



HAL
open science

Choix du matériel végétal : exemple du massif landais

Laurent Bouffier, Patrick Pastuszka

► **To cite this version:**

Laurent Bouffier, Patrick Pastuszka. Choix du matériel végétal : exemple du massif landais. Innovations Agronomiques, 2014, 41, pp.31-41. hal-02630129

HAL Id: hal-02630129

<https://hal.inrae.fr/hal-02630129>

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 - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Choix du matériel végétal : exemple du massif landais

Bouffier L.¹, Pastuszka P.²
Avec la collaboration de Raffin A.¹

¹ INRA, UMR1202 BIOGECO, F-33610 Cestas

² INRA, UE0570 Forêt-Pierroton, F-33610 Cestas

Correspondance : Laurent.Bouffier@pierroton.inra.fr

Résumé

Le choix du matériel végétal pour le reboisement ou l'afforestation est essentiel pour assurer une bonne adaptation du peuplement aux conditions pédo-climatiques locales et atteindre un niveau de production et une qualité correspondants aux objectifs fixés. La première étape consiste généralement à explorer la diversité interspécifique avant de mettre en place un programme de sélection génétique dont l'objectif est de fournir régulièrement du matériel amélioré. Dans les landes de Gascogne, le choix s'est porté, au cours du XIX^{ème} siècle, sur le pin maritime puis un programme d'amélioration a été initié dans les années soixante à partir de la provenance locale. L'utilisation de matériel amélioré a permis d'augmenter sensiblement la productivité et la qualité des peuplements. Aujourd'hui, les variétés permettent un gain génétique supérieur à 30% pour la croissance et la rectitude du tronc. Le contexte nouveau de la forêt landaise, où une intensification durable de la production est demandée, a relancé les travaux d'exploration de la variabilité inter- et intra- spécifique. Le pin maritime restera l'espèce de choix dans le massif landais. Toutefois, des stratégies pour infuser de la variabilité intraspécifique dans le programme d'amélioration sont en cours de développement afin que les futures variétés soient adaptées aux évolutions économiques et environnementales.

Mots-clés : pin maritime, variabilité, sélection, variété, changement climatique, productivité

Abstract: Selection of plant material: example of Landes forest

Plant material for reforestation or afforestation is of first importance to ensure adaptation of stands to local environmental conditions and to reach goals of wood productivity and quality. Generally the first step focuses on an exploration of between species diversity; then a breeding programme is set up to produce improved genetic material. Maritime pine was chosen for afforestation in the Landes forest (south west of France) during the XIXth century. Later on, a breeding programme was established during the 60'ies based on the local provenance. Development of improved material made it possible to increase stand productivity and quality. Genetic gains of current varieties reach more than 30% for growth and stem straightness. Exploration of diversity between and within species becomes again a key issue in the new context of Landes forest where sustainable intensification is required. Maritime pine will stay the main species in the Landes forest. Nevertheless, strategies are under development to implement new genetic diversity in the breeding programme for adapting futures varieties to environmental and economic changes.

Keywords: maritime pine, variability, selection, genetic material, climatic change, productivity

Introduction

La forêt des landes de Gascogne s'étend sur environ un million d'hectares et est constituée essentiellement de pin maritime géré en futaies régulières. Ce massif est caractérisé par une sylviculture intensive associée à l'utilisation de matériel végétal génétiquement amélioré issu du travail du Groupement d'Intérêt Scientifique « Groupe Pin Maritime du Futur » (GIS GPMF). La forte productivité des forêts de pin maritime (production moyenne supérieure à 10m³/ha/an) est valorisée à la fois en sciage (3.5 Mm³) et en bois d'industrie (3.3 Mm³) (FCBA, 2014).

Plusieurs facteurs contribuent au contexte nouveau dans lequel se trouve le massif landais aujourd'hui. Tout d'abord, les effets de la tempête Martin en 1999, puis de la tempête Klaus en 2009 aggravés par les dégâts d'insectes ravageurs en 2010 - 2011 se sont traduits par une destruction de presque 50% du capital sur pied (75Mm³ de bois soit environ 8 années de récolte). Au lendemain de la tempête Klaus, 200 000 hectares de forêts étaient à reconstituer en Aquitaine. En même temps, de nouveaux débouchés sont apparus, en particulier une forte demande en bois – énergie estimée à deux millions de tonnes soit un quart de la production du massif. On assiste donc à une compétition pour la ressource entre les différentes utilisations (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois – énergie), ce qui nécessite de trouver des solutions pour augmenter la productivité du massif si l'on souhaite maintenir une filière bois dynamique en Aquitaine. Les stratégies à suivre pour permettre cette augmentation de productivité doivent prendre en compte l'évolution du contexte environnemental avec à la fois une évolution du climat (en particulier une intensification probable des sécheresses estivales) et une probable augmentation du risque pathogène (développement des pourridés racinaires, menace liée à la présence du nématode du pin en Espagne).

Dans ce contexte difficile, le choix du matériel végétal est primordial. Il doit permettre de valoriser la très grande diversité inter- et intra-spécifique pour le reboisement. Nous présenterons, dans un premier temps, comment la diversité interspécifique a été explorée dans le cadre de la forêt landaise puis nous verrons comment la variabilité génétique au sein de l'espèce pin maritime peut permettre de répondre au défi de l'intensification durable du massif.

