

RAPPORT D'ACTIVITE D'UN PROJET DE RECHERCHE

Nom du projet : Empreinte du changement climatique sur le bois des forêts de la région Centre

Acronyme : Xylome

N° de la convention : 2009 0003 8263

1 - Résumé en langage vulgarisé des résultats scientifiques (1/4 de page)

La principale espèce-modèle du projet, le douglas, est vulnérable au réchauffement climatique. Sa situation est très différente d'une région à l'autre : les dépérissements et les épisodes de mortalité qui se sont développés à partir de 2003 en région Centre, en Bourgogne et Midi-Pyrénées n'ont pas été observés dans les trois sites du projet Xylome, situés dans l'Orne, les Vosges et l'Aude. Nos résultats montrent que le fonctionnement hydraulique du bois joue un rôle dans la résistance du douglas à la sécheresse : des conduits cellulaires plus étroits, correspondant à une densité du bois plus élevée, sont associés à la survie d'arbres confrontés à la sécheresse. Cette idée est confirmée par l'existence de relations significatives entre densité du bois et résistance à la cavitation (rupture de la colonne de sève brute dans le tronc) et par les relations entre le climat dans l'aire naturelle et la densité du bois en France : les provenances issues de régions à climat sec fabriquent un bois avec des caractéristiques proches de celles des survivants à la sécheresse. Chez le douglas le projet Xylome a permis d'estimer à la fois précisément et à grande échelle le déterminisme génétique de caractères adaptatifs de résistance à la sécheresse et de sa plasticité phénotypique. Chez le pin maritime, en conditions contrôlées, la stratégie de réponse à la sécheresse semble différente : alors que le douglas serait une espèce *tolérante*, continuant de pousser à un rythme ralenti en cas de sécheresse, le pin maritime, serait une espèce *évitante*, stoppant sa croissance dès l'apparition de conditions défavorables.

2 - Résumé en langage vulgarisé de l'impact socio-économique et environnemental (1/4 de page)

Des dépérissements forestiers provoqués par des sécheresses ont été observés entre 2000 et 2005 dans plusieurs régions de France. Ces dépérissements sont devenus plus rares entre 2005 et 2010, d'une part parce que les épisodes de sécheresse suivants ont été moins sévères et d'autre part parce que, dans les peuplements affectés, les arbres survivants sont par définition plus résistants. Lors des prochaines régénérations naturelles, ces survivants seront les géniteurs des futurs peuplements. Notre estimation du déterminisme génétique suggère que la résistance à la sécheresse sera bien transmise à ces générations suivantes : les épisodes de mortalité passés sont des événements de sélection faisant évoluer les peuplements vers une résistance à la sécheresse accrue. A l'occasion des futures éclaircies, les sylviculteurs pourront sélectionner des individus à bois plus dense, susceptibles de mieux résister à de futures sécheresses. En comparant ces forêts à des forêts témoins nous validerons l'efficacité de la méthode. Dans le cas des plantations, nos résultats permettent d'orienter le programme d'amélioration génétique du douglas vers la production de variétés plus résistantes à la sécheresse. En première approche, nos travaux mettent en évidence que cette sélection n'implique pas de baisse de la qualité du bois. En revanche l'impact sur la quantité produite est à surveiller.

3 - Liste des unités de recherche, équipes et personnes effectivement impliquées dans le projet

INRA UR 0588 AGPF, groupe Adaptation

Philippe Rozenberg, DR, coordonnateur du projet

Leopoldo Sanchez, CR

Jean-Paul Charpentier, IR

Jean-Charles Bastien, IR

Philippe Label, DR

Sara Marin, IE en CDD sur le projet

Université d'Orléans, LBLGC

Muriel Feinard-Duranceau, MCF

Cécile Vincent-Barbaroux, MCF

Domenico Morabito, MCF

Université d'Orléans, MAPMO

Laurent Delsol, MCF

Sophie Jacquot, MCF

INRA UE GBFor

Patrick Poursat, AI

Frédéric Millier, TR

Dominique Veisse, TR

Christophe Borel, TR

Arbocentre

Eric de la Rochère, Ing.

