



Etude de l'adaptation des arbres forestiers aux changements environnementaux par analyse rétrospective de cernes

Philippe P. Rozenberg

► To cite this version:

Philippe P. Rozenberg. Etude de l'adaptation des arbres forestiers aux changements environnementaux par analyse rétrospective de cernes. Sciences du Vivant [q-bio]. Université d'Orléans, 2009. tel-02814086

HAL Id: tel-02814086

<https://hal.inrae.fr/tel-02814086>

Submitted on 6 Jun 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.

UNIVERSITE D'ORLEANS

RAPPORT

présenté par

Philippe Rozenberg

Chargé de Recherches à l'INRA Orléans

Ingénieur ENITEF

Docteur en Sciences Forestières

EN VUE DE L'OBTENTION DE L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

(DIPLOME NATIONAL INSTITUTE PAR L'ARRETE MINISTERIEL DU 23 NOVEMBRE 1988)

**ETUDE DE L'ADAPTATION DES ARBRES FORESTIERS AUX
CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX PAR ANALYSE
RETROSPECTIVE DE CERNES**

EXPLORER LE BOIS POUR COMPRENDRE L'ADAPTATION

Composition du jury :

Mme **Claire Damesin**, Professeur, Université Paris-Sud XI, Rapporteur

M. **Jean-Marc Bouvet**, Chercheur, CIRAD Montpellier, Rapporteur

M. **Bruno Fady**, Directeur de recherches, INRA Avignon, Rapporteur

M. **Franck Brignolas**, Professeur, Université d'Orléans, Examineur

M. **Alain Franc**, Directeur de recherches, INRA Bordeaux, Examineur

M. **Christophe Plomion**, Directeur de recherches, INRA Bordeaux, Examineur

Etude de l'adaptation des arbres forestiers aux changements environnementaux par analyse rétrospective de cernes

EXPLORER LE BOIS POUR COMPRENDRE L'ADAPTATION

SOMMAIRE

Préambule	5
Introduction	6
1. Quelle valeur adaptative pour le bois ?	8
1.1 Mise en évidence de la valeur adaptative de la densité du bois : lien densité du bois - survie	9
1.2 Mise en évidence de la valeur adaptative du bois : mécanismes physiologiques de la résistance à la cavitation	10
2. Réponse bois à la pression de sélection climatique	13
2.1 Héritabilité de la réponse bois : approche <i>ex-situ</i>	13
2.1.1 dispositifs expérimentaux en forêt de l'amélioration génétique	14
2.1.2 dispositifs expérimentaux en conditions contrôlées	17
2.2 héritabilité de la réponse bois : approche <i>in-situ</i>	18
3. Dendroplasticité, ou la plasticité phénotypique de la réponse bois aux variations du climat	21
4. Limites d'aires et assemblages d'espèces le long de forts gradients environnementaux : le cas des gradients altitudinaux	24
5. Conclusions et perspectives	25

6. Organisation de la recherche	25
6.1 Les équipes	26
6.1.1 INRA Orléans	26
6.1.2 Région Centre.....	27
6.1.3 Autres collaborations importantes en France.....	27
6.1.4 Hors de France	29
6.2 Les projets en cours ou soumis.....	29
6.2.1 Projets finançant uniquement des voyages et des séjours (pas d'activités de recherche).....	29
6.2.2 Projets finançant des activités de recherche	31
7. Références.....	33

PREAMBULE

Ce rapport d'HDR est construit comme l'exposé du projet de recherche que je souhaite conduire dans les années qui viennent. Ce projet de recherche est désigné par la formule « le projet » dans le reste de ce document. Son point de départ remonte principalement à la thèse que j'ai soutenue en 2001, bien que certaines questions soient plus anciennes. Il s'appuie sur les résultats disponibles dans la littérature scientifique et sur d'autres, originaux, obtenues en collaboration avec des collègues et des étudiants depuis la soutenance de ma thèse. Ce rapport présente donc des résultats scientifiques, en déduit des questions de recherche et présente les activités mises en œuvre et les moyens mobilisés pour y répondre, notamment les collaborations et les sources de financement.

INTRODUCTION

Les arbres forestiers sont des organismes sessiles et particulièrement longévifs. Dans leurs aires naturelles, ils sont exposés à de fortes variations environnementales, aussi bien géographiques (à des échelles et des intensités variables entre individus et entre populations) que temporelles (au cours de la vie des individus et au fil des générations). De nombreuses espèces sont introduites par les forestiers dans des environnements nouveaux, parfois notablement différents de leurs environnements d'origine, avec des succès variables selon les espèces et les régions d'introduction (pin radiata, eucalyptus, douglas). Le changement climatique global est une composante récente des variations environnementales subies par les arbres. L'augmentation de température qui le caractérise est à la fois rapide et d'intensité élevée [Meehl & Tebaldi, 2004], avec toutefois de fortes disparités géographiques : elle est notamment plus marquée aux latitudes et aux altitudes élevées [Rebetez *et al.*, 2006].

Pour les espèces introduites, le changement climatique tend parfois à accentuer les écarts entre les climats des aires d'origine et les climats des aires d'introduction. Par exemple, en France, le douglas, originaire de régions où les précipitations dépassent 1200 mm par an, a été introduit dans des régions à moins de 800 mm où, aujourd'hui, les précipitations auraient tendance à diminuer et les températures à augmenter [Martinez-Meier *et al.*, 2008b]. Dans les aires naturelles, le changement climatique pourrait pousser les écosystèmes forestiers au-delà de leur capacité d'adaptation ([Bower & Aitken, 2008, Breda *et al.*, 2006]). Comment s'adaptent aujourd'hui les arbres forestiers, dans leurs aires naturelles et leurs aires d'introduction, par rapport à leur réponse passée et par rapport à leur réponse actuelle dans d'autres environnements ?

L'adaptation comprend trois mécanismes, l'évolution, ou réponse aux pressions de sélection, qui s'appuie sur la variance génétique et s'exprime au fil des générations, la plasticité phénotypique, qui est une réponse individuelle à plus court terme et la migration, qui explique les variations des contours des aires naturelles des espèces, façonnées par la variabilité des climats. Ces trois mécanismes tendent à harmoniser les populations avec leurs environnements. L'étude des expansions post - glaciaires en Europe [Liepelt *et al.*, 2009] montre que la migration est un mécanisme naturel très lent qui ne peut offrir aux espèces forestières une solution satisfaisante face au changement climatique. Les deux autres mécanismes constituent l'adaptation sur place. Quelle est leur part respective dans la réponse adaptative des arbres forestiers ? L'objectif de ce projet est d'étudier le potentiel spécifique des deux mécanismes dans l'adaptation sur place d'espèces forestières soumises à de fortes variations environnementales, notamment au changement

climatique global. Pour cela, on utilise l'information contenue dans les cernes successifs produits par les arbres pendant leur croissance (figure 1).

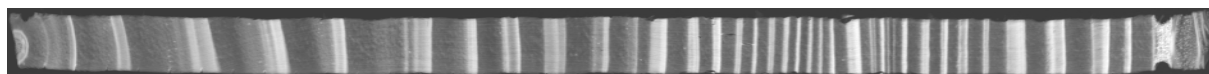


Figure 1 : Radiographie d'un échantillon de bois montrant la succession des cernes depuis le cœur de l'arbre (gauche) jusqu'à l'écorce (droite).

L'analyse des cernes successifs permet d'expliquer les variations du fonctionnement de l'arbre dans le temps, sur autant d'années que de cernes présents dans le tronc. La réponse bois peut être probablement interprétée en terme de valeur adaptative (fitness), puisque le bois joue un rôle majeur dans le fonctionnement de l'arbre : la conduction de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles. La mesure de la variabilité génétique et de l'héritabilité de caractères du bois impliqués dans la conduction de la sève permet d'estimer le potentiel de réponse des populations à des pressions de sélection. La structure particulière des cernes, qui, en climat tempéré, s'accumulent sous forme d'une succession de bois initial et de bois final permet également d'estimer de façon originale la plasticité phénotypique [Sanchez-Vargas *et al.*, 2007]. Ces approches sont ou seront mises en œuvre sur plusieurs espèces, dans leurs aires d'introduction et/ou dans leurs aires naturelles, sous notre responsabilité directe pour des espèces des genres *Larix*, *Pinus*, *Populus* et *Pseudotsuga* et en collaboration avec d'autres laboratoires de recherche en France et hors de France pour d'autres espèces des genres *Fagus*, *Nothofagus* et *Pinus*.

Des analyses de structuration géographique de la diversité génétique à l'échelle d'aires naturelles ou de gradients altitudinaux et latitudinaux ont permis de révéler la capacité de réponse de populations à des pressions de sélection exercées par des variables environnementales, comme la photopériode [Garcia-Gil *et al.*, 2003], la température ou la disponibilité en eau ([Eveno *et al.*, 2008], [Bucci *et al.*, 2007]). En montagne, une même espèce se distribue le long de gradients altitudinaux dont l'ampleur correspond à des variations de température moyenne annuelle supérieures à celles prédites dans le cadre du changement climatique. Les arbres sont donc adaptés à des conditions environnementales extrêmement différentes sur de très courtes distances. Les variations du milieu le long d'un gradient altitudinal expliquent potentiellement comment s'est modelée la distribution spatiale adaptative des arbres. Les différences de réaction d'un même individu au fil du temps permettent d'apprécier l'effet des changements climatiques récents. Les différences entre individus permettent d'estimer la variabilité de la réponse entre et au sein des différents niveaux altitudinaux. L'analyse conjointe des deux niveaux de variation (le spatial entre individus et le temporel pour chaque individu) permettra l'inférence du potentiel adaptatif au sein d'une population couvrant un gradient. Les outils de la génétique moléculaire permettent d'apprécier la composante génétique de cette variabilité. Les

gradients altitudinaux sont donc des modèles remarquables pour étudier les effets de fortes variations climatiques au sein d'une même population : ce seront des milieux d'étude privilégiés dans les années qui viennent.

Ce projet est structuré de la façon suivante :

L'analyse des mécanismes physiologiques de la réponse de l'arbre aux variations de la disponibilité en eau dans son environnement devrait nous donner des informations sur la valeur adaptative du bois (1ère partie). L'étude rétrospective de la réponse bois à la pression de sélection climatique (2^{ème} partie) fournira des informations sur le potentiel d'adaptation par modification de la structure génétique de populations d'arbres. Ce potentiel peut être mesuré grâce à l'héritabilité estimée *ex-situ* (en dispositifs expérimentaux) ou à l'héritabilité estimée *in-situ* (en populations naturelles). La réponse individuelle à court terme des génotypes, qui devrait jouer un rôle important face au changement climatique, peut être mesurée rétrospectivement grâce à la dendroplasticité (3ème partie). De forts gradients environnementaux sont des milieux pertinents pour l'étude de la réponse des forêts au climat.

1. QUELLE VALEUR ADAPTATIVE POUR LE BOIS ?

En climat tempéré, durant la saison de végétation, le cambium produit par division cellulaire les cellules du xylème secondaire (bois). Ces cellules s'empilent sous forme de cernes concentriques pour construire le tronc. Le xylème soutient l'arbre, contient des réserves (hydrates de carbone et lipides) et conduit la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles [Plomion *et al.*, 2001]. Le débit de la sève brute est influencé par les propriétés hydrauliques du bois : les principales, conductivité spécifique et vulnérabilité à la cavitation, dépendent des dimensions internes des cellules conductrices du xylème (trachéides chez les résineux, vaisseaux chez les feuillus). La vulnérabilité à la cavitation dépend également des caractéristiques des ponctuations [Pittermann *et al.*, 2006]. Les arbres ayant une conductivité élevée peuvent théoriquement mieux profiter de conditions d'alimentation en eau favorables. Les arbres ayant une faible vulnérabilité à la cavitation résistent mieux à la sécheresse [Cochard *et al.*, 2008]. Donc la variation des caractères du bois qui influencent les propriétés hydrauliques doit affecter également la croissance, la survie et la reproduction, c'est à dire la valeur adaptative (fitness) des populations d'arbres. De nombreuses espèces d'arbres sont caractérisées par des associations étroites entre préférences écologiques et caractéristiques anatomiques et hydrauliques du bois [Carlquist, 1977]. Si les propriétés anatomiques du bois varient entre individus, celles correspondant à des propriétés hydrauliques avantageuses seront sélectionnées sous la pression du climat ; si ces propriétés anatomiques et hydrauliques sont sous

contrôle génétique, c'est-à-dire s'il y a variation des fréquences alléliques dans la population, il peut y avoir évolution. La composition génétique varie alors dans le temps, tendant à harmoniser la population avec son environnement : la population s'adapte aux nouvelles conditions environnementales. Dispersion (ou migration) tout comme les mutations et les recombinaisons accompagnant la reproduction sexuée contribuent à l'évolution en enrichissant la population avec de nouveaux allèles. L'estimation de l'héritabilité de caractères génétiquement corrélés à la valeur adaptative (fitness) peut contribuer à l'étude de la réponse à la sélection naturelle [Visscher *et al.*, 2008].

1.1 MISE EN EVIDENCE DE LA VALEUR ADAPTATIVE DE LA DENSITE DU BOIS : LIEN DENSITE DU BOIS - SURVIE



Figure 2 : feuillage de douglas affecté par la canicule de 2003, août 2003, Orléans.

