

L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE DES ARBRES FORESTIERS DANS UN ENVIRONNEMENT CHANGEANT : L'EXEMPLE DU PEUPLIER

La forêt et les arbres forestiers fournissent une multitude de services dont l'approvisionnement en matières premières renouvelables comme le bois. Cependant, les dérèglements climatiques en cours menacent sérieusement la productivité et la qualité des peuplements ainsi que toute la filière bois qui en dépend. Bien qu'aujourd'hui limitée, la part de la forêt française issue de plantations devrait être amenée à augmenter dans les années à venir non seulement afin de soutenir la demande en bois croissante mais aussi afin de fournir des solutions pour l'adaptation des forêts de demain.

Cette exposition a pour but de présenter et d'illustrer quelques enjeux liés à l'amélioration génétique des arbres forestiers dans le contexte actuel de climat changeant et de développement durable, au travers d'un exemple particulier, le peuplier. Le peuplier est l'arbre feuillu le plus planté en France et représente une ressource économique importante.

Cette exposition a été réalisée avec le soutien de Centre•Sciences dans le cadre du projet d'intérêt régional « 2E-BioPop » financé par la région Centre-Val de Loire (convention no. 2017-00116950).

Exposition conçue et réalisée par :

R. Fichot (Université d'Orléans, Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures, Unité sous contrat INRAE), A. Berthelot (institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement), N. Boizot – N. Belmokhtar – R. Gobin (Unité mixte de recherche INRAE-ONF Biologie intégrée pour la valorisation de la diversité des arbres et de la forêt), G. Bodineau (Unité expérimentale INRAE Génétique et biomasse forestières d'Orléans) et M.-L. Thurier (Centre•Sciences, CCSTI de la région Centre-Val de Loire) avec la participation de I. Le Jan et A. Delaunay (Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures, Université d'Orléans, USC INRAE).

Graphisme et illustrations : Céline Roux – Impression : API



LA FORÊT PLANTÉE DANS LE PAYSAGE FORESTIER

La forêt française

LA FORÊT EN FRANCE MÉTROPOLITAINE, C'EST :



16.8 MILLIONS D'HECTARES
soit 31 % de taux de boisement



PRÈS DE 400 000 EMPLOIS



38 MILLIONS DE M³ COMMERCIALISÉS

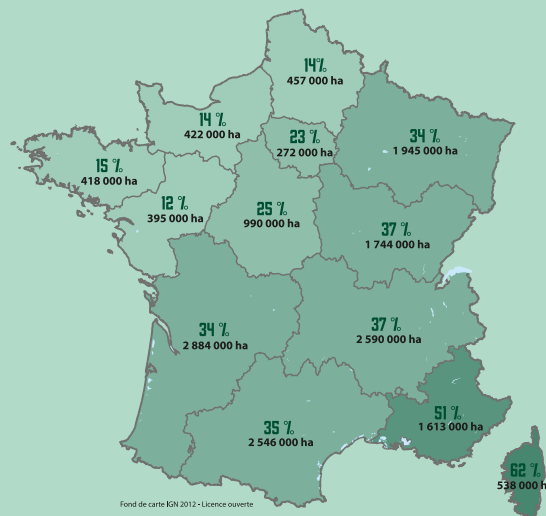


Bois d'oeuvre

Bois d'industrie

Bois d'énergie

TAUX DE BOISEMENT ET SUPERFICIES DES FORÊTS DANS LES RÉGIONS FRANÇAISES* :



Fond de carte IGN 2012 - Licence ouverte

*D'après les données du Memento Inventaire forestier - édition 2019 de l'IGN

Les rôles de la forêt plantée

Avec au moins **2,1 millions d'hectares**, la forêt plantée représente en France **13 % de la surface forestière**. Les plantations permettent :



D'obtenir une réponse adaptée à la forte demande en bois amenée à augmenter dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement durable.



De réduire la pression exercée sur les peuplements naturels.