4 - Changements intervenus dans le projet par rapport au dossier initial

Le partenaire de l'université de Tours a quitté la région Centre en début de projet en abandonnant le projet et sans pouvoir être remplacé, ce qui nous a conduit, avec l'accord de la région Centre, à réorganiser le projet selon une nouvelle structure en tâches présentée ci-dessous.

Tâche 1 : la partie « analyse statistique de données » menée dans le cadre de la collaboration avec le MAPMO a été par commodité fondue dans la tâche 1, car elle s'appuyait entièrement sur les données mesurées dans cette tâche. Le nombre d'arbres carottés est passé de 1200 à 1620. Le nombre d'arbres abattus pour les mesures hydrauliques est passé de 120 à 40, pour deux raisons : 1) l'abattage d'une partie des arbres nous a été interdit car ils sont réservés par le programme d'amélioration génétique du douglas 2) Nous sommes passé de la mesure de la conductance hydraulique à la mesure de la résistance à la cavitation, mesure plus consommatrice de temps mais plus pertinente pour qualifier la résistance à la sécheresse. L'argent rendu disponible par le retrait de l'université de Tours a été utilisé pour développer et tester, en collaboration avec l'INRA Bariloche, Argentine, un prototype d'appareil de mesure de la résistance à la cavitation, « l'embolitron ».

Photo 1 : l'Embolitron



Tâche 2 : après un échec dû à une forte mortalité, nous avons dû opérer un changement d'espèce du douglas vers le pin maritime (tous deux espèces modèles du projet). Le dispositif expérimental en conditions contrôlées installé pour étudier la réponse physiologique des arbres à une sécheresse artificielle devait utiliser des clones de douglas déjà présents dans la pépinière de l'INRA Orléans. Or, pour des raisons pas complètement élucidées, sitôt le dispositif installé, les clones disponibles ont dépéri et sont finalement presque tous morts lors de la 1^{ère} année de l'expérimentation. Des mesures ont bien été réalisées dans le cadre d'un master 1 mais se sont révélées non interprétables.

Dès l'apparition des symptômes de dépérissements, en début de 1^{ère} année du projet, nous avons anticipé les risques et cherché du matériel végétal alternatif. Nous l'avons trouvé chez une autre espèce modèle du projet, le pin maritime, sous la forme de familles élevées par la pépinière d'un institut de recherche partenaire en Espagne (TRAGSA, Galice). Nous nous sommes procurés ces plants, nous les avons fait transporter à l'INRA Orléans et installés en dispositif à la place des douglas.

Photo 2 : le dispositif pin maritime en octobre 2012



La tâche 3 est devenue l'ancienne tâche 5 d'Arbocentre. Compte-tenu des frais supplémentaires engagés dans la tâche 2 et de l'impossibilité d'abattre certains arbres réservés par le programme d'amélioration du douglas, nous avons fixé le nombre de familles récoltés à quatre (trois dans la proposition initiale). Nous avons sélectionné les familles extrêmes du point de vue des caractères d'adaptation à la sécheresse, ce qui nous a permis de mener cette partie du projet à son terme et d'obtenir des résultats statistiquement concluants.

Photo 4 : sciage des douglas



Quelques données préliminaires de réponse aux variations climatiques ont été également acquises sur pin sylvestre.

5 - Résumé des travaux réalisés (maximum 1 page par tâche + 1 page de synthèse)

Tâche 1

La tâche 1 est la plus importante du projet en termes de quantité de données produites et analysées. Nous avons récolté des carottes de bois sur 1620 arbres dans trois dispositifs de comparaison de familles de douglas situés dans trois régions de France (Orne, Vosges et Aude).

