



**HAL**  
open science

## L'apport des marqueurs moléculaires

Annie Raffin, Marjorie Vidal, Laurent Bouffier

► **To cite this version:**

Annie Raffin, Marjorie Vidal, Laurent Bouffier. L'apport des marqueurs moléculaires. Cahiers de la Reconstitution, 2016, 5, pp.4. hal-01603619

**HAL Id: hal-01603619**

**<https://hal.science/hal-01603619>**

Submitted on 27 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

# LES CAHIERS du Groupe Pin Maritime du Futur

## 20 ANS DE PROGRÈS ET D'INNOVATION

### édito

## Le Groupe Pin Maritime du Futur a 20 ans révolus !

### Vingt ans... Doit-on penser "déjà" ? Ou "seulement" ?

Est-ce l'âge de raison, ou la maturité ? Pour le sylviculteur d'hier, c'était à peine le tiers, voire le quart, de la durée de révolution de ses peuplements, pour le sylviculteur d'aujourd'hui, c'est déjà la mi-rotation, et pour le sylviculteur de demain, ce sera peut-être l'âge de la coupe rase.

Qui de ses fondateurs, au milieu des années 90 : l'AFOCEL (aujourd'hui FCBA), le CPFA, l'INRA et l'ONF, bientôt rejoints par le CRPF Aquitaine, aurait prêté une si longue carrière à une structure bâtie sur un statut des plus simples, celui d'un groupement d'intérêt scientifique ?

Qui aurait pu imaginer que « l'aventure » initiée autour du programme d'amélioration génétique du pin maritime dans le sud-ouest - à l'image des « coopératives » développées outre atlantique sur d'autres pins - allait s'étendre à la grande majorité des thématiques de la R&D sur notre massif (sylviculture, fertilité des sols, gestion durable, adaptation aux aléas...) ?

Qui aurait pu prédire que 20 ans plus tard, l'intégralité des reboisements par plantation en pin maritime se ferait avec des plants améliorés produits à partir des graines de vergers de nos variétés, consacrant ainsi cette espèce comme la première espèce de reboisement avec plus de 45 millions de plants commercialisés par an ?

Nul ne se doutait alors, que notre massif aurait à affronter deux tempêtes dévastatrices, amplifiant en cela ce dernier chiffre, au travers des besoins liés la reconstitution des peuplements sinistrés.

Sans avoir à citer ici toutes les avancées scientifiques et techniques, les partages et diffusions de connaissances, les évolutions du patrimoine expérimental, que le GPMF a portés ou auxquels il a contribué, il nous est apparu légitime de placer ces 20 années d'activité sous le double signe du progrès et de

l'innovation. Toutefois, ces derniers mots n'ont de vraie valeur que s'ils sont partagés et utiles au plus grand nombre.

Rappelons-le encore, le Groupe Pin Maritime du Futur est le fruit d'une collaboration étroite, régulièrement renouvelée, entre ses acteurs ; une collaboration partagée aussi avec l'ensemble des partenaires de la filière, une collaboration accompagnée et encouragée par le soutien indéfectible de l'Etat et des collectivités territoriales.

A cet instant, je me dois de remercier chaleureusement et sincèrement tous ceux, hommes et femmes, qui de près ou de loin, à un moment donné, ou sur la durée, ont œuvré pour la réalisation des projets, à quelque titre que ce soit, contribuant ainsi à la réussite de l'aventure. Cet engagement de chacun au service des objectifs communs doit être salué.

Certes, quelques nouveaux nuages sombres pourraient s'annoncer à l'horizon -comme l'arrivée possible d'un pathogène invasif ou les effets probables du changement climatique- risquant d'obscurcir le ciel d'azur qui baigne habituellement notre pinède.

Gageons qu'une nouvelle fois, notre forêt et sa filière sauront surmonter ces difficultés et en devenir plus forts.

Et surtout assurons-nous que le Groupe Pin Maritime du Futur, perdue aussi longtemps que nécessaire, pour apporter sa contribution à la pérennité et à l'extension de la forêt de pin maritime.

Patrick PASTUSZKA  
Président du Groupe Pin Maritime du Futur



D. Merzeau, CPFA

## La création variétale : optimisation des stratégies pour un progrès génétique en continu

Annie RAFFIN, INRA

En misant sur la coopération entre partenaires de la Recherche et du Développement, et sur la transparence vis à vis de la filière, l'objectif à la création du Groupe Pin Maritime du Futur était de coordonner les actions pour poursuivre le programme d'amélioration génétique du pin maritime, afin de proposer aux utilisateurs, des vergers à graines pouvant produire des variétés nouvelles, adaptées à leurs besoins et diversifiées, avec un gain génétique croissant.

### Une stratégie pour le long terme, à la pointe de l'innovation

Deux programmes de sélection coexistaient alors, menés en parallèle par l'INRA et par l'Afocel (aujourd'hui FCBA), sur la base d'une même population d'arbres sélectionnés en forêt dans les années 60 (arbres "plus" ou génération zéro : G0).

Le premier travail du GPMF a donc consisté en un inventaire des arbres sélectionnés sur trois générations (G0, G1 et G2), l'enregistrement dans une base de données commune de leurs pédigrées et de leurs caractéristiques, puis l'élaboration concertée d'un protocole de test sur descendance de ces géniteurs, qui conduira à l'installation de 120 ha de plantations expérimentales de 1995 à 2003, pour l'évaluation des performances de plus de 1500 géniteurs. Ces tests de descendance répétés chacun sur trois sites contrastés représentant la diversité des Landes de Gascogne, avec témoins communs, dispositif statistique rigoureux et évaluation par l'ensemble des partenaires, constituent aujourd'hui un réseau très précieux de matériel végétal en sélection et une vaste source de données pour diverses études. Les variétés VF3 et VF4 ont été créées en grande partie grâce à l'exploitation des données mesurées dans ces tests. Dans le même temps, la population d'amélioration fusionnée a été restructurée en sous groupes non apparentés pour gérer efficacement les pédigrées, rationaliser les plans de croisements, et garantir à la fois le maintien de la diversité génétique et l'augmentation du gain génétique sur le long terme. Un conservatoire commun de copies clonales de tous ces géniteurs (Conservatoire de Castillonville) a également été constitué pour la sauvegarde et la pré-multiplication du matériel sélectionné nécessaire à l'installation de vergers à graines. Un important programme de croisements contrôlés pour le renouvellement de la population d'amélioration a été mené de 2006 à 2010, permettant la création d'une nouvelle génération de descendances G3 : ce matériel permettra la sélection d'une variété VF5 à l'horizon 2025.



En parallèle à cet effort considérable de création et d'évaluation de matériels en sélection sur le terrain, le GPMF a également mis à profit l'évolution des outils informatiques et statistiques, en se dotant depuis 2011 du système Treeplan© (PlantPlan Genetics). Ce système informatique permet une précision accrue dans l'estimation des valeurs génétiques des géniteurs en sélection, grâce à l'analyse globale de l'ensemble des données historiques et actuelles mesurées sur toutes les générations de la population d'amélioration, couplée à la connaissance des relations d'apparentement entre individus. C'est donc la valorisation de tout le travail accompli sur trois générations, qui permet aujourd'hui l'optimisation de la sélection. Des avancées technologiques sur le génotypage à haut débit, fournissant "l'empreinte" génétique unique d'un individu à l'aide de marqueurs moléculaires de son ADN, sont également intégrées pour la vérification des identités et des pédigrées dans le programme d'amélioration depuis 2016 : là encore, il en résulte une meilleure précision dans l'estimation des valeurs génétiques. Ces innovations permettent ainsi d'améliorer l'efficacité de la sélection tout en accélérant les cycles de sélection, pour produire régulièrement le meilleur du gain génétique.

