

Habilitation à diriger des recherches

Le peuplier dans tous ses états : Variabilité et plasticité de productivité et de physiologie en réponse au pédoclimat et à la gestion

Présentée par

Nicolas MARRON

Soutenance le 6 avril 2016

Membres du jury :

Rapporteurs :	Claire Damesin	Professeur, Université Paris Sud
	Annie DesRochers	Professeur, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue
	Jean-Paul Laclau	Chercheur au CIRAD, Montpellier
Examineurs :	Franck Brignolas	Professeur, Université d'Orléans
	Reinhart Ceulemans	Professeur, Université d'Anvers
	Daniel Epron	Professeur, Université de Lorraine

Sommaire

Liste des abréviations.....	5
Avant-propos.....	7
1. Curriculum vitae.....	9
1.1. État civil.....	9
1.2. Situation actuelle.....	9
1.3. Cursus.....	9
1.4. Formation par la recherche.....	9
1.5. Formations complémentaires.....	10
2. Expertise et responsabilités collectives.....	11
2.1. Expertises et études à destination des pouvoirs publics.....	11
2.2. Contribution à la vie et au fonctionnement de collectifs.....	12
2.2.1. Vie collective de l'institution.....	12
2.2.2. Jurys de concours.....	12
2.2.3. Jurys et comités de thèse.....	12
2.2.4. Divers.....	12
3. Activités d'enseignement.....	13
3.1. Activités d'enseignement réalisées avant mon recrutement.....	13
3.2. Activités d'enseignement réalisées depuis mon recrutement.....	13
3.3. Participation à des universités d'été et jurys.....	14
4. Formation par la recherche.....	15
4.1. Co-encadrement de thèses.....	15
4.2. Co-encadrement d'étudiants de premier et deuxième cycles.....	17
4.2.1. Master 1 Forêt Agronomie et Génie de l'Environnement (Nancy).....	17
4.2.2. Master 2 Forêt Agronomie et Génie de l'Environnement (Nancy).....	18
4.2.3. Maîtrises Biologie Cellulaire et Physiologie / Sciences de l'Environnement (Orléans).....	18
4.2.4. Licence de Biologie des Organismes (Nancy).....	19
4.2.5. BTS Biotechnologie / Biochimie / Gestion forestière.....	19
5. Projets et collaborations.....	21
5.1. Participation à des projets de recherche nationaux et internationaux.....	21
5.1.1. Coordination de projets.....	21
5.1.2. Partenaire de projets.....	22
5.2. Collaborations significatives.....	26
5.2.1. Organismes de recherche.....	26
5.2.2. Instituts techniques.....	28
5.2.3. Secteur privé.....	28
6. Activités de recherche.....	31
6.1. Quelques éléments de contexte.....	33
6.1.1. Le peuplier et la populiculture.....	33
6.1.2. Les taillis à courte rotations.....	34
6.2. Écophysiologie de la réponse à la sécheresse du peuplier.....	37