L'augmentation de la densité du bois dans le cerne depuis le bois initial vers le bois final est liée à une rupture de l'équilibre entre disponibilité et demande en eau [Domec & Gartner, 2002] : cette augmentation de densité est une mesure de la réponse de l'arbre à la modification de cet équilibre. Cette réponse est un caractère adaptatif si la réponse elle-même et/ou sa variation entre individus influence

la valeur adaptative de la population.

Relativement exigeant en eau pendant la saison de végétation, le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) a été récemment confronté à des sécheresses marquées, notamment en 2003 et a montré des symptômes de dépérissements aboutissant parfois à la mort des arbres [Martinez-Meier *et al.*, 2008b] (figure 3). Le douglas est une espèce forestière originaire de l'ouest de l'Amérique du Nord. Elle a été largement introduite en France à partir de régions maritimes à fortes précipitations de son aire naturelle. Elle est appréciée par les sylviculteurs grâce à sa productivité et par les utilisateurs de bois grâce à ses bonnes propriétés mécaniques.

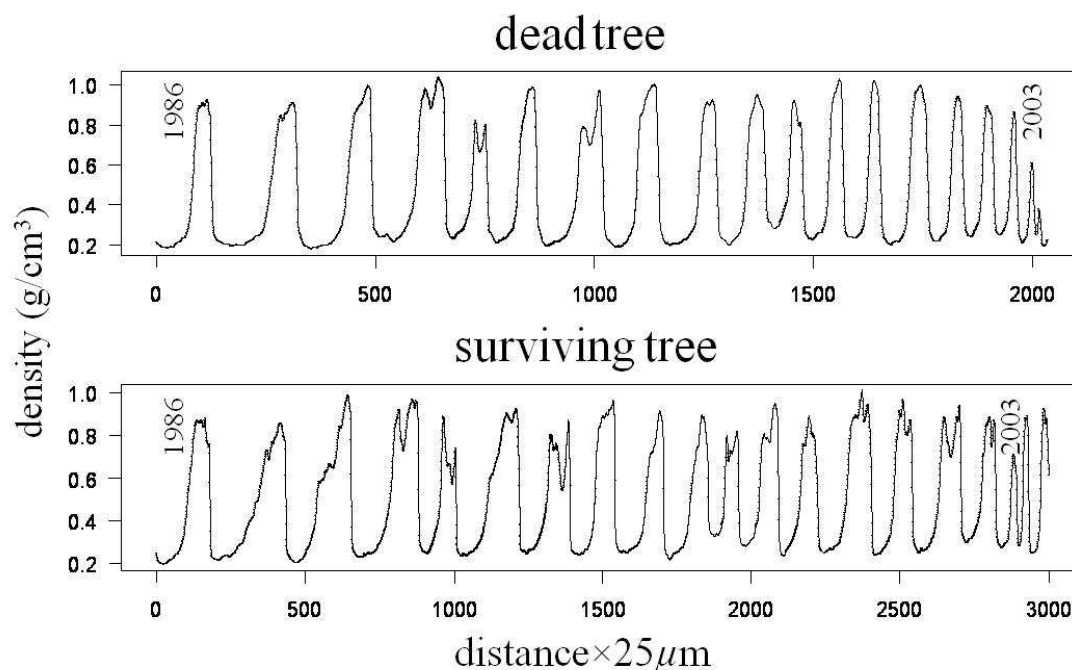


Figure 3 : le profil microdensitométrique du haut est celui d'un douglas mort peu de temps après la canicule de 2003 (courant 2004). Le profil du bas est celui d'un arbre ayant survécu. La comparaison systématique des profils microdensitométrique des douglas morts et vivants montre que les arbres survivants ont un bois final plus dense et en proportion plus importante que les arbres morts. On en déduit qu'il existe un lien entre densité du bois et capacité de survie et que le mécanisme impliqué fait intervenir les propriétés hydrauliques du bois [Martinez-Meier *et al.*, 2008b]

Le douglas est amélioré génétiquement à l'INRA Orléans (responsables du programme d'amélioration, Jean-Charles Bastien et Leopoldo Sanchez) et est donc planté dans un vaste réseau de dispositifs expérimentaux permettant d'estimer l'héritabilité des caractères mesurés et donc les potentiels de réponse à des pressions de sélection, notamment pour les caractères ayant une valeur adaptative. Certains de nos résultats récents [Martinez-Meier *et al.*, 2008b] montrant que la densité du bois a probablement une valeur adaptative servent d'assise aux travaux développés aujourd'hui dans les deux projets Dryade (ANR Vulnérabilité, coordonné par Nathalie Bréda, INRA Nancy) et Dendro-PAF (Ministère de l'Agriculture, coordonné par P. Rozenberg). Ces deux projets ont notamment pour objectif d'étudier directement et indirectement la variabilité et la génétique de propriétés hydrauliques du bois chez le douglas et le mélèze et leurs liens avec la densité du bois.

1.2 MISE EN EVIDENCE DE LA VALEUR ADAPTATIVE DU BOIS : MECANISMES PHYSIOLOGIQUES DE LA RESISTANCE A LA CAVITATION

Le profil microdensitométrique enregistre la réponse de l'arbre aux variations de l'équilibre entre disponibilité en eau dans l'environnement et demande en eau, et cette réponse est héritable [Martinez-Meier *et al.*, 2009]. La densité est donc probablement un caractère adaptatif [Martinez-Meier *et al.*, 2008b]. La densité est liée à l'anatomie (proportion lumen / paroi), notamment chez le douglas

[Rathgeber *et al.*, 2006]. L'anatomie (par l'intermédiaire du diamètre intérieur des conduits en particulier) est elle-même liée aux propriétés hydrauliques du bois [Sperry *et al.*, 2006].

Donc on s'attend à trouver des liens entre densité et propriétés hydrauliques du bois, et une variabilité génétique significative pour les propriétés hydrauliques du bois [Dalla-Salda *et al.*, 2009]. La démonstration de l'existence de tels liens permettrait de comprendre pourquoi la densité semble avoir une valeur adaptative, comme tendent à le montrer les résultats de la comparaison de la microdensité du bois d'arbres morts et vivants après la canicule de 2003 [Martinez-Meier *et al.*, 2008b].

Des progrès méthodologiques récents nous ont permis de commencer à mesurer directement les propriétés hydrauliques du bois sur un nombre d'arbres plus important qu'avec les méthodes conventionnelles : le Cavitron, développé par H. Cochard au PIAF INRA Clermont-Ferrand, permet de mesurer la vulnérabilité à la cavitation sur des échantillons de bois massif au rythme de environ 10 échantillons par jour [Cochard *et al.*, 2005]. Ces mesures nous ont permis de mettre en évidence des résultats originaux (exemple figure 4).

A Orléans, nous avons développé une méthode originale de mesure localisée de la conductivité spécifique sur rondelles de bois qui permet de travailler facilement sur plusieurs dizaines d'échantillons par jour [Dalla-Salda *et al.*, 2009]. Il n'est pas encore possible de phénotyper en masse des populations importantes, mais le nombre

d'arbre analysé est dès maintenant suffisant pour mettre en évidence des différences significatives entre clones pour la conductivité spécifique et pour la vulnérabilité à la cavitation, ouvrant ainsi la porte à l'exploration plus systématique de la variabilité génétique et environnementale des propriétés hydrauliques du bois et de la résistance à la sécheresse. Ces résultats sont issus du projet de recherche de G. Dalla-Salda, chercheuse contractuelle Argentine dans le cadre du projet européen Alfa II GEMA, puis dans le cadre d'un CDD financé par le département EFPA, jusque début 2009, en collaboration avec Hervé Cochard, INRA Clermont-Ferrand [Dalla-Salda *et al.*, 2009]. Nous avons mis en évidence un taux de cavitation extrêmement variable chez le douglas après la sécheresse de 2003

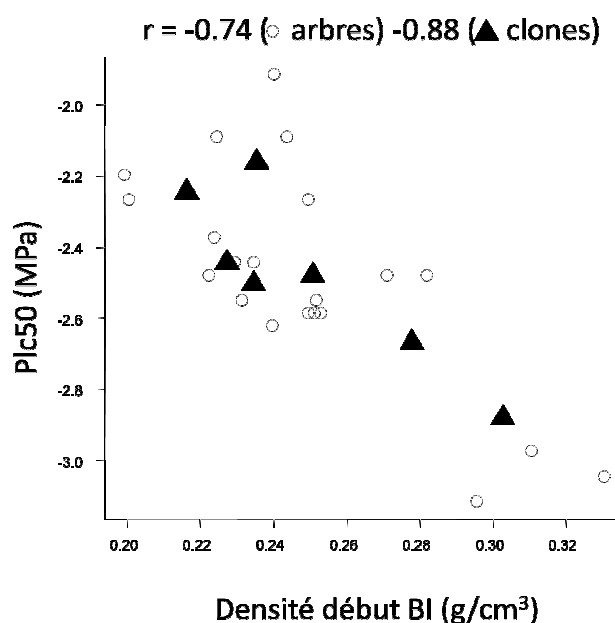


Figure 4 : relation entre Plc50 (pression pour laquelle la conductivité spécifique du bois est diminuée de 50%) et la densité du début du bois initial (les deux premiers millimètres de bois initial dans le cerne). Dalla-Salda *et al.*, résultats en cours de publication.

(avec de très fortes variations de conductivité spécifique résiduelle de l'ordre de 1 à 100), aboutissant dans un site expérimental particulier (Chassenoix, dans le Morvan) à un arrêt presque total de la conduction de la sève brute. Pour l'instant, ces travaux ont été réalisés à échelle relativement réduite, peu de temps après la canicule de 2003, et permettent de formuler un certain nombre d'hypothèses et de nouvelles questions.

Jusqu'à présent, l'héritabilité des caractères impliqués dans la résistance à la sécheresse a été estimée à l'aide de clones (héritabilité au sens large) : quelle est la part additive (et donc réellement utilisable en sélection et amélioration) de la variance génétique ? Le nombre d'arbres qui peut être raisonnablement étudié par unité de temps avec les nouvelles méthodes de mesure des propriétés hydrauliques ne permettra d'estimer précisément des paramètres génétiques qu'à condition de faire un très gros et coûteux effort de mesure. Or ces paramètres, notamment l'héritabilité, pourraient avantageusement être estimés indirectement, sur des caractères mesurables à moindre coût et de façon non-destructive. Cependant les résultats de G. Dalla-Salda (en cours de publication) mettent également en évidence de fortes relations entre propriétés hydrauliques du bois et variables microdensitométriques, beaucoup plus faciles et moins coûteuses à mesurer (figure 4) : si ces relations se confirment, elles permettront d'estimer indirectement des paramètres génétiques pour ces propriétés hydrauliques du bois.

De plus, de nouveaux progrès méthodologiques, notamment pour la mesure de la conductivité spécifique, sont envisagés et seront testés lors des prochaines saisons de végétation. Les étapes suivantes consistent donc à confirmer à grande échelle l'existence de ces relations, à mettre au point des méthodes de mesure de la conductivité spécifique encore plus précises et efficaces et à estimer précisément les paramètres génétiques pour les différentes variables expliquant directement ou indirectement les propriétés hydrauliques du bois. Concrètement, cela veut dire :

- i) confirmer les liens entre propriétés hydrauliques du bois et caractères de microdensité du bois mesurés à l'endroit même de la mesure de la conductivité,
- ii) développer et tester une méthode de mesure de la conductivité hydraulique sur carottes, ce qui simplifiera considérablement la méthodologie et donnera accès à du matériel végétal précieux qui ne peut être échantillonné de manière destructive,
- iii) utiliser des dispositifs expérimentaux de comparaison de familles pour estimer des héritabilités au sens strict : si on démontre directement ou indirectement que des propriétés hydrauliques du bois sont fortement héritable, cela signifie que les phénotypes les plus favorables peuvent être sélectionnés sous la pression du climat et que les populations peuvent évoluer pour s'adapter au changement climatique.

Ces activités ont fait l'objet d'une demande de financement auprès de la région Centre, par l'intermédiaire d'un projet de recherche déposé fin décembre 2008. Ce projet, Xylome, regroupe cinq équipes de la région Centre et propose de mettre en œuvre la stratégie décrite ci-dessus pour étudier les conséquences du changement climatique principalement sur une espèce-modèle, le douglas et de façon plus légère et exploratoire sur plusieurs autres espèces-cible, les pins des forêts du Centre : pins sylvestre, pin laricio et pin maritime. Enfin, G. Dalla-Salda est retournée en Argentine en février 2009 et vient de débiter en collaboration avec l'INRA Orléans un nouveau projet de recherche Argentin également consacré à l'étude des propriétés hydrauliques du bois chez le douglas.

2. REPONSE BOIS A LA PRESSION DE SELECTION CLIMATIQUE

Les événements climatiques extrêmes sont des opportunités exceptionnelles d'observer et de mesurer la réponse bois des arbres forestiers, sa variabilité environnementale et génétique et son héritabilité. Puisque ces événements sont imprévisibles, il est rarement possible de réaliser des observations en temps réel. L'analyse rétrospective de l'enregistrement bois de la réponse de l'arbre à des événements climatiques choisis est donc un outil précieux dans ce cas.

2.1 HERITABILITE DE LA REPONSE BOIS : APPROCHE *EX-SITU*

L'approche *ex-situ* consiste à étudier du matériel végétal d'origine connue planté en dehors de son aire naturelle, de préférence installé dans des dispositifs expérimentaux permettant de contrôler les variations locales de l'environnement : il s'agit principalement des dispositifs expérimentaux de l'amélioration génétique des arbres forestiers.