1. Exploration de la diversité interspécifique

L'exploration de la diversité interspécifique a régulièrement été considérée comme une voie privilégiée de progrès pour le gestionnaire forestier, désireux soit de répondre à des objectifs ambitieux de boisement, soit tout simplement, d'étudier et de tester un matériel végétal original. Ainsi au cours des siècles passés, forestiers, botanistes et autres passionnés ont introduit au sein des forêts françaises, dans nos parcs ou nos arboretums, un grand nombre de taxons issus des différents continents, suivant des méthodes plus ou moins rigoureuses.

Par exemple, à l'arboretum des Barres dans le Loiret (Durand, 2010), Philippe André de Vilmorin entreprend à partir de 1825 un remarquable travail, installant de nombreuses comparaisons d'espèces forestières (notamment de pins noirs et sylvestres), en portant une attention toute particulière aux populations ou provenances qui représentent ces espèces, suivant en cela les travaux de son illustre prédécesseur Duhamel du Monceau (auteur du « Traité des Forêts »). Il s'agit là des premières bases de la génétique forestière en France.

Sur le terrain, le gestionnaire forestier a bien conscience de l'importance capitale du choix de l'espèce et/ou de la provenance, dans sa décision de création ou de renouvellement d'un peuplement forestier ; même dans le cas de la régénération naturelle où de facto la question est entendue. Dans le contexte d'une forêt de production, ce choix doit satisfaire a minima trois exigences : l'adaptation aux conditions pédo-climatiques, l'obtention d'un niveau de production « raisonnable » et une qualité des produits susceptible de répondre à des besoins identifiés. **De tout temps les forestiers ont ainsi utilisé la diversité des espèces pour valoriser au mieux les différents milieux, l'introduction d'espèces**

exotiques permettant d'étendre fortement le champ des possibles. Il n'y a donc pas lieu d'opposer espèces indigènes et espèces exotiques dans cette valorisation de la diversité interspécifique.

Les différents acteurs de la recherche et du développement ont ainsi installé au cours des décennies passées de nombreux essais de terrain (arboretums d'élimination, comparaison d'espèces, ...) et en ont tiré leçons et enseignements au bénéfice de la forêt. Le développement du Douglas en France, la création de peupliers hybrides euraméricains sont des exemples majeurs de réussite de ces travaux.

Aujourd'hui alors que cette thématique était quelque peu en sommeil, **les problématiques liées aux changements climatiques et dans une moindre mesure les mutations économiques rapides, amènent à reconsidérer tous ces réseaux avec une nouvelle intensité ; peuvent-ils apporter certaines réponses aux questions d'aujourd'hui ? Quels résultats en tirer pour une adaptation plus dynamique de nos forêts et quels nouveaux réseaux faut-il installer ?**

En Aquitaine, la forêt landaise en particulier n'a pas suivi d'autre schéma. Lorsqu'il s'est agi de mettre en valeur au XIX^{ème} siècle une part importante de ce territoire, fort de l'expérience de quelques pionniers (Desbiey, Bremontier, Chambrelent,...), c'est tout naturellement le pin maritime, espèce locale, qui a été privilégié (Sargos, 1998). Mais la diversité interspécifique a également été explorée dans le contexte des sols sableux acides et pauvres du massif aquitain. Au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, chercheurs et forestiers ont installé de nombreux essais d'introduction d'essences forestières exotiques et d'espèces autochtones. La motivation principale était de trouver une ou plusieurs alternatives crédibles au pin maritime pour la mise en valeur des Landes de Gascogne, les principaux critères d'évaluation pris en compte se rapportant à l'adaptation au milieu et une production forestière d'un bon niveau. **Les résultats de ces programmes ont toujours été clairs : face aux contraintes pédo-climatiques marquées du massif landais, le pin maritime représente la meilleure solution pour une production soutenue et demeurera l'espèce majoritaire pour le reboisement (recommandations du GIP ECOFOR).**

Cependant, certaines essences ont démontré une bonne adaptation à certains milieux, avec une production certes inférieure (bouleau, pin laricio, chêne rouge), d'autres présentant parfois une productivité équivalente, voire supérieure sur certaines stations (pin taeda, eucalyptus). Enfin quelques autres espèces peuvent susciter un intérêt particulier et devront encore être étudiées (y compris en variabilité intra-spécifique) pour valider leur usage en reboisement à plus grande échelle (robinier, séquoïa).

Dans le cadre du changement climatique, l'adaptation des écosystèmes et des espèces qui les composent, génère de nouvelles interrogations. Les scénarios climatiques moyens produits à l'échelle régionale par les modèles, n'autorisent pas une quantification précise des conditions climatiques ou des stress à venir, mais ils semblent montrer que les peuplements seront soumis à des températures estivales plus élevées, accompagnées d'un stress hydrique accru, alors que la pluviométrie hivernale pourrait augmenter. De plus, même avec une température moyenne annuelle en augmentation, les froids hivernaux « intenses » ne peuvent être exclus. Ces nouvelles considérations amènent les professionnels de la filière à se ré-interroger sur la valorisation de la diversité entre espèces. Outre une nouvelle évaluation des essais anciens, l'accent a été mis sur l'installation de nouveaux réseaux d'introduction et d'évaluation d'essences indigènes et exotiques dans les conditions pédoclimatiques actuelles et futures. Un monitoring régulier devra permettre de juger l'adaptation, la croissance et l'état sanitaire de ces espèces (projets CLIMAQ et REINFORCE) ; **l'enjeu est de mesurer à terme la capacité de ces espèces à contribuer à la diversité des écosystèmes forestiers de production pour le massif aquitain.** Pour certaines de ces espèces, il est tout à fait concevable qu'un effort particulier pour valoriser la diversité génétique intraspécifique (variétés améliorées) soit nécessaire pour atteindre cet objectif. **Enfin, les « nouveaux » enjeux sur la biomasse forestière (bois – énergie et contribution des écosystèmes forestiers à l'atténuation du changement climatique) sont en plein développement en Aquitaine,** et là aussi, la diversité entre espèces pourrait sans doute être mise à

profit pour élaborer des modèles de production soutenue et durable (peuplements à forte densité, peuplements à courte rotation, taillis,...).