**En 20 ans, le GPMF aura installé près de 300 ha de dispositifs "génétiques", mesuré individuellement près de 350.000 arbres, réalisé plus de 1600 croisements contrôlés, sauvegardé par greffage plus de 1500 arbres sélectionnés, et créé trois nouvelles variétés pour le massif des Landes de Gascogne. Tout cela en installant d'emblée une stratégie pour le long terme, garante de la diversité et de l'adaptation du matériel sélectionné, et en intégrant à chaque étape les dernières innovations méthodologiques des grands programmes d'amélioration des espèces forestières.**



M. Barle, CRPF Aquitaine

## Le déploiement du progrès en continu

Annie RAFFIN, INRA

Pour mieux répondre aux contraintes d'un changement climatique rapide, aux enjeux de diversité génétique du massif cultivé, et aux attentes économiques de production, **le GPMF met en place une stratégie de déploiement du progrès génétique "en continu", en proposant qu'une nouvelle formule variétale soit créée tous les trois ans environ.**

Les variétés améliorées de pin maritime ont été déployées à un rythme d'environ une nouvelle variété landaise vigueur-forme à large diffusion tous les 15 à 20 ans (VF1, VF2, VF3), avec également des variétés Landes x Corse produites par croisements contrôlés, à diffusion plus restreinte et généralement réservées aux meilleures stations (LC1, LC2). Les vergers ont été largement dimensionnés pour couvrir les besoins en graines habituels sur le massif, ainsi que pour couvrir le risque de pertes de surfaces de production en cas d'aléas. C'est grâce à cette stratégie de large dimensionnement des vergers que la pénurie de graines améliorées a été évitée notamment ces dernières années, alors qu'il fallait faire face à la fois à de forts besoins (reconstitution post tempête) et à de faibles productions en vergers (dues au moins en partie aux ravageurs des cônes et des graines).

Les vergers sont de deux types à chaque génération de variété, de façon à répondre à différents objectifs : vergers de clones plus rapidement productifs et utilisables transitoirement en croisements contrôlés (ex : pour produire la variété LC2 puis VF3), et vergers de familles pouvant être installés sur de grandes surfaces à moindre coût. Cette stratégie de déploiement du gain génétique a rempli ses objectifs jusqu'à présent, comme le montrent l'augmentation constante de la proportion de surfaces reboisées par plantation de plants améliorés sur le massif (aujourd'hui autour de 90% des surfaces reboisées annuellement), et le remplacement des anciennes variétés par les nouvelles dès que celles-ci ont été disponibles.

Cependant la diffusion d'une variété majoritaire par décennie ne répond plus aux enjeux actuels. Au contraire, le renouvellement accéléré de variétés diversifiées permet de disposer d'un matériel mieux adapté au contexte du changement climatique, en intégrant ces nouvelles contraintes telles que l'intensification des sécheresses estivales dans le programme de sélection (voir le Cahier n°4). Il permet également de limiter la surface occupée par une même variété et favorise la diversité génétique en mosaïque à l'échelle du massif, susceptible de renforcer sa résilience vis à vis d'aléas biotiques comme abiotiques. Le remplacement rapide des variétés permet également de diffuser en continu le meilleur du progrès génétique dès l'évaluation des géniteurs d'une nouvelle génération dans le programme de sélection.

Pour répondre à cet objectif de renouvellement accéléré des variétés, les principaux leviers d'action sont basés sur les gains en précision et en efficacité de la sélection acquis grâce aux innovations technologiques dans le programme d'amélioration (voir plus haut), et sur un important réseau de dispositifs d'évaluation de nouveaux géniteurs disponibles pour la création variétale. Une stratégie innovante d'installation et de gestion des vergers à graines est également nécessaire. Une telle stratégie a été proposée aux multiplicateurs pour les futurs vergers VF4 et LC3 : il s'agit de concevoir des vergers de moindre surface (avec un minimum de 30 ha pour limiter la pollution pollinique) et gérés plus intensivement et collectivement entre opérateurs, mais aussi de cadencer et de dimensionner leur installation en fonction des besoins du massif : 150 ha de vergers en production sont nécessaires, correspondant à 10 ha à installer par an.

Alors que le GPMF sélectionne aujourd'hui une quatrième génération de vergers, l'innovation en création variétale avec la collaboration des multiplicateurs s'accompagne d'une mutation profonde du rythme et des modes de production des variétés améliorées de pin maritime, afin de diffuser en continu le meilleur du gain génétique.

## Des critères de sélection en évolution : volume, qualité et adaptation

Dès le lancement du programme d'amélioration du pin maritime, les critères de sélection ont porté sur l'adaptation (choix de la provenance landaise autochtone, résistante au froid et ayant co-évolué avec son cortège parasite indigène), la croissance (volume du tronc), et la qualité pour l'utilisation en bois d'œuvre (rectitude du tronc, finesse des branches).

Très tôt, des études ont été menées pour mieux comprendre les déterminants de la qualité du bois, leur variation dans l'arbre et selon son âge, leurs paramètres génétiques. Mais ce n'est qu'au début des années 2000 que de nouveaux outils pouvant mesurer la qualité du bois en peuplement, à la fois sur un grand nombre d'arbres et avec une fiabilité suffisante, ont été testés : outil mesurant la résistance au forage pour la mesure de densité, compas électronique pour l'angle du fil. Ces avancées

technologiques couplées à une meilleure connaissance des déterminismes de la formation du bois, ont permis d'ajouter aujourd'hui la densité, l'angle du fil et la qualité de la branchaison dans les index de sélection. Le volume et la rectitude du tronc restent les critères principaux à améliorer, l'objectif fixé est de maintenir les propriétés du bois dans les variétés améliorées, au même niveau que dans la provenance landaise non améliorée.

Mais depuis le début des années 2010, dans un contexte marqué par deux tempêtes destructrices en 1999 et 2009, et par les incertitudes liées au changement climatique et aux menaces de pathogènes invasifs, **c'est résolument vers l'adaptation aux contraintes accrues des conditions environnementales que se concentrent aujourd'hui les efforts d'innovation en termes de critères de sélection** : le GPMF y consacre un volet spécifique dans son programme d'action (voir plus loin).

## L'apport des marqueurs moléculaires

Annie RAFFIN, INRA ; Marjorie VIDAL, FCBA ;  
Laurent BOUFFIER, INRA

Le développement des outils moléculaires (analyse des marqueurs moléculaires\* du génome) permet aujourd'hui chez le pin maritime d'établir une "empreinte génétique" pour l'identification sans erreur d'un individu et la vérification de son pedigree. Ces outils peuvent être mis à profit pour améliorer la précision de la sélection et pour permettre de nouvelles stratégies de sélection où le pedigree est reconstitué a posteriori.

Le pin maritime est une espèce modèle chez les conifères à l'INRA pour l'étude du génome depuis les années 1980s. De nombreuses connaissances ont été acquises et exploitées notamment dans la description de la diversité chez cette espèce. Mais la grande taille et complexité du génome des conifères, ainsi que les freins technologiques et les coûts des analyses moléculaires, n'ont pas permis jusqu'à récemment de transférer de façon opérationnelle ces connaissances à des applications en sélection. Aujourd'hui, le contrôle d'identité et de pedigree à l'aide de marqueurs moléculaires, permet la traçabilité du matériel sélectionné et ouvre de nouvelles perspectives concernant les stratégies de sélection.

La vérification des identités des génotypes ainsi que de leur pedigree permet de détecter et de corriger les erreurs inévitables qui se cumulent au cours des cycles de

sélection successifs, lors des croisements contrôlés ou de la sauvegarde par greffage des individus sélectionnés. L'élimination de ces erreurs augmente la précision des évaluations génétiques des individus en sélection, ces évaluations étant basées sur la connaissance des performances des individus et de leurs apparentés à toutes les générations.

La recherche de paternité peut être utilisée pour reconstituer a posteriori le pedigree d'un individu en particulier dans les dispositifs de comparaison de descendances où seule l'identité de la mère est connue (chaque mère est croisée par un mélange de pollen de plusieurs pères). Ce type de croisement maximise le brassage génétique et le nombre de recombinaisons obtenues au moment du renouvellement de la population d'amélioration. La recherche de l'identité du père a posteriori pour les descendants présentant les meilleures valeurs génétiques, permet alors une sélection d'individus performants dans une large base génétique.

**Ces innovations issues de la recherche en génomique sont depuis 2016 mises à profit dans le programme d'amélioration du pin maritime, avec la vérification systématique des identités des sélections en parcs à clones, et la reconstitution des pedigrees en tests de descendance pour la sélection de la future variété LC3.**

\* marqueur moléculaire : séquence d'ADN présentant de la variabilité entre individus d'une même population.