L'utilisation du bois comme marqueur de la réponse de l'arbre aux variations du climat est ancienne : les dendrochronologues ont depuis plus d'un siècle synchronisé de longues séries temporelles permettant de reconstituer et étudier les variations des climats passés [Fritts, 1976]. L'approche consistant à utiliser le signal bois comme un marqueur de la réponse adaptative des populations d'arbres forestiers est plus récente, plus rare mais semble particulièrement efficace ([Rozenberg *et al.*, 2004], [Paiva *et al.*, 2008], [Eveno *et al.*, 2008]). Alors que l'approche des dendrochronologues consiste à extraire d'un groupe de séries temporelles collectées sur plusieurs arbres la tendance commune caractéristique des variations du climat, celle des généticiens consiste à mettre en évidence et à expliquer la variabilité entre arbres de la réponse enregistrée dans le bois et à séparer ses composantes environnementales et génétiques. Elle nécessite donc de connaître ou d'inférer la structure génétique ou d'apparentement de la population étudiée.

2.1.1 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX EN FORET DE L'AMELIORATION GENETIQUE

L'approche de génétique quantitative utilisant les dispositifs expérimentaux installés par les améliorateurs des arbres forestiers est particulièrement pertinente aujourd'hui : de nombreux dispositifs installés dans les années 70 et 80 sont en excellent état aujourd'hui. Ils abritent des collections d'arbres âgés parfois de plus de 40 ans, donc ayant subi l'apparition et la totalité du développement du changement climatique global. Souvent, après une ou deux éclaircies et un certain taux de mortalité, les effectifs sont encore suffisamment élevés pour travailler avec une bonne puissance statistique. Le matériel végétal est structuré en provenances, en familles ou en clones. Ces groupes d'unités génétiques représentent d'un dispositif expérimental à l'autre une part très dissemblable et relativement complémentaire, aussi bien en moyenne qu'en variance, de la diversité existant au sein des espèces concernées.

A partir de 1999, d'abord dans le cadre du projet européen Geniality (coordonné par C. Cahalan, Université de Bangor, Grande-Bretagne) puis dans le cadre du projet européen Eudirec (coordonné par B. Héois, CEMAGREF), nous avons mis en évidence l'existence d'un potentiel de sélection (valeurs d'héritabilités au sens large variant de 0,4 à 0,8) pour des caractères du bois traduisant une réponse de l'arbre à des événements climatiques du type sécheresse chez deux espèces forestières, l'épicéa commun [Rozenberg *et al.*, 2002] et le douglas [Rozenberg *et al.*, 2004] (figure 5).

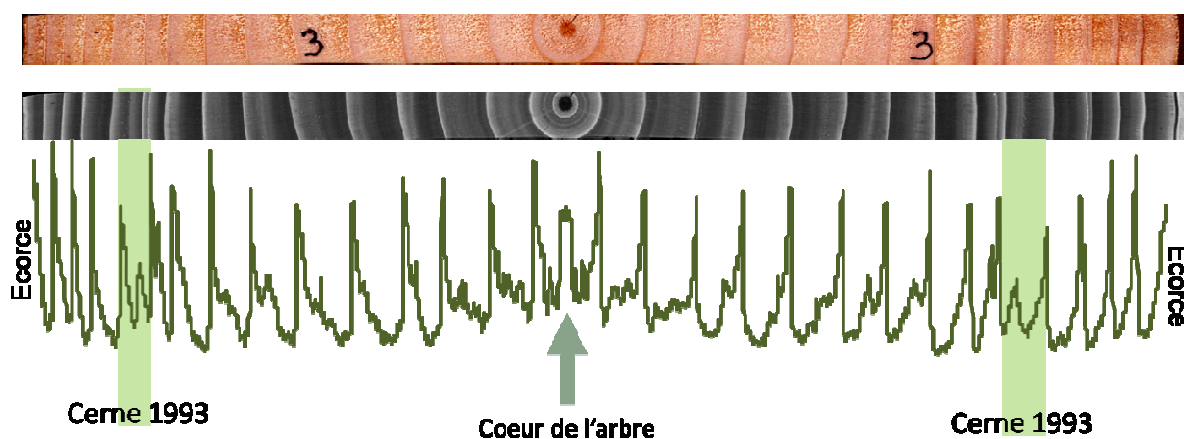


Figure 5 : Un échantillon de bois récolté sur un épicéa commun (en haut), son image aux rayons X (au milieu) et le profil microdensitométrique correspondant (en bas). Sur ce profil, le cerne 1993 présente un pic de densité (faux-cerne) dans le bois initial, provoqué par une période de sécheresse en début de saison de végétation. Les caractéristiques de ce faux-cerne (densité maximale, largeur et position dans le cerne) sont variables et héritable ([Rozenberg *et al.*, 2002]).

En utilisant des tests clonaux on peut mettre en évidence une éventuelle variabilité génétique tout en étudiant un plus petit nombre d'arbres qu'avec des tests de comparaison de provenances ou de familles, donc à moindre coût et moindre risque. L'inconvénient est que les tests clonaux ne permettent d'estimer que l'héritabilité au sens large, alors que la part de la variation utilisable en sélection, la part additive, est mesurée par l'héritabilité au sens strict (avec les outils de la génétique

quantitative, estimable en tests de comparaisons de familles exclusivement). Dans le cadre du projet Alfa II GEMA, en collaboration avec le FCBA (mise à disposition de trois tests clonaux de douglas, collaboration A. Bailly et J.-Y. Gautry), puis également avec les relais récents des projets Dryade et Dendro-PAF, nous étudions la réponse microdensitométrique de clones de douglas et de mélèze à des événements climatiques extrêmes récents, caractéristiques du changement climatique en cours, notamment la sécheresse et canicule de 2003. Dans le cadre du projet Xylome (soumis fin décembre 2008 à la région Centre) nous proposons d'estimer la part additive du potentiel de réponse du douglas aux pressions de sélection climatiques.

Le mélèze (*Larix decidua* Mill.), l'autre espèce modèle de ce chapitre avec le douglas, est autochtone en Europe et en France, dans ce cas en situation montagnarde. Il est introduit en plaine, à partir de provenances d'Europe centrale de basse ou moyenne altitude. Moins répandu que le douglas, on le présente souvent comme une alternative prometteuse. Le mélèze est amélioré génétiquement à l'INRA Orléans (responsable du programme d'amélioration L. Pâques) et est donc planté dans un vaste réseau de dispositifs expérimentaux permettant notamment d'estimer l'héritabilité des caractères mesurés et donc ses potentiels de réponse à des pressions de sélection, notamment pour les caractères ayant une valeur adaptative.

Les projets Dryade et Dendro-PAF ont servis et servent encore également à financer les activités de recherche dans le cadre des thèses de deux jeunes chercheurs Argentins de l'INTA (équivalent de l'INRA en Argentine), M. A. Martinez (sur douglas, dirigée par P. Rozenberg, avec co-encadrement de L. Sanchez) et Mme M.-E. Gauchat (sur mélèze, dirigée par L. Pâques, avec la participation de P. Rozenberg). A. Martinez vient de soutenir sa thèse¹ et M.-E. Gauchat doit soutenir la sienne à l'automne 2009. Deux articles publiés ([Martinez-Meier *et al.*, 2008b], [Martinez-Meier *et al.*, 2008a]), un troisième tout juste accepté [Martinez-Meier *et al.*, 2009] et plusieurs autres en préparation contiennent les résultats de ces travaux. En résumé, nous avons montré que :

- i) le bois du douglas et du mélèze enregistre de façon détaillée la réponse du cambium à des événements climatiques particuliers [Martinez-Meier *et al.*, 2008a];
- ii) la sécheresse et canicule de 2003 s'est notamment manifestée par un arrêt précoce de la formation du bois en cours de saison de végétation, conduisant à la formation d'un cerne 2003 plus étroit, contenant moins de bois final, moins dense que les cernes des années immédiatement suivante et précédente. Le cerne fabriqué en 2004 est plutôt semblable à ceux formés durant les années précédent 2003 [Martinez-Meier *et al.*, 2008a] ;

¹ à Paris le 13 janvier 2009, avec mention très honorable et les félicitations écrites du jury

- iii) la réponse des arbres, telle qu'elle est enregistrée par leur bois, est génétiquement contrôlée, ce qui confirme qu'il existe bien un potentiel de réponse à une pression de sélection au sein de ces espèces [Martinez-Meier *et al.*, 2008a]. Est-ce que ce potentiel est suffisant pour permettre aux arbres de supporter le changement climatique global ?

Une étude entreprise parallèlement dans un autre dispositif expérimental de douglas (test de comparaison de provenances de douglas en forêt d'Orléans) a permis de rechercher des différences systématiques entre arbres ayant succombés et arbres survivants après la canicule de 2003, pour les variables microdensitométriques des cernes précédents 2003. Les résultats montrent que les arbres survivants ont de façon significative un peu plus de bois final, un peu plus dense, que les arbres morts [Martinez-Meier *et al.*, 2008b]. Ces résultats appuient l'idée que le bois joue un rôle dans la valeur adaptative des populations d'arbres, certainement par l'intermédiaire des propriétés hydrauliques comme la conductivité spécifique et la résistance à la cavitation [Cochard *et al.*, 2008] ou encore par l'intermédiaire de ses capacités de réserve. D'autre part, des valeurs d'héritabilités significativement différentes de zéro ont été également mises en évidence dans d'autres études [Martinez-Meier, 2009] pour les caractères différenciant significativement (dans notre étude) les arbres morts des arbres survivants : il existe donc un certain potentiel de réponse aux pressions de sélection au sein de ces populations de douglas pour des caractères associés à la capacité de survie après une canicule.

Lors de cette dernière étude, un seul dispositif de comparaison de provenances de douglas a été utilisé (forêt d'Orléans), peu puissant statistiquement car déjà éclairci deux fois. Ce dispositif contenait des provenances considérées comme peu adaptées aux conditions climatiques des régions de reboisement françaises (provenances du sud et de l'intérieur de l'aire naturelle) : elles ont été éliminées au cours des éclaircies successives. Cependant certaines de ces provenances pourraient présenter de nouveau un intérêt dans le cadre de l'étude de l'effet du changement climatique (car elles sont issues du sud et de l'intérieur de l'aire naturelle et sont parfois considérées comme plus xérophiles que les provenances de douglas côtier de l'état de Washington utilisées en reboisement en France). Or de nombreux autres dispositifs âgés existent dans différentes régions de France, qui doivent permettre plus efficacement de rechercher une éventuelle variabilité entre provenances de la réponse du douglas au changement climatique, pour une gamme de provenances couvrant une large part de l'aire naturelle. C'est le projet développé dans le cadre de la thèse d'A.-S. Sargent, co-encadrée par N. Bréda (INRA Nancy) et P. Rozenberg (avec les participations de J.-C. Bastien et L. Sanchez de l'INRA Orléans, soutenance prévue fin 2010). Les activités réalisées à ce jour, visites et inventaires des dispositifs potentiellement les plus intéressants, récolte de carottes de bois et obtention des premiers profils de microdensité, permettront de réaliser l'étude de la variabilité de la

réponse microdensitométrique du douglas aux changements climatiques à une échelle environnementale et génétique beaucoup plus vaste que celle de l'étude déjà publiée.

Pour l'instant la réponse du douglas a été observée sur très peu d'années après la canicule. Comment se comporte le douglas cinq ans et plus après la canicule ? La canicule a-t-elle des effets différés ? Certaines années récentes ont été climatiquement très différentes de 2003, comme 2007 et 2008, fraîches et relativement humides, donc favorables à la croissance du douglas : quelles sont les relations entre les différentes réponses observées après 2003 et la croissance en 2007 et 2008 ? On peut tenter de répondre à ces questions soit en récoltant à nouveau des carottes et en réalisant des profils microdensitométriques (dans les dispositifs déjà étudiés après 2003 ou dans de nouveaux dispositifs à choisir au sein du réseau de l'amélioration génétique des arbres forestiers), soit en installant des expériences en conditions contrôlées.