Sommaire

6.3.	Diversité et plasticité de la productivité, de ses déterminants foliaires, phénologiques et architecturaux, et de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le peuplier.....	42
6.3.1.	Déterminants phénologiques, architecturaux et foliaires de la productivité.....	43
6.3.2.	Efficacité d'utilisation de l'eau.....	49
6.4.	Variabilité temporelle de la signature isotopique de la respiration du sol.....	51
6.5.	Écophysiologie et conduite des taillis à courte rotation (TCR).....	53
6.5.1.	Variabilité et plasticité de la productivité et de l'efficacité d'utilisation des ressources.....	55
6.5.1.1.	État de l'Art et enjeux.....	56
6.5.1.2.	Résultats marquants.....	58
6.5.2.	Allocation et dynamique du carbone et de l'azote en plantation mélangée peuplier / robinier.....	63
6.5.2.1.	État de l'Art et enjeux.....	63
6.5.2.2.	Résultats marquants.....	66
6.6.	Perspectives de recherche à quatre ans.....	73
6.6.1.	État de l'Art et enjeux.....	73
6.6.2.	Dispositif expérimental.....	75
6.6.3.	Production de biomasse et allocation du carbone.....	79
6.6.4.	Efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote.....	81
6.6.5.	En outre... ..	84
6.7.	Conclusion.....	86
7.	Publications et communications.....	87
7.1.	Articles en préparation.....	88
7.2.	Articles scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture.....	88
7.3.	Chapitres d'ouvrages.....	92
7.4.	Articles scientifiques dans des revues nationales à comité de lecture.....	92
7.5.	Communication dans des congrès et colloques.....	93
7.5.1.	Communications orales invitées lors de conférences internationales.....	93
7.5.2.	Communications lors de symposiums et congrès internationaux.....	93
7.5.2.1.	Communications orales.....	93
7.5.2.2.	Posters.....	95
7.5.3.	Communications lors de réunions plénières de projets internationaux.....	96
7.5.4.	Communications lors de conférences nationales.....	98
7.5.4.1.	Communications orales.....	98
7.5.4.2.	Posters.....	98
7.5.5.	Communications lors de séminaires.....	99
7.6.	Rapports finaux de projets de recherche.....	101
7.7.	Documents destinés à des utilisateurs de la recherche.....	102
8.	Références non issues de ma propre bibliographie.....	103
Annexe 1.	Organigramme de l'Unité EEF au 1^{er} décembre 2015.....	107

Glossaire

(Les abréviations définies dans les légendes des figures et tableaux ne sont pas reprises ici)

Acronyme	Signification	Localisation
Instituts		
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement	France
CNRS	Centre national de la recherche scientifique	France
ENSAIA	École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires	France
FCBA	Forêt, cellulose, bois construction, ameublement	France
FVA	Forstliche versuchs- und forschungsanstalt Baden-Württemberg	Allemagne (Freiburg)
HFR	Hochschule für forstwirtschaft Rottenburg	Allemagne (Rottenburg)
IDF	Institut pour le développement forestier	France
IER	Institut für energiewirtschaft und rationelle energieanwendung	Allemagne (Stuttgart)
INRA	Institut national de la recherche agronomique	France
Irstea	Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture	France
ONF	Office national des forêts	France
VIB	Vlaams instituut voor biotechnologie	Belgique - Flandres (Gand)

Universités

UHP	Université Henri Poincaré	Nancy
UJF	Université Joseph Fourier	Grenoble
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue	Rouyn-Noranda
USP	Université de São Paulo	São Paulo

Formations de deuxième et troisième cycles

FAGE	Forêt, agronomie et génie de l'environnement (Master)
MIXFOR	Species interactions in mixed forest ecosystems (Université d'été)
RP2E	Ressources, procédés, produits, environnement (École doctorale)
SIFER	Utilisation d'isotopes stables dans la recherche sur les écosystèmes forestiers (Formation doctorale)

Département - Programme INRA

EFPA	Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques (Département)
CARBIO	Carbone renouvelable et bio-industrie (Programme)

Financeurs

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	France
ANR	Agence nationale de la recherche	France
CAS-DAR	Compte d'affectation spéciale pour le développement agricole et rural	France
COFECUB	Comité français d'évaluation de la coopération universitaire et scientifique avec le Brésil	France
DREAM	Durabilité de la ressource en eau associée aux milieux	France
FNR	Fachagentur nachwachsende rohstoffe eV (DE)	Allemagne
FWO	Fonds wetenschappelijk onderzoek (BE)	Belgique - Flandres
OSEO	Œuvre suisse d'entraide ouvrière	France
PHC	Partenariat Hubert Curien	France