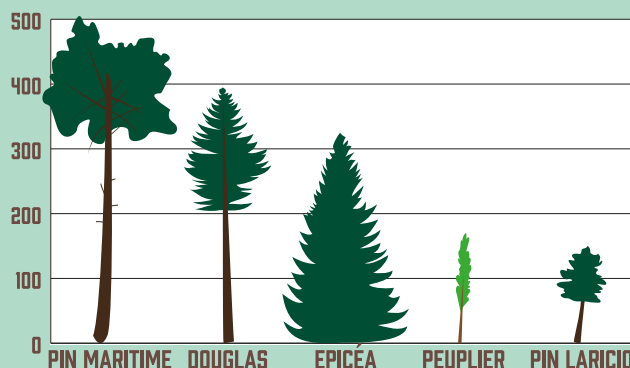


De renouveler les peuplements déperissant, lorsque la régénération naturelle est impossible, grâce à l'utilisation de provenances ou d'espèces mieux adaptées aux conditions futures du milieu et aux besoins des consommateurs.

Que plante-t-on ?

Depuis une trentaine d'années, les plantations ont fortement diminué en France, laissant craindre des problèmes d'approvisionnement. Actuellement, cinq essences représentent à elles-seules quasiment les trois quarts des surfaces plantées. Parmi elles, **le peuplier représente la première essence feuillue**. Un des facteurs de réussite des plantations repose sur l'utilisation réglementée de Matériels Forestiers de Reproduction (MFR) garantissant des qualités génétiques reproductibles et certifiées. Les programmes d'amélioration génétique ont permis de développer des Variétés Forestières Améliorées (VFA) pour les principales essences utilisées.

SURFACES DE PLANTATION SUR LE TERRITOIRE [EN MILLIERS D'HECTARES]*



*d'après la feuille de l'inventaire forestier de l'IGN 2017.

À noter que dans le cas du pin maritime, les plantations issues de semis sont sous-estimées ; les surfaces exploitables sont en réalité plus proches de 1 million d'ha pour cette essence

LES PEUPLIERS ET LA POPULICULTURE

Caractéristiques botaniques et écologiques



Il existe une trentaine d'espèces de peuplier décrites, présentes majoritairement dans l'hémisphère nord, ainsi qu'une multitude d'hybrides naturels ou artificiels. Botaniquement et écologiquement proches des saules, les peupliers sont pour la plupart des espèces pionnières à croissance rapide fortement dépendantes de la ressource en eau.

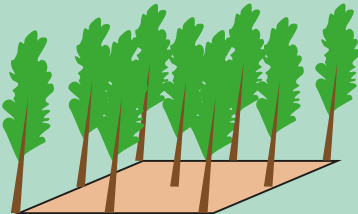
En France, trois espèces sont naturellement présentes : le peuplier blanc, le peuplier tremble et **le peuplier noir, emblématique de nos forêts ligériennes** (voir photos ci-contre).



Une essence d'importance économique

LA POPULICULTURE

210 000 ha de plantation



1,4 millions de m³ récoltés

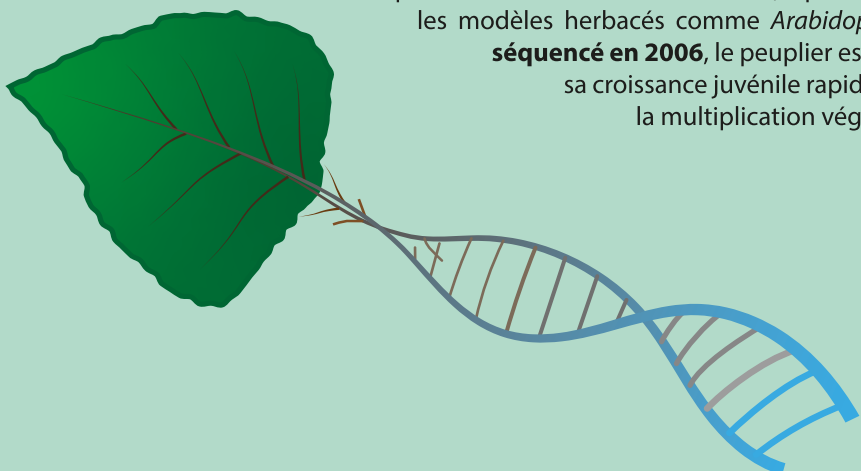


La culture du peuplier (populiculture) demeure essentiellement cantonnée aux zones de vallées alluviales. Cependant, avec **seulement 210 000 ha de plantations** (1,25 % de la surface forestière) **mais 1,4 millions de m³ récoltés par an**, le peuplier représente environ 30 % de la récolte de bois d'œuvre feuillu en France, juste derrière le chêne (3,8 M ha). Son bois blanc et léger est valorisé dans de multiples usages : panneau de contreplaqué, emballages légers, sciages, etc. La populiculture repose sur l'utilisation de variétés améliorées aux caractéristiques reproductibles. En France, le programme d'amélioration génétique est conduit par un « Groupement d'Intérêt Scientifique » regroupant l'INRAE et l'institut technologique FCBA.