2.1.2 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX EN CONDITIONS CONTROLEES

En conditions naturelles, sur la durée relativement courte des projets que nous mettons en œuvre, nous n'avons que rarement l'occasion d'observer des événements climatiques extrêmes du type de la sécheresse de 2003 et leurs effets, ou, quand nous les observons, il est rare que les équipes de recherche aient la capacité d'observer et de mesurer la réponse instantanée des écosystèmes. Par exemple, l'observation de la réponse immédiate à la canicule 2003 a été très limitée. De plus, les années qui ont suivi 2003 ont été relativement fraîches et humides et ne permettent pas de répondre à une question fondamentale : quel est l'effet de l'accumulation de plusieurs périodes de sécheresse successives sur la réponse des arbres forestiers ? Cette question est essentielle car dans le contexte du changement climatique global, les climatologues prédisent une augmentation non seulement de l'intensité, mais aussi de la fréquence des sécheresses. C'est pourquoi il est essentiel d'installer des dispositifs expérimentaux de suivi d'arbre sous serre, pour la croissance, la fabrication du bois et des variables écophysiologiques, de façon à faire subir à ces génotypes choisis des stress hydriques contrôlés, répétés, d'intensité et de durée variables, durant au moins deux saisons de végétations consécutives en mesurant en direct les variables pertinentes. Le nombre d'arbres installés dans ce type de dispositifs est nécessairement plus petit que celui mesuré dans les dispositifs expérimentaux en plein champ de l'amélioration génétique. Par contre les variables étudiées sur ces arbres peuvent être beaucoup plus nombreuses et être mesurées de façon beaucoup plus intensive et précise ; les arbres installés dans ce type de dispositif peuvent être équipés d'instruments permettant de suivre très distinctement leurs réactions vis-à-vis des variations de la disponibilité en eau dans leur environnement : mesures de croissance radiale en continue, de flux de sève, de potentiel hydrique, de teneur en eau dans les pots, de température du sol et de l'air

sont aujourd'hui réalisables à un coût compatible avec les financements proposés dans beaucoup d'appels d'offre. Le nombre d'arbres en dispositif doit être suffisamment important pour qu'en fin de projet une partie d'entre eux au moins puisse être coupée et leur bois analysé pour ses propriétés hydrauliques, son anatomie et/ou sa microdensité. Ce type de dispositif permettra notamment de donner de nouvelles indications précises et rigoureuses sur les liens entre les différents caractères impliqués dans la réponse aux déficits hydriques et avec la fitness. L'installation de ces dispositifs fait l'objet du projet Xylome, soumis fin décembre 2008 auprès de la région Centre et qui vient d'être accepté. Dans le cas du futur projet Xylome, la responsabilité des mesures écophysiologiques dans le dispositif expérimental en conditions contrôlées sera confiée à l'équipe ARCHE du LBLGC de l'université d'Orléans (F. Brignolas, C. Barbaroux et D. Morabito)

2.2 HERITABILITE DE LA REPONSE BOIS : APPROCHE *IN-SITU*

Pour élargir la gamme de situations pour l'étude de la génétique de la réponse des arbres, nous développons depuis quelques années des projets visant à l'apprécier *in-situ*, c'est-à-dire en populations naturelles, en utilisant les outils récents d'estimation de la variation génétique sans contrôle du pedigree et de l'environnement à l'aide de marqueurs moléculaires neutres [Ritland, 2000]. Ces outils peuvent se révéler extrêmement utiles pour les arbres forestiers, car ils pourraient se substituer aux dispositifs expérimentaux d'évaluation de la variabilité génétique, pas forcément disponible aujourd'hui, coûteux à installer et ne fournissant des résultats qu'après plusieurs années. A partir de la description de la structure d'apparentement de populations d'arbres en forêt, ces outils permettent d'obtenir une idée de la variabilité génétique de caractères essentiels comme les caractères d'adaptation et de résistance.

Nous avons mené un premier projet (projet innovant du département EFPA, 2005, coordination P. Rozenberg et L. Sanchez, [Sanchez L., 2006] un article en préparation) qui a montré que les paramètres importants contrôlant la qualité des estimations sont la taille de la population, le nombre de marqueurs et le polymorphisme des marqueurs. Malgré le faible niveau moyen et la faible variabilité d'apparentement ainsi que la structure d'âge très régulière dans la population du chêne étudiée, nos résultats ont permis de révéler des héritabilités élevées et significativement différentes de zéro pour des caractères connus par ailleurs pour être effectivement très héritables. Par contre, sur une espèce forestière tropicale, *Vitellaria paradoxa*, les auteurs [Bouvet *et al.*, 2008] n'ont pas mis en évidence d'héritabilité significativement différente de zéro pour des caractères des feuilles. Ces auteurs suggèrent que cet échec est lié à l'absence d'une structure d'apparentement suffisamment variable dans la population étudiée.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Buenos-Aires (P. Rozenberg et L. Sanchez), un deuxième projet sur un genre tropical, *Prosopis*, a donné des résultats positifs (projet européen Alfa II GEMA, mobilités de J.-C. Vilardi et de B. Saidman de l'université de Buenos-Aires, Argentine, un article accepté [Bessega C.F., 2009]). Dans le cadre du projet Dendro-PAF du Ministère de l'Agriculture, déjà évoqué plus haut, cette approche sera mise en œuvre sur des populations naturelles de mélèzes du gradient altitudinal Alpin, nouveau dispositif en cours d'installation à Briançon mobilisant un nombre important de chercheurs de l'UR AGPF (notamment L. Sanchez, L. Pâques, J.-P. Charpentier, P. Label) et auquel sont associés des chercheurs de l'INTA Bariloche (L. Gallo, A. Martinez). L'objectif de ce projet est d'étudier la réponse du mélèze et des espèces associées aux variations du climat le long d'un fort gradient altitudinal.

Quatre placettes installées à quatre altitudes différentes (de 1300 à 2400 m d'altitude) contenant chacune 200 mélèzes ont été délimitées en 2008 avec l'assistance de l'ONF. La récolte des carottes a débuté fin 2007 et s'est poursuivi durant toute l'année 2008 (plus de 800 carottes récoltées à ce jour sur un total prévu de 1000). Une cinquième placette vient d'être installée début 2009 dans la forêt communale voisine de St Martin de Queyrières. Un Master 2 Recherche de l'Université d'Orléans (S. Marin) étudie en 2009 la variabilité entre placettes de la réponse microdensitométrique du mélèze aux modifications du climat. En 2009, en collaboration avec l'UMR Biogéco (INRA Pierroton, S. Gerber) et l'UR EFM (INRA Avignon, S. Oddou et F. Lefèvre) débutera l'étude de la structure génétique des cinq populations de mélèzes situées aux quatre altitudes différentes, à l'aide de marqueurs génétiques. Participent également à ce projet l'UR Agroclim (INRA Avignon, F. Huard) pour les modèles climatiques expliquant les variations de la réponse bois du mélèze, et, au sein de l'UMR Biogéco (INRA Pierroton), J.-P. Rossi, pour la prise en compte de la compétition entre arbres, une autre composante majeure de la variabilité de la réponse des arbres aux changements environnementaux.



Figure 4 : l'arbre central de la placette de plus haute altitude du gradient mélèze Alpin, vers 2350 m d'altitude, dans la forêt communale de Villard-St-Pancrace.

L'UR EFM (Ecologie des Forêts Méditerranéennes) de l'INRA Avignon entreprend une étude de la réponse du hêtre aux variations de son environnement (étude de la variabilité des profils microdensitométriques du hêtre commun (*Fagus sylvatica*) le long du gradient altitudinal Ventoux) qui entre également dans le cadre du projet du ministère de l'Agriculture DendroPAF et auquel nous collaborons à la fois du point de vue technique (obtention de profils microdensitométriques de hêtre) et scientifique (méthodes d'estimation de l'héritabilité in-situ, participation à l'encadrement de l'étudiante en thèse impliquée, A. Bontemps).

Un projet de gradient altitudinal Andin jumelé avec le gradient Alpin vient de voir le jour, dans le cadre de la collaboration avec l'INTA Bariloche (L. Gallo, Argentine) engagée et développée lors du projet européen Alfa II GEMA. Ce projet bénéficie d'une aide de la MRI de l'INRA (financement d'un séjour de 3 mois de B. Bougué, étudiante d'Agro-Paris Tech, à Bariloche²), d'un financement dans le cadre du projet européen Baccara (coordonné par H. Jactel, début en 2009) et d'un tout nouveau financement ECOS Sud (coopération bilatérale France-Argentine, coordonné par P. Rozenberg et L. Gallo) pour 2009-2011, qui permettra de financer les déplacements et les séjours de membres des deux équipes durant trois ans. Le gradient altitudinal Andin a pour objectif d'étudier la variabilité de la réponse au climat de plusieurs espèces du genre *Nothofagus* qui se succèdent avec l'altitude sur près de 1500 m de dénivelé, en utilisant strictement les mêmes méthodes et les mêmes outils que

² B. Bougué vient tout récemment (27 janvier 2009) d'arriver à l'INTA Bariloche et participe aux premiers travaux d'installation du gradient Andin avec A. Martinez, qui vient de rentrer à Bariloche début février 2009.

sur le gradient Alpin. En pratique, il paraît important que les chercheurs argentins et français impliqués dans les deux projets de gradient travaillent tous sur les deux dispositifs, de façon à développer une collaboration étroite aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan méthodologique. Deux thèses, l'une Argentine, l'autre française, devraient avoir comme support ces deux gradients. Une demi-bourse de thèse (Approche microdensitométrique de la réponse adaptative du mélèze aux variations du climat le long d'un gradient altitudinal, co-dirigée par P. Rozenberg et L. Pâques) vient de nous être accordée en mars 2009 par le département EFPA de l'INRA, l'autre demi-bourse sera demandée prochainement (date limite début mai 2009) à la région Centre.

3. DENDROPLASTICITE, OU LA PLASTICITE PHENOTYPIQUE DE LA REPONSE BOIS AUX VARIATIONS DU CLIMAT

La plasticité phénotypique est, avec la réponse des populations aux pressions de sélection, la deuxième composante de l'adaptation sur place des organismes. C'est la capacité d'un génotype à modifier son phénotype en fonction des variations de son environnement [DeWitt T.J., 2004] : si le changement environnemental est quantifié, on peut construire une courbe reliant les variations du phénotype avec les variations de la variable environnementale pertinente. Cette courbe est nommée *norme de réaction* et mesure la plasticité [DeWitt T.J., 2004].

Autrement dit, dans une population, un changement environnemental peut entraîner chez chaque individu le passage d'un phénotype (plus ou moins adapté) à un autre phénotype (également plus ou moins adapté) selon une trajectoire (la norme de réaction) elle-même variable entre individus. La variabilité de la norme de réaction au sein de la population dépendra à la fois de la variabilité des phénotypes de départ et d'arrivée, ainsi que de la variabilité de la trajectoire. La plasticité est donc nécessairement associée à un caractère et son héritabilité n'est pas indépendante de celle de ce caractère. La plasticité est un concept particulièrement commode permettant de décrire et manipuler plus facilement la réponse d'un génotype aux variations de son environnement.

La plasticité est la seule possibilité d'adaptation individuelle pour les individus d'espèces sessiles. C'est également un mécanisme particulièrement important pour les espèces longévives qui subissent au cours de leur vie de nombreuses et importantes fluctuations environnementales [Bradshaw, 1965]. Les arbres forestiers sont à la fois sessiles et longévifs : la plasticité phénotypique est donc un mécanisme essentiel pour ces organismes, surtout dans le contexte du changement climatique global particulièrement rapide. Les caractéristiques du xylème déposé par le cambium au fil des saisons de

végétation varient fortement avec le climat [Larson, 1994] : ces variations peuvent être facilement interprétées en termes de plasticité phénotypique individuelle.

Les variations temporelles de la réponse bois, telle qu'elle est contenue dans les profils microdensitométriques, peuvent être interprétées à deux niveaux : *inter-cerne* et *intra-cerne* (du bois initial vers le bois final). Les dendrochronologues ont démontré qu'il existait des relations entre variables des cernes et variables climatiques [Fritts, 1976]. Observée au niveau individuel, une telle relation est donc bien une norme de réaction et mesure la plasticité phénotypique de l'individu. Toutefois, le climat seul n'explique pas la totalité de la variation inter-cerne. D'autres facteurs interviennent, qui doivent être soit pris en compte, soit négligés : par exemple, l'effet ontogénique « âge cambial » explique une bonne partie de la variation inter-cernes des 15 à 30 premiers cernes depuis la moelle [Zobel B., 1995]. De même, la compétition entre arbres dans un peuplement peut varier dans le temps et donc expliquer une partie de la variation inter-cerne des caractéristiques du bois d'un individu. Enfin, des facteurs biotiques comme des attaques d'insectes défoliateurs en cours de saison de végétation (comme *Zeiraphera* sur *Larix decidua* dans les Alpes [Baltensweiler *et al.*, 2008]) entraînent de fortes diminutions de la croissance radiale et donc de la largeur de cerne. Ces effets se confondent avec les effets du climat et rendent parfois délicate la construction de normes de réaction inter-cernes.

Par contre, la définition de normes de réaction à partir de la variation intra-cerne du bois initial vers le bois final présente plusieurs avantages :

- i) la variation du bois initial vers le bois final est la plus forte de toutes les sources de variation observées pour les propriétés de base du bois [Larson, 1994] ;
- ii) l'effet ontogénique âge cambial intra-cerne peut raisonnablement être négligé en intra-cerne par rapport à la très forte variation du bois initial vers le bois final ;
- iii) en général, sauf cas très particulier (intervention sylvicole), le niveau de la compétition entre arbres voisins ne varie que très peu au cours d'une même saison de végétation.

Donc la totalité de la variation intra-cerne peut raisonnablement être expliquée par les fortes variations climatiques intra-saison de végétation.

C'est sur ce raisonnement que sont bâties les approches d'estimation de la plasticité phénotypique bois que nous mettons en œuvre [Sanchez-Vargas *et al.*, 2007]. Dans le cadre de sa thèse [Martinez-Meier, 2009], A. Martinez a amélioré la méthode testée par N. Sanchez [Sanchez-Vargas *et al.*, 2007] et l'a mise en œuvre à grande échelle dans trois tests clonaux de douglas. Il a mis en évidence que l'héritabilité de la dendroplasticité est similaire à celle des caractères de microdensité du bois et

supérieure à celle de la largeur du cerne. Cette héritabilité montre que la plasticité phénotypique, soumise à sélection, peut avoir une importance dans le processus d'évolution des populations d'arbres dans le contexte du changement climatique.

Les résultats de l'étude morts-vivants (paragraphe « Variabilité de la réponse bois » de la partie «Réponse bois au climat», [Martinez-Meier, 2009]) sont interprétables en terme de plasticité : le bois final plus dense et plus large des arbres survivants correspond peut-être à une réponse différente des arbres morts et des arbres survivants au fort changement climatique en cours de saison de végétation, c'est-à-dire à une plasticité différente : les arbres survivants auraient fabriqué plus longtemps ou plus rapidement du bois final plus dense.