## 20 ans de création variétale

Le renouvellement des variétés permet à la fois de faire progresser le gain génétique diffusé, d'assurer une diversité génétique à l'échelle du massif, et d'introduire de nouveaux critères de sélection au fur et à mesure de l'avancée des recherches et des nécessités économiques et environnementales.

**En 20 ans, grâce à un important programme d'évaluation et de sélection, INRA et FCBA ont créé en co-obtention deux variétés** (voir le Cahier n°4) : la variété landaise Vigueur Forme VF3 (180 ha de vergers ont été installés de 2002 à 2006 par les multiplicateurs), et la variété Landes x Corse LC2 (40 ha de vergers de clones ont été installés de 2002 à 2006, utilisés temporairement pour la production de la variété LC2). De plus, **deux vergers pilotes ont été installés par le GPMF** : un verger Biomasse (2 ha installés en 2014, à l'écart du massif, avec une formule variétale réduite pour une variété destinée à des courtes rotations), et un verger Landes x Corse de type "F2" (1 ha installé en 2011, à l'écart du massif, avec des familles hybrides Landes x Corse LC2 pour la production d'hybrides sans pollinisation contrôlée). Enfin deux nouvelles variétés sont en cours de sélection et seront progressivement installées en verger : la variété landaise VF4 (sélection 2015-2016), et la variété LC3 (sélection 2016-2017).

Les gains génétiques par rapport au matériel non amélioré sont estimés pour chaque nouvelle variété par le GPMF, grâce à un large réseau de dispositifs expérimentaux. Dans un premier temps, **le gain génétique attendu** est estimé en tests de descendance lors de la sélection des parents des futurs vergers. Ainsi pour la variété VF3, le gain attendu en volume et en rectitude en absence de pollution pollinique est estimé à 40 % en moyenne à 12 ans par rapport au matériel non amélioré. Puis, pour évaluer **le gain génétique réalisé**, le GPMF installe régulièrement des dispositifs de comparaison des variétés au témoin non amélioré dès qu'elles sont disponibles : les variétés sont installées en placettes de production avec plusieurs répétitions sur le même site. Ces dispositifs, au nombre de 15 en 20 ans, sont installés pendant toute la durée de production des vergers, et sont répartis dans différentes stations représentatives du massif. L'évaluation du gain génétique réalisé obtenue au travers de ce réseau expérimental est précieuse, mais tardive par rapport à la vie du verger. C'est pourquoi une nouvelle méthodologie basée sur la calibration des valeurs génétiques, et exploitant à la fois ce réseau mais aussi des dispositifs de descendance en placettes (15 dispositifs de familles plein-frères en grandes parcelles déjà installés), est mise en œuvre par le GPMF.



## Les hybrides inter provenances

Pierre ALAZARD, FCBA ; Annie RAFFIN, INRA

**Depuis plus de 20 ans, l'intérêt d'élargir le programme d'amélioration du pin maritime, basé sur la population locale landaise, aux hybrides inter provenances Landes x Corse a été largement démontré.** Ces hybrides apportent des gains supplémentaires sur la rectitude du tronc et la qualité de la branchaison comparativement aux variétés landaises pures.

Cependant la production des variétés Landes x Corse est insuffisante au regard des besoins. En effet, le décalage phénologique de la floraison entre les deux provenances géographiques impose la pollinisation artificielle en verger, et constitue un frein important à la production des semences améliorées. Pour lever ce verrou, de nouvelles stratégies de production ont été imaginées, reposant sur l'installation de vergers composés non plus des provenances pures parentales, mais de matériel hybride obtenu en pollinisation contrôlée (vergers de clones ou de familles hybrides), et produisant en pollinisation libre des semences améliorées. Des dispositifs d'évaluation de ce type de matériel fournissent des premiers résultats encourageants sur les performances obtenues. La future variété Landes x Corse LC3 sera produite selon ce nouveau processus de création variétale et de multiplication.

**D'autres provenances de pin maritime peuvent être valorisées en sélection** pour des critères particuliers : adaptation à la sécheresse (provenances marocaines et ibériques), résistance à certains pathogènes (provenances marocaines pour leur résistance à *Matsucoccus Feytaudii* dans le sud-est, et pour leur meilleure tolérance à l'armillaire). Compte tenu des différences de capacités adaptatives entre provenances, par exemple pour la résistance au froid, ces populations ne peuvent être utilisées en provenances pures pour le reboisement dans le massif landais, mais elles peuvent être intégrées dans la création de variétés hybrides, selon la même méthodologie que pour les variétés Landes x Corse.

## Adapter le pin maritime et ses sylvicultures aux risques et aux aléas

Jusqu'en 2010, les actions du GPMF se sont concentrées sur les travaux de recherche relatifs à la méthodologie de la sélection génétique et aux travaux d'application visant à concevoir et à diffuser des variétés de plus en plus performantes et adaptées aux conditions environnementales. Même si les risques biotiques étaient déjà pris en compte dans les projets antérieurs consacrés au programme d'amélioration génétique (ex : *Dioryctria sylvestrella*, rouille courbeuse, fomes), c'est après la tempête 2009, lors du projet Fortius 2010-2015, que ces actions fondamentales et pratiques ont été poursuivies et élargies avec l'ajout d'un volet spécifiquement consacré aux risques. Ce volet a pour objectif d'accroître les connaissances et de proposer des scénarios pour intégrer l'émergence de risques nouveaux ou l'aggravation de risques existants, pouvant mettre en péril la fonction de production du massif.

Dans un contexte de changement climatique et de mondialisation des échanges, les risques majeurs à prendre en compte sont soit abiotiques (réurrence de tempêtes hivernales, aggravation des sécheresses estivales, fluctuations de températures), soit biotiques (expansion des zones touchées par le fomes ou l'armillaire, risque d'introduction du nématode).

Pour réussir ce défi, une première garantie est de disposer et de maintenir une grande diversité génétique pour le pin maritime à l'échelle du massif cultivé, pour que dans le futur, les capacités adaptatives soient suffisantes pour l'espèce. Une seconde garantie est d'examiner et d'optimiser les scénarios sylvicoles en intégrant ces nouvelles contraintes.

### Insectes et pathogènes : comment réduire les risques ?

#### Variétés améliorées et aléas biotiques

Annie RAFFIN, INRA

La résistance aux pathogènes est bien sûr un caractère souhaitable pour une variété améliorée. Mais pour être sélectionnable, un caractère doit être héritable (transmis d'un parent à sa descendance) et mesurable en routine sur un grand nombre d'individus observés dans des conditions comparables. Il faut de plus s'assurer que la résistance sélectionnée est à large spectre et durable (c'est-à-dire qu'elle ne sera pas contournée par le pathogène dans le temps), ce qui dépend en partie du niveau de variabilité génétique maintenu à l'intérieur et entre variétés. Des recherches à long terme doivent donc être entreprises sur chaque nouveau pathogène. C'est pourquoi le programme



d'amélioration du pin maritime s'intéresse en priorité aux menaces les plus conséquentes et pour lesquelles aucune méthode de lutte préventive ou curative n'est disponible.

Concernant les pathogènes déjà présents sur le massif, l'**autochtonie du pin maritime** (caractère du pin maritime qui a co-évolué avec son cortège parasitaire) et le **souci du maintien de la diversité génétique** dans le programme d'amélioration (voir le Cahier n°4) **sont les premiers atouts pour la santé des peuplements**. L'état sanitaire est systématiquement observé et enregistré dans tous les dispositifs évalués par le GPMF. Ainsi en dispositif de comparaison de variétés au témoin non amélioré, il a été montré que les variétés ne sont pas plus sensibles aux attaques de la pyrale du tronc (*Dioryctria sylvestrella*) que le matériel non amélioré. Cependant, lorsqu'un test fiable d'évaluation de la résistance génétique selon l'origine du matériel existe, la stratégie adoptée est de l'appliquer au minimum au matériel de base des vergers, de façon à conserver dans les variétés le même niveau de résistance que dans la provenance landaise non améliorée. Dans le cas de la rouille courbeuse, le test d'inoculation au laboratoire sur tige excisée est déjà disponible et validé : il a été utilisé lors du choix des géniteurs de la variété VF3. Dans le cas de l'armillaire, le test d'inoculation racinaire pratiqué sur jeunes plants en pots est trop lourd à mettre en œuvre en routine : un nouveau test de sensibilité sur tige est à l'étude avant d'être également appliqué au matériel sélectionné.