2. Utilisation de la diversité intraspécifique pour une intensification durable de la production

La variabilité observée sur le terrain pour la plupart des caractères d'intérêt sylvicole (croissance, qualité du bois, adaptation...) dépend à la fois de facteurs génétiques et de facteurs environnementaux. De façon générale, on constate une très forte variabilité génétique chez les espèces forestières (Hamrick *et al.*, 1992) et, en particulier, à l'intérieur des populations (Nybom, 2004). **Dans le cadre des programmes d'amélioration génétique, c'est la variabilité au sein de l'espèce qui est mise à profit afin de créer des variétés présentant les caractères d'intérêt pour le sylviculteur.** En effet, le gain génétique (par cycle de sélection) pour un caractère est estimé par la réponse à la sélection selon la formule suivante :

$$R = h^2 * i * \sigma_P \text{ (Falconer, 1974)}$$

où R est la réponse à la sélection (différence entre la moyenne des descendants des individus sélectionnés et la moyenne de la population initiale), h^2 l'héritabilité du caractère, i l'intensité de sélection et σ_P^2 la variance phénotypique du caractère. Ainsi, les conditions favorables pour obtenir un gain génétique important par cycle sont les suivantes :

- Le critère de sélection doit être fortement héritable c'est-à-dire qu'une part importante de la variabilité observée doit être d'origine génétique
- Le sélectionneur doit choisir une intensité de sélection élevée (peu d'individus retenus par rapport à la taille de la population initiale)
- La variabilité du caractère sélectionné dans la population initiale doit être importante.

2.1 Un programme d'amélioration mis en place au début des années soixante

Le pin maritime se caractérise par une aire de distribution naturelle très morcelée (Figure 1). On distingue généralement trois groupes géographiques : atlantique, périméditerranéen et maghrébin.

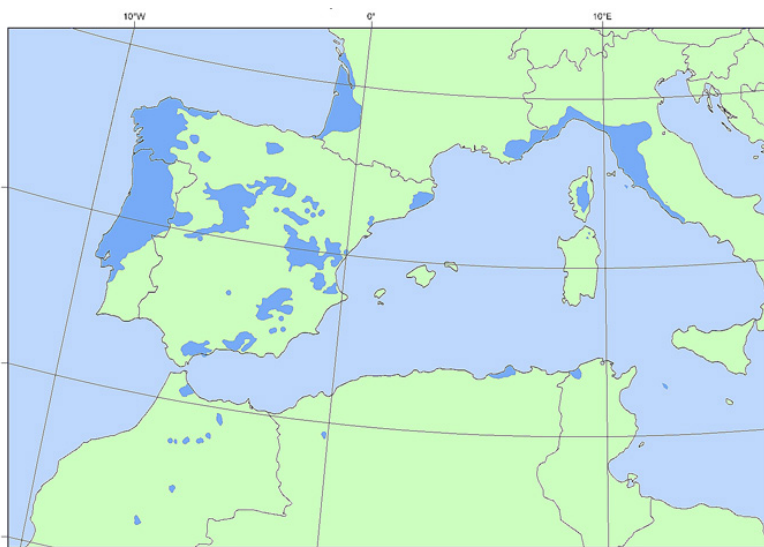


Figure 1 : Aire de distribution naturelle du pin maritime (EUFORGEN, www.euforgen.org).

Dès 1926, différentes provenances de pin maritime sont évaluées dans le sud-ouest de la France grâce à l'installation de l'arboretum des Arrouilles en Forêt domaniale de Mimizan par l'administration des Eaux et Forêts. Il sera suivi en 1955 par le test de provenances des Malgaches, situé à proximité, et suivi par la recherche forestière avec un objectif similaire. Les tests de provenances consistent à planter, dans un même site, différentes provenances d'une même espèce. L'environnement étant identique, les différences observées traduisent des différences génétiques. Ces dispositifs fourniront les premiers éléments de caractérisation des différentes provenances de pin maritime (adaptation aux conditions locales, comportement au froid après 1956). Pour illustrer cette variabilité intraspécifique, la Figure 2 présente les résultats d'un dispositif installé sur le domaine expérimental de l'INRA Pierroton-Cestas (Gironde) pour 16 provenances de l'aire naturelle du pin maritime. On observe une forte variabilité pour la croissance et la rectitude basale du tronc entre ces différentes provenances. Dans les conditions pédoclimatiques du sud-ouest de la France, la provenance landaise révèle très clairement sa supériorité en termes de croissance et d'adaptation malgré des défauts de rectitude du tronc et de branchaison (Illy, 1966). **C'est pourquoi la provenance locale a été retenue pour initier le programme d'amélioration du pin maritime au début des années soixante afin de dynamiser la filière forêt-bois-papier de la région Aquitaine.**

