** de toutes les forêts françaises métropolitaines (Corse incluse) est estimé – avec une fiabilité qui s'améliore d'année en année – à 90,5 millions de mètres-cubes, tandis que la récolte annuelle est évaluée à 41,4 millions de mètres cubes en moyenne sur les années 2005-2013 avec une incertitude statistique de l'ordre de 2,3 millions de mètres-cubes ; ceci laisse donc un excédent annuel théorique non récolté de 46 millions de mètres-cubes. Le taux moyen de prélèvement ressort donc à 46 %. Ainsi la France accroît chaque année son capital sur pied. Naturellement, l'accroissement annuel comme le taux de prélèvement varient assez sensiblement d'une région à l'autre, en fonction des massifs et du tissu industriel utilisant les bois (cf. tableau 2). C'est ainsi qu'en Aquitaine le taux de prélèvement est de 75%, tandis que dans la région voisine de Midi-Pyrénées au caractère montagneux plus prononcé il est de 20%.

Figure 1. Mesures du volume d'un arbre (source IGN)

Le volume des arbres est estimé à partir de mesures faites au cours des opérations d'inventaire de terrain. D'une façon générale, seuls sont pris en compte dans l'inventaire les arbres dits «recensables» dont la circonférence à 1,30m de hauteur est supérieure ou égale à 23,5 cm (7,5 cm de diamètre). Le volume que l'on cherche à estimer englobe la tige principale depuis le niveau du sol jusqu'à une section de 7 cm de diamètre (dit volume «bois fort tige»).

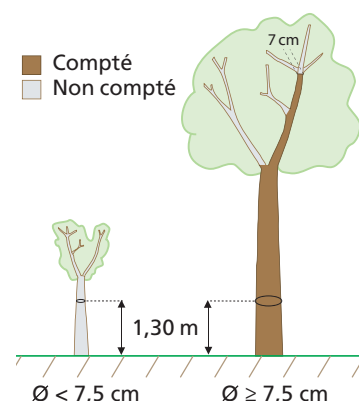


Tableau 2. Production annuelle moyenne «brute», prélèvements et mortalité calculée par Région sur la période 2004-2013 (source IGN)

La production biologique de bois en forêt correspond à l'accroissement de matière bois résultant de la croissance des arbres pendant une période donnée. Elle est exprimée ici, comme le volume sur pied, en volume « bois fort tige » (cf. fig.1) et n'inclut pas le volume des chablis de la tempête Klaus de 2009. Pour la France, elle est de 90,5 Mm³ ; pour passer à une production annuelle moyenne nette, il faut soustraire la mortalité sur la même période : 8,7 Mm³/an (soit 0,55 m³/ha/an). La production annuelle moyenne « nette » est donc de 81,8 Mm³/an. Les prélèvements correspondent au volume «bois fort tige» (cf. fig.1) des arbres vifs recensables en forêt prélevés entre deux observations (espacées de cinq ans). Ils n'incluent pas les prélèvements liés la tempête Klaus de 2009.

Alors, peut-on réellement récolter plus de bois tout en satisfaisant aux conditions de la gestion durable ?

Les données présentées ci-dessus font apparaître une part considérable de non-récolte de l'accroissement annuel net, ce qui vient augmenter le volume sur pied. Ce chiffre du "non-consommé" est sans doute à tempérer puisque dans la récolte existe une part d'ombre : le bois-bûche, souvent mobilisé à partir de boisements qui n'entrent pas dans les systèmes scientifiques de mesure ; néanmoins, en dépit de ce correctif mal chiffré, la part annuelle non récoltée reste considérable, et se mesure en dizaines de millions de mètres-cubes. Dans le même temps, les grandes industries consommatrices de bois brut (pâte à papier, sciage, panneaux), ainsi que l'énergie, déplorent régulièrement un manque de matière première. Alors : peut-on ou non récolter plus de bois ? Théoriquement : oui. Oui, mais....

La gestion forestière **durable** s'exerce dans un cadre **multifonctionnel nécessitant des compromis**, à des degrés variables selon les types de forêt, entre différents objectifs environnementaux, sociaux et économiques (voir fiche 8.01). Au niveau **environnemental**, la prise en compte de la préservation des habitats et des espèces à travers un cadre règlementaire relatif au maintien de la biodiversité vise à proscrire ou limiter fortement l'exploitation de certaines surfaces de forêt. Ceci concerne environ 195 000 hectares : les volumes ainsi gelés ne représentent qu'une petite partie du "non récolté" annuel. En montagne, où la forêt a une fonction hydrologique importante et un rôle éminent de protection, son exploitation doit être soigneusement raisonnée, tout comme l'ouverture de pistes de desserte pour la faciliter. En outre, les forêts constituent des «puits» de carbone à préserver voire accroître, ce qui interdit un déstockage trop important par l'accroissement de la récolte ou des pratiques utilisant de trop grandes coupes à blanc. La récolte des branchages et souches peut procurer une biomasse additionnelle ; elle doit

Régions	PRODUCTION (Mm ³)	PRÉLÈVEMENTS (Mm ³)	MORTALITÉ (Mm ³)
Régions côtières du Nord-Ouest			
Bretagne	2,8 ± 0,2		
Pays-de-la-Loire	2,7 ± 0,2		
Basse-Normandie	1,3 ± 0,1	4,9 ± 0,7	0,8 ± 0,1
Haute-Normandie	1,5 ± 0,1		
Picardie	2,2 ± 0,2		
Nord-Pas-de-Calais	0,8 ± 0,1		
Île-de-France, Centre et Poitou-Charentes			
Île-de-France	1,4 ± 0,1		
Centre	5,7 ± 0,2	4,0 ± 0,6	0,9 ± 0,1
Poitou-Charentes	2,5 ± 0,2		
Champagne-Ardenne et Bourgogne			
Champagne-Ardenne	4,5 ± 0,2	5,5 ± 0,8	0,6 ± 0,1
Bourgogne	6,9 ± 0,3		
Alsace, Lorraine et Franche-Comté			
Alsace	2,8 ± 0,2		
Lorraine	6,3 ± 0,3	9,1 ± 0,8	0,6 ± 0,1
Franche-Comté	5,7 ± 0,3		
Auvergne et Limousin			
Auvergne	5,8 ± 0,3	5,0 ± 1,0	1,1 ± 0,1
Limousin	4,5 ± 0,3		
Rhône-Alpes	9,8 ± 0,4	2,7 ± 0,7	1,6 ± 0,2
Aquitaine	9,8 ± 0,5	7,3 ± 1,0	0,8 ± 0,2
Midi-Pyrénées	6,0 ± 0,3	1,2 ± 0,5	0,6 ± 0,1
Sud-Est			
Languedoc-Roussillon	3,8 ± 0,3		
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	2,9 ± 0,2	1,8 ± 0,7	1,6 ± 0,2
Corse	1,0 ± 0,2		
France	90,5 ± 1,2	41,4 ± 2,3	8,7 ± 0,4

être rigoureusement évaluée du fait de son impact négatif sur la fertilité des sols par l'exportation d'éléments minéraux abondants dans les branches et du bouleversement physique et biologique du sol par le dessouchage.

Pour la **société** en général, vivant dans un cadre urbain et peu informée de la gestion forestière et de sa dimension à long terme, la coupe d'un arbre et l'exploitation forestière ont une connotation très négative, alors que les individus apprécient le matériau bois utilisé dans la construction ou l'ameublement : paradoxe surprenant ! Il n'est pas rare que des associations ou ONG en arrivent à des confrontations directes avec le gestionnaire, souvent en forêt publique, notamment dans les zones périurbaines mais pas seulement. Sous la pression, ce dernier peut être conduit à réduire les coupes ou à les différer.

La **mobilisation du bois** implique également un **accès à la ressource** sous forme de réseaux suffisants de pistes de desserte et de voies d'exploitation. C'est l'une des raisons majeures de la sous-exploitation de nombre de forêt de montagne, contribuant ainsi à l'accumulation de volume sur pied. La **structure de la propriété (surtout privée)** constitue également un frein à la mobilisation des bois. La faible taille de



Figure 3. Construction d'une route forestière aux Houches (photo Pognat)

nombreuse propriétés ne permet pas d'offrir des volumes suffisants et dans des qualités voulues. Par ailleurs le **morcellement** foncier est un obstacle sérieux à l'exploitation. Des mesures techniques (ventes groupées) et juridiques peuvent contribuer à atténuer ces handicaps. Il n'y a plus aujourd'hui de limitations techniques à la récolte forestière : les équipements mécaniques disponibles permettent d'exploiter des arbres en des lieux très reculés, mais à quel prix ? Sans même se placer dans cette situation extrême, **le prix du bois est le véritable facteur limitant la récolte**. En effet un coût trop élevé du bois va limiter son utilisation : les industriels œuvrent le plus souvent dans un contexte où leurs prix de vente ne résultent pas d'un calcul "prix de revient + marge" mais d'un indispensable alignement par rapport à leurs concurrents nationaux

ou étrangers. De leur côté, les énergéticiens doivent en permanence se poser la question de la pertinence économique du bois par rapport aux autres énergies.

Pour ce qui est de **l'économie du bois matériau (sciage, pâte, panneaux)**, le prix du bois entrant dans une usine de première transformation se décompose schématiquement en deux éléments : i) le prix du bois *sur-pied* payé au propriétaire ; ii) l'ensemble des coûts de récolte, incluant essentiellement bûcheronnage, débardage, ouverture éventuelle de pistes et transport. **Le prix du bois sur pied payé** aux propriétaires est plus une valeur transactionnelle qu'une valeur construite logiquement : hormis le cas des plantations pour lesquelles le propriétaire aura scrupuleusement relevé tous les coûts de plantation et de travaux réalisés au cours de la vie du peuplement, il est souvent très difficile de dire combien aura coûté un peuplement au moment de sa vente, et donc de s'en servir pour en fixer la valeur. Le prix payé par l'acheteur de bois *sur-pied* se définit donc surtout par référence : i) aux prix observés sur des peuplements similaires, dans la région ; ii) à ce que l'acheteur peut payer en fonction de ses propres contraintes à l'aval ; iii) à la concurrence entre acheteurs. C'est là une des "logiques" du système, qui exaspère les vendeurs : la valeur attribuée à leur produit ressort d'un calcul "en marche arrière" fait par l'industriel à partir de ce que lui-même pourra vendre son produit élaboré et de ce que lui auront coûté toutes les étapes de la transformation. Ceci engendre fréquemment une insatisfaction et un phénomène de rétention, les propriétaires préfèrent souvent "*attendre que le prix soit meilleur*". **L'ensemble des coûts de récolte**

est, à l'inverse, une valeur technique résultant de la somme de coûts de main d'œuvre, de matériels et d'aménagements ; elle n'est élastique que jusqu'à un certain point : si les différentes prestations concourant à la livraison des bois à l'industriel ne sont pas rémunérées suffisamment, elles ne se font pas et le bois reste *sur-pied* en forêt.

Pour ce qui est de l'économie du bois-matière (énergie) et notamment les plaquettes forestières, demandées par les chaufferies-bois, la problématique est la même, si ce n'est que la part du bois sur-pied est faible, voire inexistante lorsqu'il s'agit de menus bois non valorisés dans le prix de la coupe. En revanche, la partie technique est prépondérante en termes de coûts, et avec un handicap pour la forêt française : en raison de ses spécificités (parcelles de faible taille, rareté des coupes à blanc), la somme des coûts techniques (abattage, débardage, stockage, broyage, transport) est élevée. Ainsi, alors que les Scandinaves produisent de la plaquette autour de 15 €/MWh en entrée chaufferie, en France le coût est de l'ordre de 22 €/MWh, voire plus, ce qui fréquemment bloque la réalisation de chaufferies-bois ou de cogénération.



Figure 5. Plaquettes forestières
(source : ONF)

Dans les deux cas, ce sont bien évidemment les bois les moins difficiles à récolter, donc les moins chers en prix de consommation par l'utilisateur, qui sont actuellement mobilisés. Ce qui signifie que l'essentiel de la récolte potentielle supplémentaire ne serait mobilisable qu'à des prix plus élevés, et d'autant plus élevés que la ressource est moins accessible. Un des paradoxes de la forêt française est là : des disponibilités en volume (stocks et flux) considérables, mais à des coûts de mobilisation tels qu'ils rendent aujourd'hui difficiles un accroissement de la récolte, exception faite de la part liée à la «rétention» par les propriétaires, pour laquelle peut exister une relative élasticité.



Ce qu'il faut retenir

- La récolte annuelle de bois dans les forêts françaises de métropole est en moyenne très inférieure à l'accroissement net ; il en résulte une capitalisation de bois sur pied
- Pour autant, une mobilisation accrue de la ressource ligneuse est limitée par l'effet de facteurs environnementaux, sociaux et surtout économiques
- Le bilan des prélèvements vs les accroissements nets présente de grandes disparités selon les régions

Figure 6. Bûcheronnage mécanisé en forêt landaise
(source : Mediaforest)

Qu'entend-on par transition énergétique et bio-économie ?

Notre planète est confrontée à de multiples défis liés à sa démographie en expansion et une croissance économique largement fondée sur l'utilisation de ressources naturelles non renouvelables (en premier lieu desquelles les carburants d'origine fossile) et en quantité limitée. Ces développements sont générateurs de sérieuses évolutions concernant le climat et la biosphère elle-même. Peut-on en limiter les effets en réformant nos stratégies énergétiques et en ayant recours à une économie moins dépendante du carbone fossile ?

La transition énergétique : quelle définition ? quels en sont les moyens ?

D'ici 2050, cinq défis planétaires, corrélés entre eux, sont désormais identifiés:

- démographique et de développement, avec 8 milliards d'humains en 2025, et 9 milliards en 2050,
- alimentaire et agronomique, avec la convergence des régimes entre pays développés et en développement, et la nécessité de produire plus de nourriture,
- climatique, avec le réchauffement qui, selon le Groupement International des Experts sur le Climat (GIEC), pourrait progresser de + 3,5°C à + 8°C d'ici 2100, à cause de l'accumulation de gaz à effet de serre liés à l'activité humaine,
- énergétique, car ces émissions sont pour plus de 75% liées à la combustion d'énergies fossiles,
- environnemental, avec l'artificialisation des terres, le recul des forêts tropicales, la perte d'habitats et de biodiversité, les pressions multipliées sur les ressources telles que l'eau, les sols, la biomasse aquatique, agricole et forestière, les ressources minérales et métalliques.

Pour espérer maintenir à +2°C le réchauffement moyen de la terre d'ici un siècle, le GIEC préconise, d'ici 2050, de diviser par 2 les émissions anthropiques mondiales de GES, soit par 4 dans les pays développés, compte tenu de leur responsabilité historique. L'Agence Internationale de l'Energie estime qu'il faudra pour cela laisser plus de 80% des ressources fossiles connues dans le sol, et adopter une nouvelle stratégie: réduire les consommations d'énergie, améliorer l'efficacité énergétique, et passer aux énergies renouvelables: géothermie, hydraulique, solaire, éolien, biomasse. C'est ce qu'on appelle la **transition énergétique**.

Qu'appelle t'on bio-économie? Quelles sont les technologies?

La **bio-économie** désigne l'ensemble des activités liées au développement économique des produits et des services obtenus à partir de matières premières d'origine biologique ou au moyen de bio-procédés. Ce sont en premier lieu, et très majoritairement aujourd'hui, les filières économiques existantes issues de l'agriculture et de la forêt: produits alimentaires et non alimentaires (alcools, amidon, et leurs dérivés chimiques, fibres textiles naturelles), produits du bois (bois d'œuvre, sciages et produits de construction), panneaux de particules et meubles, papier et cellulose, produits chimiques dérivés du bois. On assiste au développement d'activités nouvelles, issues de la préoccupation de remplacer progressivement les matières premières fossiles par des ressources carbonées renouvelables. Le monde vivant est le seul à fournir des chaînes carbonées complexes assimilables aux molécules fossiles: la photosynthèse des végétaux chlorophylliens capte l'énergie solaire et produit la matière végétale, bases des chaînes trophiques vers le règne animal et stockant le carbone pris au gaz carbonique de l'atmosphère. Ces filières s'appuient sur des technologies matures, comme la combustion du bois, ou nouvelles, issues de la recherche :

- énergies renouvelables à base de biomasse: bois énergie, biocarburants, biogaz de méthanisation, et demain de méthanation,
- production de matériaux biosourcés pour la construction (bois, paille, chanvre etc...)
- chimie du végétal pour produire des molécules et des polymères alternatifs aux grands intermédiaires pétrochimiques (éthylène, propylène, benzène, butanol, isobutène) et tous leurs produits dérivés issus de polymères (polyesters, polyuréthanes, PVC, polystyrène), pour une très large gamme d'utilisations (engrais, solvants, colles, matériaux plastiques, textiles).

VECTEUR	BIOMASSE	TECHNOLOGIE Maturité	RENDEMENT ou bilan énergétique	Modèle économique
Chaleur	Solide (bois, paille)	Combustion (mature)	90 %	Aides (annexe 1)
Gaz G1	Humide (effluents, déchets culture)	Méthanisation voie humide, (mature)	20 à 33%	Aides (F/All) digestat +/- val.
Gaz G2 GNV	Solide (bois, paille)	Méthanation (R&D)	65-70%	Pilote (GAYA)
Électricité/ Chaleur	Solide (bois, paille, pellets)	Co-génération (mature)	34 à 75% si chaleur valorisée	Aides (UE) Chaleur diff. val.
Biodiesel G1	Colza, tournesol, soja, palme (2ù)	Transestérification (mature)	65-80% de réduct. d'énergie fossile	Aides (annexe 2)
Bioéthanol G1	Betterave, céréales, canne	Fermentation (mature)	50-80 % de réduct. d'énergie fossile	Aides
Biodiesel G2	Solide (plante entière)	Thermochimique (R&D)	35-40%	23 pilotes Biotfuel (2018)
Bioéthanol G2	Solide (plante entière)	Biochimique (R&D)	30 %	81 pilotes Futuro (2016)
BioK G3	Efflue., déchets liq.	Algues (R&D)		6 projets UE R&D
Chimie biosourcée	Solide/pl. entière/bois	Bioraffineries (R&D)		Fermentalg Dév. Eurobioref. Rech.

Figure 1. Technologies de conversion de la biomasse

Afin d'améliorer les rendements énergétiques et les bilans environnementaux des procédés, ces différentes productions (énergie et molécules ou matériaux) sont couplées dans des usines spécifiques appelées «bio-raffineries». Dans le monde, de très nombreux projets, et des moyens de recherche considérables, concernent l'amélioration des modèles économiques des «bio-raffineries», encore immatures dans la plupart des cas, et fortement dépendants des modalités et des coûts d'approvisionnement et de pré-traitement de la biomasse. Il est généralement tenté de combiner des technologies de masse produisant des quantités importantes de produits de basse valeur ajoutée (énergies), avec des technologies de pointe produisant de petites quantités de molécules à forte valeur ajoutée (médecine, chimie, cosmétique, hygiène-santé). Deux grands types de technologies sont utilisées: la «voie sèche» qui utilise des matières solides dites ligno-cellulosiques (bois, pailles), qui sont d'abord gazéifiées, puis transformées dans diverses étapes physico-chimiques, et la «voie humide», qui utilise des effluents liquides des élevages, ou des boues de stations d'épuration, ou des plantes entières, traitées par fermentation biochimique dans des réacteurs. Le bois ne sera donc concerné que par les technologies dites «sèches», chaleur et co-génération, puis biocarburants G2 et chimie bio-sourcée.

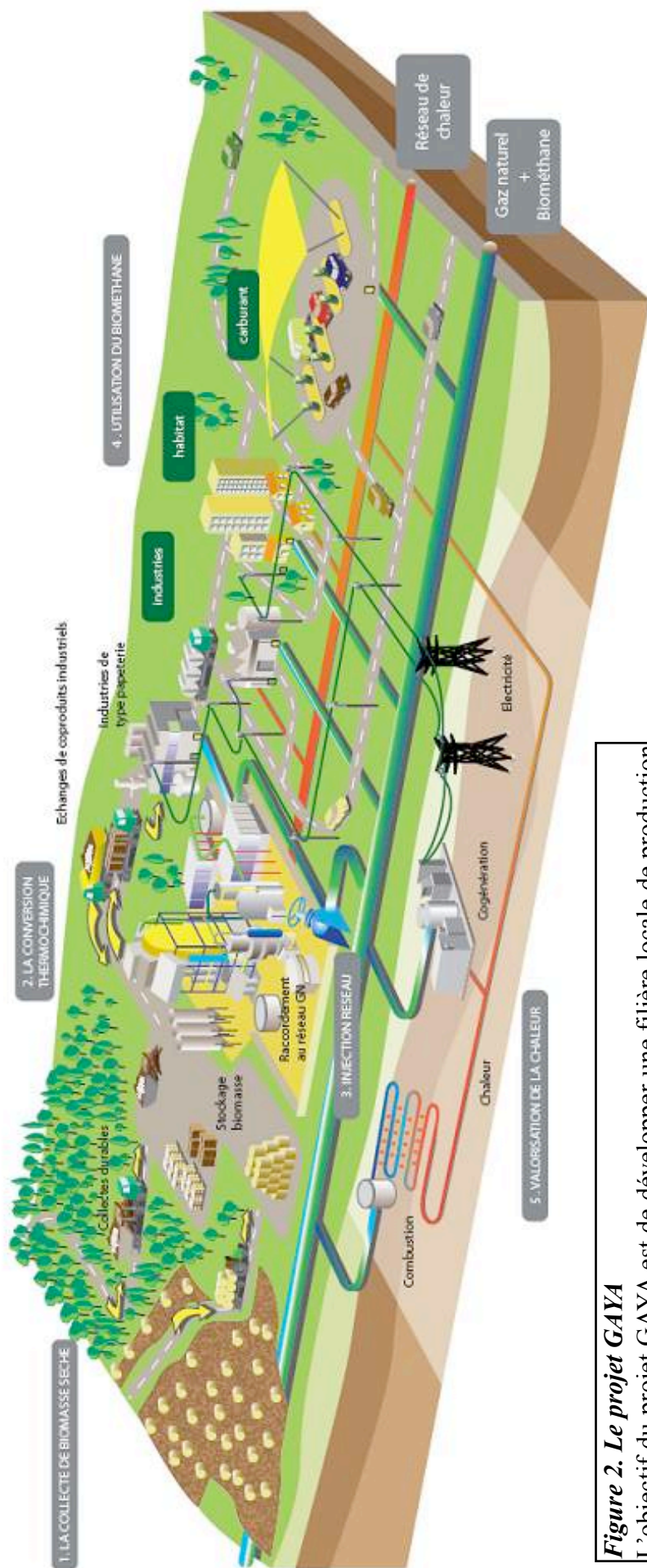


Figure 2. Le projet GAYA
 L'objectif du projet GAYA est de développer une filière locale de production de biométhane par gazéification. La conversion thermochimique de biomasse (bois, déchets de bois, paille) en biométhane s'articule autour de deux étapes principales : la gazéification et la méthanation. Elle nécessite aussi des étapes intermédiaires de purification et de mise en conformité du gaz. Le procédé de gazéification retenu pour le projet GAYA permet d'obtenir une teneur importante de méthane dans le gaz de synthèse et des teneurs en composés traces limitées. Sa faisabilité industrielle a déjà été démontrée (ex : en Autriche) et elle est adaptable à des installations de taille moyenne (10 à 60 MWth) permettant de valoriser localement la chaleur produite. Le procédé de méthanation choisi est innovant et intègre des ruptures technologiques permettant la production de biométhane de 2e génération à très haut rendement et injectable dans le réseau existant.