Quel est l'avantage associé à un bois final plus dense et plus large ? Du point de vue physiologique, l'interprétation n'est pas immédiate et nécessite des travaux supplémentaires, utilisant les outils et les méthodes décrites dans la partie 1 «Quelle valeur adaptative pour le bois ? ». Certains auteurs pensent que le bois final joue un rôle important dans le contrôle du déclenchement de la cavitation ([Waring, 1978], [Domec *et al.*, 2005]). Le fait que cette différence s'exprime de façon significative entre arbres survivants et arbres morts est un nouvel argument en faveur d'une valeur adaptative des caractères de base du bois liés aux fonctions hydrauliques. De plus, des résultats tout récents de G. Dalla-Salda (en cours de publication) montrent qu'il existe une forte relation entre certains caractères du bois final et la perte de conductivité au moment de l'apparition de la cavitation dans un cerne donné (figure 4). Ces résultats nous encouragent fortement à poursuivre les travaux engagés lors du post-doc de G. Dalla-Salda.

Dans le cadre du projet Européen Treebreedex (coordonné par L. Pâques), un petit groupe de chercheurs développe des activités pour discuter, planifier et coordonner des études sur la plasticité phénotypique chez les arbres forestiers en Europe (P. Rozenberg, L. Sanchez, J. Climent, O. Johnsen et P. Maertens). Ce groupe a en particulier organisé en février 2008 le workshop "Plasticity and Adaptation in Forest Trees" à Madrid, Espagne, dans le cadre duquel ont été invités plusieurs scientifiques reconnus pour leurs travaux sur la plasticité (F. Valladarès, P. Gibert, C. Schlichting et S. Dudley). La prochaine étape que nous proposons dans ce cadre consisterait à créer et coordonner un réseau européen de surveillance et d'intervention pour l'étude immédiate de l'effet d'évènements climatiques extrêmes, de façon à répéter des études comme celle comparant arbres morts et arbres survivants [Martinez-Meier *et al.*, 2008b].

L'approche dendroplasticité est mise en œuvre sur plusieurs espèces, comme le douglas, dans le cadre des projets évoqués ci-dessus, et le pin maritime (*Pinus pinaster*). Sur pin maritime, le post-doc de N. Sanchez (chercheur Mexicain ayant séjourné un an en 2005 – 2006 à l'INRA Orléans dans le

cadre du projet Alfa II GEMA sous la direction de P. Rozenberg) a permis de développer les premières normes de réaction mesurant la réponse plastique intra-cerne du pin maritime aux variations de l'équilibre entre disponibilité et demande en eau durant la saison de végétation (désignée par l'acronyme *dendroplasticité*) [Sanchez-Vargas *et al.*, 2007]. Ces auteurs ont également mis en évidence une héritabilité significative pour la plasticité phénotypique mesurée selon cette méthode. Cette approche va maintenant être mise en œuvre à plus grande échelle sur pin maritime dans le cadre d'un nouvel axe de collaborations coordonnées avec l'UMR Biogéco de Bordeaux en France (C. Plomion et C. Lepoittevin, actuellement dans le cadre du projet européen NovelTree, coordonné par C. Bastien), le CIS-Madeira en Espagne (E. Merlo, dans le cadre d'un projet de recherche pin maritime financé par la province de Galice et dans le cadre d'un projet de recherche bilatéral Picasso 2009-2010), l'université de Vila Real (M.-J. Gaspar, toute nouvelle collaboration en cours de formalisation depuis début 2009) et l'ISA et l'IICT Lisbonne (J. C. Rodrigues, avec lequel plusieurs projets bilatéraux se sont succédés depuis plusieurs années, l'actuel étant coordonné par J.-P. Charpentier) au Portugal.

4. LIMITES D'AIRES ET ASSEMBLAGES D'ESPECES LE LONG DE FORTS GRADIENTS ENVIRONNEMENTAUX : LE CAS DES GRADIENTS ALTITUDINAUX

La dispersion est une *variation* de la position géographique des populations (contour des aires naturelles), qui, quand elle correspond à la découverte de conditions environnementales favorables, peut entraîner la colonisation de nouveaux territoires. Dans le cadre du projet Dendro-PAE, nous avons entamé une étude *in situ* de l'assemblage des espèces forestières le long du gradient altitudinal Alpin (présenté paragraphe précédent), préalable indispensable à l'étude future de la modification possible des contours des distributions. Cette s'étude va se poursuivre, se préciser et s'étendre dans le cadre du projet européen Baccara, coordonné par H. Jactel. Elle s'appuiera sur les deux dispositifs jumelés gradient altitudinal Alpin (Briançon, France) et gradient altitudinal Andin (Bariloche, Argentine). Dans le cadre de ces deux gradients, les approches de dendro-adaptation présentées plus haut seront mises en œuvre pour expliquer les variations spatiales et temporelles de l'assemblage de deux groupes d'espèces forestières montagnardes (pin sylvestre, pin à crochet, sapin pectiné, mélèze et pin cembro à Briançon et plusieurs espèces du genre *Nothofagus* à Bariloche). L'idée principale consiste à comparer à l'aide de profils microdensitométriques les tendances de la croissance radiale et de la fabrication des cernes d'espèces différentes partageant les mêmes milieux, particulièrement aux limites altitudinales supérieures et inférieures de la distribution des espèces.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des progrès méthodologiques récents facilitent la mesure de propriétés hydrauliques du bois et augmentent les effectifs mesurables en termes de nombre d'arbres, donnant accès à une gamme de variabilité génétique et environnementale particulièrement intéressante : l'estimation directe et indirecte de paramètres génétiques pour des propriétés hydrauliques du bois en dispositifs expérimentaux de l'amélioration génétique est maintenant possible. Les tous premiers résultats donnent également des indications sur la physiologie de l'apparition et de la propagation de la cavitation dans les troncs. Le rôle de la densité dans la réponse à court terme de l'arbre au manque d'eau se précise. Par contre, trop peu de données concernent la réponse à moyen et long terme. On sait peu de chose sur la réponse des arbres à des sécheresses se produisant à des périodes, sur des durées et avec des intensités variables. Lors d'évènements climatiques extrêmes, des études comparant individus morts et survivants pourraient fournir des données précieuses, à condition de réagir suffisamment vite et efficacement. On ne se sait pas non plus grand-chose sur l'effet cumulé de plusieurs sécheresses, ou sur l'effet de la succession d'années défavorables et favorables. Toutefois, la puissance des études rétrospectives bois est telle qu'une partie des réponses à ces questions peut probablement être trouvée en explorant le bois de populations d'arbres existantes bien choisies. De ce point de vue, l'étude de populations d'arbres réparties le long de forts gradients environnementaux compacts comme les gradients altitudinaux semble particulièrement prometteuse. Les outils de la génétique moléculaire seront particulièrement utiles dans ce cas pour étudier la structure adaptative de ces populations, pour tenter de séparer les effets environnementaux des effets génétiques et pour estimer les potentiels de réponse à des pressions de sélection. Le rôle particulier de la plasticité phénotypique dans la réponse adaptative à court terme n'a été pour l'instant qu'effleuré et doit être approfondi, notamment en construisant des courbes de réaction intra-cerne pour d'autres caractères de base du bois que la microdensité.

6. ORGANISATION DE LA RECHERCHE

Pour mettre en œuvre un projet de recherche, il faut des moyens humain (les équipes) et financiers (les projets financés). La partie qui suit détaille les collaborations en cours et les moyens obtenus ou récemment demandés pour réaliser les activités de recherche détaillées ci-dessus.

6.1 LES EQUIPES

6.1.1 INRA ORLEANS

Le noyau humain du projet de recherche fait partie de l'équipe de génétique de l'Unité Amélioration, Physiologie et Amélioration du Centre d'Orléans de l'INRA, dirigée par C. Bastien. Les personnels permanents³ d'Orléans les plus fortement impliquées dans ce projet, participant systématiquement à la définition de la stratégie scientifique, aux prises de décision, à la mise en œuvre des expérimentations, à l'encadrement des personnels non-permanents et à la publication des résultats sont :

- L. Sanchez, généticien, améliorateur, modélisateur, co-responsable du programme d'amélioration génétique du douglas, fortement impliqué dans l'animation de tous les chapitres de ce projet, notamment co-encadrant de la thèse d'Alejandro Martinez, de la thèse d'A.S. Sergent et principal responsable du volet héritabilité *in-situ*,
- L. Pâques, généticien, améliorateur, responsable du programme d'amélioration génétique des mélèzes, coordonnateur du projet européen TreeBreedex, directeur de thèse de M.-E. Gauchat, co-directeur de la nouvelle thèse gradient altitudinal Alpin, est notamment co-responsable du volet mélèze du projet et participe également aux activités concernant le douglas,
- J.-P. Charpentier, biochimiste, responsable du nouveau plateau technique Génoboïs qui regroupe les laboratoires bois de l'INRA Orléans et de l'INRA Pierroton participe aux activités bois sur les gradients altitudinaux, particulièrement impliqué dans la construction de normes de réaction pour des propriétés chimiques du bois,
- Frédéric Millier, spécialiste du bois, est notamment responsable de la microdensitométrie au sein du plateau technique Génoboïs,
- Jean-Charles Bastien, améliorateur, co-responsable du programme d'amélioration génétique du douglas participe aux activités douglas du projet et à l'encadrement de la thèse d'A.S. Sergent.

D'autres chercheurs de l'équipe de génétique participent à ce projet : C. Bastien, généticienne, chef de l'équipe, est bien sûr fortement impliquée dans la définition de la stratégie scientifique et dans les prises de décision, V. Jorge, biologiste moléculaire participe au chapitre « estimation de

³ Les personnels avec un statut temporaire et les étudiants sont présentés dans la partie suivante, avec les projets et les financements qui ont permis, permettent ou permettront leur recrutement.

l'héritabilité in situ » et M. Villar, physiologiste, est à l'origine d'un nouveau chapitre concernant la réponse du peuplier noir au climat.

L'équipe Méristème de l'UR AGPF (P. Label) participe aux études de dendroplasticité en travaillant sur la synchronisation des profils microdensitométriques depuis de nombreuses années, actuellement au sein du projet ministère de l'agriculture DendroPAF, 2007-2010, sur le gradient altitudinal mélèze. Elle participe également au projet Andin Nothofagus en coopération avec l'Argentine, a participé au projet européen Alfa GEMA et est partenaire du projet douglas Xylome financé par la région Centre.

Toujours au sein de l'INRA Orléans, une collaboration est en train de s'établir avec l'UR ZF (Zoologie Forestière, A. Roques, Zoologie Forestière) pour la prise en compte de l'effet des défoliations provoquées par les gradations de *Zeiraphera* sur la fabrication du bois des mélèzes du gradient altitudinal Alpin (projet européen Baccara, demi-bourse de thèse tout récemment obtenue gradient altitudinal mélèze auprès du département EFPA de l'INRA).

Toujours à l'INRA Orléans, dans le cadre du projet ministère de l'agriculture DendroPAF, les sols du gradient altitudinal Alpin mélèze sont étudiés par l'UE InfoSol (M. Eimberck) et les relevés GPS sont également réalisés avec l'aide de cette UE (S. Lehmann).

6.1.2 REGION CENTRE

L'USC Arche du LBLGC de l'Université d'Orléans est le principal partenaire du projet soumis à la région Centre Xylome (F. Brignolas, C. Barbaroux et Domenico Morabito), pour étudier la réponse de instantanée de génotypes choisis de Douglas à une contrainte hydrique, suivre les échanges de flux de sève, estimer l'état hydrique des jeunes arbres et mesurer leur croissance radiale.

Sont également partenaires de ce projet le laboratoire MAPMO (Mathématiques et Applications, Physique Mathématique d'Orléans) de l'université d'Orléans (S. Jacquot), l'UPR Biomolécules et Biotechnologies Végétales de l'université de Tours (V. Burlat) et Arbocentre, l'Association de l'Interprofession de la Filière Forêt Bois en Région Centre (E. de la Rochère).

6.1.3 AUTRES COLLABORATIONS IMPORTANTES EN FRANCE

UMR BIOGECO, INRA Bordeaux (C. Plomion, A. Raffin, C. Lepoittevin) : nous collaborons depuis longtemps avec Biogéco au sein de projets de recherche (projet européen Geniality 1995-1999, projet européen Gemini, 1999-2004, projet Européen Alfa GEMA, 2004-2008, projet européen NovelTree, 2007-2010, projet du ministère de l'agriculture DendroPAF, 2007-2010, projet européen

Baccara, 2009-2011), pour le co-encadrement de thèses (L. Bouffier, Etude de la variabilité génétique dans les populations d'amélioration du pin maritime et conséquences pour la sélection, soutenue le 7 décembre 2007) et pour l'organisation de la mesure des propriétés du bois, grâce au nouveau plateau technique Génobois regroupant depuis début 2009 les deux laboratoires bois de l'INRA Orléans et de l'INRA Pierroton, sous la direction de J.-P. Charpentier.

UR EFM, INRA Avignon (F. Lefèvre, S. Oddou) : nous collaborons au sein du projet du ministère de l'agriculture DendroPAF, 2007-2010. Nous projetons également une participation aux activités en collaboration avec l'INTA Bariloche, Argentine, sur le gradient Andin *Nothofagus*. Enfin nous participons à l'encadrement de l'étudiante en thèse qui travaille sur « l'étude de la variabilité des profils micro-densitométrique du hêtre commun (*Fagus sylvatica*) le long du gradient altitudinal Ventoux », A. Bontemps (L. Sanchez et P. Rozenberg).