La première étape de ce programme a été la sélection d'arbres remarquables (arbres « plus »). Pour cela, tous les peuplements équiens de plus de 30 ans de la forêt landaise ont été parcourus (Illy, 1966). Les arbres candidats ont été comparés à leurs 30 plus proches voisins de façon à pouvoir construire un index de sélection comparable entre les différents candidats. Les critères de sélection pris en compte étaient le volume et la forme des arbres (diverses notations relatives à la rectitude du tronc et à la branchaison). **Au total, 635 arbres « plus » ont été sélectionnés dans la forêt landaise (Figure 3) ; ils constituent la population de base du programme d'amélioration (ou population G0 correspondant à la première génération d'amélioration).**

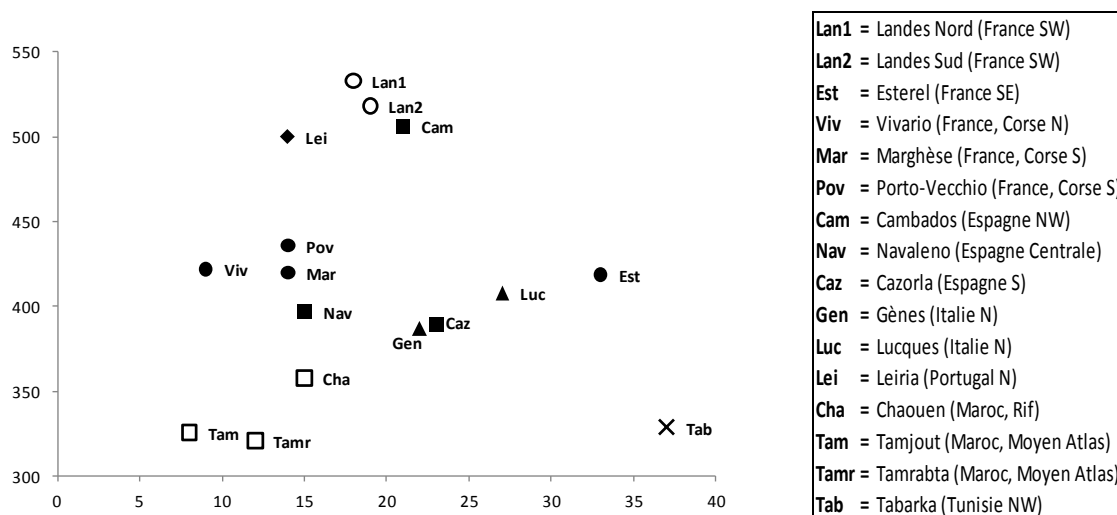


Figure 2 : Performances de 16 provenances de pin maritime pour la hauteur (ordonnées, en cm) et l'écart à la verticalité (abscisses, en degrés) à 8 ans dans le sud-ouest de la France (Harfouche, 1995).

La stratégie d'amélioration alors mise en place est identique à celle des principaux programmes d'amélioration de conifères, c'est-à-dire une sélection récurrente à partir d'une population de base sélectionnée en forêt. Cette stratégie consiste en une succession de cycles associant une phase de sélection (pour sélectionner les individus les plus performants) et une phase de croisement (pour recombiner les caractères favorables).

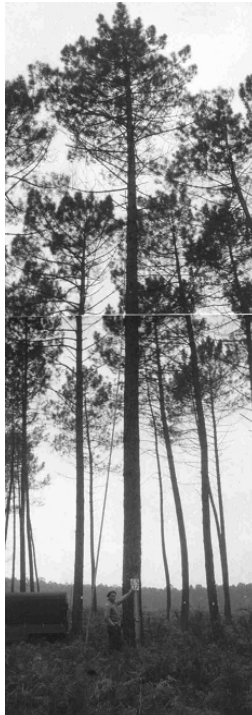


Figure 3 : Arbre « plus » sélectionné dans la forêt landaise (Illy, 1966).

Les grandes étapes de cette stratégie sont présentées dans la Figure 4. Les arbres « plus » sont évalués par des tests de descendance (dispositifs expérimentaux regroupant sur un même site les descendants de différentes familles) afin d'estimer leur valeur génétique (c'est-à-dire l'effet moyen des gènes pour le caractère considéré). Par ailleurs, ces arbres « plus » sont croisés entre eux et les meilleurs descendants sont sélectionnés pour constituer la nouvelle population d'amélioration (environ 2600 arbres, appelés G1). Le même travail est ensuite réalisé sur la population G1 dans le cadre d'un nouveau cycle de sélection. Parallèlement à cette amélioration progressive de la population, les meilleurs individus (généralement une quarantaine) sont multipliés par greffage et installés dans des vergers à graines. Les graines récoltées sur ces vergers constituent les variétés améliorées qui seront commercialisées sous forme de jeunes plants. **L'objectif de la sélection récurrente est de maximiser les gains génétiques dans les sorties**

variétales (population de production) tout en conservant de la variabilité génétique dans les populations d'amélioration pour assurer l'efficacité de la sélection sur le long terme. Par ailleurs, les arbres des populations d'amélioration successives sont conservés dans des parcs à clones : ils permettent la réalisation des croisements contrôlés et la multiplication du matériel.