Certaines technologies sont déjà accessibles : production de biocarburants de première génération, ou chimie d'applications très diverses (chewing-gum, caoutchouc, adhésifs, parfumerie, liants routiers, peintures, vernis, détergents, etc..) à partir de résines, terpènes et extraits naturels de pin. D'autres, de 2ème ou 3ème génération, sont à l'état de projets de recherches dans des pilotes industriels, souvent gérés par des consortiums associant chercheurs, industriels et pôles de compétitivité, et soutenus par des programmes publics (Investissements d'avenir). On peut citer les projets FUTUROL, BIOtFUEL et GAYA (fig.2), dont la plateforme pilote est installée près de Lyon. Leur maturité est annoncée autour de 2025 pour la G2 et de 2040 pour la G3.

En France, les matériaux et produits de la chimie sont mis en marché sans incitations publiques, et les usages énergétiques sont subventionnés, car ils ne sont pas compétitifs avec les énergies fossiles, en l'absence d'un signal-prix négatif sur les émissions de GES, ou «taxe carbone».

Enfin, une partie émergente de la bio-économie est la «biologie de synthèse», qui repose sur les progrès rapides depuis 10 ans de technologies innovantes issues de la recherche : séquençage haut débit de l'ADN, automatisation de la synthèse d'ADN, modélisation et logiciels informatiques, robotique, micro-fluidique, nanotechnologies. Elle vise à reproduire ou à créer des voies métaboliques de synthèse, à des fins de production industrielle, pour des usages médicaux, chimiques ou énergétiques : synthèse de nouveaux carburants, molécules de base de la chimie comme le butadiène, et matériaux innovants à haute valeur ajoutée, à partir de l'utilisation de biomasse ligno-cellulosique ou de déchets organiques. En majorité cantonnée au laboratoire, elle connaît quelques productions industrielles, comme la bio-synthèse d'artémisinine par une entreprise française (sur la base de développements réalisés en Californie), qui permet de faire baisser suffisamment le coût de production de cet antipaludéen, pour fournir les pays les plus pauvres. Enfin son utilisation est à l'étude pour contribuer au contrôle de la pollution et à la protection des milieux naturels par des procédés de bio-remédiation (bactéries pouvant absorber et dégrader de nombreux produits toxiques en sous-produits non toxiques, ou détecter les produits toxiques et les métaux lourds).

En conclusion, on peut retenir que s'il existe une infinité de combinaisons de procédés physico-chimiques en développement, pour produire des énergies et matériaux renouvelables alternatifs au fossile, des médicaments ou des bio-procédés, à partir de biomasse, les matières premières en sont, elles, assez peu diverses: bois, pailles et résidus de culture, plantes entières et plantes alimentaires, boues et effluents d'origine biogénique. Avec le développement rapide des usages énergétiques, il est donc inéluctable que se développent des concurrences d'usage, déjà sensibles et controversées, et que se pose la question des **disponibilités en biomasse** pour alimenter toutes ces filières, même si, à l'échelle mondiale, moins du 1/10ème de la biomasse produite chaque année est récolté. La question de l'impact d'une utilisation accrue de la biomasse sur les autres biens et services issus de la forêt est également abordée (cf. fig.3) et justifie encore des recherches pour en préciser l'importance.

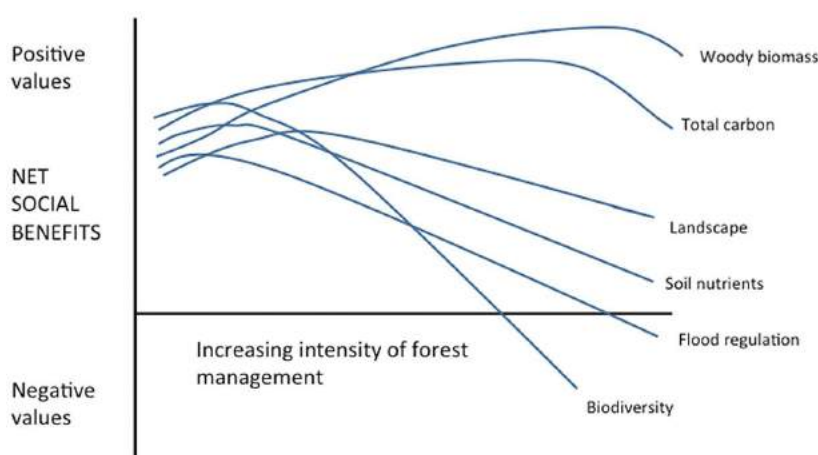


Figure 3. Relation générale entre intensité de la gestion forestière pour la production de biomasse et la fourniture des autres services écosystémiques (source : Nijnik et al., 2014)

Ce qu'il faut retenir

- Face aux défis planétaires, une approche intégrée du climat et de l'énergie apparaît comme une évidence
- La nécessaire réduction de l'émission de gaz à effet de serre implique de recourir plus massivement à un carbone plus «neutre» issu de la biomasse
- Les technologies de conversion de la biomasse en énergie et produits bio-sourcés existent et sont en développement
- La question de la disponibilité de la biomasse et de la concurrence entre filières pour son utilisation est essentielle

Recommandation : la lecture de cette fiche peut-être utilement complétée par celle des fiches 7.07 et 7.08.

Transition énergétique et bio-économie : quelles sont les stratégies actuelles ?

Dans la plupart des pays développés et des grands pays émergents, les politiques climat et énergie sont étroitement coordonnées, et la production d'énergies renouvelables, dont celles issues de la biomasse, est encouragée. Chaque région du monde, en fonction de ses impératifs énergétiques et économiques, cherche à définir son modèle de transition énergétique, où la bio-économie tient une place déterminée par ses disponibilités en biomasse agricole et forestière. Des scénarios et feuilles de routes énergétiques sont débattus, des stratégies de bio-économies sont également à l'oeuvre, dans de nombreux pays : quelle est la situation aux niveaux mondial, européen, national ?

Quelques données de contexte

La biomasse fournit 10% de la consommation mondiale d'énergie finale. Des premiers soutiens initiés lors du premier choc pétrolier, pour développer l'éthanol biocarburant comme alternative au pétrole dans les années 70 au Brésil, puis les années 80 aux Etats-Unis, on est passé aux politiques de l'énergie et du climat. Après l'adoption en 1992 de la Convention des Nations Unies sur le Changement Climatique, et l'entrée en vigueur en 2005 du Protocole de Kyoto, l'Union européenne s'est dotée en 2008 d'un «paquet énergie climat» qui a affiché «l'objectif des 3X20» pour 2020 :- réduire de 20% les émissions de GES, réduire de 20% la consommation d'énergie, atteindre 20% d'énergies renouvelables.

Quelle situation au niveau mondial ?

Au niveau mondial, l'Agence Internationale de l'Énergie produit divers scénarios de limitation des émissions et du réchauffement selon le poids des vecteurs énergétiques alternatifs au fossile : nucléaire et énergies renouvelables, dont la biomasse (fig.1).

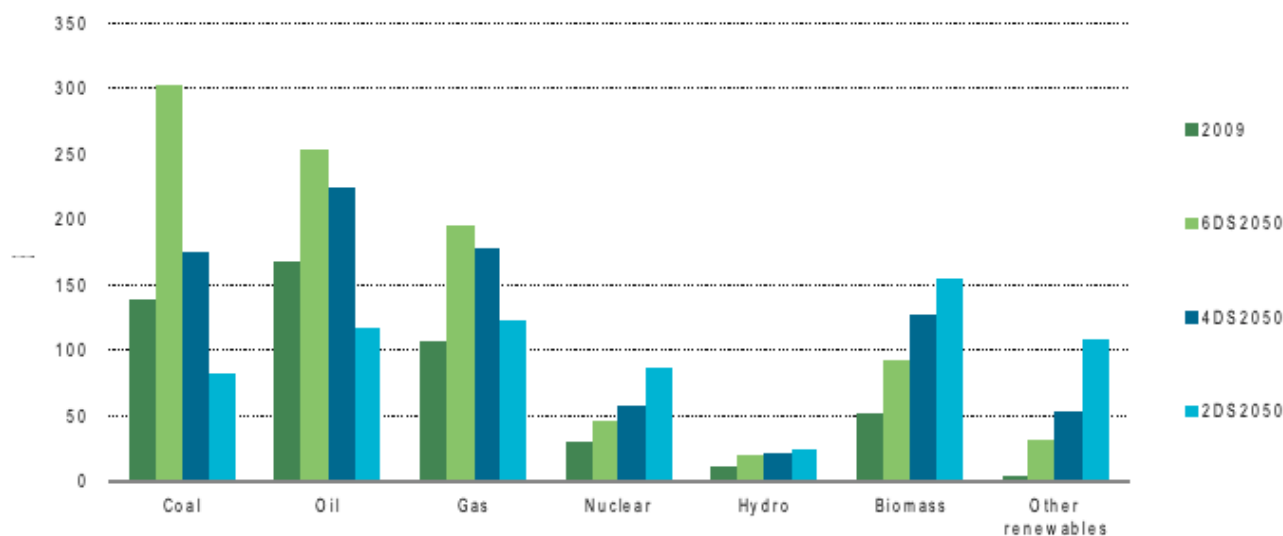


Figure 1 Perspectives énergétiques (en exajoules) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) (2012)

6DS 2050: scénario à +6°C en 2050; 4DS 2050: scénario à +4°C en 2050; 2DS 2050: scénario à +2°C en 2050

Ce graphique montre que la place de la biomasse est d'autant plus grande que les scénarios sont plus ambitieux; en outre, elle est plus importante dans la chaleur et le transport que dans la production d'électricité, qui peut s'appuyer sur un bouquet de technologies alternatives plus varié. Le continent américain est particulièrement avancé dans le développement de biocarburants G1.

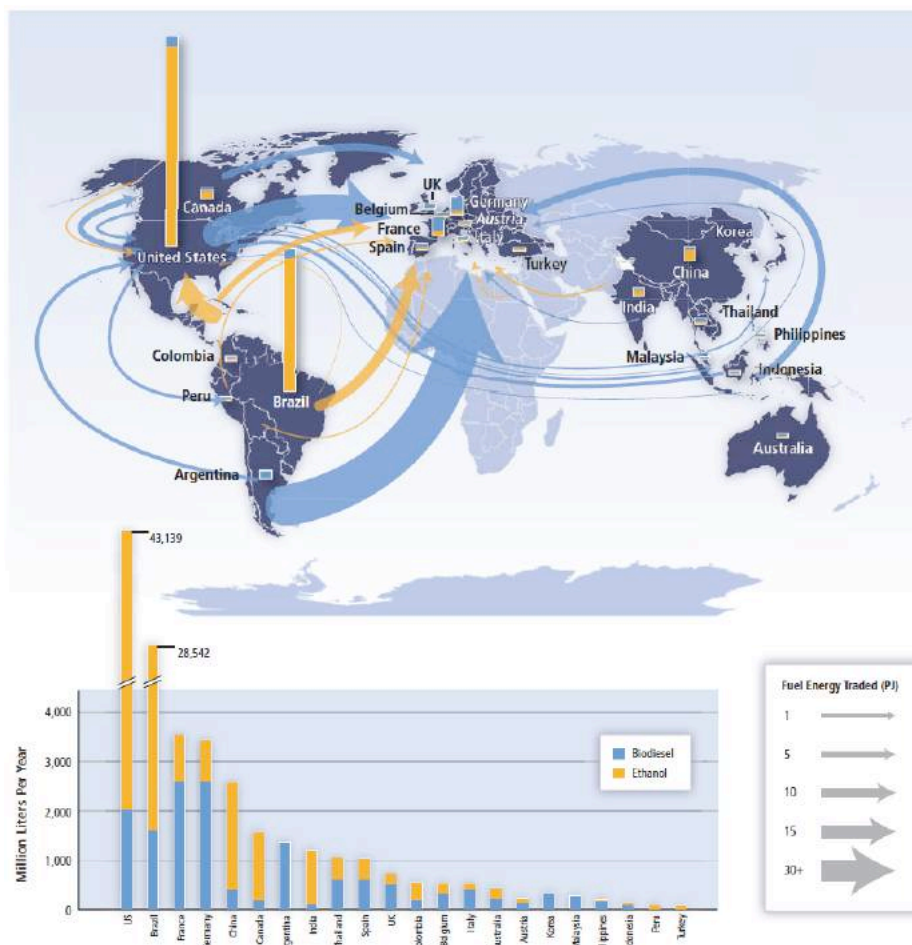


Figure 2. Production et échanges mondiaux de biocarburants G1 (source IPCC 2009)

en jaune : bioéthanol de canne et maïs ; en bleu biodiesel d'oléagineux

L'Amérique du Nord l'est également pour les granulés de bois, alors que les pays du nord de l'Europe (Royaume Uni, Suède, Pays Bas, Danemark) sont fortement dépendants du bois importé pour réduire les émissions de leur production électrique, par la technique du co-firing, qui consiste à mélanger combustible issu du bois (granulés ou pellets) au charbon.

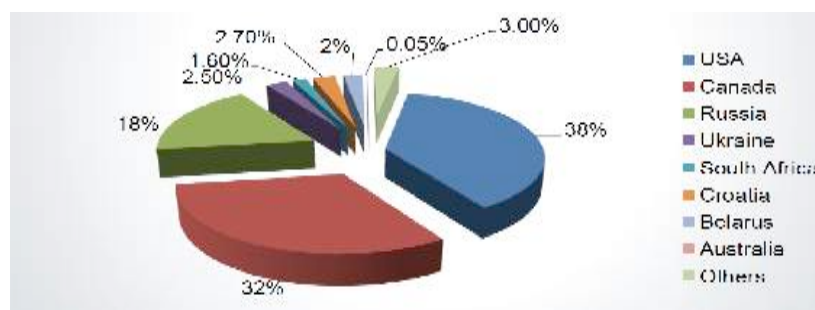


Figure 3. Importations européennes de granulés de bois (source EKMAN, colloque PROPELLETS 2014)

L'Europe en retard sur l'emploi de biomasse dans les énergies renouvelables

Selon la Commission (COM 22 01 2014), l'Union devrait viser un objectif de réduction de 40% de ses émissions de GES en 2030/1990, soit le facteur 4 en 2050. Ce rapport indique que «la décarbonisation nécessitera une grande quantité de biomasse pour la chaleur, l'électricité, le transport non électrifiable (poids lourds, aviation).

Très contrastés selon les usages énergétiques et les pays, les objectifs en biomasse pour 2020 semblent difficiles à atteindre : l'Europe visait 100 Mtep issues de biomasse en 2020, si les tendances constatées en 2013 se prolongent, seules 82Mtep seraient atteintes (rapport 2013/175 de la Commission sur les progrès accomplis dans le secteur des EnR). Une grande part semble déjà due à l'importation. Une vaste étude européenne a été lancée pour connaître la disponibilité forestière européenne (projet USEWOOD). Des critères de durabilité sur la biomasse solide, comparables à ceux existants sur les biocarburants, sont demandés.

En France, des scénarios ambitieux, des résultats contrastés, des controverses.

La France dispose d'une ressource forestière abondante et pour l'instant peu valorisée: seule environ la moitié de l'accroissement annuel est récolté. Une étude faite pour l'ADEME en 2009, a évalué à 19 Mm³ la disponibilité supplémentaire en bois de faible diamètre, adapté pour l'énergie et l'industrie, et actuellement délaissés par leurs propriétaires. Dans son plan national pour les énergies renouvelables 2009/2020, la France s'est appuyée particulièrement sur la biomasse qui devra passer de 9,9 Mtep en 2005 à 21,5 Mtep en 2020 (sur les 35,7 Mtep visées en EnR/an). L'objectif correspondant en bois énergie (BE) équivaut à récolter chaque année un supplément de 21 millions de mètres cubes en bois total, dont 8 Mm³ de bois d'œuvre (BO) pour générer les flux de sous-produits nécessaires à l'alimentation des marchés industrie et énergie : + 21 Mm³ /an = + 8 Mm³/an de BO (5 feuillus + 3 résineux)+ 1 Mm³ /an de BI (bois d'industrie)+ 12 Mm³/an de BE. Le Fonds Chaleur de l'ADEME mis en place en 2008 pour développer les usages collectifs et industriels, a permis d'atteindre +1,3 Mtep/an, dont plus d'1Mtep issues du bois, dans de bonnes conditions économiques (20€/tep, au lieu de 48€/tep pour la géothermie, et 547€/tep pour le solaire) et pour des projets de taille moyenne, dont l'approvisionnement est orienté préférentiellement sur des déchets et résidus de l'exploitation forestière, provenant au moins à 50% de forêt. En revanche, le dimensionnement des projets de centrales de co-génération de biomasse soutenues depuis 2003 par les « appels d'offre de la CRE » fait débat : certaines atteignent plus de 1Mm³ de besoin de bois annuel, et sont accusées de déstabiliser les bassins d'approvisionnement de l'industrie.

Les controverses se multiplient sur les soutiens publics à l'origine de ces volumes, et sur la pénurie croissante constatée par les industriels du papier et du panneau, en rondins de petit diamètre, qui alimentent désormais les chaufferies bois, et en sous produits du sciage, de plus en plus orientés vers la production de granulés, très compétitifs en prix du Kwh PCI. La stagnation de la récolte, le recul des volumes sciés entre 2001 et 2010 (- 43% en feuillus, -11% en résineux source AGRESTE) n'offrent pas de perspectives favorables, non plus que le fort déficit commercial de la filière: 5,8Md€ en 2013, dont 1,5Md€ sur les sciages et les produits de construction. Ces chiffres traduisent l'inadaptation de l'appareil industriel de 1ère et 2ème transformation, à valoriser la ressource et à générer des sous-produits pour l'industrie et l'énergie.

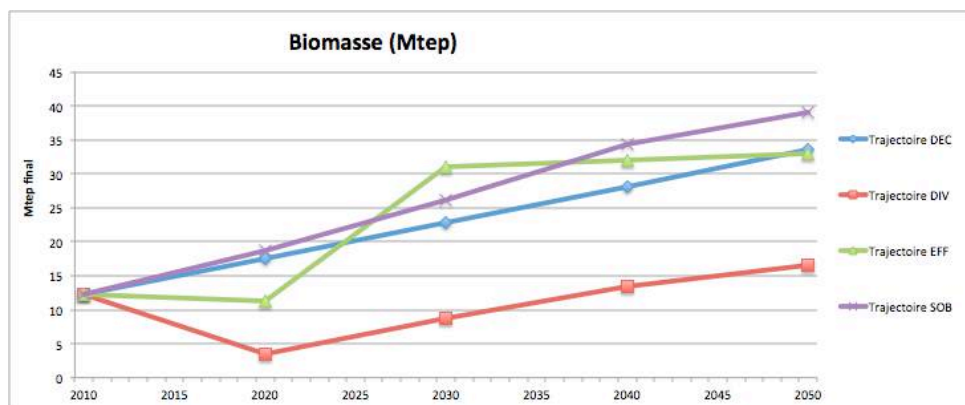


Figure 4. Scénarios biomasse lors du Débat National sur la Transition Énergétique 2013

C'est pourquoi la plupart des scénarios 2030/2050 qui font appel à la biomasse forestière, insistent sur la nécessité d'une politique de dynamisation de la récolte, qui passe obligatoirement par une meilleure couverture nationale des besoins en bois d'œuvre. Il s'agit d'un point clé pour la réalisation des objectifs et pour la valorisation et la gestion durable de la forêt.

L'ADEME préconise ainsi de faire passer le taux de prélèvement de l'accroissement naturel de 50% en 2010 à 75% en 2030 ce qui aurait pour effet une augmentation considérable du volume de bois in fine utilisable pour l'énergie. Pour atteindre de tels ordres de grandeur, il est indispensable de mettre en place des politiques ambitieuses sur le bois matériau afin de favoriser les conditions de mobilisation de la biomasse pour l'énergie tout en stockant du carbone dans les produits bois. Cependant, certaines questions restent en suspens : i) l'impact du changement climatique sur la croissance de la ressource: la période favorable pour l'intensification semble se situer avant 2050 ; ii) quel sera dans l'avenir le niveau des importations de bois-énergie, aujourd'hui marginal ? ; iii) que sera l'impact de prélèvements accrus sur la fonction «stocks de carbone» en forêt ?