UR AGROCLIM, INRA Avignon : responsable des aspects climat dans le projet du ministère de l'agriculture DendroPAF, 2007-2010, sur le gradient altitudinal Alpin mélèze, de l'enregistrement de la température sur le terrain, de l'obtention des données rétrospectives auprès de météo-France et de la modélisation des variations climatiques le long du gradient (F. Huard)

UR EEF, INRA Nancy (Nathalie Bréda), coordinatrice du projet ANR Vulnérabilité douglas Dryade (2007-2010) dans lequel nous sommes partenaire. Directrice de la thèse d'A.-S. Sergent « Place du Douglas en France dans le contexte des changements climatiques », que nous co-dirigeons et co-encadrons (P. Rozenberg et L. Sanchez, ainsi que J.C. Bastien).

CIRAD Montpellier, Unité Diversité génétique et amélioration des espèces forestières (J.-M. Bouvet, G. Chaix) étaient partenaires du projet européens Alfa GEMA. Nous avons également collaboré au sein d'un projet CIRAD consacré aux méthodes d'estimation de l'héritabilité in-situ, Herinat (coordonné par J.M. Bouvet). Nous participons ensemble à un projet sur le Teck coordonné par un institut Italien, l'IVALSÀ-CNR à Florence (Nicola Macchioni). Enfin, des projets sont actuellement en cours de construction pour de futurs appels d'offre.

UNIVERSITE PARIS-SUD-XI, UMR 8079 Ecologie, Systématique et Evolution (N. Frascaria, C. Damesin). Cette collaboration récente s'est pour l'instant traduite par des participations à des comités et jurys de thèse (notamment ceux d'A. Martinez et M.-E. Gauchat) et par la soumission récente du projet FraxCC à un appel d'offre ANR blanc. Le fait que N. Frascaria soit également enseignante à AgroParisTech nous donne également accès à des étudiants originaires de cette école : actuellement B. Bougué réalise un stage de 6 mois en Argentine puis en France sur les gradients altitudinaux. Cette collaboration devrait se développer dans un futur proche.

6.1.4 HORS DE FRANCE

Pour ne pas alourdir ce document, je mentionne uniquement les collaborations actuelles, c'est à dire celles pour lesquelles des activités de recherche communes ont lieu en ce moment ou vont débiter dans un futur proche grâce à des projets en cours ou acquis.

ITALIE

- CNR Ivalsa Florence (N. Macchioni, M. Nocetti)

PORTUGAL

- IICT-ISA Lisbonne (J.-C. Rodrigues)
- Université de Vila Real (M.-J. Gaspar)

ESPAGNE

- CIS-Madeira, Galice (E. Merlo)

ARGENTINE

- INTA Bariloche (L. Gallo, M. Pastorino, A. Martinez et G. dalla-Salda)
- INTA Monte-Carlo (M.-E. Gauchat)
- Université de Buenos-Aires (J.-C. Vilardi et B. Saidman)

6.2 LES PROJETS EN COURS OU SOUMIS

Les projets cités ci-dessous sont ceux qui financent actuellement, ou, s'ils sont acceptés, sont destinés à financer, les activités de recherche conduites dans le cadre de ce projet.

6.2.1 PROJETS FINANÇANT UNIQUEMENT DES VOYAGES ET DES SEJOURS (PAS D'ACTIVITES DE RECHERCHE)

6.2.1.1 TERMINE

ALFA II GEMA (FIN OCTOBRE 2007) : ce projet de mobilités Amérique Latine-Europe est maintenant terminé (fin 31 octobre 2007) mais est toutefois mentionné ici car il a joué un rôle capital dans le fonctionnement de nos activités de recherche entre 2004 et 2009. Ce projet a en effet financé les séjours de longues durées de plusieurs chercheurs Latino-Américains dans l'équipe, à

l'INRA Orléans. Certains de ces séjours ont été prolongés largement au-delà de la date de fin du projet (c'est le cas de G. Dalla-Salda, grâce à des financements du département EFPA et d'A. Martinez, grâce à des financements de l'INTA Argentine). Ces chercheurs ont très largement contribué, et, pour certains, contribuent encore aujourd'hui, à l'obtention des résultats présentés dans ce document. Ce sont notamment J.-C. Vilardi (Argentine), B. Saidman (Argentine), N. Sanchez-Vargas (Mexique), G. Dalla-Salda (Argentine), M.-E. Gauchat (Argentine), A. Martinez (Argentine)

6.2.1.2 EN COURS

TREEBREDEX (FIN 2010) : projet européen coordonné par L. Pâques et ayant pour objectif de coordonner au niveau européen les activités de recherche liées à l'amélioration génétique des arbres forestiers. Plusieurs activités de ce projet concernent directement la plasticité phénotypique et la mesure de propriétés de base du bois.

PESSOA (FIN DECEMBRE 2009) : projet bilatéral France-Portugal coordonné par J.-P. Charpentier et permettant de continuer à collaborer avec l'IICT-ISA Lisbonne (J.-C. Rodrigues) sur des questions surtout méthodologiques en sciences du bois.

BOURSE MRI (2009) : bourse de la Mission Relations Internationales de l'INRA finançant en partie le séjour en Argentine d'une étudiante AgroParisTech (B. Bougué) travaillant sur les gradients altitudinaux

PICASSO (FIN DECEMBRE 2010) : projet bilatéral France-Espagne complétant le projet de recherche CIS-Madeira pin maritime (E. Merlo)

ECOS-SUD ARGENTINE (FIN DECEMBRE 2011) : projet bilatéral France-Argentine qui nous permet de maintenir et développer les liens avec l'équipe Argentine de l'INTA Bariloche

6.2.1.3 SOUMIS

BOURSE DE THESE DEPARTEMENT EFPA (ACCEPTEE DEBUT MARS 2009) : bourse destinée à financer une thèse (co-direction P. Rozenberg L. Pâques) sur le gradient altitudinal Alpin mélèze, en collaboration avec l'INTA Bariloche (Argentine).

6.2.1.4 A SOUMETTRE

IRSES : projet européen de mobilités de chercheurs entre instituts de recherche européens et de pays tiers, notamment de quatre pays d'Amérique Latine (Argentine, Brésil, Chili et Mexique). L'expérience extrêmement positive du projet Alfa II GEMA nous encourage vivement à construire et

soumettre ce projet. L'objectif est de financer des séjours de longues durées de jeunes chercheurs Latino-Américains dans notre laboratoire et dans quelques autres laboratoires français et européens, ainsi que des séjours de chercheurs européens dans les laboratoires partenaires Latino-Américains.

6.2.2 PROJETS FINANÇANT DES ACTIVITES DE RECHERCHE

6.2.2.1 EN COURS

DRYADE (FIN DECEMBRE 2009): projet ANR Vulnérabilité coordonné par N. Bréda, finance des activités de recherche du projet sur douglas, en particulier les activités de l'étudiante en thèse A.-S. Sergent.

DENDROPAF (FIN SEPTEMBRE 2010) : projet ministère de l'agriculture coordonné par P. Rozenberg, finance des activités de recherche du projet sur mélèze, douglas et hêtre. Marginalement sur d'autres espèces du gradient altitudinal Alpin : sapin, pin sylvestre et pin cembro. Finance les activités de recherche de S. Marin, Master 2 de l'université d'Orléans.

PIN MARITIME CIS-MADEIRA (FIN DECEMBRE 2010) : projet Espagnol (Galice) coordonné par E. Merlo finançant des activités du projet sur pin maritime

NOVELTREE (FIN MAI 2011) : projet européen coordonné par C. Bastien, finance des activités de recherche du projet sur plasticité et pin maritime.

BACCARA (FIN DECEMBRE 2011) : projet européen coordonné par H. Jactel et finançant notamment des activités de recherche coordonnées sur les deux gradients altitudinaux Alpin (France) et Andin (Argentine)

6.2.2.2 SOUMIS

XYLOME (SOUMISSION DECEMBRE 2008): projet région Centre coordonné par P. Rozenberg et destiné à financer des activités de recherche sur douglas et marginalement sur pin maritime, pin sylvestre et pin laricio.

FRAXCC (SOUMISSION DECEMBRE 2008) : projet ANR blanc soumis par l'UMR CNRS/UPS/AgroParisTech, coordonné par N. Frascaria-Lacoste, « Les Arbres en Environnements Changeants : Une Approche Multidisciplinaire pour Analyser la Réponse au Changement Climatique des Populations de Frênes » dans lequel nous sommes partenaire.

6.2.1.4 A SOUMETTRE

ANR BLANC BILATERAL FRANCE-CANADA (DATE LIMITE AVRIL 2009) : cet appel d'offre tout juste ouvert nous permet de soumettre un projet de recherche commun correctement doté, traitant de modèles bio-climatique de dendroplasticité, avec un petit groupe de partenaires bien connus, avec lesquels des collaborations nombreuses et fructueuses ont existé dans le passé : université de Colombie Britannique à Vancouver (S. Aitken et T.-L. Wang) et Service Canadien des forêts à Victoria (A. Yanchuck et J. King). Ce projet pourrait notamment financer un séjour de la doctorante douglas A.-S. Sergent au Canada.

7. REFERENCES

- [Baltensweiler *et al.*, 2008] Baltensweiler, W., Weber, U. M., & Cherubini, P. 2008. Tracing the influence of larch-bud-moth insect outbreaks and weather conditions on larch tree-ring growth in Engadine (Switzerland). *Oikos*, **117**(2), 161–172.
- [Bessega C.F., 2009] Bessega C.F., Saidman B.O, Darquier M.R. Ewens M. Sanchez L. Rozenberg P. Vilardi J.C. 2009. Consistency between marker- and genealogy- based heritability estimates in an experimental stand of *Prosopis alba* (Leguminosae). *American Journal of Botany*.
- [Bouvet *et al.*, 2008] Bouvet, J. M., Kelly, B., Sanou, H., & Allal, F. 2008. Comparison of marker- and pedigree-based methods for estimating heritability in an agroforestry population of *Vitellaria paradoxa* CF Gaertn. (shea tree). *Genetic Resources And Crop Evolution*, **55**(8), 1291–1301.
- [Bower & Aitken, 2008] Bower, A. D., & Aitken, S. N. 2008. Ecological genetics and seed transfer guidelines for *Pinus albicaulis* (Pinaceae). *American Journal Of Botany*, **95**(1), 66–76.
- [Bradshaw, 1965] Bradshaw, A.D. 1965. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. *Advances in Genetics*, **13**, 115–155.
- [Breda *et al.*, 2006] Breda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals Of Forest Science*, **63**(6), 625–644.
- [Bucci *et al.*, 2007] Bucci, G., Gonzalez-Martinez, S. C., Provost, G. le, Plomion, C., Ribeiro, M. M., Sebastiani, F., Alia, R., & Vendramin, G. G. 2007. Range-wide phylogeography and gene zones in *Pinus pinaster* Ait. revealed by chloroplast microsatellite markers. *Molecular Ecology*, **16**(10), 2137–2153.
- [Carlquist, 1977] Carlquist, S. 1977. Ecological factors in wood evolution. *American Journal of Botany*, **64**(7), 887–896.
- [Cochard *et al.*, 2005] Cochard, H., Damour, G., Bodet, C., Tharwat, I., Poirier, M., & Ameglio, T. 2005. Evaluation of a new centrifuge technique for rapid generation of xylem vulnerability curves. *Physiologia Plantarum*, **124**(4), 410–418.
- [Cochard *et al.*, 2008] Cochard, H., Barigah, S. T., Kleinhentz, M., & Eshel, A. 2008. Is xylem cavitation resistance a relevant criterion for screening drought resistance among *Prunus* species? *Journal Of Plant Physiology*, **165**(9), 976–982.
- [Dalla-Salda *et al.*, 2009] Dalla-Salda, G., Martinez-Meier, A., Cochard, H., & Rozenberg, P. 2009. Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) clones related to a heat and drought wave in France. *Forest Ecology And Management*, **257**(1), 182–189.