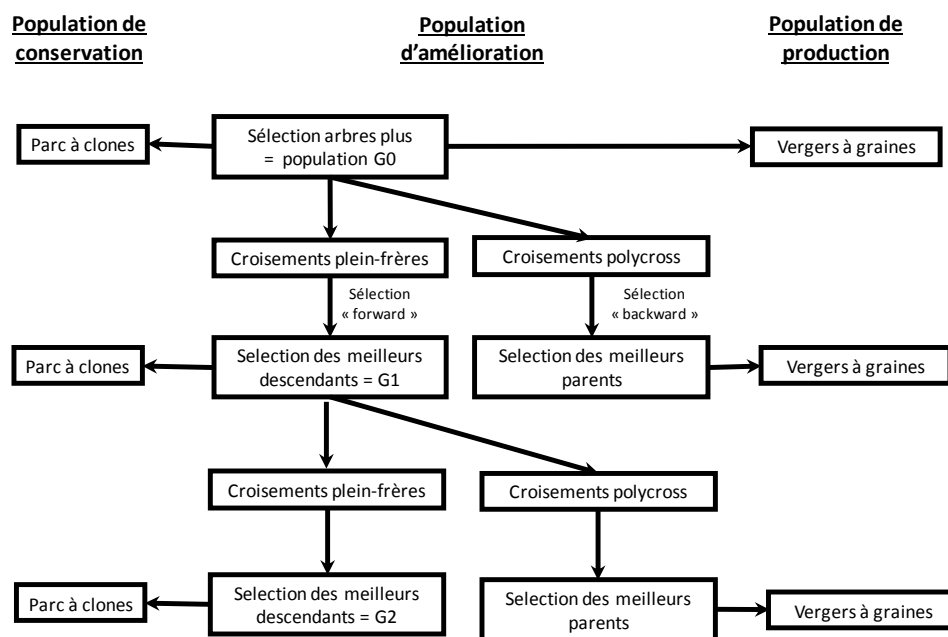


Figure 4 : Stratégie d'amélioration suivie pour la création variétale chez le pin maritime (sélection récurrente à partir d'une population de base constituée d'« arbres plus »). On distingue trois types de population: une population d'amélioration (dans laquelle sont pratiqués les cycles successifs de sélection – croisements), une population de conservation (parcs à clones rassemblant les individus des générations successives) et une population de production (plantations avec les meilleurs génotypes pour la production des graines améliorées).

Le programme d'amélioration du pin maritime est géré par le Groupement d'Intérêt Scientifique « Groupe Pin Maritime du Futur » depuis 1995 (GIS GPMF regroupant INRA, FCBA, ONF, CRPF et

CPFA). Le schéma d'amélioration entre aujourd'hui dans sa troisième génération avec la sélection d'arbres G2. **Les variétés actuelles sont dites « polyvalentes » car elles ont été sélectionnées pour une adaptation aux différents types de lande et pour des usages multiples (bois d'œuvre et d'industrie).** Deux principaux critères de sélection sont pris en compte : la croissance et la rectitude du tronc (variété landaise VF ie. Vigueur – Forme). Bien que ces deux critères soient corrélés de façon défavorable, les gains génétiques espérés sont aujourd'hui supérieurs à 30% par rapport à du matériel non amélioré (GIS GPMF, 2014). **Depuis le début du programme d'amélioration, le rythme de renouvellement des variétés a été d'environ 15 ans.** La première variété de pin maritime (variété VF1) est entrée en production dans le début des années 80, puis la VF2 au milieu des années 90 et la VF3 depuis 2011.

2.2 Vers une accélération des sorties variétales

La stratégie de sélection récurrente adoptée pour la gestion du programme d'amélioration du pin maritime a montré son efficacité puisque des gains génétiques importants ont été obtenus sans diminuer de façon significative le niveau de variabilité génétique depuis la population de base (Bouffier *et al.*, 2009). Pour répondre à la demande actuelle d'intensification durable de la production forestière, une adaptation de cette stratégie initiale est proposée afin d'accélérer les cycles de sélection. Il s'écoule presque 30 ans entre l'installation des tests de nouveaux géniteurs et la mise sur le marché de la variété dont ils seront la base (Figure 5). La réduction de cet intervalle est désormais envisageable en supprimant la phase d'évaluation sur descendance de la valeur génétique avant l'installation du verger à graines. En effet, après trois cycles de sélection, un très grand nombre de mesures ont été acquises sur les caractères soumis à sélection. Ces mesures accumulées sur plusieurs générations peuvent désormais être valorisées avec des modèles génétiques complexes grâce à la puissance de calcul des ordinateurs actuels. Aujourd'hui, les performances de plus de 400 000 arbres sont enregistrées dans la base de données du GIS GPMF alimentant ce système d'évaluation. La valeur génétique d'un individu est alors estimée à partir de l'ensemble de ses apparentés quel que soit le niveau d'apparentement.