Biomasse forestière	2010	2030
Accroissement annuel naturel net total m ³ /ha/an	115	122
Taux de prélèvement en forêt (%)	50	75
Biomasse énergie Mm ³	21	50

Figure 5. Un exemple de scénario ambitieux : source ADEME

Le volume de bois comptabilisé est celui des troncs et branches de diamètre > 7,5 cm

D'autres controverses existent sur la neutralité carbone du bois énergie et sur la qualité de l'air ; si les politiques énergétiques visent à limiter les émissions de particules dans les appareils modernes, les études montrent qu'il est nécessaire, pour optimiser les bienfaits carbone du bois, d'adopter une valorisation en cascade, qui combine la gestion durable des forêts avec la séquestration durable dans les produits, la substitution de matériaux plus émetteurs, et la substitution d'énergies fossiles, le plus possible avec des bois en fin de vie. Cette approche, fondée sur l'Analyse de Cycle de Vie, nécessite toutefois des progrès dans la modélisation et une vision sur plusieurs décennies, le cycle de production du bois étant particulièrement long. A terme, les valorisations en chimie et biocarburants G2 pourront trouver leur place dans cette «cascade d'usage», si elles démontrent leur durabilité. Une ambitieuse politique du bois matériau sera également nécessaire pour assurer que cette place ne se construit pas au détriment des filières industrielles. La future loi de transition énergétique discutée en 2014, et la programmation pluriannuelle des investissements qui va être discutée en 2015 permettront de situer précisément le scénario qui sera finalement retenu pour la biomasse, et en particulier pour le bois, et d'éviter les deux écueils extrêmes: i) celui d'une importation massive des produits énergétiques, la valorisation de la ressource française se faisant à l'étranger, sous forme de grumes qui s'exportent avec leurs sous produits, par manque de compétitivité des industries de transformation ; ii) celui d'une sur exploitation, en cas de hausse importante des cours du pétrole par exemple.

Recommandation : la lecture de cette fiche est à rapprocher de celle de la fiche 7.05.

Ce qu'il faut retenir

- La lutte contre le réchauffement climatique a commencé par une politique énergétique, rejointe par la bio-économie : la biomasse va être sollicitée de façon croissante.
- L'Europe a pris du retard dans ses objectifs 2020 sur la biomasse et recourt aux importations.
- La France dispose d'une ressource inexploitée mais devra développer les usages du matériau pour limiter les concurrences d'usages.
- Il faut progresser dans l'analyse du cycle de vie du bois, de la gestion durable à l'usage énergie en fin de vie.

Le bois peut-il occuper une plus grande place parmi les énergies renouvelables ?

En 2013, selon l'agence internationale de l'énergie (IEA), 13,3% de l'énergie primaire produite dans le monde était issue d'énergies renouvelables (ER)*, dont les 3/4 à partir de la biomasse, en particulier le bois. Jusqu'au 18^{ème} siècle il a été la principale ressource énergétique avant d'être remplacé successivement par le charbon, les hydrocarbures liquides et gazeux: pétrole et gaz naturel. Ces ressources seront les premières à être épuisées, malgré l'utilisation transitoire du gaz et du pétrole de schistes. Le temps du charbon pourrait revenir comme actuellement pour suppléer au nucléaire ou répondre à des besoins énergétiques croissants. Les problèmes environnementaux, en particulier le réchauffement climatique, vont imposer le bois qui peut être à l'origine de différentes formes d'énergies renouvelables.

* Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine

Les biocarburants

Parmi les énergies renouvelables, les biocarburants sont en développement et le bois a été et pourra être de nouveau une source importante pérenne. Actuellement on parle de trois générations de biocarburants :

Les biocarburants de première génération, le **bioéthanol** produit à partir de canne à sucre, de céréales et de betterave sucrière; le **biodiesel** issu d'acides gras (huiles végétales) transestérifiés. Ces biocarburants produits actuellement à l'échelle industrielle entrent en concurrence avec l'alimentation humaine ou animale.

Les biocarburants de deuxième génération dont les procédés de production industrielle sont en cours de mise au point et développement (pour certains en cours de renaissance !) consommeront les matières premières lignocellulosiques non utilisés dans la production alimentaire. Parmi ces matières premières, le bois, ses sous-produits de transformation et ses produits en fin de vie sont appelés à être utilisés pour la production de bio-carburants, solides, liquides et gazeux tels que le **charbon de bois**, le **bioéthanol**, le **bio-diesel**, le **bio-fuel**, le **bio-méthane**, le **bio-hydrogène**, sans concurrence alimentaire. Leur production à grande échelle est prévue à l'horizon de la prochaine décennie.

Les biocarburants de troisième génération où les procédés, encore à l'étude, s'appuient principalement sur l'utilisation de microorganismes tels que les microalgues pour la production de biodiesel, bioéthanol ou biogaz par méthanation.

Les voies de valorisation énergétique du bois (fig.1) sont : la combustion, la pyrolyse/carbonisation, la gazéification et depuis plus récemment la liquéfaction qui est pour le moment un procédé développé uniquement au stade laboratoire. A ces voies thermochimiques, on peut ajouter la voie biochimique d'hydrolyse/fermentation pour la production de bio-éthanol et de quelques alcools supérieurs. Nous disposons actuellement de toutes les connaissances de base pour passer au stade des procédés et pour la plupart des voies, ils sont déjà au point.

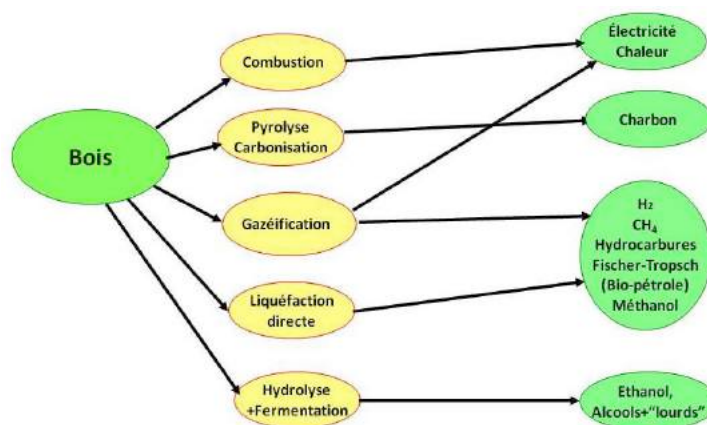


Figure 1. Les voies de valorisation énergétique du bois

Un peu d'Histoire :

Le bois a été jusqu'au début du 19^{ème} siècle la principale source d'énergie dans le monde. S'il a été abandonné au profit tout d'abord du charbon, puis du pétrole, il représente encore la matière première énergétique principale de nombreux pays d'Afrique centrale, en particulier avec le charbon de bois à usage domestique.

La Gazéification a été mise en œuvre surtout pendant les périodes de crise (1^{ère} et 2^{ème} guerres mondiales, chocs pétroliers), à partir de 1910, principalement pour le transport (fig.2). De nombreux constructeurs ont existé (un des premiers fut IMBERT), pour produire des gazogènes sur camions ou véhicules particuliers. Plus récemment ce sont des installations fixes de production d'électricité avec des gazogènes fixes et moteurs à gaz pauvre, qui ont été commercialisées par la société DUVANT.



Figure 2. Quelques gazogènes sur véhicules



Le développement industriel de la production d'éthanol à partir de l'hydrolyse du bois à l'acide chlorhydrique (Procédé BERGIUS) correspondait également à une économie de guerre, en Allemagne. C'est en URSS, durant 75 ans, que la production a été la plus importante. Le procédé d'hydrolyse du bois à l'acide sulfurique a été mis au point en 1930 à l'Académie Forestière de LENINGRAD par V.I.SHARKOV. Jusqu'à 8Mm3/an de bois (80% de résidus), ont été utilisées dans une vingtaine d'usines pour produire de l'ordre de 1,5Mt d'éthanol.

Les différents procédés de conversions énergétiques.

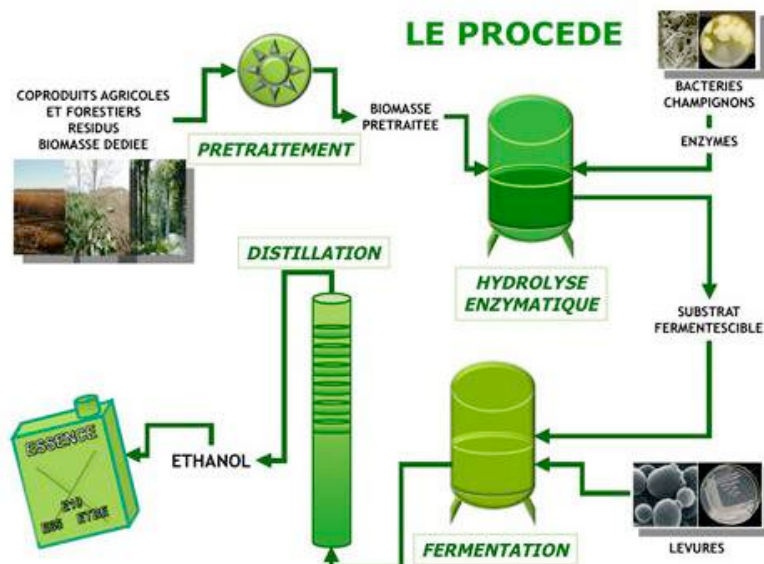
Deux grandes catégories existent, les procédés biochimiques, par voie humide ou biotechnologique et ceux par voie sèche ou thermochimique.

Les procédés biochimiques par voie humide conduisent à l'obtention principale d'éthanol et de quelques alcools supérieurs (fig.3). Ce sont des procédés à deux étapes, la première consistant à hydrolyser le bois (des sous-produits d'exploitation forestière relativement humides), en particulier la cellulose et les hémicelluloses, pour obtenir des sucres à 5 ou 6 carbones fermentescibles. Comme nous l'avons vu plus haut l'hydrolyse était jusqu'à présent une hydrolyse acide, mais maintenant elle se fait par voie enzymatique. Pour favoriser cette hydrolyse on doit procéder à un prétraitement (voir fiche « Quelle place pour le bois dans la chime verte ? ») pour rendre accessible les constituants principaux sans trop modifier la lignine.

La seconde étape est une fermentation sous deux formes ;

- La fermentation alcoolique permettant de transformer les sucres en éthanol
- La fermentation acétono-butylique permet, sous l'action de bactéries particulières, de produire un mélange de butanol, d'acétone et d'éthanol. Ce mélange avait été envisagé, il y a quelques années, comme carburant à haut indice d'octane.

Figure 3. Le pilote FUTUROL, dans l'est de la France, transforme des ressources lignocellulosiques en éthanol et produit 180 000 tonnes d'alcool/an par fermentation alcoolique. L'unité industrielle qui pourrait en être issue est prévue pour 3,5 millions de litres par an. Cf schéma du procédé (Doc. TOTAL)



Les procédés thermochimiques: Ce sont ceux qui s'appliquent le mieux à des matériaux relativement secs, comme le bois, ses sous-produits de transformation industrielle, ses produits en fin de vie, sous toutes leur formes, rondins, copeaux, sciures. On doit noter que l'étape principale gouvernant toutes les conversions thermochimiques est la pyrolyse qui est également un procédé sous le nom de carbonisation. Notons également que pour la plupart des procédés thermochimiques, hors combustion, on peut admettre la conversion moyenne suivante : 1 tonne de bois donnerait au maximum 0,3 TEP.

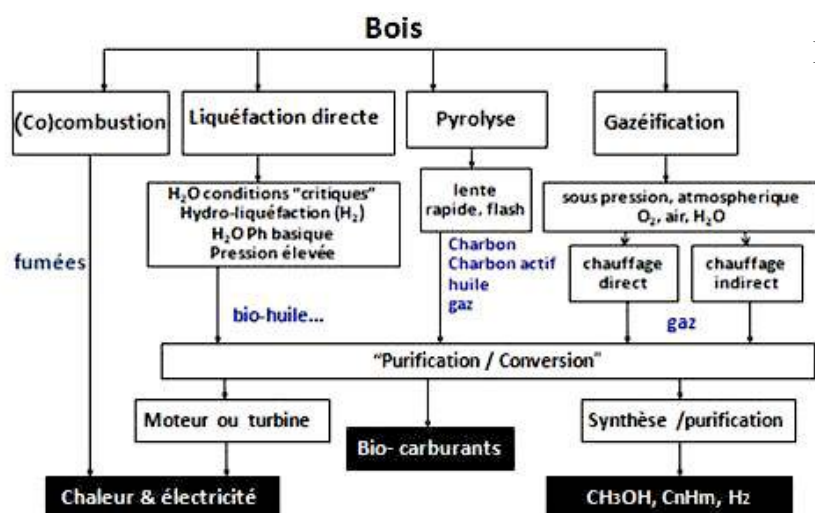
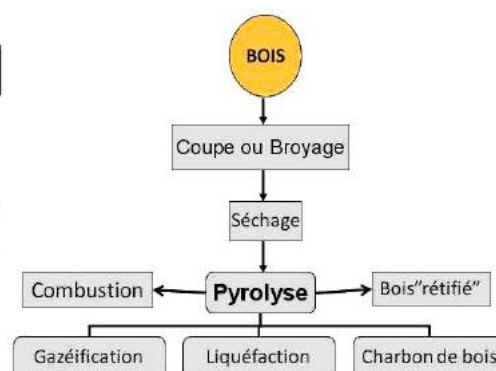


Figure 4. Les procédés thermochimiques



Les **conversions thermochimiques** se subdivisent en combustion et co-combustion (en excès d'air), pyrolyse (en l'absence d'air), gazéification (en défaut d'air, et éventuellement en présence de vapeur), et liquéfaction directe (en présence de gaz réducteur).

La **combustion** ($T \sim 1\ 900^{\circ}\text{C}$) est le mode de conversion le plus ancien et sans doute le plus employé, tant pour les utilisations domestiques qu'industrielles. Son rendement est bon dans la mesure où le bois est suffisamment sec (humidité inférieure à 35 %). La **pyrolyse** permet de transformer le bois (humidité inférieure à 10 %), en divers combustibles à haut PCI, donc stockables, sous forme gazeuse, liquide et solide (le charbon de bois). Elle se déroule à des températures comprises entre 400 et 800 °C. La répartition entre gaz, liquide et solide dépend du niveau de température et du temps de séjour dans le réacteur. La **gazéification** du bois ($T \sim 800^{\circ}\text{C} - 1\ 000^{\circ}\text{C}$) est obtenue en réalisant une combustion en défaut d'air en deux étapes: la pyrolyse donnant les phases gazeuse, liquide et solide (dont les proportions dépendent de la température et du temps de séjour) suivie de la gazéification de la phase solide (fig.5). La phase liquide représente les goudrons inhérents à ce procédé. Cette gazéification produit un gaz dit "pauvre" (1 kWh/m³ contre 10 kWh/m³ pour du méthane). En remplaçant l'air par de l'oxygène, et (ou) de vapeur d'eau, on obtient un gaz de synthèse (CO + H₂) utilisable pour la synthèse d'hydrocarbures (essence ou diesel) par le procédé Fischer-Tropsch ou de méthanol appelé également « alcool de bois ».

La **liquéfaction directe** consiste à mettre en suspension du bois divisé dans de l'eau en présence d'un "catalyseur" le carbonate de sodium, sous pression (150 à 200 bar) d'oxyde de carbone, et à des températures de 250 à 450°C. Le produit obtenu est une huile équivalente à un fuel lourd, avec un rendement matière proche de 40%. Ce procédé semble revenir d'actualité mais n'est pas encore au stade pilote.

Volume et type de ressource permettant de limiter l'émission de gaz à effet de serre (GES).

En France, le volume de bois théoriquement disponible devrait être proche de 30 Mm³, non récoltés, sans toucher aux quantités utilisées actuellement en bois énergie. On pourrait par exemple couvrir les besoins en carburant pour le transport aérien, représentant 12% de la consommation de pétrole (50 MTEP) soit 6 MTEP, par la synthèse de kérosène (Fischer-Tropsch) après gazéification de 20 Mm³ de bois. Un rapport européen récent « Carbon accounting of forest bioenergy Luisa Marelli ed, 2013 » donne les conclusions suivantes sur le type de ressources bois à utiliser. On constate qu'il faut privilégier l'utilisation judicieuse en cascade du Bois ou les nouvelles plantations sur jachères pour réduire les émissions de gaz à effet de serre des énergies renouvelables par rapport aux énergies fossiles.

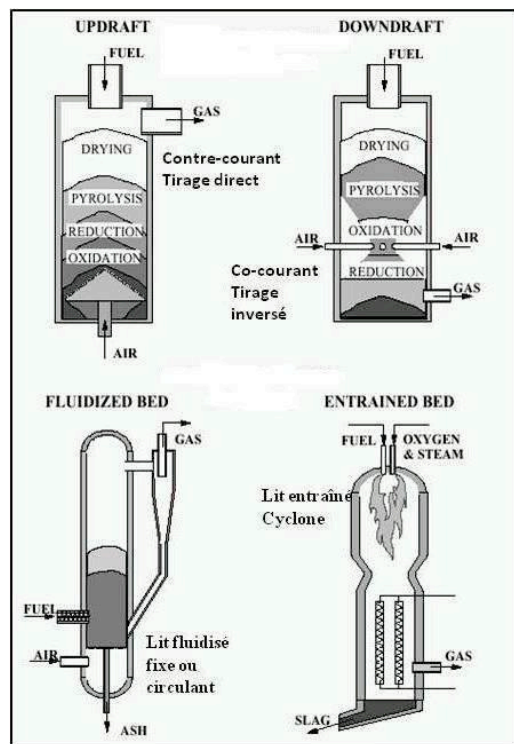


Figure 5. Types de réacteurs de gazéification : i) systèmes à lit fixe : gazéificateurs à co-courant (downdraft), et ceux à contre-courant (updraft) pour des installations mobiles, petites ou moyennes ; ii) systèmes à lit fluidisé, avec 3 catégories fonction de la vitesse de fluidisation, les lits fluidisés denses circulants et entraînés, pour des installations de grande taille.

Origine du Bois	Efficacité de la réduction des émissions de CO ₂					
	Court terme (10 ans)		Moyen terme (50 ans)		Long terme (siècles)	
	Charbon	Gaz naturel	Charbon	Gaz naturel	Charbon	Gaz naturel
Bois tige récolté pour l'énergie	---	---	+/-	-	++	+
Déchets d'exploitation	+/-	+/-	+	+	++	++
Déchets d'éclaircie	+/-	+/-	+	+	++	++
Grumes de récupération d'exploitation forestière	+/-	+/-	+	+	++	++
Nouvelles plantations sur jachères	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Remplacement de Forêts par des plantations à courte rotation	-	-	++	+	+++	+++
Déchets industries du bois, Bois en fin de vie	+++	+++	+++	+++	+++	+++

+/- Emissions de CO₂ équivalentes ; - ; -- ; --- Les énergies renouvelables émettent plus de CO₂ que les énergies fossiles
 + ; ++ ; +++ Les énergies renouvelables émettent moins de CO₂ que les énergies fossiles

Ce qu'il faut retenir

- L'utilisation du bois comme ER est ancienne (petites installations fixes ou mobiles)
- Les réactions et procédés de valorisation énergétiques du bois sont connus
- Le bois est la meilleure biomasse pour la production de biocarburant 2G
- Les volumes disponibles de bois en France permettraient de couvrir les besoins en carburant liquide exigé par le transport aérien
- L'utilisation de déchets et produits bois en fin de vie doit être privilégiée en termes de réduction d'émission de GES

Quelle place pour le Bois dans la Chimie verte ?

Le bois est la matière première permettant théoriquement de reproduire tous les produits chimiques issus de la pétrochimie. En utilisant des ressources renouvelables d'étapes et de dérivés, pour concevoir des produits chimiques moins toxiques l'environnement, tout en limitant les dépenses énergétiques. Quelles sont les caractéristiques chimiques du bois ? Quels sont ses atouts pour une «chimie verte»?

Un peu d'histoire

Le bois a été le premier matériau utilisé par l'homme et, transformé en goudron, le premier produit chimique pour la protection des ouvrages en bois (bateaux, constructions) et pour la santé (antiseptique). L'Industrie chimique, jusque vers les années 1950, reposait uniquement sur le bois. On obtenait ainsi, par pyrolyse du bois, l'acide acétique, sous sa forme acétate de sodium, le méthanol (dénaturant de l'éthanol pour obtenir l'alcool à brûler) des phénols (antiseptiques), des arômes alimentaires (fraise des bois, vanille, caramel...) du diacétyl (au goût de beurre rance pour donner l'aspect du beurre aux margarines végétales).

Figure 1. Document de 1950 décrivant les produits obtenus par distillation du bois. Musée régional de l'Alsace Bossue où sont exposés les gazogènes à Bois - IMBERT

Le Bois matière première pour la Chimie :

Quelle que soit l'essence, le bois est composé de 50% de carbone, 44% d'oxygène et 6% d'hydrogène répartis en 3 constituants macromoléculaires majoritaires: Cellulose, Hémicelluloses et la Lignine à l'origine du charbon minéral. Des substances de faible poids moléculaire, variables selon les essences, sont également présentes. Quelques exemples: les tannins du Chêne que l'on retrouve dans le vin vieilli en barrique; la gomme ou résine du Pin maritime, le latex de l'Hévéa; des minéraux, comme les oxydes de Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn, Si, P... présents dans les cendres et qui peuvent être fusibles. Ils sont à l'origine de la fabrication du verre.