Photo 5 : carottage dans l'Orne



Les individus carottés appartiennent à 56 familles de trois provenances. L'étude rétrospective des cernes annuels par analyse microdensitométrique nous a permis de décrire à la fois précisément et à grande échelle la réponse des arbres aux variations temporelles du climat et en particulier de disponibilité en eau ; de ce point de vue, les trois sites étudiés se révèlent très différents climatiquement et fournissent des informations complémentaires. Nous avons démontré de façon rigoureuse que certaines variables de densité intra-cerne étaient des caractères adaptatifs pour la résistance à la sécheresse. Quelques données préliminaires à beaucoup plus petite échelle ont été également acquises sur pin sylvestre.

Les caractéristiques des cernes annuels varient en fonction du site, de la provenance, de la famille et du temps, en particulier en fonction des variations climatiques inter annuelles. Le douglas réagit fortement aux variations de la disponibilité en eau dans son environnement. La compétition entre arbres entraîne une plus forte diminution de croissance dans l'Orne et surtout dans les Vosges que dans l'Aude. Compte tenu de l'effet compétition, le douglas retrouve généralement une croissance normale après les épisodes de déficit en eau.

Nous avons estimé des héritabilités au sens strict pour ces caractères adaptatifs originaux et pour des caractères conventionnels, site par site, provenance par provenance et cerne annuel par cerne annuel sur la période 1993-2010 (18 ans). Selon les caractères, les sites et les périodes considérées, les variations d'héritabilité sont fortes (de non significativement différente de zéro à plus de 0,8), parfois structurées, parfois erratiques. Quels que soient les caractères, les estimations sont toujours beaucoup plus faibles dans l'Aude et les Vosges (avec des maxima vers 0,3-0,4) que dans l'Orne (avec des maxima supérieurs à 0,8). Quand les variations sont structurées, elles peuvent parfois être mises en relation avec certaines variables climatiques.

Nous avons développé un outil statistique informatisé original permettant de construire automatiquement des normes de réaction à partir de profils microdensitométriques de cerne mis en relation avec une variable de bilan hydrique. Cet outil nous permet d'estimer la plasticité phénotypique de la réponse à la disponibilité en eau à une échelle et avec une précision jamais pratiquée chez les arbres forestiers. Les analyses qui se poursuivent aujourd'hui ont pour but d'estimer le déterminisme génétique de cette plasticité phénotypique.

Dans un des trois sites du projet Xylome, nous avons testé l'hypothèse que des familles résistantes à la sécheresse pouvaient être sélectionnées sur la base de variables de densité du bois mesurées dans des cernes annuels. Nous avons choisi quatre familles, deux *résistantes* et deux *non résistantes* sur la base des données recueillies lors de la première phase du travail et nous avons abattu 10 arbres par famille. La plus grande partie du bois a été utilisée dans la tâche 3. Un billon a été réservé pour des mesures directes de résistance à la cavitation. Malgré un certain nombre de difficultés méthodologiques lors de la mesure de la résistance à la cavitation, nos résultats valident

notre hypothèse : les familles à forte densité du bois, notamment du bois initial, sont significativement plus résistantes à la cavitation, donc plus résistantes à la sécheresse, que les familles à bois de plus faible densité.

Ces résultats nous donnent des indications précises sur l'adaptabilité de l'espèce au changement climatique au travers de ses deux composantes, le potentiel d'évolution et la plasticité. Une part importante de la variation pour la résistance à la sécheresse peut être transmise aux générations suivantes. Ce résultat permet d'orienter le programme d'amélioration génétique du douglas vers la production de variétés résistantes à la sécheresse. Il permet également d'orienter les régénérations naturelles vers une meilleure résistance à la sécheresse. La technique consiste à éliminer à l'occasion des éclaircies les individus à faible densité du bois, sachant qu'aujourd'hui la densité du bois peut être mesurée à l'aide d'outils non destructifs du type Resistograph ou spectromètre infra-rouge portable.

Tâche 2

Ce travail est une première approche de la variabilité de la réponse du pin maritime à la sécheresse à un stade très juvénile. Ce stade est particulièrement sensible aux pressions de sélection. L'étude écophysiological en conditions contrôlées donne des indications sur la capacité de résister aux limitations de la disponibilité en eau du sol lors de la phase d'installation des peuplements, évidemment déterminante pour la composition et la dynamique des forêts.