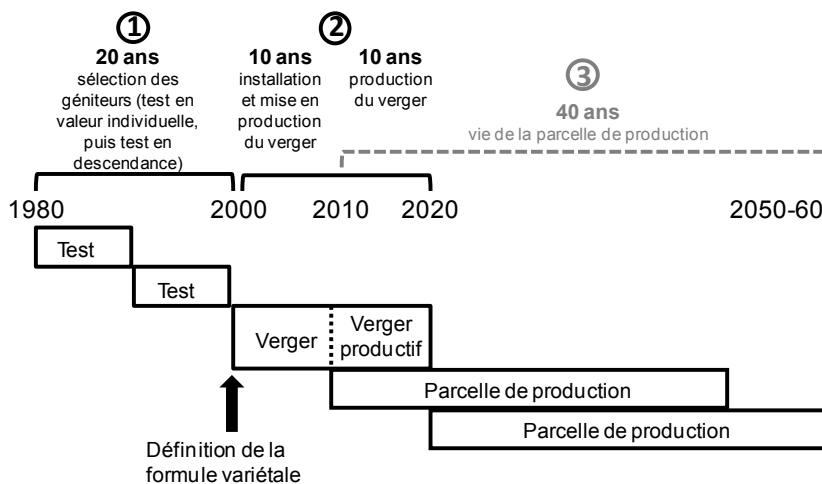


Figure 5 : Délais nécessaires depuis la phase de sélection des géniteurs (1), la phase de production d'une variété (2) jusqu'à son utilisation dans le massif (3) (d'après GIS GPMF, 2014).

Cette stratégie de sélection plus dynamique **permettrait de réduire les cycles de sélection à une quinzaine d'années et donc d'accélérer les sorties variétales.** Elle présenterait un double avantage :

- **Accélérer l'obtention du gain génétique, en particulier dans une perspective d'accroissement de la productivité**
- **Faciliter l'adaptation des variétés aux évolutions environnementales et économiques en réduisant le temps écoulé entre la sélection des géniteurs et la production des variétés.**

Les variétés de pin maritime sont des variétés synthétiques (mélange de familles dont les parents sont sélectionnés) qui présentent un fort niveau de diversité génétique. Le renouvellement plus fréquent des variétés ouvre également la possibilité d'une réduction de la diversité à l'intérieur des variétés afin d'accroître le gain génétique par une intensité de sélection plus forte sur les géniteurs des vergers à graines. La plus faible diversité génétique à l'intérieur de chaque variété serait compensée, au niveau du massif, par un plus grand nombre de variétés différentes.

2.3 Vers l'utilisation d'une variabilité génétique plus large

Les tests de provenances révèlent une très grande variabilité génétique entre les différentes provenances du pin maritime (Figure 2) qui s'explique notamment par l'aire naturelle de distribution morcelée de cette espèce. À côté de la provenance landaise, le programme d'amélioration du GIS GPMF développe une population d'amélioration pour la provenance corse, particulièrement intéressante pour la qualité de la branchaison et la rectitude du tronc. Cette population est valorisée dans le cadre des variétés Landes x Corse (variétés LC). Une population de provenance marocaine a également été sélectionnée dans une perspective de sélection pour la résistance à la sécheresse et à certains pathogènes (*Matsucoccus* dans le sud-est, armillaire).

Ces dernières années, l'évolution du contexte économique et environnemental a fait émerger de nouveaux critères de sélection. Des caractères relatifs à la qualité du bois (densité du bois, angle du fil, branchaison) sont mesurés en routine pour la sélection des géniteurs des futurs vergers à graines. D'autres critères devront être intégrés dans les années à venir, en particulier la résistance à la sécheresse. Le changement climatique entraînerait en effet des sécheresses plus marquées et plus fréquentes dans le sud-ouest de la France. Le nématode du pin est également une menace supplémentaire pour le massif. Détecté pour la première fois en Europe (Portugal) en 1999, ce pathogène a depuis été signalé en Espagne. La recherche de résistances génétiques est une des pistes envisagées pour limiter les dommages potentiels du nématode du pin.

Puisque les gains génétiques ne seront possibles que s'il y a de la variabilité génétique dans la population de base, il apparaît important d'évaluer, pour l'ensemble de ces nouveaux critères de sélection, la variabilité dans la population landaise ainsi que dans les autres provenances de pin maritime. Par exemple, une forte variabilité est vraisemblable pour la résistance à la sécheresse puisque le pin maritime est présent dans des environnements allant de plus de 1700 mm de précipitations (littoral de la Galice) à moins de 400 mm de précipitations (Sierra de Oria au sud-est de l'Espagne). Les provenances méditerranéennes de pin maritime, adaptées à des climats plus secs que le sud-ouest de la France, pourraient être intéressantes pour le reboisement dans le massif landais, à condition de présenter un niveau de résistance au froid suffisant pour supporter un événement hivernal extrême, toujours possible même si les températures moyennes augmentent (GIS GPMF, 2014). **C'est pourquoi l'utilisation de ces provenances est envisagée en croisement avec la provenance landaise locale résistante au froid. Un programme d'évaluation de croisements inter-provenances (Espagne, Portugal, Maroc) est mené par le GIS GPMF.**

2.4 Vers une diversification des sorties variétales

La diffusion du gain génétique se fait actuellement via des variétés polyvalentes améliorées à la fois pour la croissance et la rectitude du tronc, deux caractères corrélés défavorablement. Cette corrélation étant estimée au niveau de la population, il est possible d'identifier des individus présentant des

performances intéressantes pour ces deux critères de sélection. Toutefois, plus le nombre de critères de sélection pris en compte augmente, moins le gain génétique possible pour chacun d'entre eux est important. Ainsi l'accumulation des critères de sélection (densité du bois, branchaison, adaptation au changement climatique...) en plus des critères initiaux (croissance et rectitude) limitera le progrès génétique pour chacun d'entre eux. C'est pourquoi, il est envisagé de développer des variétés « spécialisées » où un nombre restreint de critères de sélection serait pris en compte. Par exemple, une variété « Biomasse » spécialisée pour une croissance rapide (gain espéré pouvant dépasser 50% sur le volume du tronc par rapport au matériel non amélioré) est en développement. Une base génétique plus étroite que les variétés classiques est rendue possible par la courte rotation (10 à 15 ans) qui minimise le risque par rapport aux aléas (GIS GPMF, 2014). **Le développement de variétés spécialisées semble être particulièrement adapté à la diversification actuelle des usages du pin maritime.**