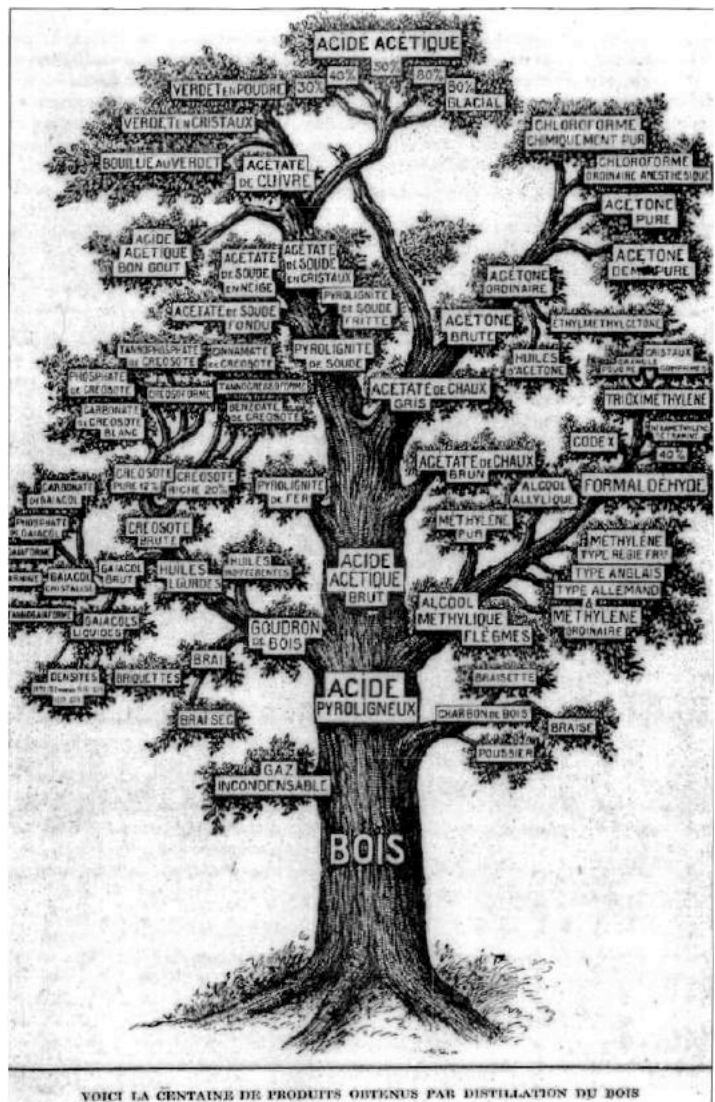
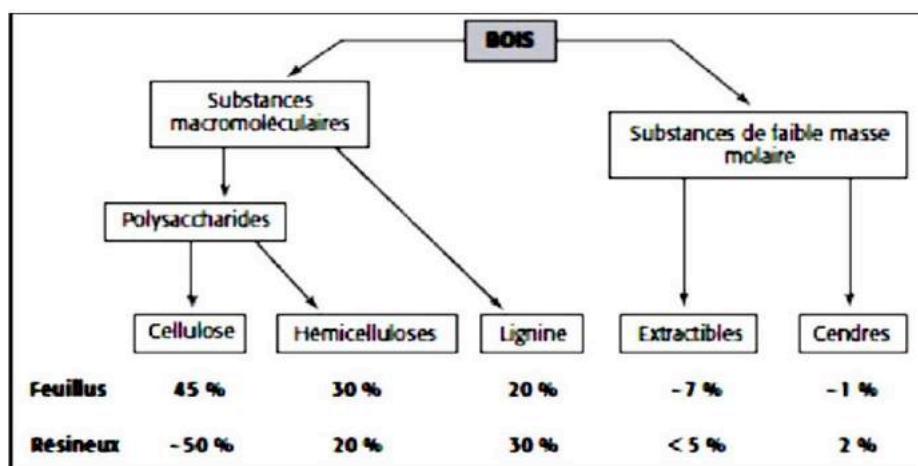
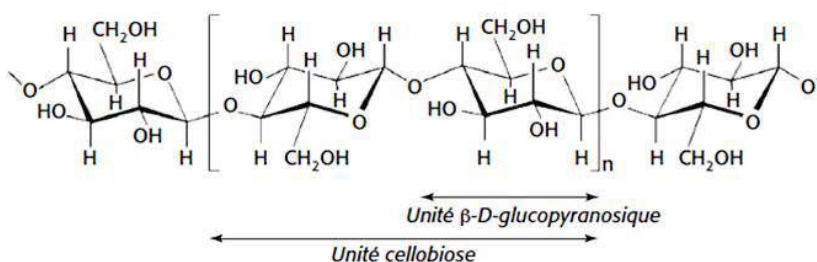


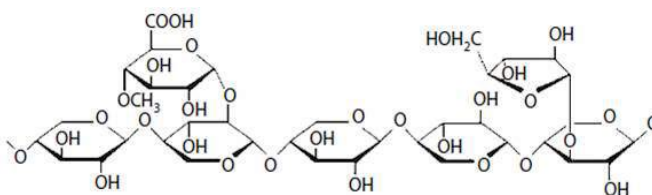
Figure 2:
Composition chimique du Bois



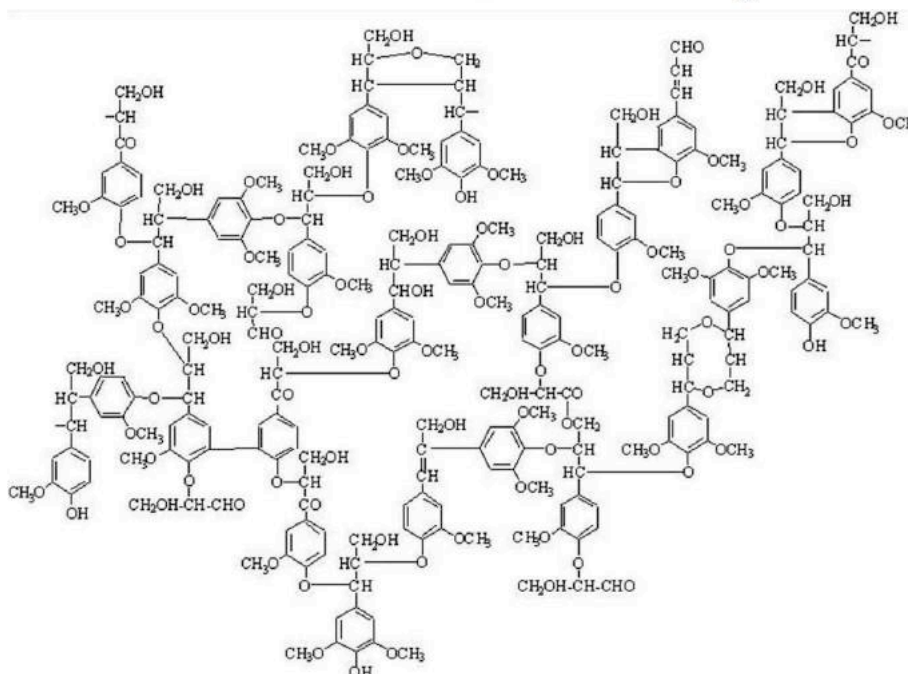
Cellulose



Un exemple d'hémicellulose



Un exemple de lignine de résineux



Quelques atouts du bois pour la chimie verte

Outre son caractère renouvelable, le bois se stocke sur pied au cours de sa croissance et n'entre pas en concurrence avec la production de biens pour l'alimentation humaine et animale, comme pour les produits chimiques issus de l'Agrochimie. Le bois est la matière première permettant théoriquement de reproduire tous les produits chimiques issus de la pétrochimie.

Toutes les réactions sont connues, souvent depuis très longtemps, que ce soit avec des procédés non sélectifs ne conservant pas les structures moléculaires des constituants du bois ou avec des procédés sélectifs plus respectueux de la structure du bois. Le schéma suivant résume l'état des connaissances et procédés de transformation actuels. Avec le concept de Chimie verte, on ne va pas « trouver » de nouveaux produits à quelques exceptions près, mais développer de nouveaux procédés où toute la matière première sera valorisée.

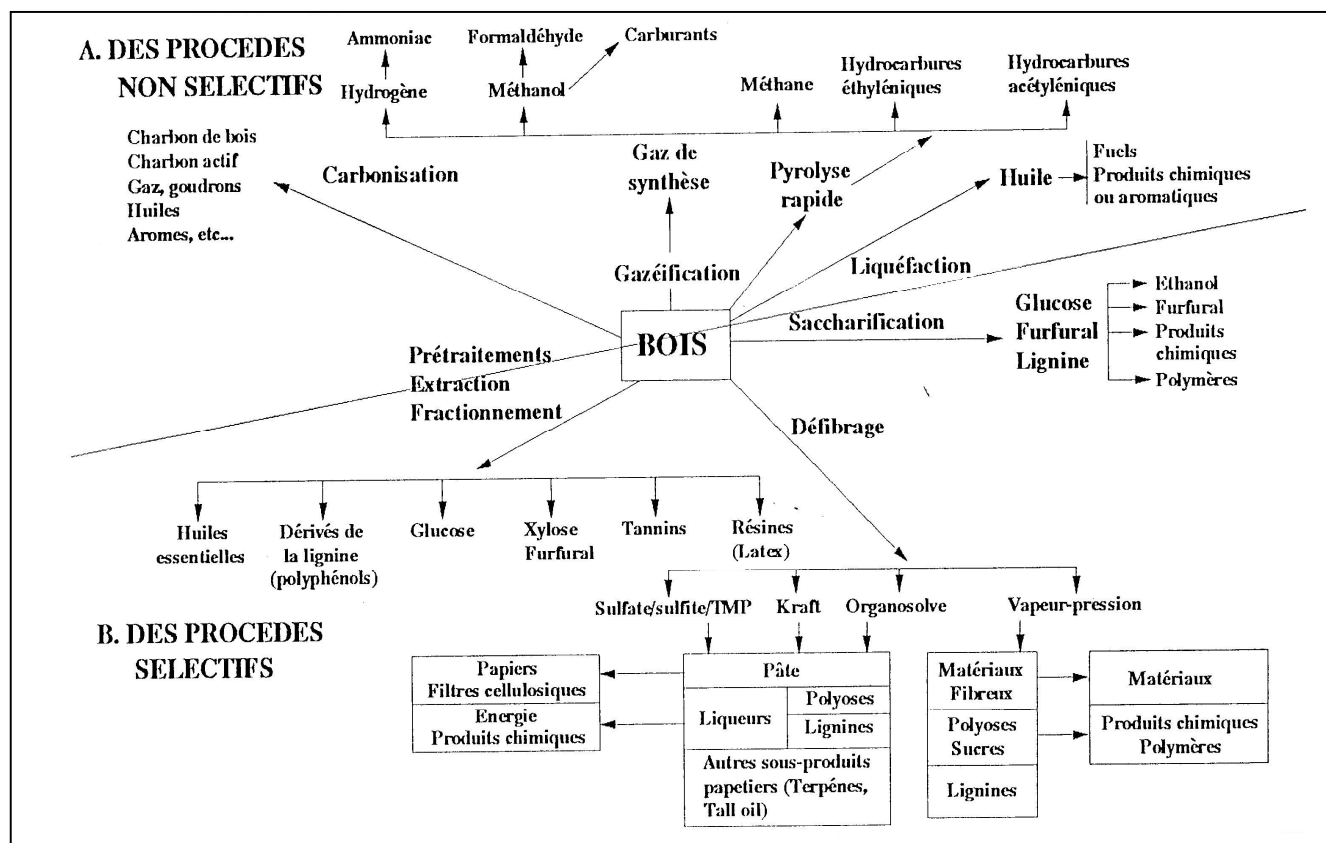


Figure 3. Schéma général des procédés de transformation du bois

Depuis quelques années, on assiste à une renaissance de cette "xylochimie" sous la forme de bioraffinerie valorisant tous les constituants du bois (fig.4). C'est une chimie fine, extractive à partir de métabolites secondaires (extractibles) des feuillages, écorces, bois et de transformation après prétraitement (fig.5) et séparation des constituants majeurs. La lignine n'est pas valorisée uniquement en tant que charge ou lignosulfonates, mais en produits chimiques fins, tels que des antioxydants. Un des avantages du prétraitement est de réduire les quantités de réactifs (enzymatiques, acides..) pour hydrolyser les polymères constitutifs mieux séparés et moins modifiés.

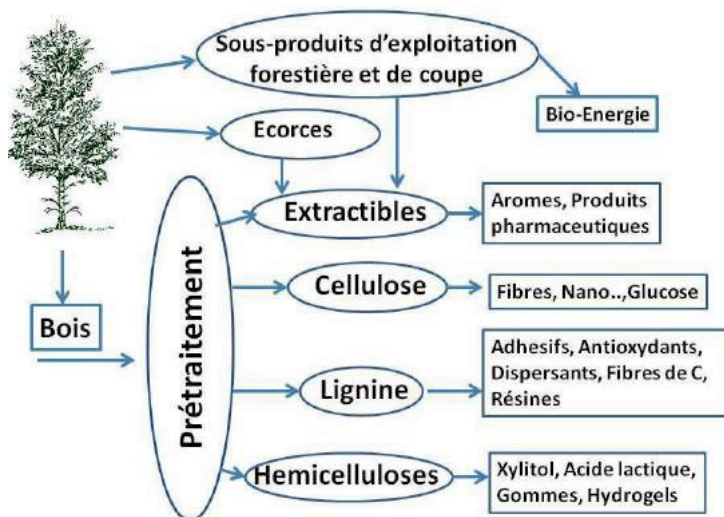


Figure 4. Schéma général de bioraffinerie

On peut ainsi obtenir de la cellulose pure, utilisable en emballage alimentaire (viscose), sous forme de cellulose nano cristalline (Nanocellulose) à propriétés remarquables, équivalente au Kevlar, utilisable également comme charge (nanowhiskers) alimentaire ou non, comme mousse ou gel... La lignine peu modifiée peut être envisagée pour l'obtention de fibres de carbone, d'adhésifs phénoliques et polyuréthanes, d'antioxydants industriels et même de charbons actifs.

Les produits issus de la chimie des extractibles provenant soit de la lignine ou des écorces, ou des noeuds, sont des tannins à propriétés antioxydantes, sources d'adhésifs verts et de mousses ignifuges, ainsi que des molécules à propriétés nutraceutiques (p.ex . bouleau) et pharmaceutiques : acide salicylique, Xylitol (agent sucrant), sitostérol (phytostérol de structure analogue au cholestérol) utilisé dans les alicaments, lignanes (antioxydants et anticancéreux. On extrait de l'écorce de pin maritime du Picnogénol antioxydant et antiinflammatoire combinaison d'acides organiques, procyanidines et bioflavonoïdes. Le resveratrol, stilbène présent dans le vin rouge, est présent également dans l'écorce d'épicéa.

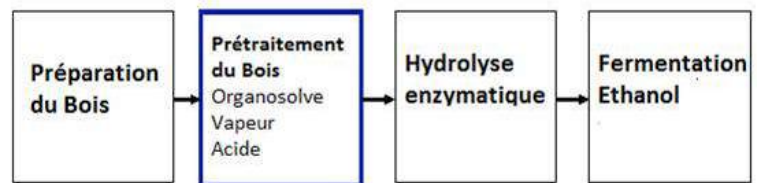
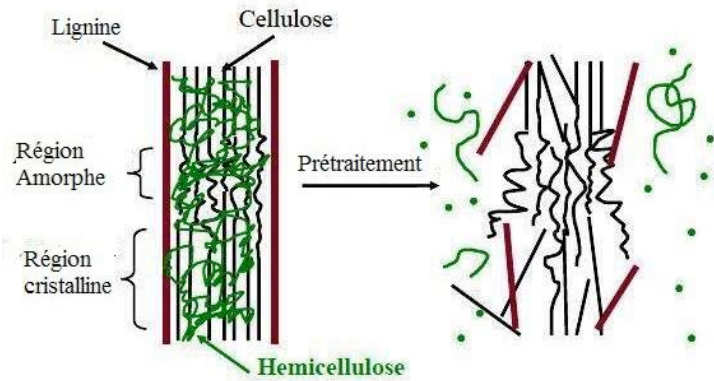


Figure 5. Exemple de prétraitement, au niveau de la paroi et dans un processus complet

Recommandation : la lecture de cette fiche peut utilement être complétée par celle de la fiche 7.11

Ce qu'il faut retenir

- L'utilisation du bois pour la chimie est très ancienne et a été développée jusqu'au milieu du 20^{me} siècle
- La cellulose est le produit organique le plus important sur terre. Elle a été le premier polymère utilisé par l'homme
- De nouveaux matériaux à partir de la cellulose comme les nanocelluloses apparaissent sur le marché aussi bien industriel qu'alimentaire
- La lignine va donner lieu à des utilisations à valeur ajoutée comme avec les adhésifs et antioxydants
- Dans le bois, tout est valorisable en produits chimiques « verts », avec le concept de bioraffinerie

Quelle matière première pour la chimie verte à base de bois ?

Elle peut provenir des sous-produits de la sylviculture et de l'exploitation forestière, sans oublier ceux issus des industries de transformation du Bois. Par ailleurs, une source importante de matière première peut provenir de la valorisation des produits bois en fin de vie (cascade). L'utilisation du bois comme matière première pour la chimie, en remplacement du pétrole, ne déséquilibrera pas les autres utilisations en bois matériau et bien entendu papetières. Cette nouvelle chimie verte permettra la diversification de l'industrie papetière en valorisant au mieux tous les constituants du bois...notamment à partir des feuillus, relativement peu utilisés en papèterie et dont les débouchés en bois massif sont plus limités que pour les résineux utilisés en construction.. Actuellement, cette chimie du bois moderne se développe autour des usines de pâte chimique. On pourrait facilement imaginer de remplacer tout ou partie du pétrole consommé pour la chimie (environ 15MT/an en France) par le bois. Il serait nécessaire de disposer au maximum de 90 Mm³ de bois par an.

Les nanotechnologies ont-elles un intérêt pour le bois et ses dérivés ?

La société est désormais à la recherche de produits biosourcés performants, à faible impact environnemental et disponibles en grandes quantités, qui doivent pouvoir se substituer à d'autres matériaux traditionnels en présentant des propriétés d'usage au moins équivalents à des coûts compétitifs. A cet égard, les composites sont en pleine expansion et promus à un brillant avenir compte tenu de propriétés remarquables qu'ils confèrent aux matériaux auxquels ils sont associés. De récentes avancées en matière de procédés industriels empruntés pour la plupart aux technologies papetières laissent entrevoir un fort potentiel pour des nanocomposites à base de fibre cellulosique, que celle-ci provienne du bois ou de certaines plantes annuelles. Jusqu'à un passé récent ces nanoéléments ne provenaient pas de composés naturels renouvelables. Qu'en est-il actuellement ? La cellulose issue du bois peut-elle être source de nanorenforts ? Quels sont les mécanismes physicochimiques mis en jeu ? Comment produire la nanocellulose ? Quelles en sont les applications ?

Qu'appelle t-on nanocomposites ?

On parle de nanocomposites dès lors que les nanoéléments qui les composent, pour tout ou partie, possèdent une de leurs dimensions inférieure à 100 nanomètres (c'est à dire 1/10 000 mm) Il s'avère, bien entendu, très difficile de déstructurer la matière pour atteindre des dimensions de cet ordre. Cela requiert généralement beaucoup d'énergie. A cette échelle, ces nanoparticules présentent le plus souvent des caractéristiques physicochimiques très intéressantes, mises à profit comme éléments de renforcement même ajoutées en faible quantité (accroissement sensible des caractéristiques mécaniques, modification du comportement de surface des matériaux à titre d'exemples).

Pourquoi un tel comportement physicochimique ?

A ce stade dimensionnel ces nanoparticules ont une structure moléculaire plus ordonnée que les particules millimétriques, avec un taux de cristallinité élevé et de moindres défauts. Elles présentent par ailleurs une surface spécifique considérable qui génère une activité physicochimique de surface importante due à la présence de très nombreux groupes hydroxyles. Les liaisons hydrogène jouent alors un rôle prépondérant sur la cohésion du matériau. Lorsque ces nanoparticules sont de forme asymétrique (cas des microfibrilles de cellulose), leur orientation éventuelle conduit à des propriétés unidirectionnelles privilégiées.



Figure 1. *Microfibrilles de cellulose enchevêtrées.*
(Keystone/Science photo library)

Du bois à la nanocellulose

Le bois, constitué de fibres lignocellulosiques (cellulose-lignine-hémicelluloses-tanins etc...) est par excellence un matériau composite orienté des plus remarquables. La constitution de la paroi cellulaire, la présence de fibres, fibrilles et microfibrilles partiellement orientées, induisent des propriétés mécaniques élevées en regard de la densité du matériau. Par contre, les nombreuses inhomogénéités du bois ne permettent pas de profiter pleinement des caractéristiques intrinsèques particulièrement intéressantes des éléments les plus fins, à savoir les microfibrilles. Les fibres natives de cellulose sont agrégées en longs filaments de cellulose constitués de domaines moléculaires à caractères cristallin et amorphe, plus ou moins alternés. De part la structure hiérarchique et la nature semi-cristalline de la cellulose on peut en extraire les microfibrilles de cellulose qui correspondent essentiellement aux domaines à forte cristallinité.

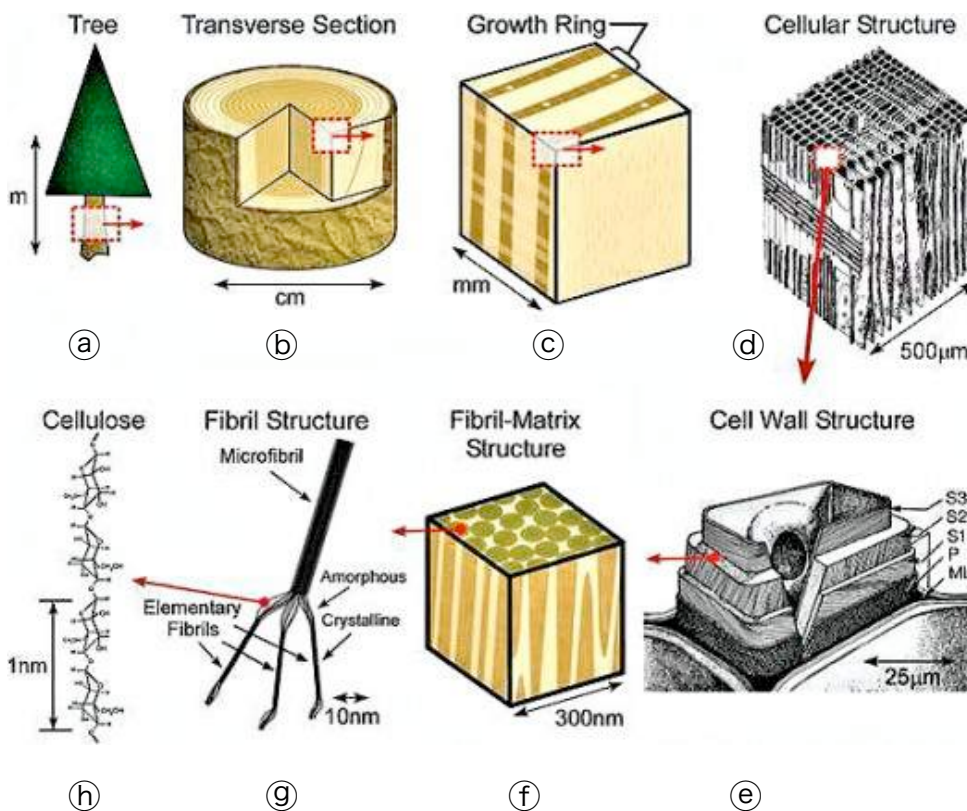


Figure 2. Structures de la cellulose dans les arbres : du tronc aux molécules

- a : arbre
- b : section transversale
- c : cerne annuel de croissance
- d : structure cellulaire
- e : structure de la paroi cellulaire
- f : structure de la matrice fibrillaire
- g : structure fibrillaire
- h : cellulose

Source fig. 2 et 3 : www.infohightech.com/de-la-pulpe-de-bois-plus-resistante-que-la-fibre-de-carbone-ou-le-kevlar/

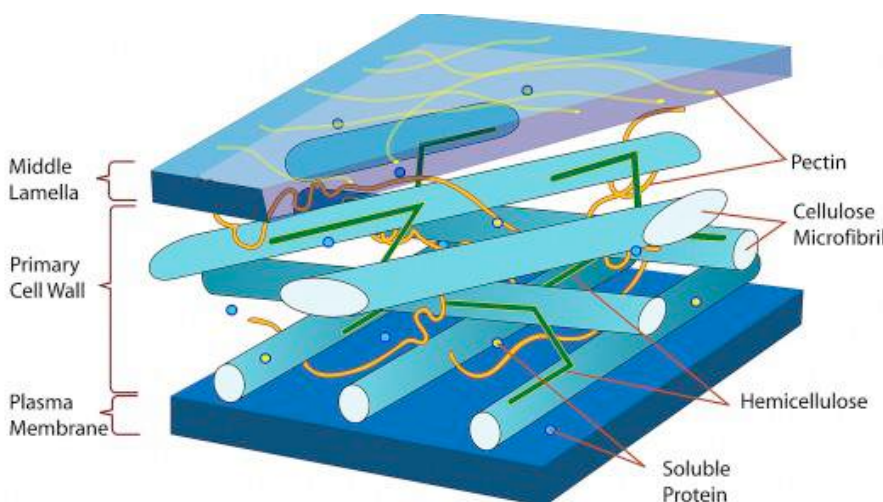


Figure 3. Structure sous-jacente de la paroi cellulaire d'une cellule du bois montrant la sous-structure des microfibrilles de cellulose portantes

Comment obtenir la nanocellulose ?