- [DeWitt T.J., 2004] DeWitt T.J., Scheiner S.M. (ed). 2004. *Phenotypic Plasticity. Functional and Conceptual Approaches*. Oxford University Press.
- [Domec & Gartner, 2002] Domec, J. C., & Gartner, B. L. 2002. How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *Journal Of Experimental Botany*, **53**(379), 2369–2379.
- [Domec *et al.*, 2005] Domec, J. C., Pruyn, M. L., & Gartner, B. L. 2005. Axial and radial profiles in conductivities, water storage and native embolism in trunks of young and old-growth ponderosa pine trees. *Plant Cell And Environment*, **28**(9), 1103–1113.
- [Eveno *et al.*, 2008] Eveno, E., Collada, C., Guevara, M. A., Leger, V., Soto, A., Diaz, L., Leger, P., Gonzalez-Martinez, S. C., Cervera, M. T., Plomion, C., & Garnier-Gere, P. H. 2008. Contrasting patterns of selection at *Pinus pinaster* Ait. drought stress candidate genes as revealed by genetic differentiation analyses. *Molecular Biology and Evolution*, **25**(2), 417–437.
- [Fritts, 1976] Fritts, H.C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- [Garcia-Gil *et al.*, 2003] Garcia-Gil, M. R., Mikkonen, M., & Savolainen, O. 2003. Nucleotide diversity at two phytochrome loci along a latitudinal cline in *Pinus sylvestris*. *Molecular Ecology*, **12**(5), 1195–1206.
- [Larson, 1994] Larson, P.R. 1994. *The vascular cambium, development and structure*. Springer Verlag, Heidelberg & Berlin.
- [Liepelt *et al.*, 2009] Liepelt, S., Cheddadi, R., de Beaulieu, J. L., Fady, B., Gomory, D., Hussendorfer, E., Konnert, M., Litt, T., Longauer, R., Terhurne-Berson, R., & Ziegenhagen, B. 2009. Postglacial range expansion and its genetic imprints in *Abies alba* (Mill.) - A synthesis from palaeobotanic and genetic data. *Review Of Palaeobotany And Palynology*, **153**(1-2), 139–149.
- [Martinez-Meier *et al.*, 2008a] Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Salda, G. D., Pastorino, M. J. M., Gautry, J. Y., Gallo, L. A., & Rozenberg, P. 2008a. Genetic control of the tree-ring response of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) to the 2003 drought and heat-wave in France - art. no. 102. *Annals Of Forest Science*, **65**(1), 102–102.
- [Martinez-Meier *et al.*, 2008b] Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Pastorino, M., Gallo, L., & Rozenberg, P. 2008b. What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. *Forest Ecology And Management*, **256**(4), 837–843.
- [Martinez-Meier *et al.*, 2009] Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Dalla-Salda, G., Gallo, L., Pastorino, M., & Rozenberg, P. 2009. Ring density record of phenotypic plasticity and adaptation to drought in Douglas-fir. *accepted in Forest Ecology and Management*.

- [Martinez-Meier, 2009] Martinez-Meier, Alejandro. 2009. *Réponse du douglas à des événements climatiques extrêmes : capacité d'adaptation au changement climatique*. Ph.D. thesis, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement AgroParisTech, INRA Orléans France.
- [Meehl & Tebaldi, 2004] Meehl, G. A., & Tebaldi, C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, **305**(5686), 994–997.
- [Paiva *et al.*, 2008] Paiva, J. A. P., Garnier-Gere, P. H., Rodrigues, J. C., Alves, A., Santos, S., Graca, J., Le Provost, G., Chaumeil, P., Da Silva-Perez, D., Bosc, A., Fevereiro, P., & Plomion, C. 2008. Plasticity of maritime pine (*Pinus pinaster*) wood-forming tissues during a growing season. *New Phytologist*, **179**(4), 1080–1094.
- [Pittermann *et al.*, 2006] Pittermann, J., Sperry, J. S., Hacke, U. G., Wheeler, J. K., & Sikkema, E. H. 2006. Inter-tracheid pitting and the hydraulic efficiency of conifer wood: The role of tracheid allometry and cavitation protection. *American Journal Of Botany*, **93**(9), 1265–1273.
- [Plomion *et al.*, 2001] Plomion, C., Leprovost, G., & Stokes, A. 2001. Wood formation in trees. *Plant Physiology*, **127**(4), 1513–1523.
- [Rathgeber *et al.*, 2006] Rathgeber, C. B. K., Decoux, V., & Leban, J. M. 2006. Linking intra-tree-ring wood density variations and tracheid anatomical characteristics in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Annals Of Forest Science*, **63**(7), 699–706.
- [Rebetez *et al.*, 2006] Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. P., & Menzel, A. 2006. Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals Of Forest Science*, **63**(6), 569–577.
- [Ritland, 2000] Ritland, K. 2000. Marker-inferred relatedness as a tool for detecting heritability in nature. *Molecular Ecology*, **9**(9), 1195–1204.
- [Rozenberg *et al.*, 2002] Rozenberg, P., Van Loo, J., Hannrup, B., & Grabner, M. 2002. Clonal variation of wood density record of cambium reaction to water deficit in *Picea abies* (L.) Karst. *Annals Of Forest Science*, **59**(5-6), 533–540.
- [Rozenberg *et al.*, 2004] Rozenberg, P., Schute, G., Ivkovich, M., Bastien, C., & Bastien, J. C. 2004. Clonal variation of indirect cambium reaction to within-growing season temperature changes in Douglas-fir. *Forestry*, **77**(4), 257–268.
- [Sanchez L., 2006] Sanchez L., Rozenberg P. 2006. *Marqueurs neutres et apparemment pour l'estimation de la variation génotypique adaptative en forêt*. Rapport Final Projets Innovants 2005. département EFPA, INRA Orléans, France.
- [Sanchez-Vargas *et al.*, 2007] Sanchez-Vargas, N. M., Sanchez, L., & Rozenberg, P. 2007. Plastic and adaptive response to weather events: a pilot study in a maritime pine tree ring. *Canadian Journal Of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, **37**(11), 2090–2095.

[Sperry *et al.*, 2006] Sperry, J. S., Hacke, U. G., & Pittermann, J. 2006. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American Journal Of Botany*, **93**(10), 1490–1500.

[Visscher *et al.*, 2008] Visscher, P. M., Hill, W. G., & Wray, N. R. 2008. Heritability in the genomics era - concepts and misconceptions. *Nature Reviews Genetics*, **9**(4), 255–266.

[Waring, 1978] Waring, R., Running S. 1978. Sapwood water storage: its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant Cell and Environment*, **1**, 131–140.

[Zobel B., 1995] Zobel B., Sprague J. 1995. *Juvenile wood in Forest trees*. Springer Series in wood science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

ANNEXE : CURRICULUM VITAE

Philippe Rozenberg, INRA Orléans,
Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières
Email : philippe.rozenberg@orleans.inra.fr

Formations et diplômes :

1981 : Ingénieur des Travaux des Eaux et Forêts.
1982 : DEA d'écologie de l'Université Paris VI, France.
1997-2001 : Thèse de docteur - ingénieur en Sciences Forestières de l'ENGREF (AgroParisTech) Paris, France.

Activités Professionnelles :

Depuis 2001, Chargé de Recherche de 1^{ère} classe, INRA Orléans, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières.

De 1988 à 2001 : Ingénieur d'études, Unité Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières INRA Orléans

De 1985 à 1988 : Ingénieur de développement forestier, IDF Nancy.

De 1983 à 1985 : Coopération Internationale (Enseignement, Recherche, Costa-Rica)

Programme de Recherche :

Explorer le bois pour comprendre l'adaptation des arbres forestiers : comment l'analyse rétrospective des cernes accumulés dans le tronc permet d'étudier l'adaptation des arbres forestiers aux changements environnementaux. Les arbres forestiers sont des organismes sessiles et longévifs exposés à de fortes variations environnementales. Le changement climatique global modifie les climats des aires d'origine et d'introduction et accentue les contrastes. Comment répondent les arbres, dans leurs aires naturelles et d'introduction ? Mon objectif est d'utiliser les signaux contenus dans les cernes accumulés dans les troncs des arbres pour étudier la variation spatiale, temporelle et génétique de leur réponse aux principaux changements environnementaux.

Principaux intérêts en recherche :

Génétique de la formation du bois, qualité du bois, adaptation des arbres forestiers au changement climatique, amélioration génétique des arbres forestiers.

Projets de recherche en cours ou récemment terminés :

- 2009-2010 : projet bilatéral France-Espagne Picasso « Spectroscopie Proche Infra Rouge, découverte de la variabilité des propriétés du bois et amélioration génétique » coordonné par P. Rozenberg et E. Merlo
- 2009-2011 : projet bilatéral France-Argentine « Réponse adaptative passée et présente des forêts de montagne au changement climatique global : approche rétrospective basée sur l'étude du bois », coordonné par P. Rozenberg et L. Gallo.
- 2009-2011 : projet européen Baccara « Biodiversity And Climate Change, A Risk Analysis », coordonné par Hervé Jactel.
- 2008-2009 : projet bilatéral France – Portugal PESSOA « Evaluation par la technique SPIR des variations intra cerne des extractibles et de la densité du bois », coordination Jean-Paul Charpentier et José-Carlos Rodrigues.
- 2007-2010 : projet Calidade Estrutural Da Madeira De *Pinus Pinaster* En Galicia. Variabilidade E Plasticidade Fenotípica. Métodos Non Destructivos De Avaliación, coordonné par Esther Merlo, CIS-Madeira, Ourense, Galice, Espagne.
- 2007-2010 : projet européen NovelTree, coordonné par Catherine Bastien, INRA Orléans.

- 2007-2010 : projet Plan d'Action Forestier du Ministère de l'Agriculture et de la Forêt « outils de diagnostic et de prévision de la réponse des arbres aux événements climatiques... », coordination Philippe Rozenberg.
- 2007-2011 : projet ANR DRYADE « Vulnérabilité des forêts face aux changements climatiques : de l'arbre aux aires bioclimatiques », coordination Nathalie Bréda.
- 2004-2007 : projet Européen Alfa GEMA de coopération Europe – Amérique Latine « Génétique de la Formation du Bois », coordination Philippe Rozenberg.
- 2005-2006 : projet bilatéral France – Portugal PESSOA « Comparaison de la spectroscopie proche infra-rouge et de la microdensité indirecte aux rayons X pour la mesure des variations de la densité du bois intra et inter arbres », coordination Philippe Rozenberg et José-Carlos Rodrigues.
- 2005 : projet Innovant du département INRA EFPA « Marqueurs neutres et apparemment pour l'estimation de la variation génotypique adaptative en forêt » coordination Philippe Rozenberg et Leopoldo Sanchez.
- 2002-2005 : projet ECOS Nord France-Mexique « Etude du Contrôle génétique et environnemental de la formation du bois juvénile chez des résineux forestiers économiquement importants (*Pinus sp.*) » coordination Philippe Rozenberg et Jesus-Vargas Hernandez.
- 2001-2004 : projet européen GEMINI « Genetic determinism of Maritime Pine Pulp and Paper Properties », coordination Christophe Plomion.

Encadrements en cours ou récemment terminés :

- Encadrant du stage de césure AgroParisTech de Bérengère Bougué (janvier-juillet 2009)
- Encadrant de Sara Marin, Master 2 de l'Université d'Orléans, 2008-2009.
- Encadrement d'une doctorante Portugaise, Maria Joao Gaspar, Juillet 2008 (1 mois).
- Encadrant du stage de 2^{ème} année AgroParisTech de Bérengère Bougué (mars 2008)
- Co-directeur (avec Nathalie Bréda) et encadrant de la thèse d'Anne-Sophie Sergent, Université d'Orléans (septembre 2007 – fin 2010).
- Encadrant principal de Muriel Thomasset, diplôme de DIRS (analogue à un Master 2) de l'Université de Tours, France, soutenance 09 Octobre 2007.
- Co-encadrant (avec G. Dalla Salda) de Fernanda Guedès, étudiante brésilienne en 3^{ème} année d'Agro Paris-Tech ENGREF Nancy (2006-2007).
- Co-encadrant (avec J. Lopez de l'INTA Bella-Vista, Argentine) de Marie Thiberville, étudiante en 2^{ème} année d'Agro Paris-Tech, 2006.
- Directeur et encadrant principal de la thèse d'Alejandro Martinez (thèse Agro Paris-Tech ENGREF, Juin 2005-janvier 2009).
- Encadrant principal du post-doc de Nahum Sanchez-Vargas, enseignant à l'université de Michoacan, Mexique, de septembre 2005 à août 2006.
- Participation à l'encadrement de la thèse de Maria-Elena Gauchat (thèse Agro Paris-Tech ENGREF dirigée par L. Pâques, de Septembre 2005 à avril 2009).
- Participation à l'encadrement de la thèse de Laurent Bouffier (thèse Université de Bordeaux, France, début en 2004, soutenance décembre 2007).
- Encadrant du Master 2 de l'Université d'Orléans de Guillermina Dalla-Salda « Variation génétique des paramètres écophysiologiques en rapport avec la résistance à la sécheresse chez *Pseudotsuga menziesii* » (soutenu en juin 2006).
- Encadrant principal du BTS Forêts de Céline de Vial « réponse du douglas à la canicule de 2003 » (soutenu en juin 2006).

Lecteur d'articles pour Annals of Forest Science, Canadian Journal of Forest Research, Forest Ecology and Management, Forest Genetics, Forestry, Holzforschung, IAWA Journal, Journal of Experimental Botany, Journal

Of Tropical Forest Science, New Forests, New Zealand Journal of Forestry Science, Polar Geography, Tree Genetics and Genomes, Trees Structure and Functions and Scandinavian Journal of Forest Research.