2.5 Des outils moléculaires pour répondre aux objectifs d'intensification durable ?

Un marqueur moléculaire est un fragment d'ADN (correspondant à une séquence codante ou non) avec une position bien définie dans le génome (locus) et présentant du polymorphisme dans la population d'étude. Il existe de nombreux types de marqueurs moléculaires. Aujourd'hui, les marqueurs les plus couramment utilisés sont les SNPs (Single Nucleotide Polymorphism) qui correspondent à la variation d'un seul nucléotide. Dans la population d'amélioration du pin maritime, environ 4500 SNPs polymorphes ont été mis en évidence. Jusqu'à présent, les marqueurs moléculaires n'ont pas été valorisés pour la sélection chez le pin maritime. Muranty *et al.* (2014) détaillent les raisons pouvant expliquer la non-utilisation de la biologie moléculaire dans les programmes d'amélioration forestiers malgré d'importantes recherches menées depuis plus de 20 ans. Toutefois, deux applications principales de la biologie moléculaire pourraient permettre d'augmenter l'efficacité de la sélection génétique à court et moyen terme.

La première correspond à l'**utilisation des marqueurs moléculaires pour vérifier ou reconstituer le pedigree des individus de la population d'amélioration**. Ceci est actuellement possible en routine grâce à l'optimisation d'un jeu de 70 SNPs pour le pin maritime. La connaissance du pedigree des arbres (depuis la population de base) est un élément clef pour estimer avec précision leur valeur génétique. L'utilisation des marqueurs moléculaires permettrait ici soit de corriger des erreurs de pedigree soit de compléter des pedigrees partiels afin de mieux estimer les valeurs génétiques des arbres. La reconstitution des pedigrees, désormais possible à faible coût, ouvre également de nouvelles perspectives en termes de stratégies de sélection (Bouffier *et al.*, 2013). Il est en effet envisageable de simplifier la phase de croisements contrôlés sur le terrain en réalisant des croisements de type polycross (utilisation d'un mélange de pollen) suivis d'une reconstitution de pedigree avec les marqueurs moléculaires. Ce type de stratégie de sélection est en cours d'étude au sein de l'UMR BIOGECO et devrait être mis en application sur une partie de la population d'amélioration.

La deuxième utilisation possible de la biologie moléculaire est une perspective plus lointaine mais très intéressante. L'objectif est ici d'essayer de **prédire les performances des arbres à partir de la connaissance des marqueurs moléculaires c'est-à-dire avant que le phénotype ne soit évalué avec des mesures de terrain**. La méthodologie la plus prometteuse actuellement est la **sélection génomique**. L'utilisation de plusieurs milliers de marqueurs moléculaires répartis sur l'ensemble du génome permet d'exploiter les associations entre marqueurs et phénotypes. **Le principe de la sélection génomique (Figure 6) consiste à établir, à partir d'une population d'entraînement phénotypée et génotypée, un modèle pour prédire la valeur génétique d'arbres génotypés mais non phénotypés** (Isik, 2014).

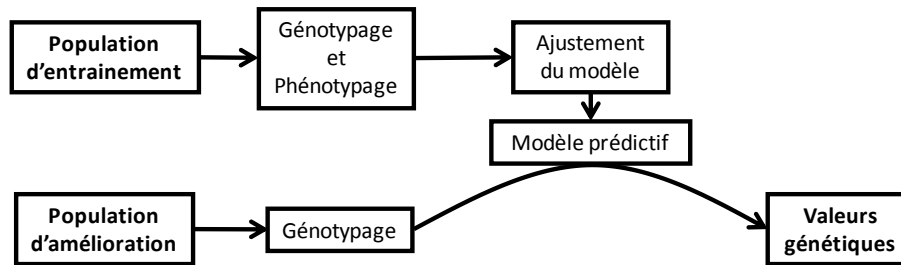


Figure 6 : Description simplifiée de la sélection génomique.

Des travaux de modélisation ont permis de préciser le domaine de validité de la sélection génomique chez les arbres forestiers (Grattapaglia et Resende, 2011). Le nombre de marqueurs disponibles est, pour le moment, encore limitant mais les premières études de faisabilité chez l'eucalyptus, le pin taeda et l'épicéa sont encourageantes (Resende et al., 2012 ; Zapata-Valenzuela et al., 2012 ; Beaulieu et al., 2014). En fournissant une évaluation génétique précoce, la sélection génomique pourrait être utilisée, chez le pin maritime, soit pour diminuer la durée des cycles de sélection soit pour augmenter l'intensité de la sélection. En effet, si l'évaluation génétique obtenue s'avère suffisamment précise, l'étape de sélection serait envisageable au stade plantule au lieu de 12 ans actuellement. Toutefois la durée du cycle de sélection restera contrainte par l'âge de la maturité sexuelle (environ 8 ans). Quant à l'augmentation de l'intensité de sélection, elle serait possible grâce à une étape de pré-sélection basée sur la prédiction génomique. De plus, la sélection génomique pourrait être intéressante pour sélectionner des critères difficiles ou coûteux à évaluer puisque, dans le cadre de la sélection génomique, seuls les individus de la population d'entraînement sont phénotypés. Une étude de faisabilité de la sélection génomique chez le pin maritime est en cours dans le cadre du projet européen ProCoGen (<http://www.procogen.eu/>), elle devrait permettre d'évaluer la précision de l'évaluation génomique et les gains génétiques possibles par rapport à la stratégie actuelle.