A partir du bois ou des plantes annuelles, les procédés papetiers permettent de libérer les fibres de cellulose par dissolution chimique de la lignine. A partir de ces fibres, il est alors possible par traitement d'hydrolyse par un acide fort de dissoudre les domaines moléculaires amorphes. Il en résulte l'obtention de nanocristaux de cellulose, encore appelés whiskers de cellulose.

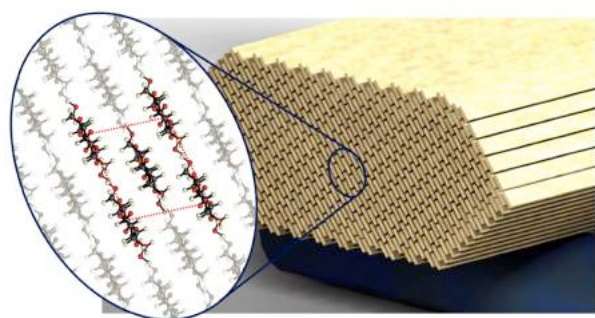


Figure 4. Détail de la structure des nanocristaux de cellulose. (Purdue University- image : Pablo Zavattieri)



Figure 5. Unité pilote de fabrication de nanocellulose (Université de Toronto - Prof. M. Sain - Canada)

Toujours à partir des fibres cellulosiques, de nouveaux prétraitements chimiques ou mécano-enzymatiques (utilisation d'enzymes produits à partir de champignons filamenteux de la pourriture du bois) permettent de commencer la déstructuration de ces fibres de cellulose pour faciliter la libération des microfibrilles de cellulose de la paroi. Un traitement mécanique à très haute pression hydraulique est ensuite nécessaire pour individualiser les microfibrilles de cellulose qui se présentent sous la forme d'un gel. Ces prétraitements sont encore fort consommateurs d'énergie électrique mais des travaux de recherche sont en cours pour la réduire.

Des propriétés remarquables

Leur surface spécifique très importante et leur module de Young de l'ordre de 150 GPa prédestinent les particules de nanocellulose à conférer un potentiel de renforcement important dans des matrices polymériques même à faible taux de charge. Leur transparence peut être mise à profit pour la réalisation de films résistants. Leur réactivité de surface est propice au greffage moléculaire.

Les applications actuelles et futures

Les applications potentielles sont particulièrement variées :

- L'adjonction de 0,5% de nanocellulose à la pâte de cellulose conduit à une amélioration très sensible des caractéristiques mécaniques du papier (+25% en résistance au déchirement, +20% en résistance à l'éclatement ...)
- L'incorporation de faibles quantités de nanocellulose dans des vernis et revêtements de surface accroît la résistance à l'abrasion et la durabilité dans le temps (applications sur bois, panneaux et cuir à titre d'exemples). Des membranes électroacoustiques à base de films de nanocellulose sont incorporées dans des casques audio Hi-Fi compte tenu de leur exceptionnelle rigidité dynamique.
- La nanocellulose additionnée aux boues de forage en modifie la rhéologie ce qui permet une réduction de l'énergie requise pour ce type d'application.
- Des composites plastiques renforcés avec de la nanocellulose sont envisagés dans des applications automobiles.
- Des composants électroniques transparents à base de nanocellulose sont en cours d'essai pour la fabrication de diodes électroluminescentes (LED).



Figure 6. *Écran ultra-mince et flexible* Photo Samsung

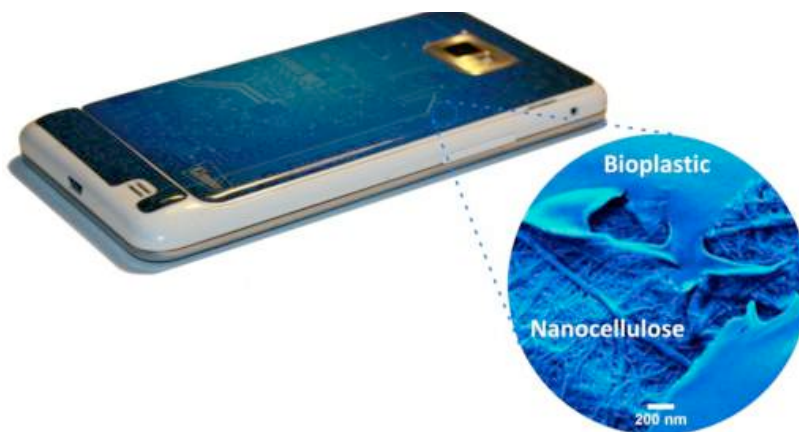


Figure 7. *Protection de smartphone en nanocomposite*
Photo : Gary Chinga-Carasco, PFI

Ce qu'il faut retenir

- On peut effectivement produire de la nanocellulose à partir de bois.
- Cette nanocellulose présente des propriétés originales très intéressantes pouvant conduire à de nombreuses applications.
- Les procédés d'obtention de nanocellulose sont en cours d'industrialisation.
- La ressource ligneuse très abondante, renouvelable, recyclable et de faible coût offre de grandes perspectives pour de futurs matériaux composites incorporant de la nanocellulose.

Le papier : un matériau du futur ?

Le papier, terme connu de tout le monde, recouvre une très grande diversité de formes et d'usages. Les applications représentant la plus grosse part du volume de papier fabriqué et consommé dans notre vie quotidienne sont destinées à l'impression, l'écriture, la presse, les magazines, les papiers d'hygiène et l'emballage. Ce dernier usage rassemble différentes formes de papier, de carton plat ou de carton ondulé. Il ne faut pas oublier les papiers qualifiés de "spéciaux" : papiers fiduciaires pour les billets de banque, papiers à cigarette, papiers-peint, sachets de thé, post-it,... L'énumération complète serait fastidieuse ! Mais de nouvelles formes de papier pour de nouveaux usages sont en train d'émerger. Quelles sont-elles et quelles technologies utilisent-elles ?

Le papier, c'est quoi au juste ?

Fondamentalement, le papier est le résultat de l'assemblage de très petites fibres de cellulose (fig.1). Lors de sa production, des molécules d'eau viennent s'intercaler et s'accrocher sur les atomes d'hydrogène présents le long des molécules de cellulose (fig.2). Une fois l'eau éliminée lors du séchage, ce sont des liaisons chimiques de type hydrogène qui feront la tenue mécanique du papier.

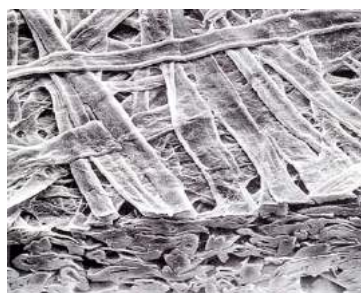


Figure 1. *Feuille de papier à fort grossissement* (crédit Copacel)

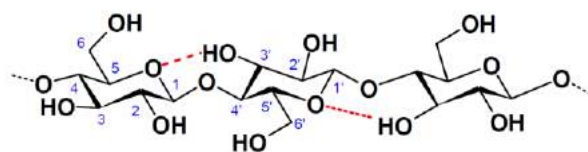


Figure 2. *Schéma montrant les liaisons hydrogène entre molécules*

Ces fibres de cellulose, sont d'origine naturelle. Le bois est de très loin la source la plus abondante ! Il faut ajouter le coton, le chanvre, l'alfa (plante herbacée vivace qui pousse dans des régions arides de l'ouest du bassin méditerranéen et qui sert notamment à fabriquer des papiers d'impression de qualité) et d'autres plantes annuelles. Le développement de la collecte et du recyclage du papier fournit aujourd'hui une nouvelle source très importante de fibres. Des journaux, des papiers d'emballages sont depuis de nombreuses années fabriqués en totalité avec des fibres recyclées ! Biosourcé, c'est à dire issu d'une biomasse végétale renouvelable, recyclable et recyclé, stockant le carbone, le papier mérite déjà le qualificatif de matériau du futur.

Améliorer les propriétés existantes des papiers : de nouvelles perspectives

De nouvelles technologies, de nouveaux procédés permettent aujourd'hui et encore plus demain, d'améliorer les propriétés existantes et d'offrir des fonctionnalités totalement nouvelles.

Dans le domaine de l'**emballage**, rendre le papier hydrophobe est un atout considérable. La chromatogénie permet de déposer à la surface du papier une très faible quantité d'acides gras, d'origine végétale, qui se greffent à la cellulose. Le papier devient ainsi barrière à l'eau et aux graisses. Plus besoin demain de coller un film plastique, ou une feuille d'aluminium, sur la feuille de papier ou de carton, pour obtenir de telles propriétés. Son recyclage est alors grandement simplifié. Des sacs en papier sont déjà fabriqués avec cette technologie.

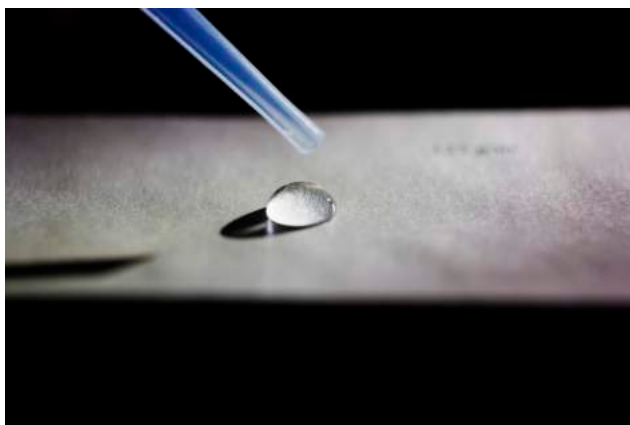


Figure 3. *Goutte d'eau sur papiers traités par chromatogénie* (Source: CTP)

Dans le domaine de la **communication**, certains voient le papier déjà condamné. C'est loin d'être le cas, il assure déjà une passerelle avec le monde électronique. Simplement photographier un QR code, imprimé sur un article ou une affiche, permet actuellement d'accéder, via son smartphone, à une page internet.

L'émergence de l'électronique organique et de l'électronique imprimée ouvre un champ immense de nouvelles possibilités. De nouvelles générations d'encres conductrices, résistives ou isolantes, permettent d'utiliser les techniques classiques d'impression pour faire du papier le support naturel de nouvelles fonctionnalités de type électronique.

Comment se préserver des ondes électromagnétiques de plus en plus présentes dans notre environnement quotidien (WiFi, GSM, etc.) ? Un MetaPapier est une réponse beaucoup plus simple et moins onéreuse que la mise en place d'une cage de Faraday. Il s'agit tout simplement d'un papier peint, sur lequel ont été imprimés des motifs particuliers (éléments électroniques) à l'aide d'une encre conductrice. Ce Méta-matériau papier peut aussi être marié avec des panneaux en plâtre ou en bois, utilisés en construction.



Figure 5. *Papier peint MetaPapier ; il est posé avec les outils classiques* (Source CTP)

La radio-identification, le plus souvent désignée par le sigle RFID permet la traçabilité d'objets grâce à une antenne et une micro-puce. Cette technologie existe dans de nombreux domaines du monde de l'étiquette et permet avec un lecteur de collecter les données de la puce à distance. Imprimer aujourd'hui cette solution sur un emballage permet de dépasser les limites d'un simple code barre. Peu importe où se trouve l'emballage dans son environnement, ses données sont accessibles individuellement et à distance. Connaître au passage en caisse le contenu d'un caddie de supermarché devient instantané, gérer des stocks de marchandises devient plus simple. Cette possibilité d'identification précise d'un produit, permet d'assurer sa traçabilité, mais aussi de lutter contre la contrefaçon, plaie majeure pour un certain nombre de secteurs.



Figure 4. *QR code du Centre Technique du Papier* (Source CTP)



Figure 6. *Decartag antenne RFID et emballage anti-contrefaçon* (Source CTP)

Il est possible d'imprimer des capteurs, qui vont par exemple permettre de détecter une rupture de la chaîne du froid sur des produits alimentaires. L'énergie nécessaire pour activer ces circuits électroniques est celle dégagée par les smartphones ou encore l'hybridation de batteries souples, voire de petites cellules photovoltaïques. Le papier est produit sous forme de grandes surfaces. On peut tirer avantageusement partie de sa troisième dimension, l'épaisseur, pour y intégrer de nouvelles propriétés, beaucoup plus facilement que l'on ne le ferait avec le plastique. On le fait déjà par exemple dans le papier fiduciaire et demain probablement pour les titres sécurisés.



Figure 7. *Electronique imprimée et affiche interactive A3Ple*

Dans le **domaine sanitaire et de la santé**, le papier anti-microbien est promis à un bel avenir dans le monde hospitalier. Bien que déjà performants, l'amélioration des propriétés absorbantes et mécaniques, va rendre les papiers d'hygiène encore plus efficaces.

De nouvelles perspectives offertes par le développement des micro et nano-celluloses

Tout ce qui précède porte sur des structures du papier de type classique. Par contre le développement des micro et des nano-celluloses, ouvre des horizons pour des nouveaux matériaux, seuls ou en combinaison avec d'autres. Les nano et micro fibrilles de cellulose ont d'ores et déjà démontré leur intérêt et leur potentiel quant au développement de nouveaux produits performants. L'abondance de la cellulose, matière première renouvelable, laisse entrevoir des productions de l'ordre de plusieurs millions de tonnes par an. Les nano et micro fibrilles sont généralement fabriquées par des traitements mécaniques, par exemple dans un raffineur, un broyeur, un homogénéiseur. On obtient à l'issue de tels traitements des fibrilles de différentes tailles. La largeur des petites fibrilles ou agrégats est habituellement de 20-40 nanomètres (nm)

alors que leur longueur peut être de plusieurs micromètres. Les fibrilles sont très ramifiées et flexibles. La consommation d'énergie élevée des traitements mécaniques peut être réduite grâce à différents prétraitements chimiques ou enzymatiques qui agissent en facilitant la fibrillation des fibres cellulosiques. Les microfibrilles apportent entre autres des propriétés de grande résistance, d'absorption, de faible densité, d'auto-assemblage. La gamme des applications potentielles des nano et micro fibrilles de cellulose est variée et offre une excellente opportunité de développer de nouveaux bio-produits qui complètent les produits traditionnels de l'industrie de la pâte, du papier et du carton : modificateur de rhéologie (propriétés visco-élastiques sous l'effet de contraintes), rétenteurs d'eau dans les produits cosmétiques et produits d'hygiène, films transparents, couche barrières, etc...

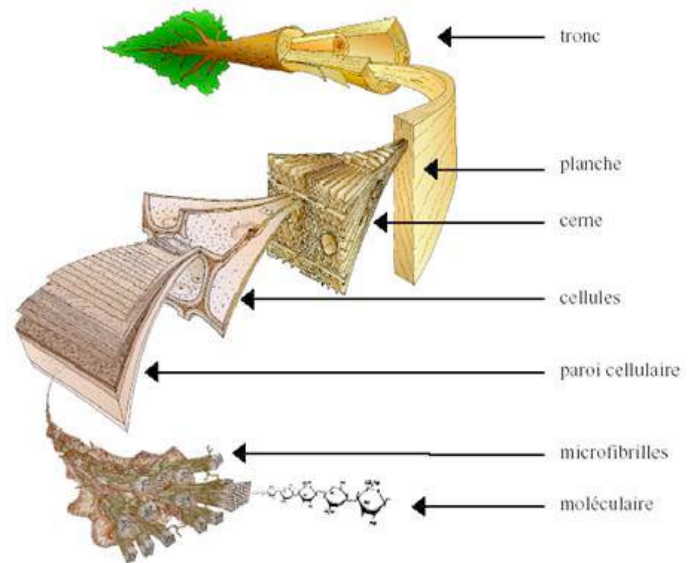


Figure 8. Structure hiérarchique du bois depuis la molécule de cellulose, jusqu'à l'arbre entier (d'après Hamilton, 1998)



Figure 9. Microfibrilles de cellulose (gels et films souples)

Ce qu'il faut retenir

- Formé de cellulose le papier est bio-sourcé et recyclable
- On sait le rendre étanche à l'eau et aux graisses
- Il devient intelligent grâce à l'électronique imprimée
- Sous forme de micro et de nano fibrilles de cellulose, il ouvre des horizons totalement nouveaux

Recommandations : la lecture de cette fiche peut être complétée par celle des fiches 3.07 et 7.09

Des usines de pâte à papier aux bioraffineries, puis à la chimie verte...

Les usines de pâte à papier ont un grand potentiel pour devenir l'un des piliers de la bioéconomie et de la croissance verte. Outre la production traditionnelle de fibre de cellulose et d'électricité, ces usines, fonctionnant comme des «bio-raffineries», peuvent permettre la fabrication en masse et à un coût raisonnable de toute une palette de produits environnementalement performants. Ces produits peuvent trouver une utilisation comme matériaux, composés chimiques et carburants innovants, pouvant se substituer à d'autres matériaux ou matières premières. Quels sont-ils ? Comment peut-on les produire ?

La fabrication de la pâte à papier : quelles évolutions ?

Tout au long des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, les unités de pâtes à papier, qu'elles commercialisent directement leur pâte ou qu'elles soient intégrées sur une fabrication papetière, n'ont cessé d'améliorer leurs procédés de fabrication pour réduire le coût de leur produit et rester, ou tenter de rester, compétitives sur un marché qui s'est progressivement mais totalement ouvert.

Pour autant, les deux familles de procédés de production -mécanique et chimique- (voir encadré 1) sont restées fidèles aux principes initiaux. Mais ils ont progressé en rendement de transformation de la matière première, en récupération des entrants chimiques, en efficacité énergétique, en réduction drastique des rejets et émissions polluantes...tout en améliorant considérablement la qualité et la régularité de la pâte produite. Sur la base de ces procédés efficaces et à impact environnemental maîtrisé, la réduction des coûts s'est prolongée par la diminution des coûts fixes, c'est-à-dire par l'augmentation considérable de la taille des unités de production. Et en la matière, c'est bien la ressource forestière qui dispose du dernier mot. Si la forêt française, diverse et morcelée peut approvisionner une unité de production de 300000 T/an, au Brésil, on peut observer des unités cinq fois plus importantes, environnées de plantations d'eucalyptus à haute productivité sélectionnées pour la qualité de leur fibre. Facile à transporter par voie maritime, la pâte est déchargée dans des ports français bien équipés, ce qui provoque une rude concurrence entre les sites de production, d'autant que la montée en puissance sur les trois dernières décennies des pâtes issues des papiers et cartons recyclés a fortement atténué la croissance du marché des « pâtes vierges ».

Encadré 1 Petit rappel sur les procédés de fabrication de la pâte

Pour extraire ces fibres des matières premières lignocellulosiques, (bois principalement mais aussi plantes annuelles telles que coton, lin, chanvre...) deux familles de procédé sont utilisées industriellement : les procédés chimiques et les procédés mécaniques. Les procédés mécaniques, qui représentent 17% de la production mondiale de pâte sont basés sur de la déstructuration mécanique, associée ou non à un traitement thermique, associée ou non à un traitement chimique doux. Les rendements obtenus sont de 85 à 95% de la matière première utilisée et permettent de produire des fibres avec des propriétés spécifiques, notamment optiques. La grande majorité des usines de pâtes sont donc basées sur des procédés chimiques, acides ou alcalins, qui viennent dissoudre la lignine enrobant les fibres pour faciliter leur libération. Le procédé le plus connu et le plus répandu est le procédé Kraft, développé au 19^{ème}, permettant de produire des fibres possédant de très bonnes propriétés mécaniques mais dont le rendement bois est naturellement réduit puisque seule la cellulose est conservée (avec un résidu de lignine et une partie des hémicelluloses). Par contre ces unités disposent d'un excédent d'énergie, électrique notamment, du fait de la combustion des liqueurs noires (lignine et hémicelluloses) qui peut naturellement s'employer dans un cadre d'intégration papetière.

Les tendances actuelles

Ainsi, au début du 21^{ème} siècle, suite à plus d'un siècle de perfectionnement du modèle de transformation du bois en pâte, on pouvait observer de gigantesques unités de transformation optimisées au plan des procédés de fabrication et articulées autour d'une ressource dédiée et améliorée génétiquement. Mais au même moment, les problématiques de fin d'un pétrole bon marché, de réchauffement climatique, de gestion durable des espaces forestiers...conduisaient aussi à s'interroger sur l'opportunité de concevoir des unités de fabrication de pâte à papier valorisant de façon beaucoup plus large les composants du bois, à l'image de ce qui se faisait avant l'ère du pétrole, quand le bois servait une multitude de marchés, énergie, carburants, alimentation, chimie...