Lors de notre expérimentation, la capacité au champ du traitement stressé a été progressivement descendue à 60% puis 40% durant les six semaines de l'expérience principale (contre maintien à 100% pour le témoin) durant les mois d'avril et mai 2011. Nous avons mis en évidence un effet significatif du traitement sur la croissance en hauteur, l'assimilation nette du CO₂ (A), la conductance stomatique à la vapeur d'eau (gs) et l'efficacité de l'utilisation de l'eau (calculée à partir des deux caractères précédents) : les valeurs des deux premiers caractères diminuent alors que l'efficacité de l'utilisation de l'eau augmente. Cela signifie que l'efficacité de l'utilisation de l'eau dépend plus de gs que de A. Ce résultat est confirmé par la valeur du coefficient de corrélation : il est environ deux fois plus élevé pour la liaison gs/efficacité que pour la liaison A/efficacité. Le caractère gs diminue presque trois fois plus que A. La réponse du pin maritime à la sécheresse est donc avant tout une fermeture progressive des stomates qui limite l'évapotranspiration. Il s'agit d'une adaptation à la diminution de la ressource en eau. En contrepartie, l'efficacité de l'utilisation de l'eau augmente, ce qui signifie que les arbres deviennent plus efficaces et produisent plus de biomasse par volume d'eau transporté. En conditions non stressées (témoin), nous mettons en évidence un effet famille significatif pour A, gs et la longueur de la pousse annuelle, mais pas pour l'efficacité de l'utilisation de l'eau. En conditions stressées, les différences significatives entre familles ne s'observent plus que pour la longueur de la pousse annuelle : toutes les familles convergent vers le même niveau réduit de photosynthèse et de transpiration. Donc la variation pour A et gs tend à converger entre familles en conditions stressantes. La variation significative de la longueur de la pousse annuelle en conditions stressantes ne s'explique donc pas par un effet génétique sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Elle peut s'expliquer par une variation de la distribution des produits de la photosynthèse entre compartiments, racines et parties aériennes.

Nous avons également calculé la réponse plastique moyenne des familles à la diminution de la capacité au champ pour les caractères de l'étude. Nos résultats montrent que la pente décrivant l'intensité de cette réponse plastique ne varie pas significativement entre familles : pour tous les caractères étudiés sauf la longueur de la pousse annuelle, les familles ne sont significativement différentes entre elles ni pour le *niveau* de la réponse atteint en conditions stressées (comme montré par les résultats présentés dans le paragraphe précédent), ni pour la *vitesse d'ajustement* aux nouvelles conditions environnementales. La réponse au stress hydrique est donc une caractéristique commune aux familles du groupe étudié. Ce résultat est cohérent avec des résultats d'une étude sur arbres adultes réalisée à l'INRA de Bordeaux, qui montrent une absence de différenciation génétique pour la résistance à la cavitation : les auteurs concluent que le

pin maritime a évolué sous l'effet d'une sélection uniformisante. Nous proposons l'hypothèse que chez le pin maritime la variation génétique de la photosynthèse s'exprime en conditions favorables alors qu'en conditions de sécheresse tous les génotypes convergent vers une réponse commune du type évitement par fermeture des stomates.

Des mesures de croissance en hauteur réalisées l'année suivante (en 2012) montrent que l'écart de croissance entre les deux traitements s'est atténué jusqu'à disparaître complètement. Durant le mois d'août 2013 les arbres du traitement stressé en 2011 ont été à nouveau stressés par arrêt d'arrosage, en poussant plus loin le niveau du stress, jusqu'à observer un début de chute d'aiguilles. Les arbres atteignent aujourd'hui des dimensions non compatibles avec leur maintien en serre : ils seront abattus en 2014 et des échantillons de bois seront collectés et étudiés. On recherchera en particulier la trace des deux stress hydriques de 2011 et de 2013 à l'aide d'une analyse microdensitométrique aux rayons X.