Conclusion

L'exploration de la diversité interspécifique constitue une première étape clef dans le choix du matériel végétal, le plus adapté à des conditions de milieux et enjeux de production donnés. Ensuite, l'amélioration génétique représente la meilleure voie pour augmenter durablement et de façon conséquente les performances du matériel végétal pour le reboisement.

Dans le cadre des Landes de Gascogne, le choix s'est porté, au cours du XIX^{ème} siècle, sur le pin maritime et a été conforté par les résultats des essais d'introduction de nouvelles essences forestières le siècle suivant. Le programme d'amélioration a ensuite concentré ses efforts de sélection, depuis les années soixante, sur la provenance locale en raison de sa productivité dans les conditions pédo-climatiques locales difficiles.

Aujourd'hui, l'évolution du contexte économique et environnemental réactive les recherches pour valoriser la variabilité inter- et intra-spécifique. En l'état actuel des connaissances, aucune espèce ne semble pouvoir remplacer le pin maritime dans le massif landais ; mais certaines espèces à croissance rapide pourraient présenter un intérêt sur certaines stations et pour des objectifs spécifiques. Au niveau intraspécifique, l'apport des différentes provenances de pin maritime semble particulièrement intéressant pour essayer d'atteindre l'objectif d'intensification durable de la production. La très grande diversité intraspécifique du pin maritime est un atout incontestable pour faire face à ce nouveau contexte économique et environnemental. Elle pourra être valorisée par la mise en place de stratégies d'amélioration plus dynamiques visant à accélérer les sorties variétales tout en prenant en compte de nouveaux critères de sélection. A moyen terme, la biologie moléculaire pourrait également jouer un rôle important dans ces stratégies novatrices.

Références bibliographiques

- Beaulieu J., Doerksen T., Clément S., MacKay J., Bousquet J., 2014. Accuracy of genomic selection models in a large population of open-pollinated families in white spruce. *Heredity* 113(4), 343-52.
- Bouffier L., Raffin A., Kremer A., 2009. La gestion de la variabilité génétique dans le programme d'amélioration du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). *Revue Forestière Française* LXI 4, 369-388.
- Bouffier L., Raffin A., Alía R., 2013. Maritime pine – *Pinus pinaster* Ait. In: T.J. Mullin, S.J. Lee (Eds), *Best practice for tree breeding in Europe*, Skogforsk, Uppsala, p 65-76.
- Durand R., 2010. Nogent-sur Vernisson et le Domaine des Barres, de la préhistoire à nos jours. 281 p.
- Falconer D.S., Introduction à la génétique quantitative. Paris : Masson, 1974, 284p.
- FCBA, Memento 2014: <http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/memento2014.pdf>
- GIS GPMF, 2014. Matériel Végétal de Reboisement, Cahier de la Reconstitution n°4, 19p.
- Grattapaglia D., Resende M.D.V., 2011. Genomic selection in forest tree breeding. *Tree Genetics and Genomes* 7, 241-255.
- Hamrick J.L., Godt M.J.W., Sherman-Broyles S.L., 1992. Factors influencing levels of genetic diversity in woody plant species. *New Forests* 6(1-4), 95-124.
- Harfourche A., 1995. Variabilité géographique et hybridation interrassiale chez le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, France, 153p.
- Illy G., 1966. Recherches sur l'amélioration génétique du pin maritime. *Annales des Sciences Forestières* 23, 757-948.
- Isik F., 2014. Genomic selection in forest tree breeding: the concept and an outlook to the future. *New Forests* 45, 379-401.
- Muranty H, Jorge V, Bastien C, Lepoittevin C, Bouffier L, Sanchez L, 2014. Potential for marker-assisted selection for forest tree breeding: lessons from 20 years of MAS in crops. *Trees Genetics and Genomes* 10(6), 1491-1510.
- Nybom, H., 2004. Comparison of different nuclear DNA markers for estimating intraspecific genetic diversity in plants, *Molecular Ecology* 13, 1143–1155.
- Resende M.D.V., Resende M.F.R., Sansaloni C.P., Petrolí C.D., Missiaggia A.A., Aguiar A.M., Abad J.M., Takahashi E.K., Rosado A.M., Faria D.A., Pappas G.J., Kilian A., Grattapaglia D., 2012. Genomic selection for growth and wood quality in *Eucalyptus*: capturing the missing heritability and accelerating breeding for complex traits in forest trees. *New Phytologist* 194, 116-128.
- Sargos J., 1998. Histoire de la forêt landaise, du désert à l'âge d'or. Bordeaux : L'Horizon chimérique, 535 p.
- Zapata-Valenzuela J., Isik F., Maltecca C., Wegrzyn J., Neale D., McKeand S., Whetten R., 2012. SNP markers trace familial linkages in a cloned population of *Pinus taeda* – prospects for genomic selection. *Tree Genetics and Genomes* 8, 1307-1318.