De telles unités à fins multiples, profitant du savoir-faire de plates formes industrielles spécialisées dans le traitement du bois, mais développant une philosophie nouvelle, celle de la valorisation beaucoup plus fine des composés du bois, et en conséquence développant de nouveaux marchés, certains à créer s'agissant de molécules nouvelles à propriétés spécifiques, d'autres de substitution d'un composé biosourcé au composé équivalent d'origine pétrolière, rentrent ainsi dans la dénomination dénomination de bioraffineries. Ce sont les unités du 21^{ème} siècle, au sens d'une économie durable, œuvrant sur une matière première issue d'une gestion durable, tirant parti de la complexité intrinsèque de cette matière première pour en tirer un ensemble de molécules et composés à haute valeur ajoutée, optimisant cela va sans dire les procédés, réduisant les émissions polluantes voire les supprimant, et mettant sur le marché des produits qui en fin de vie seront recyclables. De quelle matière première disposent ces futures bioraffineries ? (encadré 2)

Encadré 2. La composition du bois en bref

Les matériaux lignocellulosiques sont principalement composés de 45 à 50% de cellulose, de 20 à 25% d'hémicelluloses, de 20 à 25% de lignines. Des matières extractibles en quantité nettement plus faibles (1 à 5%) sont également présentes selon les espèces de bois pour leur protection. Toutes les molécules d'un matériau lignocellulosique sont composées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Dans sa globalité, le bois sec est composé de 50% de carbone, 44% d'oxygène et 6% d'hydrogène, avec moins de 1% d'azote et des traces d'éléments minéraux. La cellulose et les hémicelluloses sont des polymères naturels de sucres (glucose, xylose, galactose, mannose, arabinose) alors que les lignines sont des polymères aromatiques tridimensionnels. Les matières extractibles sont des composés de petite taille et de types très variés selon les espèces végétales, qui sont extraites par de l'eau ou des solvants organiques. Les matériaux lignocellulosiques sont des composites naturels qui peuvent être valorisés à différentes échelles (fig.1).

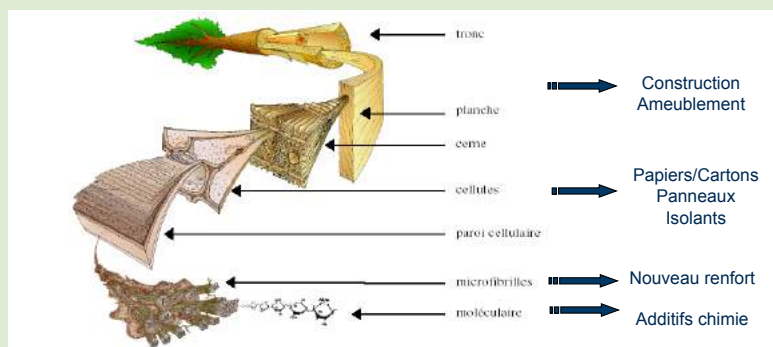
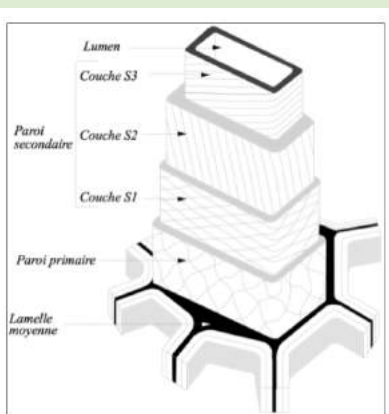


Figure1. Structure hiérarchique du bois de l'échelle macroscopique à l'échelle nanométrique (Hamilton, 1998)



La fibre lignocellulosique est elle aussi un matériau composite puisqu'elle est constituée de 2 parois : une paroi primaire et une paroi secondaire, elle-même composée de 3 couches. Chacune des parois est structurée en microfibrilles de cellulose assurant sa structure et ses résistances. Les fibres sont associées les unes par rapport aux autres par la lamelle moyenne (fig. 2).

Figure 2. Structure d'une fibre lignocellulosique.

Les dimensions et les caractéristiques morphologiques des fibres des matériaux lignocellulosiques dépendent des espèces. A partir de ces éléments, il est possible, par observation en microscopie optique, de déterminer le matériau initial. Pour les bois, les fibres issues de résineux sont différentes de celles de feuillus. Les bois résineux se caractérisent par des fibres de printemps et des fibres d'automne alors que les bois feuillus se différencient par des fibres et des vaisseaux (fig. 3). Ce sont les fibres qui sont d'intérêt pour une usine de pâte.

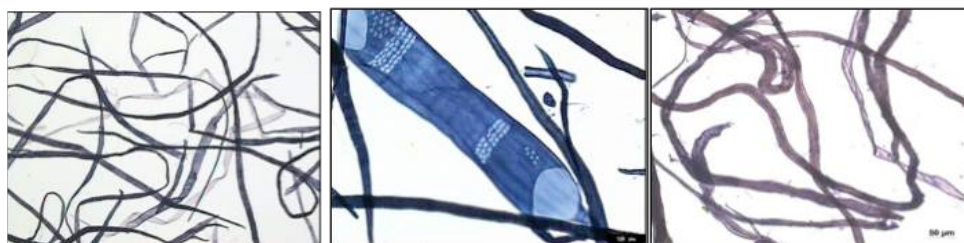


Figure 3. *Fibres de bois résineux (gauche), fibres et vaisseau de bois feuillus (milieu) par comparaison avec des fibres de coton (droite) en microscopie optique.*

De l'usine de pâte à papier aux bioraffineries...

Si la principale activité d'une usine de pâte est de produire ces fibres lignocellulosiques, progressivement, par adjonction de prétraitements et de boucles de production spécifiques, des unités cherchent à produire différents polymères et molécules et servir de nouveaux marchés. Avec les procédés chimiques acides, les réactions chimiques permettent de produire de la cellulose, des lignosulfonates, de la vanilline et de l'éthanol. Les lignosulfonates sont valorisés dans l'alimentation animale, l'agriculture, la construction, les céramiques entre autres. L'usine de Tartas (Tembec), dans les Landes, basée sur ce type de procédé, a ainsi progressivement abandonné la production d'un produit de commodité, très concurrencé (pâte fluff) pour se consacrer à la production de celluloses de spécialités pour la production d'éthers de cellulose, d'acétate de cellulose, de cellulose microcristalline...et alimenter de tous nouveaux marchés liés à la plasturgie, la peinture, le textile. L'ancienne usine de pâte à papier a franchi le pas de la bioraffinerie, un pas décisif pour sa survie (fig.4).



Figure 4. *L'usine Tembec de Tartas*

Avec les procédés chimiques alcalins, les réactions chimiques individualisent les fibres tout en extrayant hémicelluloses et lignines. Ces composés sont récupérés sous forme de liqueurs, concentrés et brûlés pour produire de la vapeur. Cette vapeur est utilisée par l'usine dans le procédé mais surtout pour la production d'énergie électrique via des turbo-alternateurs. Les usines modernes de production de pâte chimique fournissent de l'énergie électrique sur les réseaux nationaux. Parallèlement, les matières extractibles issues de la matière première sont valorisées sous la forme de térébenthine et de tall-oil, un complexe d'acides gras et d'acides résiniques qui est traité par l'industrie chimique pour faire de nombreux intermédiaires chimiques.

Cette transition d'une unité de pâte vers une bioraffinerie va encore évoluer avec une meilleure valorisation des composés chimiques du bois. Les hémicelluloses, qui sont extraites et dégradées pendant les réactions chimiques d'extraction, puis brûlées pour la production d'énergie thermique, seront demain en partie extraites de la matière première avant d'entrer dans le procédé de fabrication des fibres. Ces polymères peuvent être considérés comme des molécules plateformes, bases de substitution à la chimie issue des ressources fossiles, s'ouvrant par exemple sur la chimie du furfural, base de matériaux performants de l'industrie aéronautique. Les hémicelluloses peuvent également être valorisées en

De plus, comme pour les hémicelluloses, les lignines sont extraites par le procédé et actuellement brûlées pour produire de l'énergie thermique et électrique. Une partie de cette lignine peut être précipitée pour fabriquer une matière première qui pourrait être valorisée dans de nombreux secteurs industriels : gaz et carburants, bitumes, polymères (grâce aux phénols présents), textiles, fibres de carbone, adhésifs, agents dispersants etc.

Enfin, les matières extractibles, actuellement valorisées sous forme de térébenthine et de tall-oil, seront demain extraites avant l'introduction dans le procédé pour produire de la térébenthine naturelle et des molécules aux propriétés anti-oxydantes et anti-microbiennes d'intérêt pour les industries pharmaceutiques, nutraceutiques et cosmétiques. Il a été démontré que de telles molécules à haute valeur ajoutée pouvaient être extraites des nœuds du bois et des écorces, co-produits actuellement brûlés pour la production d'énergie.

Progressivement, dans l'ensemble des flux liquides et gazeux d'une usine de pâte, il sera économiquement intéressant et pertinent d'identifier des molécules d'intérêt valorisables, notamment dans les effluents de blanchiment des fibres, qui sont actuellement directement traités dans une station d'épuration pour respecter les normes environnementales. L'utilisation optimale de certains réactifs chimiques de blanchiment devraient aussi permettre l'extraction de la lignine résiduelle sous différentes formes chimiques permettant une valorisation des molécules extraites.

Des bioraffineries à la chimie verte...

La chimie verte se fonde sur des usages non alimentaires des productions agricoles et forestières pour promouvoir le développement durable impliquant le triple aspect sociétal, environnemental et économique. Nous avons vu que les procédés éprouvés et améliorés sur des décennies de chimie du bois (xylochimie) ouvraient dans leur développement sur des possibilités multiples de valorisation des ressources ligneuses dans leur diversité. Mais les procédés eux-mêmes vont encore profondément évoluer au 21^{ème} siècle par recours maîtrisé à l'enzymologie, réduisant sensiblement les températures de cuisson du bois, par l'utilisation de procédés mimant des processus naturels (biomimétisme), par recours par exemple à des mélanges eutectiques permettant des fusions à des températures inférieures à chacun des composés pris isolément, et ces procédés plus doux permettront de disposer de molécules organiques mieux préservées ouvrant sur une chimie verte durable. Une chimie verte déjà très avancée dans les laboratoires («cellulose valley» grenobloise notamment) permettant de disposer grâce à la chromatogénie (greffage d'un chlorure d'acide gras sur le groupement -OH de la cellulose) de papiers d'emballage aux barrières biosourcées se substituant aux complexes associant aujourd'hui papier, aluminium et plastique. Des collages « sans colle », par adhésion naturelle de couches nanodimensionnelles de composés affinés faciliteront le recyclage des matériaux en fin de vie. La cellulose microfibrillée et les nanocristaux de cellulose joueront un rôle majeur en médecine demain grâce à leur biocompatibilité.

Nous avons tous oublié que l'ère du pétrole est récente. Mais nous savons que son temps est compté. Les ressources lignocellulosiques, un temps oubliées seront de nouveau demain à la base de notre énergie, de notre industrie, de notre chimie, de notre confort. Les technologies seront au rendez-vous, quand aux ressources, elles dépendent de nos efforts pour les développer, et il y a lieu de s'en préoccuper !

Ce qu'il faut retenir

- Le secteur de la pâte à papier s'interroge sur l'opportunité de concevoir des unités de fabrication valorisant de façon beaucoup plus large les composants du bois pour les marchés, énergétique, carburants, alimentaire, chimie
- Certaines unités de pâte évoluent déjà vers de véritables bioraffineries
- Les procédés (physiques, chimiques et biologiques) vont également profondément évoluer
- Le contexte de la «croissance verte» est favorable à la valorisation d'une large gamme de produits bio-sourcés

Quels sont les atouts du bois dans une économie du « recyclable » ?

De la forêt jusqu'à la fin de vie des produits bois, la filière est dans une logique d'économie à la fois biosourcée et circulaire. Parmi les différentes composantes de cette filière, la présente fiche met l'accent sur les produits bois en s'attachant plus particulièrement à répondre aux questions suivantes : D'où proviennent les déchets bois ? Quel recyclage pour les produits bois en cours et en fin de vie ? Comment allonger la durée de vie du matériau bois ?

La filière forêt-bois : une économie biosourcée et circulaire

On peut définir l'économie circulaire «comme un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources (matières premières, eau, énergie) ainsi que la production des déchets. Il s'agit de rompre avec le modèle de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) pour un modèle économique « circulaire ». L'émergence de la notion d'économie circulaire fait suite à la prise de conscience des ressources limitées de la planète et du besoin de les économiser. Cette notion contient également l'idée que les nouveaux modèles de production et de consommation liés à l'économie circulaire peuvent être générateurs d'activités et de création d'emplois durables et non délocalisables. L'économie circulaire fait partie du champ de l'économie verte. Ainsi, les enjeux de l'économie circulaire sont à la fois environnementaux, économiques et sociaux». (Ministère de la transition écologique et solidaire - décembre 2015)

La filière forêt-bois peut se décrire par trois boucles, celle de la forêt, celle des produits bois, et celle des industries de la pâte et de la chimie verte (fig.1), les bio-énergies se plaçant au stade ultime de la vie du bois. La présente fiche se propose d'analyser en détail la boucle des produits bois (2).

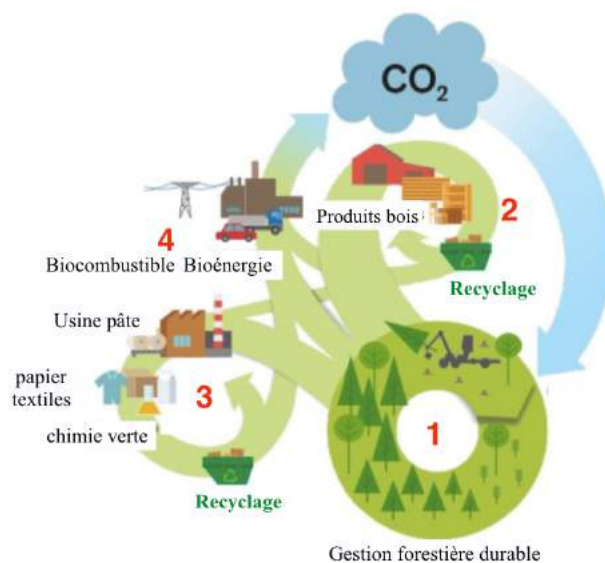


Figure 1. La filière forêt-bois : une économie biosourcée et circulaire (Source : <https://bioenergyinternational.com/opinion-commentary/energy-woody-biomass-positive-climate-new-iea-bioenergy-brief>)

- (1) Le peuplement forestier géré durablement est en fin de vie régénéré par plantation ou naturellement. Les récoltes périodiques fournissent du bois d'industrie (petits bois et déchets d'exploitation) pour la fabrication de la pâte à papier, des panneaux, et pour l'énergie, ainsi que du bois d'oeuvre (sciages, placages).
- (2) La transformation du bois en produits (sciages, placages, panneaux) génère des sous-produits et déchets dont les débouchés sont les industries de la pâte, des bioénergies et des panneaux. Les produits bois peuvent être **recyclés**, une ou plusieurs fois sous différentes formes.
- (3) Les usines de pâte produisent de la pâte à papier, des fibres pour le papier et les textiles, et des biocarburants et des produits chimiques d'intérêt (fiches 3.06), des biocarburants. Elles participent au **recyclage** des vieux papiers et cartons. Elles produisent aussi de l'énergie
- (4) La filière énergétique comprend la transformation du bois en biocarburant et l'incinération du bois qui fournit de la chaleur, de l'électricité (ou les deux). Les cendres, riches en éléments minéraux, peuvent (sous certaines conditions) retourner à la forêt tandis que les gaz sont émis dans l'atmosphère. L'incinération est la fin de vie du bois.

Les différentes origines des déchets bois

La filière bois est organisée en un système fortement orienté vers la logique d'économie circulaire. Le cas de la valorisation des produits connexes de sciage en est un élément emblématique, puisque ceux-ci sont pratiquement totalement valorisés et trouvent des utilisations majeures en tant que matière première de fabrication de la pâte à papier et des panneaux de particules. Des emplois comme paillage horticole, litière animale sont également à signaler. Et une part importante est également utilisée en tant que combustible, soit directement (écorces), soit après simple préparation en plaquettes, soit comme granulés (sciures).

Le recyclage interne est également largement pratiqué, dans les usines de fabrication de panneaux où les chutes d'usinage sont réintroduites dans le système d'alimentation matière ainsi que dans le secteur papetier. La valorisation énergétique interne des entreprises des chutes et déchets industriels issus du bois, est encore plus répandue. De la scierie à la fabrication d'emballages, de meubles, de menuiseries et charpentes, dans les usines de pâte ou de panneaux, des systèmes de chaudières permettent la production de chaleur, voire d'électricité, pour des utilisations process et pour le chauffage des locaux, mais également pour revente externe.

A ces valorisations directes des coproduits et déchets de production, qui n'ont cessé de se développer, il faut ajouter aujourd'hui le recyclage et la valorisation des déchets de produits bois en fin de vie. Ces déchets sont globalement issus de trois domaines : les déchets de produits papier, les déchets de chantiers du BTP (construction, rénovation, démolition), les déchets de meubles en fin de vie (mobilier

domestique, mobilier professionnel) et les déchets d'emballages (emballages légers, palettes et caisses palettes, caisses industrielles). A noter que les meubles en fin de vie ou DEA (Déchets d'Eléments d'Ameublement) font l'objet depuis 2012 d'une « filière REP » (Responsabilité Elargie du Producteur), gérée par deux éco-organismes, ECOMOBILIER pour le meuble domestique et VADELIA pour le meuble professionnel, visant à améliorer la collecte, le tri, le recyclage et la valorisation de ces déchets (fig.2). La production de déchets de bois (hors connexes de sciage) atteint en 2012 près de 7,2 millions de tonnes, dont environ 1 million est auto-consommé par les sites les produisant.



Figure 2. Recyclage des produits d'ameublement (Source : Écomobilier)

Le recyclage des produits bois en cours et en fin de vie

En cours de vie, il existe de nombreuses situations de réemploi et réutilisations de ces produits. La palette multi-rotations est un exemple marquant de cette capacité d'un produit bois à être conçu pour assurer un nombre significatif d'opérations de service logistique, directement ou après réparation ; il est estimé qu'une palette multi-rotations a ainsi une durée de vie de 7 ans et un nombre moyen de 28 rotations). Dans le domaine de l'ameublement, il faut citer le rôle important des acteurs de l'économie sociale et solidaire dans le réemploi et la réutilisation des meubles. Dans celui de la construction, il est fréquent que les produits en bois massif soient récupérés et réutilisés.

Au-delà de ces pratiques, le secteur majeur de recyclage matière de produits bois en fin de vie est certainement la fabrication de panneaux de particules. Les fabricants utilisent classiquement les produits connexes de scierie comme source de matière première. La diversification vers les broyats de produits bois en fin de vie est apparue en France il y a une quinzaine d'années, parallèlement à la montée des préoccupations de gestion des déchets. L'utilisation de broyats d'emballages bois est certainement la première étape, la plus simple compte-tenu de la composition de ces déchets, constitués très majoritairement de bois massif (fig.3). La présence de clous en acier est facilement gérée, après broyage par séparation électromagnétique. La seconde étape a été l'introduction de déchets bois du BTP, rendue possible par la mise en application de l'interdiction d'entrée en centres d'enfouissement de déchets inertes, des déchets bois, ainsi que de déchets bois issus des ménages, constitués principalement de déchets d'éléments d'ameublement. Le recyclage des DEA bois a fortement augmenté ces dernières années avec l'action des éco-organismes. Cette étape a nécessité le développement de centres de tri et de préparation des déchets afin que les caractéristiques de composition de cette matière première secondaire puissent correspondre aux cahiers des charges des fabricants de panneaux. Les entreprises qui se sont lancées dans l'introduction de ce type de matière dans leurs approvisionnements ont également investi dans des chaînes de tri complémentaire afin de bien maîtriser la qualité de la matière entrant dans le process. La proportion de déchets bois utilisés en fabrication de panneaux de particules est aujourd'hui estimée à 35%. Ainsi environ 800 000 tonnes de déchets bois sont valorisés en recyclage matière par l'industrie des panneaux en France, tandis qu'environ 1 Mt de ces déchets sont exportés pour ce même type de recyclage. D'autres usages de recyclage tels que les litières animales, le paillage horticole ou l'utilisation en stations d'épuration des eaux pour le traitement des boues interviennent également.



Figure 3. Le bois est réceptionné, trié puis broyé en différents calibres qui permettent d'alimenter des panneaux ou des chaufferies (Source : <http://www.bati-recyclage.fr/activites/bois/>)



La valorisation énergétique des déchets de bois en fin de vie

Les déchets d'emballages bois constituent un gisement très intéressant pour la production d'énergie. En effet, qu'il s'agisse de palettes ou emballages légers, ils sont constitués très majoritairement de bois. Les clous et agrafes d'assemblage sont facilement séparés, après broyage, par électro-aimant. Une démarche de Sortie de Statut de Déchet (SSD) a été menée par les professions concernées, qui permet aujourd'hui, pour les centres de production de ces broyats d'emballage qui sont agréés pour cela, de commercialiser un combustible biomasse produit à partir de ces déchets, pouvant être utilisé sans contrainte particulière par les chaufferies biomasse. Pour les déchets de bois issus de meubles en fin de vie, ou de chantiers de démolition et de rénovation, la réglementation actuelle permet leur valorisation énergétique dans des installations classées pour l'incinération ou la co-incinération de déchets. Ces installations, généralement de grande capacité et puissance thermique, sont conçues et équipées pour la destruction et filtration des effluents gazeux polluants qui pourraient être liés à la combustion des adjuvants chimiques présents dans les produits bois. Ici encore, la production d'énergie se fait sous forme de chaleur, souvent utilisée pour des procédés ou sous forme d'électricité. Au total, ce sont plus de 1,2 Mt de déchets de bois (hors connexes de scierie) qui sont valorisés en énergie.