Un organisme modèle pour la recherche

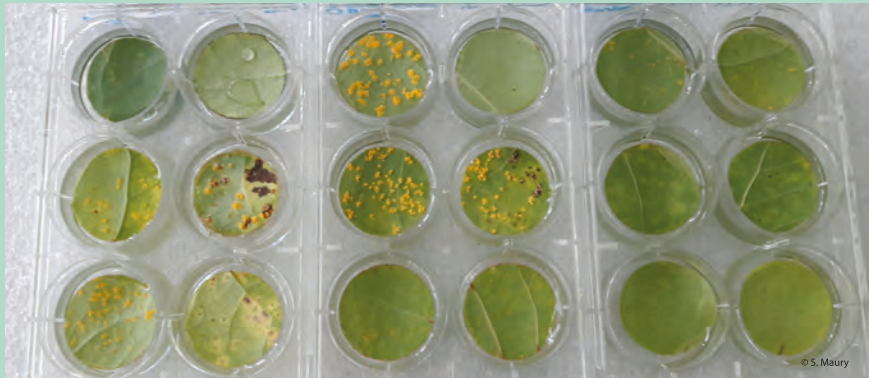
Certains phénomènes biologiques propres aux arbres comme la longévité, la production de bois ou encore la réponse à l'alternance des saisons (la phénologie) ne peuvent pas être directement étudiés chez les modèles herbacés comme *Arabidopsis thaliana*. **Premier arbre à avoir eu son génome séquencé en 2006**, le peuplier est un modèle couramment utilisé du fait, entre autres, de sa croissance juvénile rapide, de sa maturité sexuelle précoce et de sa propension à la multiplication végétative.



DES CRITÈRES D'AMÉLIORATION NOMBREUX ET DIVERSIFIÉS

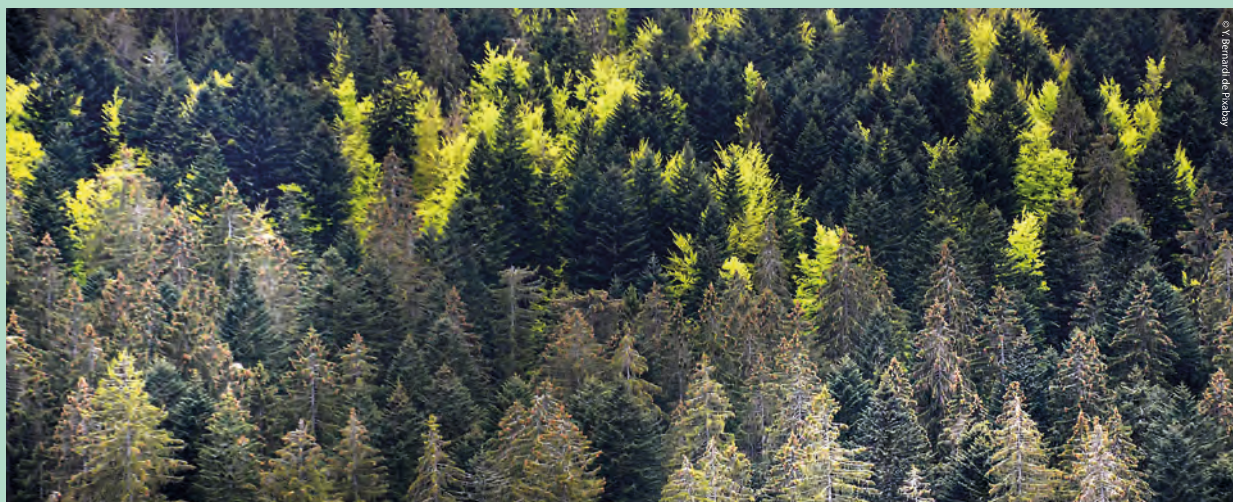
Des critères pensés pour la futaie...

Les peupleraies en futaie régulière, d'une **durée de révolution moyenne de 15 à 20 ans**, sont les plantations les plus répandues en populiculture. Historiquement, les critères d'amélioration se sont donc focalisés sur ce type de sylviculture et concernent essentiellement des caractères comme la productivité, la tolérance à de multiples agents pathogènes, en particulier l'agent responsable de la rouille foliaire *Melampsora larici-populina*, ou encore la rectitude du tronc et l'aptitude à certains usages du bois (déroulage).