Unités de recherche

AGPF	Amélioration, génétique et physiologie forestières	Orléans
Agro-Impact	Agroressources et impacts environnementaux	Mons
BEF	Biogéochimie des écosystèmes forestiers	Nancy
DISAFRI	Dipartimento di scienze dell'ambiente forestale e delle sue risorse	Viterbe
Eco&Sols	Écologie fonctionnelle et biogéochimie des sols et des agroécosystèmes	Montpellier
EEF	Écologie et écophysiologie forestières	Nancy
ESALQ	Escola superior de agricultura "Luiz de Queiroz"	São Paulo
FARE	Fractionnement des agroressources et environnement	Reims
GBFor	Génétique et biomasse forestières	Orléans
IAM	Interactions arbres - microorganismes	Nancy
ISPA	Interactions sol - plante - atmosphère	Bordeaux
LAE	Laboratoire agronomie - environnement	Nancy - Colmar
LBLGC	Laboratoire de biologie des ligneux et des grandes cultures	Orléans
LERMAB	Laboratoire d'études et de recherche sur le matériau bois	Nancy

Unités de recherche

LIEC	Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux	Nancy
PIAF	Physique et physiologie intégratives de l'arbre fruitier et forestier	Clermont-Ferrand
Pleco	Plant and vegetation ecology	Anvers
SYSTEM	Systèmes de cultures tropicaux et méditerranéens	Montpellier

Associations - Secteur privé

AFAF	Association française d'agroforesterie	Montpellier
AILE	Association d'initiatives locales pour l'énergie et l'environnement	Rennes
Cosylval	Coopérative des sylviculteurs d'Alsace	Schiltigheim
UPM	United paper mills Ltd	Strasbourg

Réseaux

AnaEE	Analysis and experimentation on ecosystems
ERA-Net	European research area network
F-ORE-T	Fonctionnement des écosystèmes forestiers
GIP ECOFOR	Groupement d'intérêt public – Écosystèmes forestiers
GIS	Groupement d'intérêt scientifique
NFZ	Nancy - Freiburg - Zurich
RMT	Réseau Mixte Technologique
SOERE	Système d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement

Équipes EEf

ARBECO	Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème
PhysioDiv	Physiologie et diversité des réponses aux contraintes
Phytoéco	Dynamique à long terme et dysfonctionnement des écosystèmes forestiers
PTEF	Plateforme technique d'écologie fonctionnelle

Projets

ARBRE	Advanced research on the biology of tree and forest ecosystems
CREFF	Cost reduction and efficiency improvement of short-rotation coppice
EVOLTREE	Evolution of trees as drivers of terrestrial biodiversity
Intens&Fix	Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières
Mafor	Matières fertilisantes d'origine résiduaire
SYLVABIOM	Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques
TSAR	Techniques sylvicoles et agronomiques remédiantes
UP-TRANS	Upscaling of anatomical, physiological and molecular determinisms of transpiration at wood and leaf levels in poplar trees submitted to water stress
WOOD-EP-N2	Wood composition of eucalypt and poplar from pure and mixed plantations

Termes scientifiques

ANPP	Aboveground net primary production
$\delta^{13}C$	Composition en ^{13}C
$\Delta^{13}C$	Discrimination isotopique vis-à-vis du carbone
GCB	Global change biology
HPLC	High performance liquid chromatography
LAI	Leaf area index
LER	Land equivalent ratio
LPI	Leaf plastochron index
Ndfa	Nitrogen derived from atmosphere
N_{export}	Nitrogen exportation rate
NIRS / MIRS	Near-infrared / Mid-infrared spectroscopy
NUE	Nitrogen-use efficiency
RWC	Relative water content
SLA	Specific leaf area
SRC	Short-rotation coppice
TBCF	Total belowground carbon flux
TCR	Taillis à courte rotation
TDLS	Tunable diode laser spectrophotometer
TTCR	Taillis à très courte rotation
WUE	Water-use efficiency

Structuration de la recherche

ARP	Atelier de réflexion prospective
CSU	Conseil scientifique d'utilisation
EA	Équipe d'accueil
ESCo	Expertise scientifique collective
Labex	Laboratoire d'excellence
OC	Outil commun
R&D	Recherche et développement
UE	Unité expérimentale
UMR	Unité mixte de recherche
UR	Unité de recherche
USC	Unité sous contrat (avec l'INRA)