Hiérarchie de la gestion des déchets et utilisation en cascade

Du point de vue macro-économique de la gestion de la ressource bois, et sur une période de temps significative, le fait d'allonger la durée de vie du matériau bois en intégrant une ou plusieurs boucles de recyclage matière avant la valorisation énergétique (qui correspond aussi à la destruction du matériau) est beaucoup plus intéressant que de brûler directement le déchet bois dès la fin de vie du produit (fig.4).

Cette utilisation en cascade permet également de prolonger le stockage de carbone dans le matériau, ce qui représente un avantage pour la lutte contre le changement climatique. Quelques travaux de recherche ont ainsi exploré avec succès la possibilité de créer une boucle supplémentaire de recyclage en amont de l'utilisation du bois en tant que matière première secondaire pour les panneaux de particules (2). Le propos est dans ce cas par exemple de fabriquer, à partir de déchets de bois massif, des carrelets, éléments en bois massif reconstitué ou bois lamellé-collé.

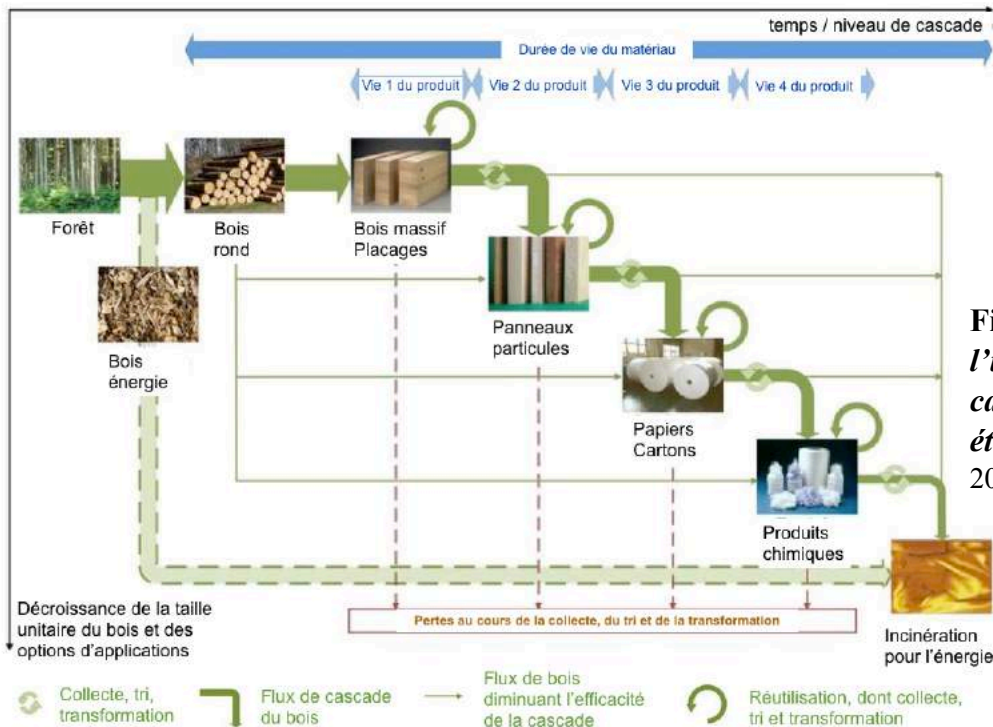


Figure 4. Concept de l'utilisation du bois en cascade avec ses différentes étapes (Source : Höglmeier, 2015)

La directive européenne 2008/98/CE et la réglementation française (Ordonnance n° 2010-1579 et Décret n° 2011-828) fixent une hiérarchie des modes de gestion des déchets et classe notamment par ordre de priorité : 1) la préparation en vue du réemploi ; 2) le recyclage ; 3) les autres formes de valorisation, notamment la valorisation énergétique. Les textes prévoient que des dérogations à cette hiérarchie sont possibles si justifiées d'un point de vue environnemental, économique et social. A noter que dans un certain nombre de situations spécifiques, comme prévu par la réglementation, il peut être plus intéressant de valoriser directement en énergie que de recycler (exemple : absence d'unités de recyclage à proximité du lieu de production du déchet ou niveaux de contamination trop élevés nécessitant une incinération).

Ainsi, les activités de transformation du bois ont un taux très élevé de recyclage et de valorisation de l'ensemble des co-produits et déchets de fabrication, et élaborent des produits durables, et pour certains, réemployés de nombreuses fois dans leur phase de service et réparables. En fin de vie, les produits sont pour la plupart recyclables sans obstacle technique majeur et des niveaux importants de recyclage et de valorisation énergétiques sont atteints.

Ce qu'il faut retenir

- La filière bois s'inscrit dans la logique de l'économie circulaire,
- Les co-produits de première transformation sont totalement utilisés en matière ou énergie.
- Les déchets de seconde transformation et produits bois en fin de vie sont également largement recyclés ou valorisés.
- La principale voie de recyclage est la fabrication de panneaux de particules.
- Les déchets d'emballages bois peuvent être convertis en combustible et utilisés dans des chaufferies biomasse ; les déchets issus de meubles et du bâtiment sont valorisables en chaleur et électricité en incinérateurs.

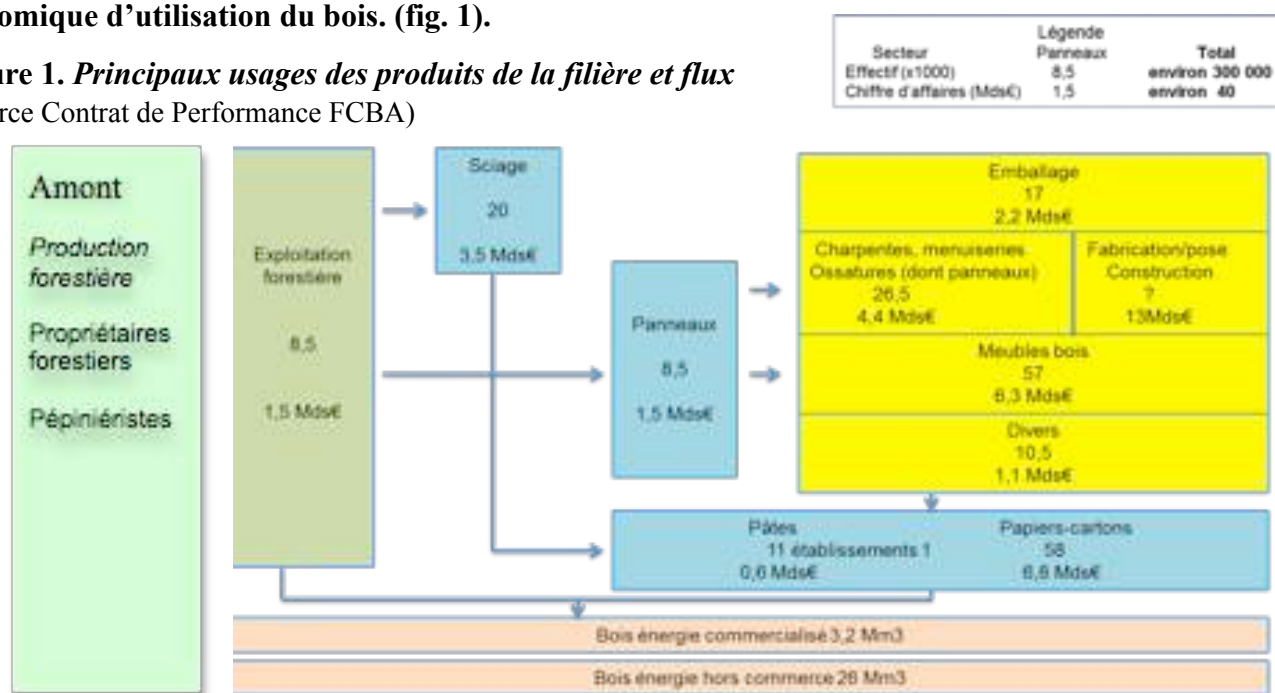
Le bois dans la construction peut-il faire l'objet d'une utilisation accrue ?

La construction est le principal secteur économique d'utilisation du bois en France. Toutefois, comparés à la majorité des pays développés, le taux d'incorporation du bois dans la construction ou le pourcentage de la construction en bois dans la construction individuelle restent faibles, alors que la ressource forestière française permettrait sans doute un usage accru du bois. Quels sont les freins ? Comment les lever ?

Le secteur Forêt Bois en quelques chiffres et place du bois dans la construction

La filière forêt-bois, avec un chiffre d'affaires de l'ordre de 50 Mds € et un effectif, de 250 à 400.000 emplois selon le mode de comptabilisation, voisins de ceux de l'automobile, est un secteur clé de l'économie française. Il existe toujours un déficit de la balance commerciale française de la filière mais la part « bois » n'est pas prépondérante : 1 à 1.5 Mds € sur les 6,7 Mds € en 2012 ; le déficit est principalement imputable aux meubles et papier) cf fiche 3.03. la construction est le principal secteur économique d'utilisation du bois. (fig. 1).

Figure 1. Principaux usages des produits de la filière et flux
(Source Contrat de Performance FCBA)



La part de marché du bois dans la construction est toujours faible en regard d'autres pays développés comparables. Pour la construction individuelle, bien que d'un niveau encore limité, on note une hausse France de la part de la construction bois en France dans la maison individuelle (voir fig.2). Les innovations technologiques pour les produits de construction : bois contrecollé, poutre en I, CLT, etc. ainsi que l'industrialisation de la maison à ossature bois (MOB) offrent des solutions pour une utilisation accrue du bois en construction. Parmi les facteurs limitants, il faut mentionner une réglementation incendie défavorable au bois. Le bois utilisé dans la construction est très majoritairement issu de conifères même si en France la ressource feuillue est particulièrement importante. Dans un contexte marqué par une réduction drastique des plantations résineuses, un enjeu particulier est d'innover pour utiliser au mieux les feuillus dans la construction.



Figure 2. Taux d'incorporation du bois dans la construction dans le monde et pourcentage du bois dans la maison individuelle en France par rapport aux leaders européens et d'Amérique du Nord

Quels sont les freins principaux à l'utilisation du bois dans la construction et comment les lever?

Les freins sont de nature très différente : culturels, réglementaires, techniques, liés à la formation des prescripteurs (architectes), à la concurrence et au lobbying d'autres filières, etc.

Au plan **technique**, l'une des questions importante est la **durabilité du bois**, notamment en cas d'utilisation **en extérieur**, qui peut être améliorée par des traitements utilisant des procédés thermiques ou chimiques. L'une des critiques porte sur la nécessité de l'entretien périodique du bois et de son coût, pas prohibitif dans les villes où le ravalement doit se faire tous les dix ans (Bordeaux, Paris, ...). Dans ce dernier domaine, l'intégration de tous les coûts dont les impacts environnementaux notamment, laissent entrevoir des perspectives tout à fait intéressantes pour le bois. Il convient cependant de mettre en avant les solutions d'entretien et les avancées technologiques améliorant sa durabilité. Pour faire durer le bois, notamment en extérieur, on recherche des produits de traitement plus «verts» ou l'utilisation de technologies non chimiques (huilage, traitements thermiques...). Il faudra parvenir pour tout le domaine du bâtiment à annoncer les durées de service des produits et ouvrages, et en particulier pour le bois, celles de nos composants seront très appréciées des maîtrises d'œuvre et d'ouvrage. A noter que l'utilisation en intérieur laisse des possibilités de progression encore importantes.

Toujours au plan technique, la question de **manque de stabilité dimensionnelle** du bois est souvent mis en avant. Le recours croissant au «bois massif reconstitué» offre des solutions. Reconstituer le matériau en le collant, notamment à contre fil, permet de créer des composants aux performances dimensionnelles plus fiables.

Après les lamellés collés, les systèmes de duos-trios, de poutres en I, de CLT (*Cross Laminated Timber*) sont des produits réellement industriels, livrables sur catalogue pour le chantier ou facilitant la préfabrication. Par ailleurs, la question des **colles et de leur toxicité** (formaldéhyde), utilisées pour la fabrication de panneaux ou de bois reconstitués existe. Des innovations sont en cours pour développer des colles « vertes, durables » (*sustainable*) pour le bois à plus faible taux de formaldéhyde ou issues de produits naturels. C'est aussi le cas pour les autres produits adjuvants ajoutés au matériau pour le reconstituer ou amplifier ses performances (colles, finitions, produits de préservation).

Concernant le **confort thermique**, si les performances du matériau sont connues pour la thermique d'hiver, des questions se posent sur la **thermique d'été**. On y travaille, par exemple au travers de l'alliance avec d'autres matériaux (ayant une bonne inertie thermique) comme le béton ou avec des matériaux à changement de phase. L'effort de mixité des matériaux peut être encore amplifié. Pour le confort d'été on peut profiter de l'inertie du béton avec des bâtiments à noyau central en béton qui vont assurer une restitution de fraîcheur en période chaude et des zones périphériques qui elles, sont en bois pour le confort d'hiver. On peut aussi utiliser les systèmes de planchers bois béton (poutres bois, dalles béton). Il faut aussi travailler plus finement l'approche bioclimatique en suscitant notamment la création d'outils de justification plus élaborés. A noter en matière de mixité qu'il existe des complémentarités : le bois, comme l'acier, fonctionne mieux à l'horizontale, le béton à la verticale.

Des travaux sont aussi menés sur le risque **sismique** dans la mesure où la carte sismique s'étend en France. La filière s'est dotée récemment d'un outil unique en Europe et très adapté à ces besoins : table vibrante mono axiale pour systèmes constructifs de masses modérées à moyennes à Bordeaux. Cet outil devrait permettre des avancées significatives sur la prévention du risque sismique.

La position de « challenger » de l'industrie du bois vis à vis d'autres industries l'incite à s'impliquer à **rattraper les lacunes ou les erreurs des textes en matière réglementaire ou normative**. Quand on établit une norme dans le domaine du bâtiment, ou une nouvelle réglementation, on pense « traditionnel », et donc, « naturellement », on ne pense pas au bois quand il existe de remarquables exemples qui ont passé les siècles et des réalisations très modernes...



Figure 3. *Construire la ville de demain avec des immeubles en bois, aménager des espaces innovants avec le bois*

La Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et du Patrimoine (DHUP) du Ministère chargé du Logement a demandé au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et à l'Institut Technologique (FCBA) de travailler sur ces freins qui empêchent le développement de la construction bois. Certains d'entre eux ont été levés comme, par exemple, l'ostracisme dont était frappé le matériau dans les plans locaux d'urbanisme. Des dispositions incitatives viennent de paraître : le décret bois, créé après la loi sur l'air, en vue d'incorporer au bâtiment un minimum de bois, vient d'être multiplié par dix. Il a subi quelques contretemps mais le Ministère s'active à lever la difficulté de la Question préalable de Constitutionnalité élevée en contre feu par les concurrents. La DHUP, avec les professionnels (la FIBC, la CAPEB et la FFB; voir fiche 9.09) et FCBA ont travaillé pour définir quels étaient les grands domaines où il y avait encore du retard. Parmi les facteurs limitants, il faut mentionner une réglementation **incendie** défavorable au bois. Les principaux freins à lever concernent la résistance au feu et la propagation par les façades. Les actions entreprises CODIFAB (Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois)-DHUP-FCBA-CSTB devraient aboutir vers 2017.

Rattraper le retard culturel et délivrer des connaissances objectives : développer la communication et formation

Une entreprise de construction traditionnelle vantait ses maisons avec le slogan «une maison de maçon». Un tel slogan «parle» à un européen du sud qui a une grande considération pour la pierre. Et pourtant....

Les **performances environnementales du bois** telles que son caractère renouvelable, son faible coût énergétique et le fait qu'il stocke le carbone sont claires, et confortées par des argumentaires scientifiquement solides qui s'étaient de jour en jour. Il en est de même pour les performances techniques des produits «bois» souvent méconnues. Un effort de communication et de formation est à amplifier. FCBA et le CSTB au travers notamment de leur partenariat (SYNERBOIS) proposent des documents communs plus facilement accessibles aux professionnels et une démarche simplifiée d'accès à l'évaluation des composants innovants (avis techniques, agréments techniques européens). La communication doit cibler aussi bien la société en général que les prescripteurs et en particulier les architectes.

Le saviez-vous : le bois archétype des matériaux ?

Le bois mérite une place à part, ne serait-ce que pour une raison étymologique : il permet de comprendre les mots « matériau » et « matière », inséparables de la « mère ». Les termes : - *materia*, *materies*, *materiaris* – de la langue latine rustique qualifient le bois de substance maternelle, parce que le tronc de l'arbre, dont on coupe les branches, ne cesse pas de produire des rejetons. Le fût principal est désigné par *silvae materiariae*, quand il s'agit d'un bois de construction (maison, navire). D'ailleurs en espagnol, bois se dit «madera» et en portugais «madeira».

Ce qu'il faut retenir

- Le bois dans la construction peut avoir une place plus grande qu'aujourd'hui
- Les performances environnementales du bois sont un atout par rapport à d'autres matériaux
- Les performances techniques autoriseront demain la construction de bâtiments de grande hauteur
- La mixité des matériaux peut être développée davantage
- Il est possible de mettre en place des normes plus adaptées aux produits bois
- Il faut renforcer les actions de communication et de formation pour rattraper le retard «culturel» des maîtres d'oeuvre et d'ouvrage et de leurs clients

Quelle place pour le bois dans les matériaux composites ?

On associe le plus souvent les matériaux composites à des produits de haute valeur ajoutée, de coût élevé et qui requièrent d'excellentes caractéristiques physiques, les critères poids/performances et durabilité étant primordiaux. Il existe cependant des applications moins exigeantes, générant des volumes conséquents, qui font appel à des composites à base de bois et dont les marchés sont en pleine expansion. La présente fiche passe en revue les matériaux composites à base de bois en se limitant aux composites bois/fibres, bois/polymères, bois imprégnés ou modifiés chimiquement. Les composites présents dans les bois reconstitués étant traités dans la fiche 3.10.

Définition des composites

Le terme « matériaux composites » recouvre une vaste palette de matériaux incorporant, souvent en faible quantité, des charges de renfort ou associant d'autres matériaux de caractéristiques différentes, qui vont en accroître significativement les propriétés physiques et la durabilité.

On peut ainsi disposer de produits légers, à fortes caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, réalisés à partir d'une matrice le plus souvent de nature polymérique enrobant des additifs solides de renfort ou de remplissage, millimétriques voire nanométriques. Le taux d'incorporation de ces charges spécifiques au sein de la matrice, leur géométrie (rapport longueur/diamètre), leur orientation, leurs propriétés intrinsèques (module par ex.) sont autant de paramètres qui vont conférer au produit final les propriétés originales recherchées.

Qu'en est-il des composites à base de bois ?

Notons tout d'abord que le bois est naturellement un composite au niveau de la paroi cellulaire des fibres ou trachéides (figure 1) qui est constituée de nappes de fibrilles de nanocellulose enrobées dans une matrice, sensible à l'eau, constituée d'hémicelluloses et de lignine (figure 2 et 3, cf. fiche 7.08). Il est parfois nécessaire de stabiliser le bois dans des composites avec des fibres ou charges, ou de le modifier en substituant les groupements hydroxyles de la cellulose et des hémicelluloses.

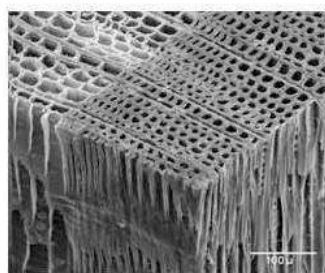


Figure 1.

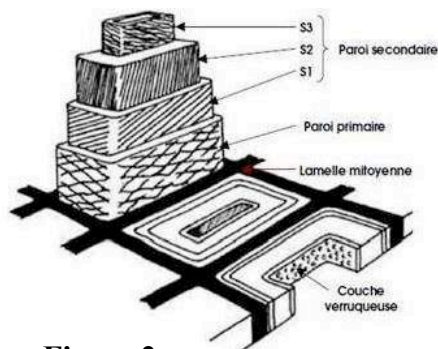


Figure 2.

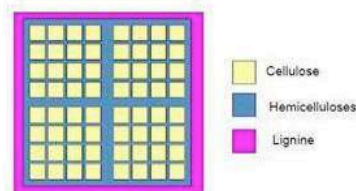


Figure 3.

On peut distinguer quatre grands types de composites pour lesquels le matériau ligno-cellulosique présente un intérêt à savoir :

1) Ceux associant des nappes de fibres longues de haut module avec du bois massif.

Des poutres et longerons porteurs, fortement sollicités mécaniquement, ont été réalisés et commercialisés sous la forme de sandwichs associant une âme en bois massif à des mats de fibres de carbone collés de part et d'autre de l'élément central ou à des plaques de titane. Dans les activités de loisir, par exemple les skis et l'aéronautique font et ont fait usage de tels éléments structuraux (avions de voltige CAP Mudry) pour la réalisation de skis à noyau bois (fig. 4) et de longerons d'ailes d'excellent rapport poids/performances (fig. 5). Les applications associant fibres longues de hautes caractéristiques à du bois demeurent toutefois de plus en plus limitées, voire anecdotiques.

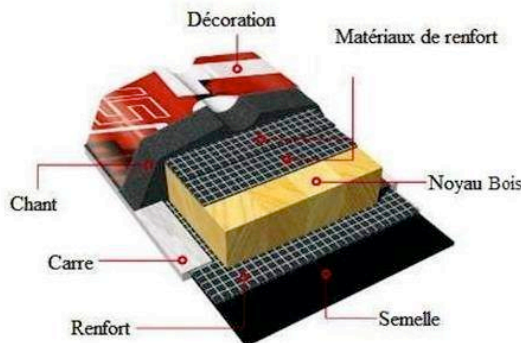


Figure 4.



Figure 5.

2) Ceux dans lesquels le bois joue le rôle de renfort (fibres de bois) ou de remplissage (farine de bois, sciure calibrée) par incorporation dans une matrice thermoplastique ou thermodurcissable.

Dans ce cas, le bois est soit défibré en conservant les propriétés propres à l'essence, soit fortement divisé et micronisé sous forme de farine de bois. Son addition contrôlée à un polymère à l'état fondu, lors de la transformation, permet d'en modifier certaines propriétés mais également d'abaisser le coût de la pièce finie.