Concernant les pathogènes invasifs, en cas de haute probabilité d'occurrence de l'aléa, de forte vulnérabilité de l'hôte et d'impacts socio-économiques importants, le risque est au niveau le plus élevé. C'est le cas **pour le nématode du pin**, introduit pour la première fois en Europe en 1999, au Portugal. Pour ce pathogène de quarantaine, **la sélection de résistance chez l'hôte est possible grâce à un test d'inoculation artificielle sur jeunes plants en conditions confinées**. Des résultats encourageants ont été obtenus au Japon, où des variétés résistantes ont été développées. Un tel programme de recherche de matériel génétique tolérant est également envisageable à moyen terme pour le GPMF, avec le soutien

financier de nos partenaires pour l'obtention de la serre sécurisée adaptée à cette expérimentation. Cependant dans tous les cas, les variétés améliorées pour les caractères de résistance ne peuvent pas suffire à garantir totalement la santé des peuplements. **Des mesures sylvicoles et sanitaires** visant à limiter la diffusion et le niveau de population du pathogène, et à favoriser la vigueur des arbres, sont des éléments importants à mettre en place, **dans le cadre d'une véritable lutte intégrée. La biodiversité à différentes échelles**, tels que les îlots ou lisières feuillues, **peut également contribuer à une meilleure santé des plantations** de résineux (voir le Cahier n° 2).

## De nouvelles connaissances au service de la lutte contre le fomes

B. Lung-Escarmant, INRA ; Céline MEREDIEU, INRA

Le fomes est connu depuis longtemps dans le massif landais mais les signalements de dégâts se sont étendus (DSF) depuis 1995. Avec l'aide du DSF et depuis le projet Sylvogène 2006-2008, des connaissances indispensables ont été acquises. On peut maintenant affirmer que **le risque de contamination est présent sur tout le massif landais**. Les spores, dont le nombre est sous dépendance climatique peuvent donc contaminer toutes les souches fraîchement coupées et cela quelle que soit la saison. Deux études dendrochronologiques (étude des cernes d'arbres morts par contamination par le fomes) ont montré que les arbres contaminés présentent une période de perte de croissance en diamètre de très courte durée (2 à 3 ans) avant leur mort. Les arbres sont, pendant leur période de contamination, asymptomatiques (pas de perte foliaire, ni de décoloration). Toutes les connaissances disponibles sur la dispersion des spores, la vitesse de contamination et l'impact sur la croissance et la mortalité des arbres ont été synthétisées dans un modèle *FomPine* couplé au modèle de croissance des peuplements de pin maritime *Pinaster* qui pourra être utilisé pour tester des stratégies de gestion face à la contamination. Les variétés disponibles actuellement sur le marché ont été installées sur deux sites contaminés et un suivi des dégâts est réalisé régulièrement. En parallèle, le suivi de deux dispositifs testant des méthodes de préparation du sol avant le reboisement en site contaminé se poursuit, montrant que le dessouchage n'est pas un traitement curatif car il ne permet pas toujours d'éradiquer ce champignon racinaire. A l'heure actuelle, **la seule méthode de lutte existante et efficace dans les peuplements est préventive**. L'application d'une spécialité pharmaceutique dite de biocontrôle (ROTSTOP®) est donc fortement conseillée lors de chaque coupe dans les peuplements de résineux

(dépressages, éclaircies, coupes rases suivies d'un reboisement).

## L'ancrage racinaire et le risque tempête

Frédéric DANJON, INRA ; Céline MEREDIEU, INRA

Concernant l'adaptation au risque vent, la connaissance de l'architecture racinaire du pin maritime est une des plus avancées dans le monde.

Les récentes tempêtes ont permis de mesurer l'ancrage du pin maritime dans différentes conditions pédologiques et à différents stades.

## L'architecture racinaire du pin maritime

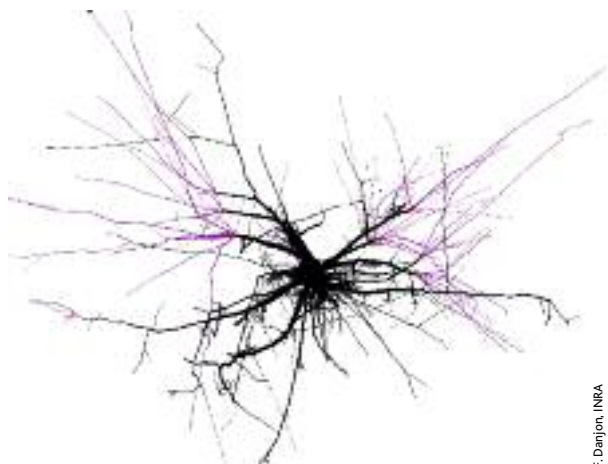
Frédéric DANJON, INRA

Le pin maritime a une architecture racinaire caractéristique : à la germination, il émet un pivot long et profond et une couronne d'une quinzaine de racines traçantes qui suivent la surface du sol. Ces racines traçantes s'allongent de l'ordre d'un mètre par an et des ramifications verticales apparaissent formant des pivots secondaires. Les racines de pin maritime fourchent rarement et il n'y a en principe pas d'émission de nouvelles racines sur des racines existantes. De ce fait, une fois le système racinaire établi, il ne peut s'acclimater à son environnement qu'à partir de la croissance en épaisseur des racines. Le pin maritime est donc très sensible aux perturbations de son système racinaire.

Le système racinaire du pin s'adapte très fortement à l'épaisseur du sol disponible qui, dans le massif landais, peut être limitée soit par une couche d'alias discontinuée soit par la nappe phréatique. En lande sèche et en dune, jusque vers 20 ans, l'arbre est surtout ancré par un pivot profond et des racines traçantes renforcées. En revanche, lorsque la profondeur d'enracinement est limitée, le pin développe rapidement les pivots secondaires, mettant ainsi en place une cage rigide, qui s'appuie très fortement sur l'alias (quand il est présent) du côté sous le vent.

Le schéma architectural racinaire est homogène pour l'espèce pin maritime. Cependant, les provenances de régions venteuses ont tendance à développer un pivot épais, long, vertical et unique, alors que les provenances de régions sèches développent surtout un réseau de traçantes fines et ramifiées. L'adaptation à la sécheresse semble dominer dans les hybrides entre provenances.





F. Danjon, INRA

**La rupture de l'ancrage des arbres de petite taille** (< 15 m) lors d'une tempête se traduit par une inclinaison du tronc (verse) qui correspond à un faible déplacement de la souche. A ce stade, l'ancrage est assuré principalement par la souche et le pivot, qui peut être long et assez fin ou plus court et épais (rigide), ancré par des racines profondes. La partie des racines traçantes près de la souche contribue à l'ancrage par leur résistance en flexion, dans le vent et sous le vent. Quand une racine est blessée, au point de cicatrisation va apparaître un faisceau de racines de plus faible diamètre. La propriété d'ancrage de cette racine en est diminuée (la rigidité en flexion est réduite). Pour limiter les blessures, une plantation dans l'axe des vents dominants pourrait être préférée.

**A partir d'une vingtaine d'années**, le rôle du pivot régresse au profit des racines traçantes et des pivots secondaires. La partie centrale du système racinaire (souche, pivot, partie des traçantes près de la souche, pivots secondaires et racines profondes) forme alors une cage rigide qui emprisonne le sol sous l'arbre. La rupture de l'ancrage des arbres de plus grande taille se traduit par un chablis : la plaque sol-racine sort du sol environnant, ce qui correspond à un fort déplacement des racines. L'extension et la rigidité de la "cage" racinaire vont déterminer le poids de la plaque sol-racine, essentiel pour l'ancrage. Cette plaque rigide est haubanée par les racines traçantes dans le vent, qui agissent donc en tension.

Dans l'environnement pédologique très particulier du massif landais, il est important d'observer le développement des systèmes racinaires au cours des premières années de croissance de façon à évaluer leur capacité à établir un système racinaire capable de soutenir le développement de leur partie aérienne. Pour cela, le GPMF a contribué à l'installation de plusieurs dispositifs qui permettent des arrachages réguliers pendant 10 ans : un dispositif répété dans deux milieux contrastés pour analyser annuellement la dynamique de croissance des systèmes racinaires de variétés et d'hybrides de pin maritime ; un dispositif pour comparer différents types de travail du sol (labour en plein, labour en bandes et sans labour) et le type de régénération (plantation et semis).