Divers

ANOVA	Analysis of variance
BTS	Brevet de technicien supérieur
CDD	Contrat à durée déterminée
DEA	Diplôme d'études approfondies
NORIA	Notoriété des revues et indicateurs d'articles
PES	Prime d'excellence scientifique
TR	Technicien de recherche

Avant-propos

L'HDR est l'occasion de faire le point et de regarder dans le rétroviseur. Dans mon cas, elle me permet de me rendre compte que mes 15 (premières) années de carrière ont finalement été bien remplies, sans temps morts. La partie « recherche » de ce mémoire n'a pas vocation à être exhaustive en termes de résultats obtenus (et publiés) car cela reviendrait à paraphraser mes propres publications, mémoires de thèses, rapports de stages encadrés, etc. Au lieu de cela, j'ai essayé de retracer mon parcours scientifique de manière synthétique et critique, ainsi que la logique selon laquelle il a évolué, en l'illustrant par des figures et des résultats extraits de ma bibliographie.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner mes travaux en vue de l'obtention de l'HDR, avec un merci particulier à mes trois « mentors » de doc et post-doc : Franck Brignolas, Reinhart Ceulemans et Daniel Epron qui m'ont tous les trois beaucoup apporté (dans des styles différents) et appris à construire un raisonnement, à faire preuve de curiosité et de créativité scientifique, à comprendre la chance que l'on a de faire ce métier et à m'organiser et faire preuve de rigueur (concernant ce dernier point, l'opinion générale s'entend sur le fait que j'ai un peu dérivé vers la maniaquerie...).

Mes remerciements vont également aux nombreuses personnes (scientifiques, techniciens et étudiants) qui ont émaillé mon parcours professionnel, l'ont enrichi et fait évoluer, à Orléans, Anvers, Viterbe et Nancy. La plupart sont citées dans les rubriques « encadrement » et « collaborations » de ce mémoire, mais je souhaiterais tout de même mentionner ici Romain, Sophie et Erwin qui ont eu une influence particulière sur mes activités scientifiques.

Merci enfin à Marie-Noëlle et Irène pour leur relecture de ce manuscrit et leurs conseils avisés (dans des styles différents).

2000-2003 : Thèse de doctorat au sein de l'EA 1207 Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures (LBLGC) – Université d'Orléans.

Titre : Écophysiologie des peupliers euraméricains en réponse à la sécheresse.

Durée : 3 ans

Responsables : Dr Franck Brignolas, Prof. Francis Delmotte

2000 : Stage de DEA au sein de l'EA 1207 Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures (LBLGC) – Université d'Orléans.

Titre : Écophysiologie de deux clones de *Populus × euramericana* cv. Dorskamp et Luisa Avanzo durant un cycle sécheresse/ré-arrosage.

Durée : 8 mois

Responsables : Dr Franck Brignolas, Prof. Guy Kahlem

1.5. Formations complémentaires

- « Conduite professionnelle : risques routiers » – Phalsbourg – 22-23 mars 2010
- « Membre de jury de concours externes » – Paris – 21-22 avril 2011
- Séminaire trajectoire chargés de recherche EFPA – La Rochelle – 26-27 septembre 2011