Les techniques de mise en œuvre font appel à la plasturgie (moulage – roto- moulage – extrusion - injection, à l'exception du soufflage) avec quelques adaptations des matériels pour évacuer l'eau résiduelle contenue dans le bois. A cet effet les vis d'extrusion comportent des événements judicieusement disposés. Un dispositif spécifiquement dédié à l'extrusion de composites à forte teneur en farine de bois, le Woodtruder (figure 6), est commercialisé aux USA et ne nécessite pas de séchage préalable de la charge ligno-cellulosique.



Figure 6.



Figure 7.

Ce type de composite bois-plastique, connu le plus souvent sous la dénomination anglo-saxonne de WPC (Wood – Plastic – Composites), est désormais bien présent dans le secteur du bâtiment et de l'agencement urbain, comme les platelages (figure 7). Jusqu'à 60 à 70% de farine de bois peut être incorporée à une matrice PVC ou polypropylène pour élaborer des éléments linéaires, à l'état de profilés, dont la forme définitive, issue de filières d'extrusion, ne nécessite aucun usinage ultérieur. La farine de bois doit être très bien calibrée et de haute siccité (de l'ordre de 2 à 3% d'eau résiduelle). Sa production nécessite des installations spécifiques anti déflagration, compte tenu de la dangerosité (feu – explosivité) d'un produit cellulosique de très faible granulométrie et de grande surface spécifique.

Dans certains cas il peut s'avérer nécessaire de modifier (par greffage chimique le plus souvent) l'interface bois micronisé-matrice polymère pour accroître les performances du composite, à la traction.

3) Les composites pour lesquels le bois a été préalablement transformé chimiquement pour n'en conserver que la partie cellulosique plus ou moins cristalline.

C'est tout l'intérêt porté aux nano-celluloses qui présentent de hautes caractéristiques intrinsèques. Des recherches récentes sur l'adjonction en faible quantité de nanoparticules de cellulose à une matrice plastique font penser que ce type de composites à valeur ajoutée a un avenir certain, compte tenu des caractéristiques mécaniques obtenues, en particulier dans les applications automobiles.

4) Les bois imprégnés et densifiés à cœur que l'on peut assimiler à des composites

La structure du bois peut être imprégnée et modifiée de plusieurs façons schématisées sur la figure 8 A partir de la coupe transversale d'une fibre de bois non modifiée en A1, on a soit modification de la paroi cellulaire en A2, soit dépôt complémentaire de produit dans le lumen en A3, soit seulement remplissage du lumen en A4.

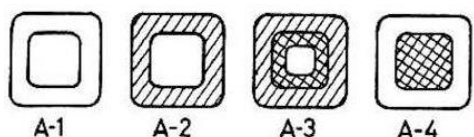


Figure 8. Source : Woodland and Cellulose Chemistry - D. HON Edit.

Les réactifs chimiques (le plus souvent des monomères ou des oligomères de résines synthétiques) sont polymérisés ou réticulés (formation d'un réseau en trois dimensions) afin d'en modifier les caractéristiques physiques. On procède par des techniques de vide-pression variables en fonction du type d'imprégnation (figure 8), puis densification du substrat par réticulation de la résine, à laquelle on a souvent adjoint un catalyseur. Cette réticulation est réalisée le plus souvent par voie thermique ou par bombardement électronique (Electron Beam Curing) ou par rayonnement gamma, dans quelques cas particuliers. Ces traitements ont pour effet d'augmenter la dureté de surface du matériau, d'accroître la résistance à l'abrasion mais également de réduire considérablement la sensibilité du bois à l'humidité et au pourrissement biologique. Il rend le matériau bois pérenne ce qui est recherché dans nombre d'applications. Plusieurs procédés et produits ont été développés :

Le **traitement thermique sous pression** de 25 à 250kgs/cm où on observe la plastification du bois par exemple à 80kg/cm² et 160°C avec amélioration des propriétés mécaniques de bois peu denses (fig. 9).

L'**imprégnation** par des résines phénoliques en solution méthanol sous vide-pression ou sous pression jusqu'à 60 Kg/cm² pour donner le Permawood® (ou Lignostone®), bois laminé densifié fait de tranchages de Hêtre donnant un composite (fig. 10) de faible poids spécifique, isolant électrique, résistant à la chaleur, à l'abrasion et à l'usure. Plus récemment, le bois acétylé (fig. 11) a été industrialisé pour les applications extérieures et en structure. Ce bois est stabilisé dans la masse, non mouillable, résistant à l'eau et aux champignons, gardant l'aspect initial du bois, ne nécessitant aucune finition, qui accrocherait avec difficulté.



Figure 9.



Figure 10.

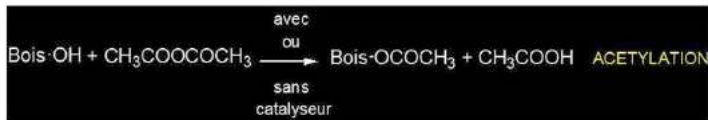
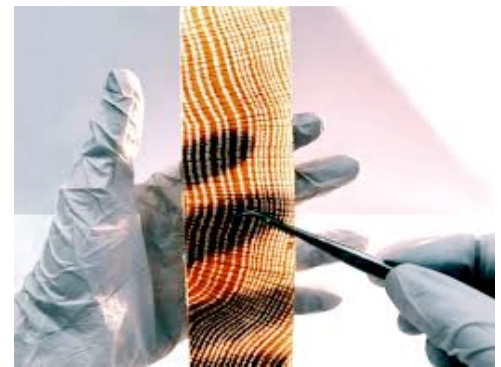


Figure 11.

Enfin il paraît digne d'intérêt de souligner les recherches actuelles sur le **bois transparent**. Les fibres de cellulose, après délignification par un procédé papetier, sont associées à une résine d'enrobage (PMMA : Polyméthylméthacrylate de méthyle) dont l'indice optique de réfraction est proche de celui de la cellulose (1,47). Ce matériau translucide suscite un réel intérêt pour ses propriétés optiques et thermiques pouvant, à terme, être mises à profit pour la réalisation de vitrages isolants. (fig. 12)

Figure 12.

Remarque : Ce type de bois transparent correspond à un usage ancien du papier huilé comme vitrage transparent



Dans un domaine tout autre, les équipementiers automobiles font appel à du polypropylène extrudé en plaques, chargé en farine de bois (50% environ) pour la réalisation, après une opération de chauffage/pressage, d'habillages intérieurs de véhicules (contre portières, tablettes arrière, fonds de coffres...). Ces composants, en partie bio-sourcés (avec des bio-polymères d'acide lactique ?) correspondent parfaitement à la demande du marché, pour des produits issus de la biomasse.

Notons quelques développements réalisés en Afrique centrale, où la prolifération des déchets plastiques est un problème très important. Un exemple est la fabrication de MDF à partir de sciures calibrées issues de sous produits de bois tropicaux et d'adhésif à base de polystyrène dissous dans de l'essence ! (Source: E. C. Adjovi et coll. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 4, April-2013 et IAWS Annual meeting St Petersburg and Moscow, June 2009)

Applications majeures des WPC et marchés

Les principales applications des produits extrudés qui représentent la très grande majorité des composites bois-plastique, concernent les platelages, les lames de terrasses, pourtours de piscines, bardages, plinthes, coffres de volets roulants ainsi que des éléments de fenêtres. Dans ce dernier cas, compte tenu des exigences mécaniques, la résine utilisée en tant que matrice est de nature thermodurcissable. Le marché mondial actuel dépasse désormais le million de tonnes /an, avec un fort potentiel de croissance.

Ce qu'il faut retenir

- Les composites bois - plastique, associant fibres ou farine de bois à une résine thermoplastique PVC ou Polypropylène sont les plus répandus.
- Ils intègrent de 20 à 60% de bois micronisé et sont transformés selon des procédés de plasturgie modifiés (extrusion, injection ...).
- La construction et l'aménagement, constituent la majorité des applications pour les éléments non porteurs.
- Le secteur automobile fait également appel à ces composites pour l'habillage intérieur de véhicules en intégrant désormais des composites bio-sourcés.
- Les composites à base de nano-cellulose ainsi que les bois imprégnés à cœur sont des produits à forte potentialité.
- Pourquoi pas des composites bois avec des déchets plastiques ?

Une gestion forestière virtuelle ?

« Arbres et paysages virtuels », « gestion digitale des forêts » : s'agit-il là d'oxymores, de gadgets ou de rêves de geeks ? ou bien d'outils et de services destinés aux forestiers, aux industriels ou aux citoyens ? C'est parce que les arbres sont des organismes complexes et longévifs qu'il est utile de disposer de méthodes numériques pour prédire leur développement en fonction de leur environnement biologique ou physique, ou pour visualiser en 3D la structure interne de leur tronc afin, par exemple, d'optimiser le débit au sciage. C'est aussi parce que la sylviculture ou l'aménagement ont des effets multiples et différés qu'il est précieux de pouvoir simuler le devenir d'un peuplement ou d'un paysage en fonction de la gestion forestière.

Qu'est-ce qu'un arbre, un peuplement forestier ou un paysage virtuel ?

Dès le 18^e siècle, les dendrométriciens (voir fiche 8.07) se sont attachés à estimer le volume des arbres et des peuplements forestiers à partir de la mesure de leur diamètre, de leur circonférence ou leur hauteur. Ils ont aussi cherché à décrire et prédire leur croissance et leur production en fonction de leur espèce et de leur âge, de la sylviculture pratiquée et des conditions écologiques (sol, climat, ...) ou, plus tard, de leur génotype. Ils ont ainsi créé des outils qui ont été progressivement perfectionnés au fil de l'évolution des connaissances et des technologies : les « tarifs de cubage » et les « tables de production » en sont les exemples classiques les plus connus.

Au début, les données étaient peu nombreuses et les méthodes employées étaient essentiellement graphiques. Dans la seconde moitié du 20^e siècle et depuis le début du 21^e siècle, la situation a progressivement et profondément évolué.

D'une part, les données se sont diversifiées et massifiées : par exemple, la photographie aérienne, la télédétection ou aujourd'hui le « lidar » (acronyme de l'expression anglaise « light detection and ranging » ou « laser detection and ranging », le « lidar » désigne une technique de détection et d'estimation de la distance par la lumière ou par laser, fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur ; voir fiches 1.10 et 7/03 et <http://computree.onf.fr>) génèrent des images à haute densité et à haute fréquence des forêts (Fig. 1) qui permettent de caractériser leur composition, leur structure et leur géométrie et d'obtenir ainsi un grand nombre de variables d'intérêt qui n'étaient pas faciles à obtenir ; la tomographie et les scanners fournissent aussi des données fines sur la structure interne des troncs (Fig. 2). Nous disposons ainsi d'outils numériques pour représenter les forêts, depuis l'anatomie des arbres jusqu'au panorama d'un grand paysage.



Figure 1. Numérisation de placettes de l'Inventaire forestier national par Lidar terrestre et reconstitution algorithmique de la géométrie des arbres d'une placette pour l'estimation du volume total aérien des ressources forestières. Source : d'après Hervé et al. 2016. Evaluation des ressources forestières pour la bioéconomie : quels nouveaux besoins et comment y répondre ? Innovations Agronomiques, 56 : 71-80).



Figure 2. Reconstruction tridimensionnelle et visualisation d'un quartier de grume d'épicéa scannée. Source : projet européen FAIR CT 96 – 1915: STUD – Marc Jaeger [Cirad] et Jean-Michel Leban [Inra] (2000).

D'autre part, des approches de plus en plus puissantes de modélisation ont été développées en faisant appel aux statistiques, aux mathématiques appliquées et à l'informatique (voir : i) Houllier, Bouchon et Birot, 1991. Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. *Revue forestière française*, XLIII (2) : 87-108 ; ii) Houllier F. 2001. Modélisation de la production ligneuse et des paysages : des technologies nouvelles pour l'évaluation des ressources forestières. *Revue forestière française*, LIII (3-4) : 423-432.)

Simultanément, la finesse, le nombre et la complexité des mécanismes pris en compte se sont aussi accrus : on sait aujourd'hui modéliser — au moins jusqu'à un certain point — l'architecture, la biomécanique ou la physiologie des arbres aussi bien que la dynamique de peuplements irréguliers et mélangés.

Dès les années 1990 et plus encore depuis 2000, ces nouveaux modèles ont conduit à parler d'arbre, de peuplement ou de paysage « virtuel » ; les adjectifs « digital » ou « numérique » sont aussi utilisés et rendent compte de la place de l'informatique dans ces nouveaux modèles. Au-delà de la grande diversité des modèles sous-jacents, les arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels partagent, à des degrés variés, quelques caractéristiques communes.

En premier lieu, ils fournissent des capacités de visualisation à plusieurs échelles : représentation tridimensionnelle de la silhouette d'un arbre ou, plus finement, de son architecture ; exploration de sa structure interne, de l'empilement des cernes, des nœuds ou d'autres défauts ; simulation d'un couvert forestier depuis un bouquet d'arbres jusqu'à une scène de plusieurs centaines d'hectares ; possibilité de modifier le niveau de détail visualisé, de changer de point de vue, de simuler le parcours d'un promeneur en forêt ou des paysages du passé (Fig. 3).



Figure 3. Simulation de paysages avec les logiciels issus d'AMAP : ci-dessus, paysage fonctionnel ; ci-contre, paléopaysage (image calculée par R. Lecoustre) - Source : de Reffye et al. 2009, https://interstices.info/jcms/c_38032/

En second lieu, ces modèles offrent aux utilisateurs des possibilités d'interaction dynamique à différentes échelles : simulation du débit d'une grume et de la qualité des produits dérivés ; élagage ou éclaircie d'un peuplement et prédiction de sa réponse ; dynamique à court et long terme d'un paysage en fonction des choix d'aménagement. Il est ainsi possible de représenter les effets et impacts des décisions ou des événements simulés.

A quoi les forêts virtuelles servent-elles ?

Les arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels sont d'abord des outils pour explorer ces systèmes complexes et en approfondir la compréhension.

Les modèles d'architecture des plantes, notamment des arbres forestiers (voir fiche 2.08), synthétisent ainsi les connaissances botaniques sur leur développement : les séquences d'événements qui caractérisent le fonctionnement des méristèmes (élongation des tiges, ramification, floraison, ...) sont modélisées par des méthodes probabilistes et statistiques ; la simulation informatique permet de représenter la topologie et la géométrie d'un arbre en fonction de son stade de développement, et de générer une maquette tridimensionnelle qui peut ensuite être manipulée.

De tels modèles peuvent aussi intégrer des connaissances sur les interactions de l'arbre avec son environnement (interception de la lumière, compétition pour l'espace, ...) et sur son fonctionnement écophysio-physiologique (transpiration, photosynthèse, croissance secondaire, ...) ou biomécanique (Fig. 4). Le modèle repose alors sur un véritable dialogue entre la structure et la fonction de l'arbre, entre son développement propre et son environnement. Un exemple récent est présenté par Eloy et al (2017) qui ont simulé l'évolution d'une forêt pendant plus de 200 000 ans afin d'expliquer comment la forme des arbres a pu émerger au cours de l'évolution en réponse à l'action conjointe du vent et de la lumière (Fig. 5).



Figure 4. Déformation d'un pin maritime qui croît le long d'un mur : la simulation combine développement architectural, croissance en diamètre du tronc et des branches et comportement biomécanique de l'arbre. Source : Thierry Fourcaud [Cirad].

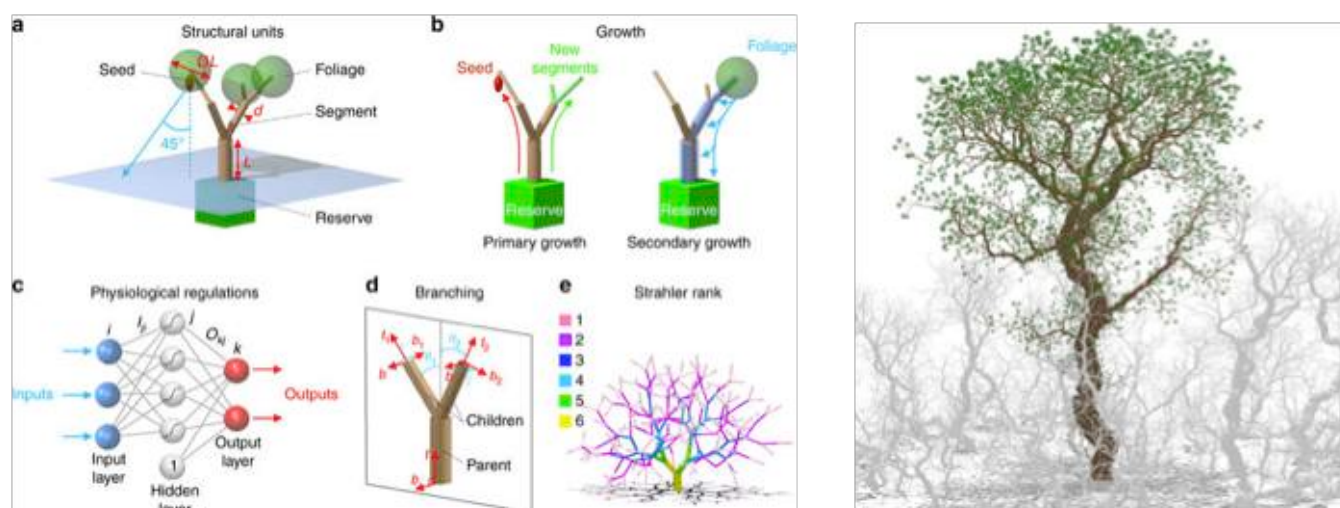


Figure 5. MECHATREE : simulation du développement d'un arbre en réponse à la lumière et aux contraintes biomécaniques. A gauche : principes du modèle. A droite : arbre simulé au milieu d'une forêt virtuelle. Source : Eloy C., Fournier M., Lacointe A., Mouliat B. 2017. Wind loads and competition for light sculpt trees into self-similar structures. Nature Communications, 8. DOI: 10.1038/s41467-017-00995-6.

Pour des raisons pratiques (ampleur des ressources informatiques requises) aussi bien que scientifiques (pour représenter la dynamique d'un peuplement forestier il n'est pas nécessaire de connaître tous les détails de la croissance des arbres qui le composent), les modèles de peuplements et de forêts peuvent être obtenus selon des approches plus synthétiques que celles évoquées ci-dessus.

Au-delà de leur visée cognitive, ces arbres et forêts virtuels ont aussi des applications variées. En premier lieu, ils permettent d'obtenir, par le calcul des grandeurs d'intérêt peu accessibles à la mesure directe. Par exemple : les différentes fractions de la biomasse (tronc, branches, feuillage) et la quantité de rayonnement intercepté par le feuillage pour calibrer des modèles utilisés en télédétection ; ou encore la distribution spatiale du matériel végétal combustible qui est un facteur clé dans la propagation d'un incendie de forêt.

En Rhénanie-du-Nord–Westphalie, le projet « Der virtuelle Wald » (<http://www.virtueller-wald.de/de/der-virtuelle-wald/>) illustre les applications concrètes des arbres, peuplements et paysages forestiers virtuels pour la gestion forestière. Dans un usage tactique, les modèles prédisent l'évolution d'un peuplement particulier en fonction de la sylviculture pratiquée (éclaircies, élagage, ...) (Fig. 6). Ils fournissent également des indications sur la qualité des produits attendus (densité du bois, nodosité des planches débitées, ...). Ils permettent aussi d'optimiser des opérations d'exploitation forestière ou des procédés de transformation tels que le sciage. La génération de scènes virtuelles sert enfin pour des aménagements paysagers ou dans des simulations en temps réel.

Dans un usage stratégique, ils servent à élaborer des principes plus généraux pour la sylviculture (choix des espèces, composition et densité des peuplements, ...) en fonction du milieu, par exemple en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques. Ils ont aussi des usages pédagogiques et ludiques quand ils prennent la forme de supports de formation ou de jeux (voir, par exemple le projet mené par des étudiants de l'école Epitech : <http://www.rfi.fr/emission/20151206-une-foret-virtuelle-evolutive> ou <http://www.futura-sciences.com/tech/actualites/informatique-foret-virtuelle-pousse-mmo-science-60538/>).

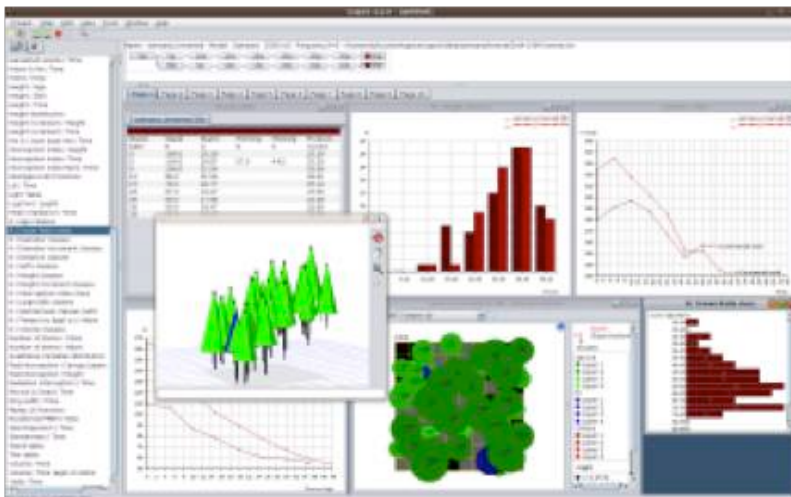


Figure 6. *Différentes fenêtres permettant à un utilisateur de visualiser les caractéristiques d'un peuplement forestier simulé par le logiciel CAPSIS (Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture). Source : François de Coligny [Inra].*

Ce qu'il faut retenir

- Issus des travaux des dendrométriciens, les forêts virtuelles s'inscrivent dans le cadre général de la transition numérique qui affecte tous les secteurs d'activité
- Elles reposent ainsi sur trois grands volets : la production massive de données par de nouvelles technologies ; la modélisation des processus biologiques, écologiques et technologiques ainsi que des comportements ; l'intégration de ces données et modèles dans des systèmes de visualisation et de simulation de plus en plus interactifs
- Depuis le niveau de l'arbre jusqu'à celui du paysage, leurs usages sont nombreux et se diversifient : ils vont de l'exploration des frontières des connaissances à la gestion forestière concrète, des jeux à la formation.