Tâche 3

Quatre familles ont été sélectionnées sur la base de la mesure de la densité du bois réalisée sur les carottes récoltées et analysées dans la tâche 1. Ce sont les familles 442 et 416 (avec une densité du bois initial faible, elles sont supposées être peu résistantes à la sécheresse) et les familles 424 et 610 (qui elles sont supposées être beaucoup plus résistantes à la sécheresse). Les mesures de résistance à la cavitation réalisées dans le cadre de la tâche 1 (voir plus haut) confirment que la sélection sur la densité a bien permis de sélectionner des familles extrêmes du point de vue des propriétés hydrauliques du bois.

L'abattage, la récolte et le transport du bois ont eu lieu en février 2012. Une scierie mobile s'est déplacée sur le site d'Orléans le 28/03/2012 pour découper les grumes en planches. Les planches ont été analysées pour évaluer la qualité de leur bois en suivant un protocole standard et les normes et usages de l'industrie du bois. Les résultats ont été analysés avec ceux obtenus dans la tâche 1.

Ces résultats mettent en évidence l'existence de différences significatives entre ces quatre familles pour certains des critères de qualité appréciés : la largeur moyenne des planches découpées, le nombre de nœuds sains et le nombre de nœuds morts. En revanche il n'y a pas de différences significatives entre ces familles pour le nombre de planches, la largeur du bois de cœur et la note attribuée en suivant la méthode visuelle de classement.

Les familles ayant les planches les plus larges sont les 416 et 424, soit une famille « non résistante » et une « résistante ». Celles qui ont les planches de plus petite largeur sont les 442 et 610, donc également une « résistante » et une « non résistante ». On retrouve à peu près les mêmes tendances pour les deux autres caractères « nombre de nœuds ». Nos résultats permettent de conclure que rien à ce stade ne permet d'affirmer que les familles supposées être plus résistantes à la sécheresse pourraient produire du bois de moins bonne qualité que les familles moins résistantes à la sécheresse. En conséquence, on peut envisager de réaliser une sélection sur la résistance à la sécheresse sans craindre de dégrader la qualité.

Nous avons également étudié le lien entre vitesse de croissance et qualité du bois de ces familles. Les trois familles 442, 416 et 424 sont peu différentes et possèdent une croissance radiale significativement plus élevée que la famille 610 (une des deux familles résistantes à la sécheresse). De ce point de vue, une certaine prudence s'impose : il n'est pas impossible que, chez le douglas, une croissance en grosseur diminuée soit le prix à payer pour une résistance à la sécheresse accrue. Ces résultats sont à rapprocher de certains résultats partiellement contradictoires obtenus dans des tests de comparaison de provenances : selon les cas, des arbres survivants après un dépérissement provoqué par des sécheresses avaient ou n'avait pas une croissance significativement plus faible que les arbres morts.

Dans tous les cas, avec seulement quatre familles, nous mettons en évidence des différences significatives entre familles pour plusieurs critères importants de la qualité du bois. Ces critères ont une influence directe sur la valeur des produits finis. Nous en

concluons que la prise en compte, directe ou indirecte, de caractères de qualité du bois dans le programme d'amélioration génétique du douglas est techniquement envisageable avec des méthodes simples et doit se faire en parallèle de la prise en compte des caractères de croissance et d'adaptation. Nos résultats restent toutefois à confirmer. Il faut aussi déterminer si le gain économique associé au gain de qualité vaut la peine de cet effort.