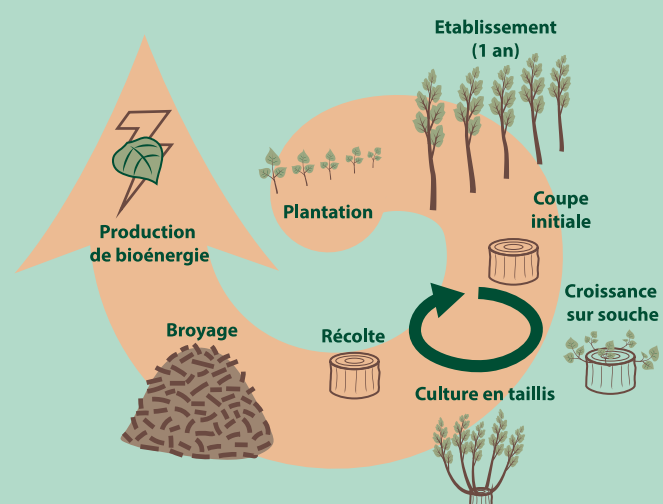
... qui évoluent avec les changements climatiques

Les modifications climatiques en cours sont caractérisées entre autres par la survenue d'épisodes de sécheresse plus fréquents et/ou plus intenses. Ces changements incitent à prendre en compte de nouveaux critères d'amélioration comme **l'efficacité d'utilisation des ressources**, notamment en eau, et **la tolérance à la sécheresse**. Ces critères s'expriment particulièrement bien chez le peuplier, dont la croissance est très dépendante de la disponibilité en eau.



... et qui évoluent avec la diversification des usages

Le contexte de transition énergétique a remis sur le devant de la scène des modes de sylviculture alternatifs comme les taillis à courtes ou très courtes rotations pour la production de bioénergie. La forte productivité, la capacité à rejeter de souche et la tolérance au recépage régulier sont dans ce contexte des critères qui jusque-là n'étaient pas pris en compte. Les critères d'amélioration ne sont pas non plus les mêmes en fonction de l'usage (chauffage ou **biocarburant** par exemple).



LA TOLÉRANCE À LA SÉCHERESSE

Une caractéristique difficile à évaluer

Bien que la notion de tolérance à la sécheresse soit facile à concevoir, elle est en réalité bien plus difficile à appréhender lorsqu'il s'agit de la mesurer. Les effets de la sécheresse sur les plantes sont multiples, dépendent de la **combinaison {intensité x durée}**, et peuvent être évalués à des échelles variées allant de la cellule à l'organe (feuille, tige, racine) ou à l'individu, sur des pas de temps plus ou moins longs. Les cibles de l'amélioration sont donc complexes et multiples.

Dispositifs expérimentaux permettant d'évaluer la réponse à la sécheresse en milieu contrôlé (sous serre, photo de gauche) ou en condition extérieure (en pépinière, photo de droite). Dans le deuxième cas, l'apport en eau par les précipitations est diminué de 25 % grâce à un système d'exclusion de pluie.



Des capteurs pour identifier les stress

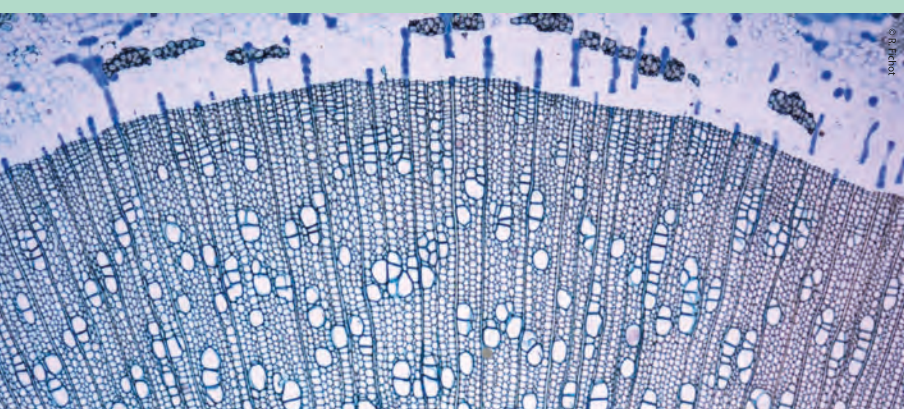
La croissance radiale (c.-à.-d. en épaisseur), liée à la production de bois essentiellement, est une caractéristique des arbres. Dans des conditions de sécheresse modérée plus ou moins longue, la tolérance peut être définie comme la capacité à limiter les chutes de croissance et donc de productivité. L'utilisation de capteurs automatisés (**dendromètres automatiques**) permet de suivre en continu les variations de croissance radiale à une échelle très fine de l'ordre du micromètre. Cela permet d'identifier les périodes de stress ressenti et d'évaluer la diversité des comportements pendant et après contrainte.