## Les tempêtes dans nos réseaux : des dégâts et des connaissances

Dominique MERZEAU, IDF-CPFA ; Céline MEREDIEU, INRA

Les tempêtes hivernales sont un phénomène répandu en Europe et sont considérées comme un facteur majeur de perturbation. Dans le Sud-Ouest de la France, deux grandes tempêtes ont récemment causé en moins de dix ans d'énormes pertes de bois. Les 27 et 28 décembre 1999, la tempête Martin a occasionné environ 28 millions de m<sup>3</sup> de dégâts en Aquitaine. Moins de 10 ans plus tard, le 24 Janvier 2009, la tempête Klaus a infligé plus de 43 millions de m<sup>3</sup> de dommages directs aux forêts d'Aquitaine, suivis d'une perte de 4 millions de m<sup>3</sup> due à la pullulation induite d'insectes xylophages. A Biscarrosse, en 2009, le vent a soufflé à 172 km/h ; en 1999 il n'avait atteint que 166km/h !

Comme le reste du massif, ces deux tempêtes ont endommagé le réseau SylvCOOP Pin maritime, installé

## Les variétés améliorées et la tempête

Annie RAFFIN, INRA

Les variétés améliorées pour la croissance et la rectitude du tronc, ne sont pas plus sensibles au vent que le matériel non amélioré dans les mêmes conditions sylvicoles. Les études menées par le GPMF sur ses dispositifs ont montré que dans les dispositifs d'évaluation des variétés, malgré une meilleure croissance des variétés améliorées et donc, a priori une exposition plus importante au vent, les variétés landaises vigueur-forme VF1 et VF2 présentent des taux de dégâts non significativement différents du témoin non amélioré. On observe également que la

variété Landes x Corse LC1 est celle qui résiste le mieux sur l'ensemble des sites. De plus, dans les dispositifs d'évaluation des géniteurs affectés par la tempête, les familles présentant la meilleure rectitude du tronc sont aussi celles qui sont les plus stables. Ainsi les variétés améliorées permettent un raccourcissement des rotations grâce à leur croissance supérieure, et donc indirectement une moindre exposition au risque de survenue d'une tempête, et elles sont également sélectionnées pour une meilleure rectitude du tronc, facteur favorable à la stabilité. Il semble donc que l'effet de la sélection sur le risque lié au vent soit plutôt favorable, allant dans le sens d'un moindre risque.

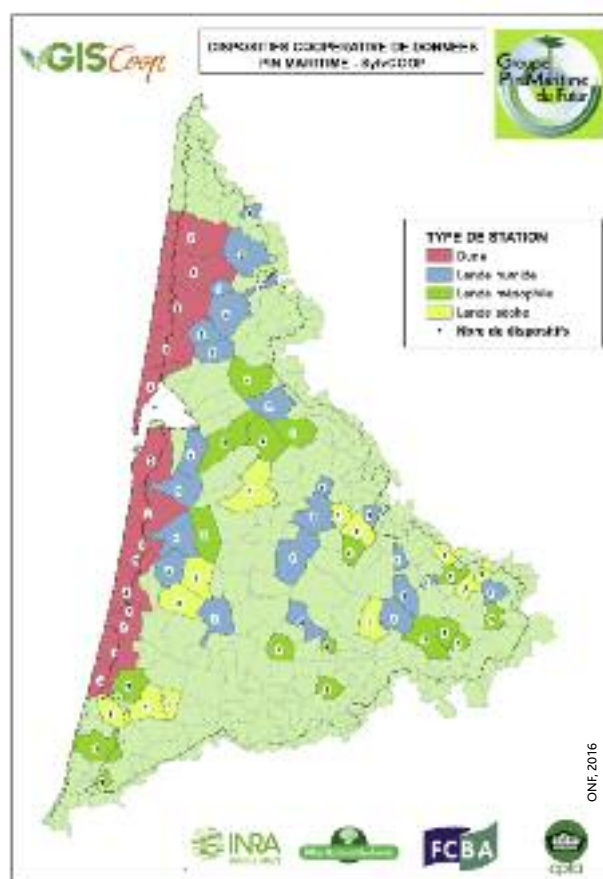
essentiellement en Aquitaine. Ce réseau teste neuf scénarios sylvicoles avec des densités initiales allant de 200 à 3500 tiges/ha combinés à tous les niveaux d'amélioration du matériel végétal. Secondairement, des modalités de travail du sol et de fertilisation sont testées. Ce réseau est installé par quatre des partenaires du GPMF depuis 1995 et **aujourd'hui 69 dispositifs (528 placettes) sont mesurés tous les trois ans.**

En 1999, le réseau comptait 97 dispositifs et 679 placettes : 101 placettes (soit 15%) ont été éliminées en raison de l'importance des dommages, 56 placettes (soit 8%) ont été nettoyées et leurs modalités expérimentales ont dûes être modifiées. Lors de cette première tempête le réseau a été brutalement rajeuni, car les dégâts ont été les plus importants dans les placettes âgées de plus de 20 ans. Les **dispositifs en dune ont mieux résisté** que dans les trois autres stations du massif landais. Le mode d'installation en semis ou plantation n'a pas entraîné de différence de comportement face au vent. Parfois atypiques, les **différentes densités n'ont pas influencé la résistance des peuplements**, excepté les peuplements les plus denses qui ont présenté de plus faibles dégâts surement en raison de la fermeture et l'homogénéité de leur couvert (« effet bloc »). Les **placettes récemment éclaircies ont toutes eu plus de dégâts** si on les compare à des placettes de densité identique non éclaircies. Les éclaircies fragilisent les peuplements pendant les quelques années nécessaires à la fermeture du couvert. Enfin si la fertilisation initiale permet aux arbres un développement plus rapide, elle n'est pas remise en question par les différences de dégâts observées entre placettes fertilisées ou non. En revanche **la tonification**, associant destruction chimique de la végétation et fertilisation azotée appliquée à des peuplements âgés, procure un faible gain sur la croissance mais **fragilise les peuplements en cas de tempête**. Ces enseignements ont été confirmés lors du passage de la tempête Klaus. Un modèle statistique sur les dégâts de 2009 dans les placettes IGN a permis de vérifier l'importance des facteurs de vulnérabilité classiquement mis en évidence mais aussi deux nouvelles variables : la turbulence atmosphérique et l'environnement de la parcelle. Ainsi, c'est la turbulence qui distingue le mieux les peuplements de dune : si la vitesse de vent peut être plus forte, la turbulence y est plus faible. La deuxième variable, l'effet d'abri montre que les peuplements subissent plus de dégâts s'ils sont exposés à l'ouest au cours de la tempête. Ces résultats ont été synthétisés dans le Cahier n°1 (Sylviculture et stabilité). Lors de cette seconde tempête, 109 placettes (15 dispositifs) ont été abandonnées. A ces dégâts dus à la tempête, des mortalités, parfois fortes, ont été enregistrées à cause des

## Le redressement manuel, une solution de sauvetage pour les jeunes peuplements touchés par la verse

Didier CANTELOUP, ONF

L'efficacité des opérations de redressement manuel à l'aide de planchettes a été mesurée dans deux plantations âgées de 3 et 4 ans, et dont les taux de verse étaient de plus de 40%. D'un point de vue technique, cette opération de redressement manuel des jeunes peuplements de pin maritime qui permet de remédier à une inclinaison rédhibitoire du tronc peut être recommandée si elle est réalisée rapidement après la tempête. En effet, une réaction rapide (en 7 à 10 jours) du pin maritime à l'inclinaison a été observée grâce à la croissance verticale (gravitropisme) de la pousse de l'année et au redressement manuel. Aucun effet dépressif sur la croissance générale n'a été enregistré sur les arbres qui ont amélioré leur rectitude générale.



scolytes entraînant de nouveau des abandons de placettes.