Synthèse

Ce projet a permis de mieux quantifier et de mieux comprendre la part respective de l'évolution (qui s'appuie sur la variance génétique additive et s'exprime au fil des générations) et de la plasticité phénotypique (qui est une réponse individuelle à plus court terme) dans la réponse adaptative des arbres aux variations du climat. C'est la première fois à notre connaissance que le déterminisme génétique des caractères impliqués dans la résistance à la sécheresse a été estimé à l'aide de familles, ce qui nous a permis d'estimer la part additive, réellement utilisable en sélection, de la variance génétique. Nos résultats confirment les relations entre propriétés hydrauliques du bois et propriétés de base du bois (densité), dont la mesure peut se substituer à celle, consommatrice de temps et délicate, des propriétés hydrauliques. La réponse des arbres a été observée sur 18 ans, dans des sites et pendant des années climatiquement très contrastées, allant de la canicule et sécheresse à des années humides et douces particulièrement favorables à la croissance du douglas. Dans les populations étudiées, la réponse des provenances et des familles s'est révélée peu interactive. Enfin, les conséquences des modifications de la réponse des arbres aux changements environnementaux sur la production de bois, en quantité et en qualité, ont été abordées. Le douglas confirme son statut d'espèce modèle majeure pour l'étude de la résistance à la sécheresse dans le groupe des espèces dites « tolérantes ». Chez ces espèces le bois joue un rôle plus important dans l'adaptation à la sécheresse que chez les espèces évitantes comme le pin maritime. Les caractéristiques anatomiques du dernier cerne formé résultent d'une interaction entre le potentiel génétique et l'environnement courant (notamment les conditions climatiques qui précèdent et accompagnent la formation du cerne). De façon générale ce projet a permis de modifier et d'approfondir notre vision des mécanismes de résistance à la sécheresse chez les arbres forestiers.

6 - Productions obtenues dans le cadre du projet

- Livrables, rapports

Tableau 1 : tableau des indicateurs

Nature de l'Indicateur	Valeur au début du projet	Valeur attendue à la fin du projet	Valeur observée	commentaires
Nombre d'arbres abattus pour les mesures hydrauliques (tâche 1)	0	120	40	forte diminution liée à l'interdiction d'abattre certains arbres réservés et à un changement de stratégie : passage à une mesure beaucoup plus consommatrice de temps (résistance à la cavitation)
Nombre de carottes récoltées pour le phénotypage (tâche 1)	0	1 200	1 620	échantillonnage plus intensif dans les dispositifs expérimentaux, de façon à augmenter la précision d'estimation de l'héritabilité, principal objectif du projet.
Nombre d'arbres en pot installés et instrumentés dans le dispositif "stress imposé" de la tâche 2	0	75	200	deux dispositifs de 100 arbres ont été installés successivement, un de douglas, qui a disparu (fort taux de mortalité), et un de pin maritime, qui a permis de produire les résultats présentés dans le rapport

Nombre d'arbres récoltés pour la tâche 3 "qualité du bois"	0	30	40	Augmentation de 10 arbres pour traiter quatre familles au lieu de trois.
Nombre d'articles soumis	0	2	2 publié, (1 soumis)	trois autres sont en préparation, dont l'un qui doit être soumis dans les semaines qui suivent la soumission du rapport final.

Rapports de stage

- M1 Université d'Orléans, Céline Button, « Application de méthodes statistiques fonctionnelles à l'analyse de la formation du bois du mélèze le long d'un gradient altitudinal »
- M1 Université d'Orléans, Charlène Branger et Alexane Berthier, « Approche écophysiological de la réponse du douglas à un stress hydrique »
- M2 Université d'Orléans, Cécile Milcent, « Etude des variations microdensitométriques de populations de douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) en dispositif expérimental »
- M2 Université d'Orléans, Charlène Branger, « Potentiel de réponse génétique du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) au changement climatique par analyse de cernes »
- M2 Université d'Orléans, Alexane Berthier, « Adaptation des conifères au climat :
- Variabilité génétique de la réponse du pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) à un stress hydrique en conditions contrôlées, approche écophysiological »

- Publications scientifiques

Un article publié :

Rozenberg, P., A. S. Sergent, G. Dalla-Salda, A. Martinez-Meier, S. Marin, M. Ruiz-Diaz, J. C. Bastien, L. Sanchez, et N. Breda. 2012. « Analyse retrospective de l'adaptation a la sécheresse chez le Douglas. » *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwesen* 163 (3). doi:10.3188/szf.2012.0088.