2. Expertise et responsabilités collectives

2.1. Expertises et études à destination des pouvoirs publics

1. Participation en tant qu'expert de la biomasse forestière issue de plantations intensives à la **conférence franco-chinoise sur l'Agro-écologie dans le contexte du changement climatique**, organisée par l'ambassade de France en Chine, à Pékin, Chine – 3-5 juin 2015.
2. Participation en tant qu'expert des plantations forestières intensives à l'**expertise scientifique collective nationale** CNRS-INRA-Irstea sur les impacts de l'épandage de matières fertilisantes d'origine résiduaire (ESCo Mafor) à la demande des ministères de l'Agriculture et de l'Ecologie – 2013-2014.
3. **Expertise** de synthèse bibliographique pour l'IDF réalisée dans le cadre du projet TSAR (Techniques Sylvicoles et Agronomiques Remédiantes), du cluster DREAM – 2011.
4. **Expertise de projet** pour le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (Natural Sciences and Engineering Research of Canada) – 2009.
5. Implication dans l'**Atelier de Réflexion Prospective (ARP) VegA** en tant qu'expert pour la tâche 10 (« *Conception de systèmes de culture et de systèmes de production* ») – 2008 - 2010.
6. Participation au **comité de pilotage** de Taillis à Très Courte Rotation (TTCR) de saule mis en place par la Chambre d'Agriculture des Vosges – 16 avril 2008.
7. Participation à la **journée d'information** des exploitants agricoles – Présentation des projets de l'ENSAIA et de l'INRA de Nancy en matière d'énergies renouvelables. Journée organisée par la Chambre d'Agriculture de Meurthe-et-Moselle à Nancy – 13 février 2008.
8. Participation au **Réseau Mixte Technologique (RMT) Biomasse, Energie, Environnement et Territoire** – Séminaire d'ouverture organisé par la Chambre d'Agriculture de Picardie à Amiens – 9 et 10 janvier 2008.
9. Participation à une **consultation d'experts** sur les Taillis à Courte Rotation organisée à Harpenden, Royaume-Uni par la Commission Européenne (*Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit*) – 17 et 18 octobre 2007.

2.2. Contribution à la vie et au fonctionnement de collectifs

2.2.1. Vie collective de l'institution

1. Représentant titulaire des Chargés de Recherche au sein du **Conseil de Service de l'Unité EEF** depuis le 28 mai 2015.
2. Participation à l'organisation et à l'animation des séminaires du Département INRA EFPA en **septembre 2012** (Pont-à-Mousson) et en **janvier 2015** (Orléans).
3. Participation au **Conseil Scientifique d'Utilisation** (CSU) de l'Unité Expérimentale Génétique et Biomasse Forestières d'Orléans (UE 995) depuis 2010.

2.2.2. Jurys de concours

4. **Membre de jury de concours externe de Maître de Conférences** (sections 66/68) à l'Université d'Orléans en **2012** (poste 0232).
5. **Membre de jury de concours externe de Technicien de Recherche** INRA (Technicien des milieux naturels et ruraux) en **2011** (profils TR11-EFPA).

2.2.3. Jurys et comités de thèses

6. **Jury de thèse** de Najwa Al Afas – Université d'Anvers, Belgique (directeur de thèse : Reinhart Ceulemans) – « *Comparative study of ecophysiological characteristics related to biomass production of different hybrid poplars in a short rotation coppice culture* » – Soutenue le 25 juin 2007 à Anvers, Belgique.
7. **Jury de thèse** de Lahcen Benomar – Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Canada (directeur de thèse : Annie DesRochers) – « *Plantation de peuplier hybride dans la région boréale du Canada : Espacement entre les arbres, déploiement mixte et modélisation éco-physiologique de l'assimilation du carbone à l'échelle de la canopée* » - Soutenue le 14 mai 2012 à Rouyn-Noranda, Canada.
8. **Comité de thèse** de Sylvain Chamailard – Université d'Orléans (directeur de thèse : Franck Brignolas) – « *Variabilité de facteurs écophysologiques contrôlant la régénération de populations naturelles de peuplier noir (Populus nigra L.) en Loire moyenne dans le cadre des modifications climatiques actuelles* » - Le 20 mars 2009 à Paris.
9. **Comités de thèse** de Morgane Pluchon – Université de Lorraine (directeurs de thèse : Daniel Epron / Dominique Gérard) – « *Dynamiques saisonnières des réserves carbonées et azotées chez l'eucalyptus en plantation pure et en association avec une espèce fixatrice d'azote, l'acacia* » - Les 28 mars 2011 et 10 décembre 2012.