Exemples de capteurs installés en serre sur de jeunes arbres de trois mois (photo à gauche) ou en plantation en pépinière sur des arbres âgés d'une dizaine d'années (photo à droite).

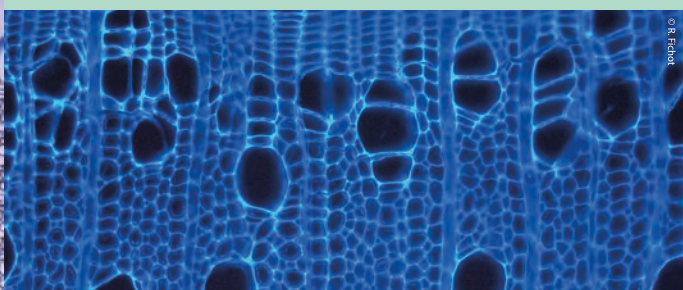


L'appareil vasculaire soumis à rude épreuve

Dans des conditions de sécheresse intense, l'appareil vasculaire assurant la circulation de la sève brute (le xylème) est sujet à l'**embolie gazeuse**, c.-à.-d. la formation de bulles d'air. Ce phénomène provoque une déshydratation progressive de l'arbre et peut éventuellement conduire à la mort. Le niveau de tolérance à l'embolie dépend des caractéristiques intrinsèques des éléments conducteurs.



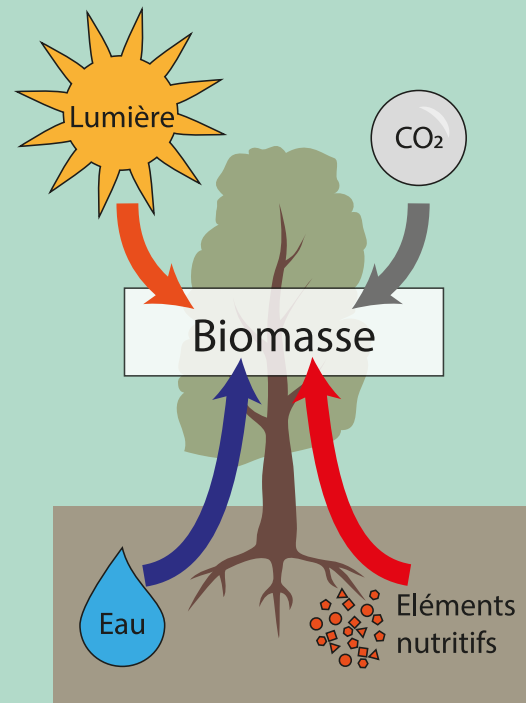
Observations microscopiques de l'appareil vasculaire du peuplier. En conditions normales, les vaisseaux (structures cylindriques de grande taille) assurent la conduction de l'eau et des éléments minéraux. L'embolie gazeuse des vaisseaux en périodes de sécheresse peut conduire à une perte de fonction irréversible.



L'EFFICIENCE D'UTILISATION DES RESSOURCES

De quelles ressources parle-t-on ?

L'eau et les minéraux essentiels sont les deux ressources limitant le plus la productivité des plantes. Si ces ressources peuvent être en quantité variable selon les stations, la quantité de ressources prélevées pour produire une même quantité de biomasse diffère également selon les individus. Cette variabilité pour « l'efficacité » d'utilisation des ressources constitue un levier pour améliorer l'empreinte écologique des plantations.



L'efficacité d'utilisation de l'eau et des nutriments

La sélection de matériel végétal adapté efficient permet d'optimiser la production de biomasse au regard de la consommation en ressources et constitue un levier important en plus des conditions de cultures.