Un article soumis :

Manuela Ruiz Diaz Britez, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez Meier, Nathalie Bréda, Philippe Rozenberg, « Looking for wood density proxies of adaptive traits linked with resistance to drought in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). », Soumis à *Trees, Structure and Function*

Trois articles en préparation :

Muriel Feinard-Duranceau, Alexane Berthier, Cecile Vincent-Barbaroux, Sara Marin, Francisco Jose Lario, Philippe Rozenberg, « Genetic variability of maritime pine (*Pinus pinaster* aiton) response to water stress »

Manuela Ruiz Diaz Britez, Alejandro Martinez Meier, Leopoldo Sanchez, Sara Marin, Philippe Rozenberg, «Genetic determinism of resistance to drought proxies in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). »

Manuela Ruiz Diaz Britez, Alejandro Martinez Meier, Leopoldo Sanchez, Sara Marin, Philippe Rozenberg, «Genetic determinism of phenotypic plasticity of cambial response to water balance in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). »

- Réunions, séminaires, conférences

Présentations dans des conférences internationales :

Philippe Rozenberg, Maria-Elena Gauchat, Anne-Sophie Sergent, Laurent Bouffier, Alejandro Martinez-Meier, Luc Paques, Leopoldo Sanchez, 2010, Tree-ring response to climate: the concept of dendroplasticity, invited key-note presentation at the Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology conference, April 23 – 25, 2010, Institute for Forest Growth, University of Freiburg, Germany

P. Rozenberg, L. Sanchez, G. Dalla-Salda, A. Martinez-Meier, A.S. Sergent, J. C. Bastien, 2010, Tree-ring analysis of adaptation to drought in Douglas-fir, invited key-note presentation at the conference "Opportunities and Risks for Douglas-Fir in a Changing Climate", October 18-20, Forest Research Institute Baden-Württemberg, Freiburg, Germany.

Anne-Sophie Sergent, Philippe Rozenberg, Benoît Marçais, Yves Lefèvre, Jean-Charles Bastien, Leopoldo Sanchez, Louis-Michel Nageleisen and Nathalie Bréda, 2010, Vulnerability of Douglas-fir in a changing climate: study of decline in France after the 2003 drought, conference "Opportunities and Risks for Douglas-Fir in a Changing Climate", October 18-20, Freiburg, Germany.

Manuela Ruiz-Diaz, Sara Marin, Alejandro Martinez-Meier, Leopoldo Sanchez, Guillermina Dalla-Salda and Philippe Rozenberg, 2010, Impact of the 2003 heat wave on Douglas-fir in France: comparison of dead and surviving trees for juvenile and mature traits, conference "Opportunities and Risks for Douglas-Fir in a Changing Climate", October 18-20, Freiburg, Germany.

Anne-Sophie Sergent, Philippe Rozenberg, Benoît Marçais, Yves Lefèvre, Louis-Michel Nageleisen and Nathalie Bréda, 2011, Vulnerability to decline of Douglas-fir in France: study of radial growth reduction and recovery after the extreme 2003's drought, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology conference, May 11-14 2011, Orléans, France.

Sara Marin, Leopoldo Sanchez, Manuela Ruiz-Diaz, Charlène Branger and Philippe Rozenberg, 2011, Synchronization methods for construction of norms of reaction over weather records in tree rings, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology conference, May 11-14 2011, Orléans, France.

Manuela Ruiz Diaz Britez, Sara Marin, Leopoldo Sanchez, Charlène Branger and Philippe Rozenberg, 2011, Tree-ring study of genetic variation of phenotypic plasticity in Douglas-fir, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology conference, May 11-14 2011, Orléans, France.