**Un réseau expérimental forestier se conduit sur le long terme et les abandons causés par des raisons diverses (tempête, feu, changement de propriétaire ou d'usage...) font partie du processus.** L'installation continue de nouvelles placettes – contrebalancée par les abandons – s'explique par deux raisons. Tout d'abord, la productivité des peuplements de pin maritime évolue au cours du temps grâce aux nouvelles pratiques qui apparaissent (préparation du sol, mise en place des peuplements, entretien...) mais aussi en raison des changements climatiques (dépôts azotés, accroissement de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub>, élévation de la température). Deuxièmement, un réseau de sylviculture moderne pour le pin maritime nécessite l'intégration des nouveaux niveaux génétiques. Un réseau se construit régulièrement sinon il devient obsolète face aux pratiques et serait inféodé à une interaction âge-date dans l'analyse des facteurs testés. **Ainsi depuis 2007, quatorze nouveaux dispositifs ont été installés en Aquitaine pour un total de 171 placettes.**

## Adaptation à la sécheresse

Annie RAFFIN, INRA ; Laurent BOUFFIER, INRA ;  
Céline MEREDIEU, INRA

Un des scénarios du GIEC (RCP4.5) prévoit pour le sud-ouest de la France, à l'horizon 2050, une hausse des températures de près de 1,5°C et une légère diminution des précipitations l'été. Ceci se traduirait pour les Landes de Gascogne par une accentuation des déficits hydriques estivaux, alors même que ces contraintes sont déjà fortes dans le massif. Il semble donc important d'expertiser la variabilité des réponses des variétés disponibles et les différentes pratiques sylvicoles existantes ou susceptibles d'être développées dans le cadre d'une diversification des itinéraires au regard de la sensibilité des peuplements de pin maritimes à la sécheresse.

## Variétés améliorées et adaptation au stress hydrique

La tolérance au stress hydrique est une forte priorité de recherche dans le programme d'amélioration du pin maritime (voir le Cahier n°4). Les variétés de demain qui devront faire face à ces nouvelles contraintes se préparent dès aujourd'hui. C'est pourquoi une première adaptation des stratégies de sélection est **l'accélération des cycles de sélection** et du rythme de renouvellement des sorties variétales. Ainsi les conditions environnementales lors de la sélection des variétés ne seront pas trop différentes de

celles de leur utilisation en production. Cette stratégie plus dynamique est rendue possible par l'intégration de nouvelles méthodologies améliorant l'efficacité et la précision de la sélection (outils statistiques puissants, intégration des marqueurs moléculaires) - (voir plus haut).

Un deuxième levier est la recherche, au sein de la population d'amélioration landaise, de **géniteurs tolérants aux périodes de sécheresse estivales**. Pour cela, le GPMF exploite son important réseau de dispositifs installés, soit pour repérer les géniteurs les plus performants en croissance sur les milieux les plus secs, soit pour développer de nouveaux critères de sélection en relation avec la tolérance à la sécheresse. Le critère de sélection le plus prometteur pour discriminer les descendances ou géniteurs les mieux adaptés sur un site donné est la dendroplasticité, ou **capacité d'un arbre à réagir différemment dans la formation du bois en fonction des conditions climatiques rencontrées**. L'arbre formant un cerne par année de croissance, l'analyse de ces cernes après carottage, en parallèle avec les données climatiques enregistrées, permet de mettre en évidence des comportements différents entre arbres et selon les années sèches ou humides, en liaison à la fois avec leur capacité de survie et leur capacité de production. Ainsi le GPMF suit plusieurs dispositifs instrumentés (recueil en continu de données météorologiques, de l'état hydrique de la parcelle, de la croissance radiale des arbres), où la dendroplasticité sera mesurée à terme, pour la comparaison de différents matériels génétiques (familles, variétés) sur différents milieux (lande sèche, lande humide).



R. Ségura, INRA

**Le pin maritime**, dont l'aire naturelle correspond au pourtour du bassin méditerranéen et à la façade sud-ouest atlantique de l'Europe, **est déjà bien adapté aux étés secs**. Une troisième stratégie pour augmenter la tolérance au stress hydrique est d'exploiter la **variabilité génétique naturelle** de l'espèce, en recherchant dans les populations du sud (Espagne, Portugal, Maroc), des géniteurs à la fois résistants à la sécheresse et performants en croissance. Pour cela, le GPMF a entamé l'installation d'un nouveau réseau de dispositifs de comparaison de provenances, et poursuit l'installation de tests de descendance hybrides inter-provenances (Landes x Maroc, Landes x Portugal, Landes x Corse). L'objectif in fine, est de produire des variétés hybrides par croisement avec la population améliorée landaise, performantes et adaptées à un climat plus sec.

Ainsi plusieurs pistes sont actuellement explorées par le GPMF pour développer des variétés améliorées adaptées à un climat plus sec et conservant un bon niveau de productivité. En fonction de l'ampleur du changement climatique, et des innovations technologiques possibles, l'une ou l'autre piste pourront être combinées ou privilégiées.

### Gestion du sous-bois et stress hydrique : vers une sylviculture économe en eau

Le sous-bois est un concurrent pour les jeunes arbres (eau, minéraux, lumière). Par exemple, lorsque la ressource hydrique est limitante ou lorsque la demande climatique est forte, la transpiration de la strate herbacée étant

élevée, elle consomme la réserve en eau au dépend de la strate forestière. L'intensité de cette transpiration est plus ou moins modulée selon la composition du sous-bois et sa biomasse. Mais le sous-bois joue également un rôle dans la stabilité des peuplements, sans oublier le risque incendie. Le travail du sol préalablement à l'installation a un large impact sur la dynamique qualitative et quantitative de la colonisation par le sous-bois. Ensuite, les entretiens avec des outils mécaniques, leurs méthodes et leur fréquence sont un moyen pour gérer ce sous-bois et donc atténuer la concurrence pour l'eau et les éléments minéraux en particulier dans la période entre régénération et fermeture du couvert. Dans le cadre du projet Pinaster, et en s'attachant à la période juvénile dans des milieux variés (callune, molinie...), des dispositifs ont été installés pour analyser la recolonisation après différents types de travail du sol ou tester l'efficacité des modalités d'entretien des interlignes face au stress hydrique subit par les arbres.

Dans les peuplements adultes de Pin maritime, la strate herbacée est le plus souvent dominante (recouvrement supérieur à 70% dans 71% des points IGN 2014) et la question est de quantifier à la fois son impact sur la ressource hydrique et si la densité du couvert foliaire des arbres permet de moduler sa concurrence. Un dispositif comparant différents niveaux de densité de peuplements pour une variété donnée a été instrumenté comme les dispositifs de génétique (cf. plus haut), complétant le réseau de dispositif SylvCOOP couvrant les types de milieux et une large gamme de densité.



## Explorer les sylvicultures du pin maritime pour connaître et prédire sa productivité

Céline MEREDIEU, INRA

Après la première tempête de 1999, le GPMF, jusqu'alors exclusivement orienté vers la création variétale, a ressenti le besoin d'évoluer en intégrant dans son périmètre d'actions, la sylviculture, autre levier, et non des moindres, d'amélioration de la productivité des peuplements de pin maritime. Cet élargissement s'est concrétisé lors du renouvellement de la convention du groupement d'intérêt scientifique en 2011. Il a permis au GPMF d'analyser l'ensemble des pratiques et de participer aux expertises pour reconstituer au mieux les nouveaux peuplements des forêts d'Aquitaine en phase avec l'évolution des milieux.

### Des réseaux expérimentaux coordonnés pour chaque question de sylviculture

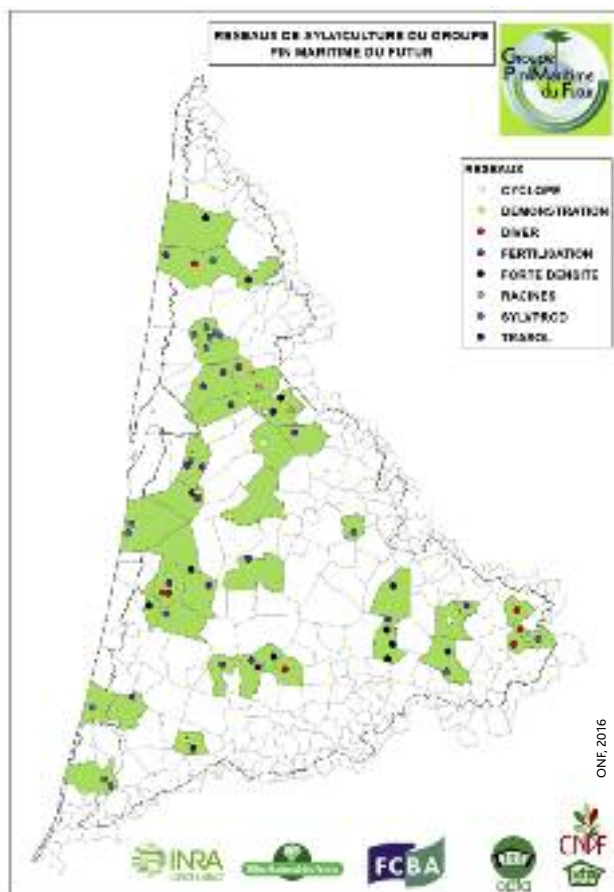
La prédiction de la production des peuplements forestiers nécessite d'analyser ses trois composantes : le matériel végétal, l'environnement et la sylviculture.