Choix du matériel végétal (variété / espèce)

Densité de plantation

Fréquence de récolte

Bilan hydrique du site

Fertilité du sol

Efficienc e d'utilisation de l'eau

$$EUE = \frac{\text{biomasse produite}}{\text{eau utilisée}}$$

Plus de 90 % de l'eau absorbée par les racines sont perdus par transpiration au travers de micropores au niveau des feuilles. Il s'agit cependant d'un mal pour un bien qui permet en retour la fixation du CO₂ lors de la photosynthèse.

À niveau de productivité égal, utiliser des variétés plus efficaces pour l'utilisation de l'eau permet de limiter l'impact sur la ressource en eau locale.

Efficienc e d'utilisation des nutriments

$$EUN = \frac{\text{biomasse produite}}{\text{nutriments utilisés}}$$

Contrairement à l'eau, les nutriments sont stockés dans la biomasse. La récolte de biomasse, même si elle est réalisée une fois les feuilles tombées, contribue fondamentalement à exporter des nutriments et à appauvrir le sol.

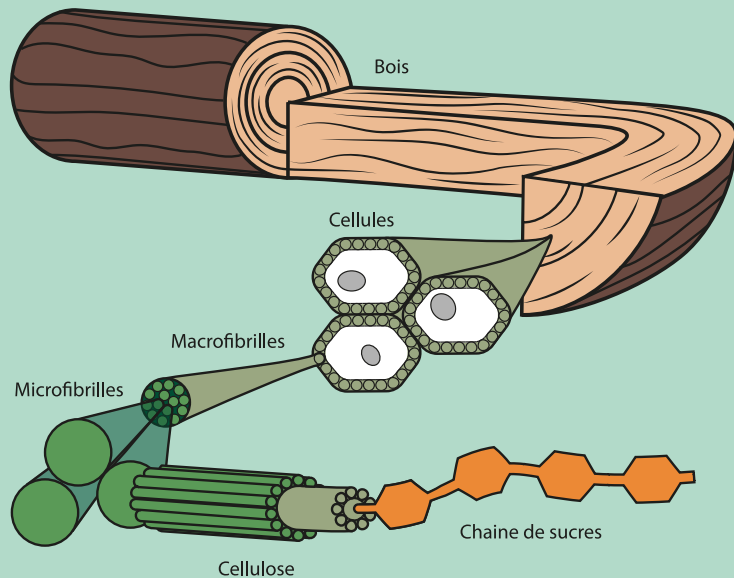
À niveau de productivité égal, utiliser des variétés plus efficaces pour l'utilisation des nutriments permet de limiter l'impact sur la fertilité des sols.



LA QUALITÉ DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

La biomasse lignocellulosique

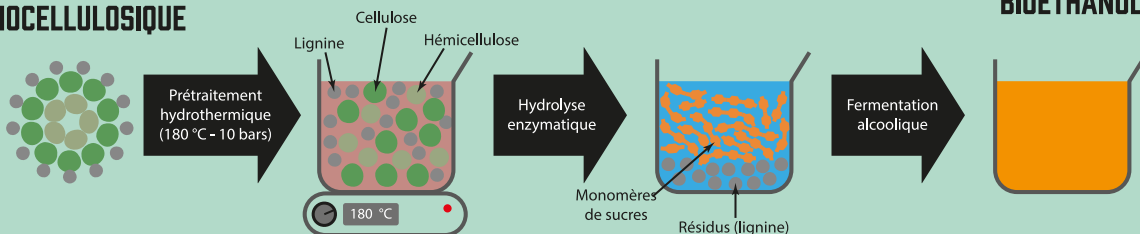
La biomasse lignocellulosique désigne la matière organique d'origine végétale pouvant être transformée en bioénergie. Le bois en est l'exemple type. Le terme lignocellulosique dérive simplement des molécules constituant majoritairement la biomasse : la **cellulose** et les **hémicelluloses**, qui sont des sucres complexes, et la **lignine**, un réseau tridimensionnel hydrophobe de nature phénolique.



Du bioéthanol avec le bois de peuplier ?