2.2.4. Divers

10. **Relecture d'articles** pour les revues internationales à comité de lecture *Annals of Botany, Annals of Forest Science, BioEnergy Research, Biomass & Bioenergy, Ecology, Environmental and Experimental Botany, Environmental Management, Environmental Pollution, European Journal of Wood and Wood Products, Forest Ecology and Management, Forests, Trees & Livelihoods, Forestry, Functional Plant Biology, GCB Bioenergy, International Journal of Plant Sciences, New Forests, New Phytologist, New Zealand Journal of Forestry Science, Physiologia Plantarum, Plant Ecology & Diversity, Silvae Genetica* et *Tree Physiology*.

Dans la suite du document, les encarts en vert titrés « Analyse » correspondent aux bilans des différents chapitres, où je porte un regard synthétique et critique sur mes activités.

3. Activités d'enseignement

3.1. Activités d'enseignement réalisées avant mon recrutement

Université	Filière	Module	Responsable	Nature	Calendrier	Nombre d'heures
Université d'Anvers	Licence de Biologie, option Milieu	Écologie végétale	Prof. R. Ceulemans	Cours	De 2004 à 2006	3 x 1h30
Université d'Anvers	Maîtrise de Biologie, option Milieu	Écophysiologie végétale	Prof. R. Ceulemans	Cours	2005 et 2006	4 x 1h30
Université Libre de Bruxelles	Bio-ingénierie	Écophysiologie forestière	Prof. C. De Cannière	Cours	2006	6 x 2h
Université Libre de Bruxelles	Bio-ingénierie	Agronomie et biotechnologies	Prof. J. Bogaert	Cours	2006	2 x 2h
Université Henri Poincaré	Master 1 ^{ère} année FAGE	Écophysiologie	Prof. D. Epron	Travaux Dirigés	2007	2h
Université Henri Poincaré	Licence Sciences de la Vie	Plantes et Environnement	Prof. D. Epron	Travaux Dirigés	2007	4 x 2h

➔ Soit 26h30 de cours et 10h de travaux dirigés

3.2. Activités d'enseignement réalisées depuis mon recrutement

Université	Filière	Module	Responsable	Nature	Calendrier	Nombre d'heures
Université de Lorraine	Licence de Sciences du Vivant	La forêt, l'arbre et le bois	Prof. D. Epron, Dr. S. Chauchard	Travaux Dirigés	De 2010 et 2016	12 x 2h
Université de Lorraine	Master 2 ^{ème} année FAGE	Fonctionnement et gestion de l'arbre en milieu anthropisé	Dr. Marie-Reine Fleisch	Cours	2015 et 2016	2 x 2h
Université de Lorraine	Master 2 ^{ème} année FAGE	Écophysiologie de réponse à la sécheresse	Dr. M.B. Bogeat-Triboulot	Travaux Dirigés	2015 et 2016	2 x 2h