Le GPMF a organisé ses réseaux expérimentaux en cinq grandes thématiques pour tester des hypothèses en conditions réelles, afin quantifier et comparer des pratiques et de recueillir des données pour la modélisation.

- **Travail du sol [TRASOL et RACINES] et entretien des peuplements** : Cette thématique englobe la problématique de la dynamique naturelle du sous-bois à l'installation du peuplement et les questions d'interaction avec l'ancrage racinaire. Un réseau traitant des entretiens pendant la période juvénile et au stade de la première éclaircie va être mis en place pendant le prochain quadriennal.
- **Fertilité du sol [FERTILISATION]** : Cette thématique regroupe les questions sur l'impact des récoltes des rémanents, la fertilisation avec notamment les modalités d'apport de phosphore, les amendements, ou encore l'utilisation de légumineuses.
- **Gestion de la densité des arbres à l'installation et au cours de la révolution [SylvCOOP, FORTE DENSITE, CYCLOPE, DIVER]** : Ces questions nécessitent des réseaux qui combinent au minimum la question du choix du matériel végétal et de la densité en privilégiant les modalités des scénarios sylvicoles qui permettent de couvrir une large gamme de conditions de compétition entre les arbres. Outre le réseau SylvCOOP (qui teste neuf scénarios sylvicoles avec des densités initiales allant de 200 à 3500 tiges/ha combinés à tous les niveaux

d'amélioration du matériel végétal), ont été installés : un réseau de parcelles à courte rotation ou à forte densité à l'installation (semi-dédiées : densité initiale forte pour une première récolte de bois-énergie), un réseau temporaire de placettes post-Klaus pour enregistrer la croissance de parcelles endommagées, et enfin un réseau de peuplements mixtes plantés (le taux de mélange entre pin maritime et espèce accompagnatrice feuillue variant de 25 à 50%, avec agrégation ou dispersion des lignes de l'espèce en mélange).

- **Suivi de la production en conditions réelles [SylvPROD]** : Ces placettes permettent d'élargir la palette des conditions stationnelles ou de gestion avec des mesures annuelles.
- **Réseau de démonstration [DEMON]** de façon à ce que les organismes prescripteurs en sylviculture puissent évaluer sur le long terme les modalités d'installation des différents scénarios préconisés par l'expertise du GIP ECOFOR au lendemain de la tempête Klaus de janvier 2009 et leurs adaptations aux conditions stationnelles locales.



## Caractérisation écologique et fertilité

Céline MEREDIEU, INRA ; Laurent AUGUSTO, INRA

Le programme Sylvogène a permis des avancées significatives dans l'analyse des descripteurs écologiques déterminant les potentialités stationnelles des peuplements de pin maritime. Le milieu est généralement décrit d'une manière qui n'explique pas tous les facteurs écologiques (trophiques, énergétiques et hydriques). Ainsi la dénomination des types de landes met l'accent principalement sur la présence de la nappe phréatique. Ce critère demeure un facteur particulièrement discriminant. Néanmoins, l'analyse des hauteurs moyennes des arbres sur les placettes à 8 ans du réseau SylvCOOP a montré une forte variation de croissance entre les dispositifs et entre les placettes d'un dispositif au sein du même type de milieu. Le type de lande est donc loin d'être un critère suffisant pour prédire la productivité d'une parcelle et cette première étude des facteurs pédologiques et floristiques a permis de dégager les grands facteurs de variation de la productivité du massif.

Une première conclusion nous a amené à distinguer les placettes de dune des placettes du plateau en raison de leur plus faible biomasse de la strate basse, leur pH plus élevé de 0.6 point (4.9 dans l'horizon de surface du sol) et pour leur faibles teneurs en matières organiques (carbone et azote) ainsi qu'en phosphore. Pour la première fois, **l'importance des teneurs du sol en oxydes de fer et d'aluminium a été mise en évidence pour la croissance des arbres**, probablement via un effet sur la nutrition en phosphore. La forme assimilable du phosphore est représentée par les phosphates solubles. A la différence de la plupart des autres nutriments, le phosphore en solution se trouve toujours à concentration faible par rapport au stock de phosphore total qui est plus ou moins disponible pour les végétaux. En l'absence d'oxydes, la nutrition en phosphore dépend uniquement des processus de minéralisation des matières organiques du sol et des litières. En présence d'oxydes, la dynamique du phosphore est modifiée en raison de leur pouvoir tampon qui permet une meilleure disponibilité de cet élément. Ainsi, pour les placettes dont la teneur en oxydes est supérieure à 0.018 g/100 g, la hauteur moyenne du peuplement à 8 ans est généralement plus élevée (5,6 m). Ce sont en majorité des placettes de landes humides ou mésophiles. C'est également sur ces placettes que l'on note un effet significatif du désherbage mécanique. Pour les placettes dont la valeur en oxydes est inférieure à 0,018 g/100 g, la hauteur moyenne est extrêmement variable (3 à 6 m) et

on note un effet dépressif de l'augmentation du ratio C/N et un effet positif des teneurs en azote et phosphore total.

## Prédire la production selon des scénarios sylvicoles diversifiés

Céline MEREDIEU, INRA ; Priscilla CAILLY, FCBA

### De l'utilité des modèles de croissance...

Au sein du GPMF, **plusieurs modèles et logiciels ont été mis au point par l'INRA et FCBA pour répondre aux questions de prédiction de la production** des peuplements de pin maritime.

A l'échelle de la parcelle forestière et pour comparer des scénarios sylvicoles, ces modèles sont intégrés dans le logiciel CAPSIS qui est mis à disposition de l'ONF. Le CNPF-IDF dispose des modèles INRA. Ainsi, CAPSIS, plateforme de simulation, permet de partager facilement les avancées méthodologiques. Sylveco, un logiciel spécifique a été construit par FCBA pour le consortium « Alliance Forêt bois, la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations et Smurfit Kappa Comptoir du Pin ». Il utilise un modèle de croissance de type « peuplement » et des fonctionnalités d'aide à la décision intégrant des calculs d'indicateurs économiques avec ou sans prise en compte des récurrences d'aléas majeurs.

A l'échelle du massif des Landes de Gascogne, un outil de calcul a été élaboré pour l'actualisation et la prévision à court terme de la ressource : le module Sylvogène (INRA). Il a également été développé sous CAPSIS lors du projet Sylvogène et il simule la croissance, la mortalité et intègre les dégâts de tempête des points d'inventaire forestier de l'IGN. Ce module a été utilisé pour actualiser les données de l'IGN après les tempêtes de 1999 et 2009, et les résultats ont servi de base aux prévisions de ressource. L'objectif est aujourd'hui de mettre en commun les données de calibration pour fusionner et actualiser les différents modèles disponibles.

### ... Aux panels de scénarios sylvicoles...

L'intensification de la production forestière est à la fois un enjeu climatique majeur (adaptation et atténuation du changement climatique) et économique (augmentation de la consommation de bois pour différents usages, du bois construction au bois énergie). Au même moment, le premier massif cultivé français est toujours un gigantesque chantier de reconstitution sur sa partie sud. Suite à la tempête de 2009, le travail d'expertise mené après la tempête Klaus ainsi que les besoins exprimés par les sylviculteurs et les utilisateurs de bois tendent vers une

diversification des itinéraires sylvicoles selon les débouchés attendus, leur réversibilité et leur résilience. Les scénarios proposés se sont donc élargis vers les scénarios à courte révolution (dédié) ou à forte densité initiale (semi-dédié). Parallèlement, l'évolution des pratiques sylvicoles et du contexte environnemental entraînent une modification des caractéristiques juvéniles des peuplements. Il est donc nécessaire d'acquérir des données sur la dynamique de croissance juvénile de ces nouveaux peuplements et de les intégrer dans les modèles pour cette phase allant de la plantation à la première éclaircie.