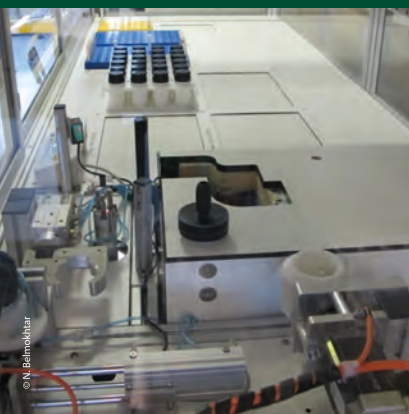
Les biocarburants de deuxième génération sont issus de la transformation des biomasses lignocellulosiques tels que le bois. Leur production repose sur la **transformation biochimique des sucres** issus de la cellulose et des hémicelluloses en bioéthanol. Les arbres tels que les peupliers conduits en taillis peuvent servir de cultures énergétiques dédiées étant donné leur capacité à pousser rapidement et à produire d'importantes quantités de biomasse valorisable en bioraffinerie.

BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE



Une méthode d'évaluation haut-débit de la qualité de la biomasse

Le rendement de production de bioéthanol peut varier considérablement entre espèces, entre variétés d'une même espèce mais aussi en fonction des itinéraires de culture. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer facilement le potentiel des biomasses candidates avant leur utilisation au niveau industriel. Pour ce faire, les scientifiques d'INRAE ont développé au laboratoire un **protocole miniaturisé du process industriel** (en photos). Il permet d'analyser une centaine d'échantillons à la fois.



DE NOUVEAUX OUTILS POUR L'ÉVALUATION DES CARACTÈRES D'INTÉRÊT

Pourquoi a-t-on besoin de nouveaux outils ?



L'évaluation des nombreux caractères d'intérêt pour l'amélioration génétique des arbres à planter est généralement complexe à mettre en place, souvent couteuse, et la plupart du temps chronophage, les mesures devant être répétées de nombreuses fois au cours du cycle de développement.

Afin de palier à ces limites, le potentiel des nouvelles technologies de pointe comme la **spectrométrie en proche infrarouge (SPIR)** est actuellement à l'étude.

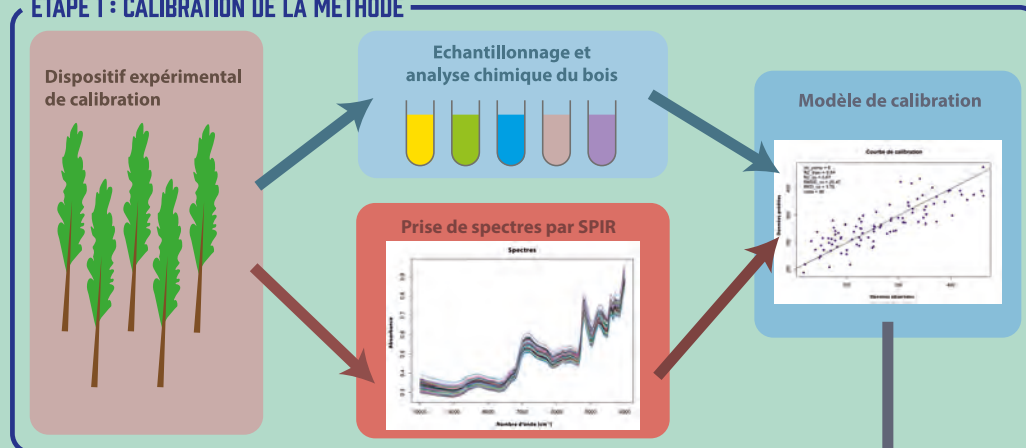
Mesure spectrale sur le terrain à l'aide d'un appareil portable de spectrométrie proche infrarouge

Principe de la Spectrométrie en proche infrarouge

La SPIR est une méthode analytique reposant sur l'absorption sélective du rayonnement infrarouge par les composés chimiques présents dans la matière organique. Des modèles mathématiques permettent ensuite d'établir le lien entre les spectres d'absorption mesurés et les propriétés physico-chimiques de matériaux tels que le bois afin de pouvoir **prédire indirectement et de façon fiable le(s) caractère(s) d'intérêt**.

PRINCIPE D'ANALYSE DU BOIS PAR SPECTROMÉTRIE EN PROCHE INFRAROUGE

ETAPE 1 : CALIBRATION DE LA MÉTHODE



ETAPE 2 : PROTOCOLE D'ANALYSE HAUT-DÉBIT



Potentiel d'application futur

Le développement récent d'équipements proche infrarouge portatifs permet la réalisation des mesures spectrales directement sur le tronc des arbres ou sur leurs feuilles. Le but est de concevoir un outil d'aide à la décision pour accompagner en temps réel les professionnels de la filière forêt-bois, avec des applications multiples comme la **prédiction de la qualité technologique des arbres**.