Député du groupe IUFRO 5.01.02 – Natural variations in wood quality

Publications Récentes (2002-2008) :

1. Articles scientifiques (revues avec comité de lecture)

1. O. Brendel, D. Pot, C. Plomion, P. Rozenberg, J.M. Guehl, 2002, Genetic parameters and QTL analysis of $\delta^{13}\text{C}$ and ring width in maritime pine, *Plant, Cell and Environment*, (2002) 25, 945-953.
2. P. Rozenberg, J. Van Loo, B. Hannrup, M. Grabner, 2002, Clonal variation of wood density record of cambium reaction to water deficit in *Picea abies* (L.) Karst, *Annals of Forest Science*, 59 (5/6).
3. Francisco Zamudio, Ricardo Baettyg, Adriana Vergara, Fernando Guerra and Philippe Rozenberg, 2002, Genetic trends in wood density and radial growth with cambial age in a radiata pine progeny test, *Annals of Forest Science*, 59 (5/6).
4. Chantre Guillaume, Rozenberg Philippe, Baonza Victoria, Macchioni Nicola, Le Turcq Alain, Rueff Martine, Petit Conil Michel and Heois Bernard, 2002, Genetic selection within Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Europe for papermaking uses, *Annals of Forest Science*, 59 (5/6).
5. David Pot, Guillaume Chantre, Philippe Rozenberg, José Carlos Rodrigues, Lloyd Jones Gwynn, Helena Pereira, Bjorn Hannrup, Christine Cahalan and Christophe Plomion, 2002, Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), *Annals of Forest Science*, 59 (5/6).
6. Jean Launay, Milosh Ivkovich, Luc Pâques, Catherine Bastien, Pascal Higelin and Philippe Rozenberg, 2002, Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using RIGIDIMETER, *Annals of Forest Science*, 59 (5/6).
7. P. Rozenberg, G. Schüte, M. Ivkovich, C. Bastien and J.-C. Bastien, 2004, Clonal variation of indirect cambium reaction to within-growing season temperature changes in Douglas-fir, *Forestry* 76 (4)
8. B. Hannrup, C. Cahalan, G. Chantre, M. Grabner, B. Karlsson, I. Le Bayon, G. L. Jones, U. Müller, H. Pereira, J. C. Rodrigues, S. Rosner, P. Rozenberg, L. Wilhelmsson, R. Wimmer, 2004, Genetic Parameters of Growth and Wood Quality Traits in *Picea abies*, Volume 19, Number 1 / February 2004 pp. 14 – 29 *Scandinavian Journal of Forest Research*
9. N. Gierlinger, D. Jacques, M. Grabner, R. Wimmer, M. Schwanninger, P. Rozenberg and L. E. Pâques, 2004, Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance Volume 18, Number 1 102 - 108 *Trees - Structure and Function*
10. Ivković M., Rozenberg P. 2004, a method for description and modelling of within-ring wood density distribution in clones of three coniferous species, *Ann. For. Sci.* 61 (2004) 759-764
11. F. Zamudio, P. Rozenberg, R. Baettig, A. Vergara, M. Yañez, C. Gantz 2005, Genetic variation of wood density components in a radiata pine progeny test located in the south of Chile, *Ann. For. Sci.*, 62 (2005) 105-114
12. David Pot, José-Carlos Rodriguès, Philippe Rozenberg, Guillaume Chantre, Josquin Tibbits, Christine Cahalan, Frédérique Pichavant, Christophe Plomion 2006, QTLs and candidates genes for wood properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.), *Tree Genetics and Genome* (2006) 2: 10-24
13. Michael Grabner, Paolo Cherubini, Philippe Rozenberg, Björn Hannrup 2006, Summer drought and low earlywood density are inducing intra-annual radial cracks in conifers, *Scandinavian Journal of Forest Research* 21 : 151 – 157
14. Nicola Macchioni, Sabrina Palanti, Philippe Rozenberg, 2007, Measurements of Fungal Wood Decay on Scots Pine and Beech through X Ray Microdensitometry, *Wood Sci Technol* 41:417-426
15. Sánchez-Vargas Nahum M, Sánchez Leopoldo, Rozenberg Philippe, 2007, Plastic and adaptive response to weather events: a pilot study in a maritime pine tree-ring, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 37 , 11, pp. 2090-2095, November 2007

16. Martinez Meier Alejandro G., Sanchez Leopoldo, Dalla Salda Guillermina, Pastorino Mario J. M., Gautry Jean-Yves, Gallo Leonardo A, Rozenberg Philippe, 2008, Genetic control of the tree-ring response of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) to the 2003 drought and heat-wave in France, *Annals of Forest Science*, Vol. 65 No. 1 January-February 2008
17. Bouffier Laurent, Charlot Céline, Raffin Annie, Rozenberg Philippe and Kremer Antoine, 2008, Can wood density be efficiently selected at early stage in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)? , *Annals of Forest Science*, Vol. 65 No. 1 January-February 2008
18. Bouffier Laurent, Rozenberg Philippe, Raffin Annie, Kremer Antoine, 2008, Wood density variability in successive breeding populations of maritime pine. Accepted in *Canadian Journal of Forest Research*.
19. Bouffier Laurent, Raffin Annie, Rozenberg Philippe, Meredieu Céline, Kremer Antoine, 2008, What are the consequences of growth selection on wood density in the French maritime pine breeding programme? Accepted in *Tree Genetics and Genomes*.
20. Martinez-Meier Alejandro; Leopoldo Sanchez; Mario Pastorino; Leonardo Gallo; Philippe Rozenberg, What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave, in press in *Forest Ecology and Management*.
21. Cecilia F Bessega; Beatriz O Saidman; María R Darquier; Mauricio Ewens; Leopoldo Sanchez; Philippe Rozenberg; Juan C Vilardi, Consistency between marker- and genealogy- based heritability estimates in an experimental stand of *Prosopis alba* (Leguminosae), accepted in *American Journal of Botany*.
22. Guillermina Dalla-Salda, Alejandro Martinez-Meier, Hervé Cochard and Philippe Rozenberg, Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) clones after a heat and drought wave in France, accepted in *Forest Ecology and Management*.
23. Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Dalla-Salda, G., Gallo, L., Pastorino, M., & Rozenberg, P. 2009. Ring density record of phenotypic plasticity and adaptation to drought in Douglas-fir. *accepted in Forest Ecology and Management*.

2. Chapitres d'ouvrages

Rozenberg Philippe, 2008, Réponse du douglas et du mélèze à la canicule de 2003 à partir d'observations densitométriques, in *Sécheresse et canicule 2003. contribution des dispositifs de suivi et l'observation des forêts à la quantification des effets immédiats et à court terme*, Guy Landmann Ed., Editions Quae, Versailles, France

3. Communications dans colloques et congrès (2002-2008)

1. P. Rozenberg 2002, Wood Quality Research at INRA: implications for Douglas-fir Breeding, summary in proceedings of Workshop "Genetic Improvement of Wood Quality in Coastal Douglas-fir and Western Hemlock", Pacific Northwest Tree Improvement Research Cooperative, Northwest Tree Improvement Cooperative, Oregon State University, Corvallis, Oregon, United States of America, June, 27, 2002.
2. P. Rozenberg, Luc Pâques, Frédéric Millier, Notburga Gierlinger, Dominique Jacques, Michael Grabner, Rupert Wimmer, 2002, Responses of wood density to climate – a new approach to evaluate adaptive fitness of larch, summary in proceedings Conference Larch, 16 – 18 October 2002, Gap, France.
3. Philippe Rozenberg, Marco Lausberg, Annie Raffin, Fred Burger, Frédéric Millier, Milosh Ivkovich and Jean Launay, 2003, Clonal Variation in Wood Quality in Radiata and Maritime Pine with Rigidimeter and HITMAN Tools, IUFRO All Division 5 Conference, Rotorua, New Zealand, 11-15 March 2003
4. P. Rozenberg, G. Schüte, C. Bastien, M. Ivkovich, J.C. Bastien, 2002, A wood density model for Douglas-fir including within-growing season climate variables, in proceedings International Symposium on Pacific temperate conifers as native and introduced species - Genetics and sexual reproduction IUFRO Working Parties 2.02.05 and 2.01.16, 27-30 May, 2002 Orléans, France

5. Rozenberg Philippe, Pot David, Sanchez Leopoldo, Ivković Miloš, Franc Alain, 2004, Heritability of wood microdensity as a description of the genetic control of tree plasticity in maritime pine, International Symposium on Wood Sciences, October 24-29, 2004, Montpellier, France
6. P. Rozenberg, L. Pâques, 2004, Evidence of the effect of the climate of year 2003 on Douglas-fir and larch wood formation in France, Impacts of the Drought and Heat in 2003 on Forests, 17th – 19th November 2004, Freiburg, Germany
7. Giovannelli A, Macchioni N, Caparrini S, Berta M, Morabito D, Carpin S, Castro G, Rozenberg P, Label P, Racchi ML, 2005, Studies on wood formation and cambial growth in response to water deficit in poplar, European project Alfa GEMA and COST group « Forest Genomics » joint meeting, 9 to 16 october 2005, Museum of natural history, Orléans, France
8. Juan César Vilardi, Philippe Rozenberg, Leopoldo Sánchez, 2005, evaluation of bias and precision of methods of relationship and heritability estimation in nature by means of simulation assays, European project Alfa GEMA and COST group « Forest Genomics » joint meeting, 9 to 16 october 2005, Museum of natural history, Orléans, France
9. Nahum M. Sanchez Vargas, Philippe Rozenberg, Catherine Bastien, Leopoldo Sanchez, 2006, Genetic control of tree response to climate characteristics of three years in a maritime pine clonal test, TRACE 2006 – Royal Museum for Central Africa, Belgium The annual conference and general meeting of the ATR, April 20th – 22nd, 2006
10. L. Sanchez ; J. C. Vilardi ; S. Gerber ; A. Ducouso ; J. L. Puech ; C. Rathgeber ; P. Rozenberg, 2006, Heritabilities out of the beaten test site: looking at the perspectives of in situ inferences for forest tree species with a preliminary study in Quercus, A joint conference of IUFRO Working Groups 2.04.01 (Population, ecological and conservation genetics) and 2.04.10 (Genomics), and Cost Action E-28 (Genosilva: European Forest Genomics Network). October 1st-6 2006, Alcala de Henares, Spain
11. Rozenberg P., 2007, from plasticity to quality, IV reunion cientifica del grupo de trabajo de genetica forestal de la SECF, 27-28 June 2007, Pontevedra, Spain (conférence invitée).
12. Pâques Luc E., Guillermina Dalla-Salda, Alejandro Martinez-Meier, Philippe Rozenberg, 2008, Wood: an adaptive trait? TreeBreedex Workshop on *Adaptive traits needed for breeding zones delineation*, Madrid, Spain, 25th – 26th February 2008
13. Rozenberg P., A. Martinez-Meier, G. Dalla-Salda, M.A. Gauchat, L. Pâques, L. Sanchez, 2008, The wood record of plasticity (Dendroplasticity), TreeBreedex Workshop on *Plasticity and Adaptation in Forest Trees*, Madrid, Spain, 27th – 28th February 2008
14. Martinez-Meier, Rozenberg P., L. Sanchez, 2008, Genetic control of wood formation and plasticity in Douglas-fir : a case study, TreeBreedex Workshop on *Plasticity and Adaptation in Forest Trees*, Madrid, Spain, 27th – 28th February 2008
15. Plomion, P. Rozenberg, 2008, is wood an adaptive trait? FuncFiber International Symposium, March 10 - 12, 2008, Umea, Sweden
16. P. Rozenberg, Guillermina Dalla-Salda, Alejandro Martinez-Meier, Leopoldo Sanchez, Maria-Elena Gauchat, Luc Pâques 2008, Investigating wood to understand adaptation, IUFRO CTIA 2008 joint conference, Adaptation, breeding and conservation in the era of forest tree genomics and environmental change, August 25-28, Québec City, Canada.

4. Posters (2002-2006)

1. Alejandro Martinez Meier, Philippe Rozenberg, Leopoldo Sanchez, Guillermina Dalla Salda, Mario Pastorino, Leonardo Gallo, 2006, Genetics of Douglas-fir response to 2003 heat wave in France, TRACE 2006 – Royal Museum for Central Africa, Belgium The annual conference and general meeting of the ATR, April 20th – 22nd, 2006
2. Macchioni N., Nocetti M., Rozenberg P., 2007. Early detection of surface quality of Teak (*Tectona grandis* L.f.) through X-Ray microdensitometry. Test on west African plantations. Proceeding of the

"International Scientific Conference on Hardwood Processing" (ISCHP), September 24-26, Quebec City, Canada, 311-316.

5. Conférences, séminaires et enseignements (2002-2008)

1. Variation of wood microdensity: genetic and environmental control of wood formation, 2002, June 25, Corvallis, Oregon, USA
2. Décodage des cernes et génétique de l'adaptation au climat, 3 mars 2003, INRA Orléans, France
3. Investigaciones en genética forestal en el INRA: qué campo para la madera? Seminario personal académico del programa forestal, Colegio De Postgraduados De Montecillo, 27 de mayo 2003, Mexico
4. La madera en el programa de genética forestal del inra : del cambium al producto final, División De Ciencias Forestales Universidad Autonoma Chapingo, 28 de mayo, 2003, Mexico
5. Anatomía, microdensidad y genética del funcionamiento del cambium, seminario con estudiantes del curso de anatomía de maderas y corteza, Collegio De Postgraduados De Montecillo 29 De Mayo, Mexico.
6. Microdensity in genetics of wood studies: questions, methods and results, giovedì 25 settembre 2003, Consiglio Nazionale Ricerche, Polo Scientifico Di Sesto Fiorentino, Firenze, Italia.
7. Genetic variation of climatic control of wood formation, 10 décembre 2003, University Of British Columbia, Vancouver, Canada
8. Modélisation des profils mdm pour l'étude de la variabilité génétique de la réponse des résineux aux changements environnementaux en saison de végétation, 15 mars 2005, Cemagref, Nogent-Sur-Vernisson, France
9. Dendroplasticity, population genetics of wood record of cambial activity, septembre 2005, University Of Beijing and Forest Academy, Chine.
10. Sécheresse et canicule 2003 : la forêt face au changement climatique, Orléans, 9 janvier 2006.
11. Dendroplasticité, séminaire invité au LECA, 1^{er} février 2007, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
12. Importance du bois pour l'étude de l'adaptation, 10 mars 2008, Journées Jeunes Chercheurs du DGAP, INRA, Orléans.