## ....Pour les comparer afin de les mettre en œuvre.

Grâce aux connaissances déjà acquises sur les scénarios sylvicoles proposés, une première étude a porté sur leur caractérisation du point de vue des stocks de carbone à l'échelle de la parcelle forestière et pour une révolution forestière. Les stocks de carbone sur pied et de carbone récolté, détaillés par compartiments de l'arbre (tronc, branches, racines) ont été calculés grâce à l'assemblage de différents modèles : un modèle de croissance du pin maritime et des modèles de calcul de biomasse complétés par un module d'évaluation des scénarios d'usage qui prolonge les calculs au devenir du bois récolté. Ces études d'évaluation environnementale sont méthodologiquement compliquées et nécessitent un grand nombre d'informations de diverses origines mais également un certain nombre d'hypothèses. Il faut donc rester prudent avec les résultats de cette première étude. La séquestration temporaire du carbone dans le bois sur pied est favorisée dans les itinéraires "haute-qualité". La productivité de ces itinéraires est faible, mais peut être compensée par un usage dans des produits à longue durée de vie. A l'opposé, les itinéraires "biomasse" présentent une forte productivité mais séquestrent peu de carbone. Ils restent très intéressants dans une optique de production d'énergie alternative à l'énergie fossile.



Ces résultats sur la comptabilité carbone ne sont qu'une première étape des composantes à examiner : analyse de risque, bilan de fertilité, analyse économique... Malgré l'impatience à obtenir des réponses rapides et efficaces à des problématiques parfois nouvelles, ce travail ne pourra être effectué avec la rigueur nécessaire qu'en combinant des expérimentations soignées et des travaux de synthèse dans un esprit opérationnel.

## Soutenir la production et la récolte par des pratiques durables et innovantes de gestion

Pierre TRICHET, INRA ; Laurent AUGUSTO, INRA ; Jean-Yves FRAYSSE, FCBA ; Céline MEREDIEU, INRA

L'augmentation de la productivité du massif landais en lien avec la capacité des sols à soutenir cette productivité durablement est une question centrale pour une forêt qui produit 26% de la ressource nationale en bois.

Le GPMF développe des programmes visant à évaluer l'impact sur les sols des différentes opérations caractérisant la sylviculture du pin maritime (coupe rase et récolte de biomasse, gestion des résidus végétaux, travail du sol, fertilisation ...).

Les sols forestiers du massif landais sont des sols du type podzol, sableux, caractérisés par leur pauvreté minérale, notamment en phosphore. Leur fertilité repose presque exclusivement sur la quantité de matière organique (cohésion du sol, support de rétention en eau et en éléments minéraux), la teneur en phosphore, et la teneur en oxydes de fer-aluminium (qui régulent la disponibilité en phosphore).

## Fertilisation

L'intensification de la culture du pin maritime n'a pu se faire sans la mise en place à l'échelle du massif de la pratique de la fertilisation phosphatée apportée à l'installation du peuplement. Le réseau expérimental d'essais de fertilisation, toujours renouvelé, a permis de mettre évidence la variabilité de l'action du phosphore selon les types stationnels et d'établir la courbe de réponse à la dose de phosphore, en fonction de l'âge. Ces résultats ont conforté la réduction des apports de phosphore au moment du reboisement : les doses apportées sont passées de 120 à 60-80 kg de P2O5 par hectare.

Aujourd'hui, ce réseau a été élargi pour répondre aux principaux questionnements concernant la fertilisation en phosphore : les mécanismes expliquant la diversité stationnelle de la réponse à la fertilisation, la localisation de l'engrais (en plein, en bande sur l'interligne ou sur la ligne, ou au pied du plant), et enfin la date de la fertilisation (initiale ou différée de quelques années) et son association avec des coupes.

## Cultures intercalaires de légumineuses

L'efficacité d'une fertilisation minérale azotée est faible et fugace en lien avec le caractère fortement lessivable de cet élément dans les sols sableux du massif landais. Les légumineuses autochtones telles que l'ajonc et le genêt peuvent fixer une quantité importante d'azote et ainsi améliorer le bilan azoté d'un peuplement de pin maritime. Des essais d'introduction de cultures intercalaires d'ajoncs et de genêts ont été installés pour évaluer l'impact des légumineuses sur la croissance et la nutrition des pins maritimes et sur le bilan de fertilité des peuplements. Ce programme de recherche est toujours en cours et ces essais expérimentaux ont été un facteur positif pour l'obtention d'un soutien de l'ADEME et du département EFPA de l'INRA pour développer ces recherches. Une thèse portant sur les interactions légumineuses-pins démarre en octobre 2016.

## Utilisation des cendres de chaudière à biomasse et intensification du prélèvement de biomasse

Les prélèvements de minéraux occasionnés par les récoltes de biomasse peuvent être compensés par l'apport d'engrais de synthèse ou de produits résiduels tels que les cendres. L'utilisation en forêt des cendres de combustion de chaudière à biomasse que la filière va devoir recycler dans un souci d'économie circulaire permettrait de restituer en partie au sol le calcium, potassium, magnésium, fer, bore, manganèse prélevés par l'exportation de biomasse. Une synthèse biographique sur l'utilisation des cendres en forêt a été réalisée mais il convient néanmoins d'évaluer les possibles effets de ce type de recyclage sur les peuplements et l'environnement. A cette fin, deux sites expérimentaux ont été installés au Teich (33) en 2009 et à Pontenx (40) en 2016, pour mesurer l'impact du prélèvement de biomasse pour différentes modalités de récoltes (tronc, tronc + branches et tronc + branches + souches) combinées à des mesures de maintien de la fertilité (engrais phosphaté, amendement sous forme de cendres) (Plaquette du GPMF – Juin 2016).



P. Tréchet, INRA

## Des sylvicultures innovantes : le mélange d'espèces pour la protection sanitaire du pin maritime

Jean-Raymond LIARÇOU, CNPF Aquitaine

Les résultats des recherches ont mis en évidence l'intérêt sanitaire du mélange entre pin maritime et essences feuillues dans le massif landais. Le mélange peut être réalisé à l'échelle d'une propriété ou d'une petite région forestière (lisières, îlots) mais aussi à l'échelle de la parcelle (mélange pied à pied ou alternance de lignes).

La maîtrise technique de l'installation et de la gestion de ces plantations en mélange reste un défi dans le massif landais. Il est donc nécessaire pour les partenaires de rassembler l'expérience déjà acquise de façon dispersée dans ce domaine et de compléter les connaissances par le suivi des dispositifs déjà installés dans le massif landais. Plusieurs dispositifs testant le mélange par bande du pin maritime et d'une essence accompagnatrice ont été installés. Les premières mesures vont débuter dans les prochaines années pour répondre aux questions portant sur l'installation de feuillus par plantation et leurs dynamiques de croissance. En outre il est prévu d'évaluer des plantations de pin maritime dans lesquels des feuillus ont été conservés lors de leur renouvellement.





Directeur de la publication :  
GPMF

Comité éditorial  
Patrick Pastuszka, INRA - Président du GPMF  
et le Comité Exécutif du GPMF

Rédactrices en chef  
Céline Meredieu, INRA  
Annie Raffin, INRA

Contact GPMF :  
Groupe Pin Maritime du Futur, Domaine de l'Hermitage  
69, route d'Arcachon - Pierroton - 33612 CESTAS CEDEX  
Courriel : [contact@gisgpmf.fr](mailto:contact@gisgpmf.fr)

Les Cahiers déjà parus :  
N°1 : Sylviculture et stabilité, novembre 2011  
N°2 : Situation sanitaire et diversification, mai 2012  
N°3 : Les techniques d'installation, mai 2013  
N°4 : Matériel végétal de reboisement, juin 2014

*Pour en savoir plus :*  
*Les publications du GPMF sont disponibles en ligne sur les sites des partenaires.*  
*Tapez « Cahiers de la Reconstitution » dans un moteur de recherche.*

Avec le soutien de