Anne-Sophie Sergent, Philippe Rozenberg and Nathalie Bréda 2011, Douglas-fir mortality is related to low earlywood density, 12th European Ecological Federation Congress, Avila – Sept 27, 2011

Guillermina Dalla Salda, María Elena Fernández, Anne-Sophie Sergent, Alejandro Martinez-Meier, Philippe Rozenberg, 2013, "Transition wood: the lord of the ring?" International Symposium on Wood Structure in Plant Biology and Ecology (WSE), Naples, Italy, 17-20 April 2013.

M. Ruiz Diaz Britez, A.S. Sergent, L. Sanchez, A. Martinez-Meier, P. Rozenberg, 2013, "Relationships between tree mortality and tree-ring microdensity: hints on the adaptive value of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb Franco) wood under drought stress" International Symposium on Wood Structure in Plant Biology and Ecology (WSE), Naples, Italy, 17-20 April 2013.

- Valorisation et communication
- Brevets

- Autres

7 – Impact du projet en terme de recrutements

16 mois de CDD ingénieur d'étude (Sara Marin) ont été financés par le projet Xylome. Par la suite, Sara Marin a été recruté en CDD à plusieurs reprises par l'INRA Orléans pour travailler sur divers projets, pour un nombre de mois total égal à 40,5.

8 - Conclusion générale (dont suites envisagées au projet)

Malgré quelques difficultés principalement méthodologiques, ce projet est pour nous un grand succès. Plusieurs résultats peuvent être à notre avis considérés comme des avancées majeures dans le domaine de l'étude de l'adaptation des arbres forestiers à la sécheresse.

Le projet Xylome a fourni des moyens de fonctionnement de la recherche pendant plus de trois ans non seulement au personnel permanent des unités impliquées mais également à un CDD Ingénieur, deux étudiants en thèse, deux étudiants en master 2, un étudiant en master 1 et un étudiant en licence 3.

Les étudiants en thèse qui ont bénéficié de Xylome sont :

- Manuela Ruiz-Diaz, thèse AgroParisTech « déterminisme génétique de la réponse du douglas aux variations du climat » (soutenance début 2014).
- Guillermina Dalla-Salda, thèse AgroParisTech « Valeur adaptative du bois et fonction de conduction de la sève brute : approches directes et indirectes de la variation génétique et de la plasticité phénotypique des propriétés hydrauliques du bois » (soutenance courant 2014).

Xylome a également contribué à développer des collaborations internationales en Europe (Allemagne, Pays-Bas, Espagne, Portugal) et hors d'Europe, principalement en Argentine. Il est en particulier une composante importante de la collaboration suivie avec plusieurs unités de l'INTA (équivalent de l'INRA) en Argentine, collaboration que nous cherchons actuellement à développer et pérenniser. Un projet de collaboration bilatéral France-Argentine s'appuyant sur des résultats de Xylome (« Décryptage des liens entre stratégies de résistance à la sécheresse et densité du bois chez les arbres forestiers ») vient d'être soumis.

Dans le prolongement des résultats de Xylome, nous avons l'intention d'explorer d'autres pistes de recherche :

-élargir la base génétique et environnementale de l'étude de la réponse du douglas au climat : Xylome utilise des populations de douglas originaires d'une petite partie océanique de l'aire naturelle. Les sites expérimentaux étudiés se trouvent dans des zones climatiques considérées comme convenant à ces origines. Nous souhaitons anticiper l'étude de la réponse du douglas au changement climatique en l'étudiant dans des sites plus chauds, avec une gamme d'origine plus larges incluant des provenances de régions sèches. Deux dispositifs de ce type existent en France en région méditerranéenne.

-valider certains de nos résultats par une étude en conditions contrôlées de la réponse du douglas à la sécheresse. Le dispositif qui a disparu en début de projet conserve tout son intérêt et doit être réinstallé. Son intérêt sera accru si nous pouvons y installer des génotypes sélectionnés sur la densité du bois ayant des potentiels de réponse à la sécheresse contrastés.

-poursuivre la comparaison des espèces tolérantes et évitantes en valorisant le dispositif pin maritime en conditions contrôlées, par des mesures de résistance à la cavitation et des mesures de microdensité.