➔ Soit 3h30 de cours et 28h de travaux dirigés – Environ 8h par an depuis 2015

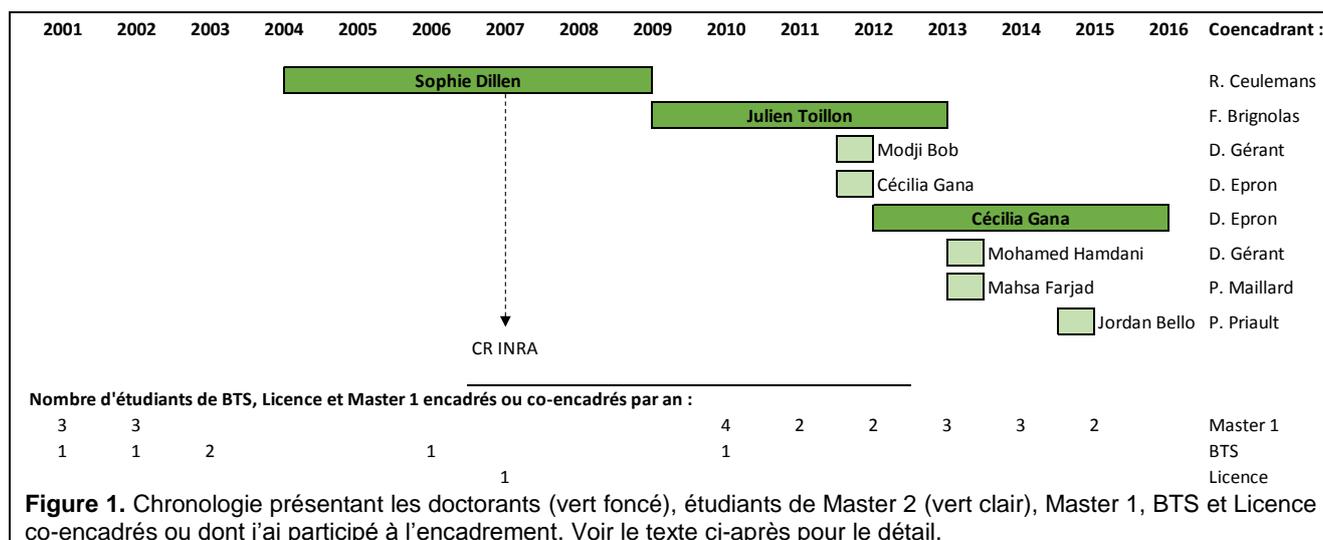
3.3. Participation à des universités d'été et jurys

- **Co-organisation de l'Université d'été internationale** (Summer School) NFZ (Nancy – Freiburg – Zurich) en 2014 (août 25-29) à Nancy sur le thème des interactions des espèces dans les forêts et plantations mélangées (*Species interactions in mixed forest ecosystems*, MIXFOR).
- **Participation au « Training course on the use of stable isotopes in forest ecology »** organisé en mars 2009 à Champenoux et sponsorisé par le projet européen EVOLTREE.
- **Jury pour l'évaluation des projets tuteurés de Master 1 FAGE** (Forêt, Agronomie et Génie de l'Environnement) de l'Université de Lorraine en 2011, 2013 et 2015.

Analyse

Bien que peu nombreuses, les heures d'**enseignement** que j'ai dispensées aussi bien avant qu'après mon recrutement à l'INRA ont toutes été montées de toutes pièces par mes soins. Il s'agit de sujets connexes à mes activités de recherche actuelles ou passées (importance de l'ajustement osmotique en réponse à la sécheresse, enjeux liés aux plantations d'arbres dédiées à la bioénergie en Master 2) ou plus éloignés (description de la filière bois en Licence 3). Certaines des interventions, notamment au sein de l'Université d'Anvers ou dans le cadre d'Universités d'été thématiques (MIXFOR par exemple), étaient réalisées en anglais. J'ai également eu l'occasion d'organiser, en tandem avec Damien Bonal (EEF, INRA Nancy), une **Université d'été internationale** à Nancy en 2014 sur le thème des écosystèmes forestiers mélangés dans le cadre du réseau Nancy – Freiburg – Zurich (NFZ). J'effectue à l'heure actuelle **une dizaine d'heures annuelles d'enseignement en moyenne** en Licence et Master 2 au sein de l'Université de Lorraine.

4. Formation par la recherche



4.1. Co-encadrement de thèses (Figure 1)

1. Co-encadrement (50%) de la thèse de **Cécilia Gana** (financement Ministère de la Recherche) 2012 – 2016 : « *Croissance, production et acquisition de l'azote chez le peuplier et le robinier en plantations à courte rotation monospécifiques et mélangées* ». Directeur de thèse : Prof. Daniel Epron (UMR EEF, Université de Lorraine). École doctorale : Ressources, Procédés, Produits Environnement (RP2E). Soutenance le 5 février 2016 à Vandœuvre-lès-Nancy.
2. Co-encadrement (50%) de la thèse de **Julien Toillon** (financement ANR) 2009 – 2013 dans le cadre du projet ANR Bioénergies SYLVABIOM (coordination : INRA Orléans, UR AGPF, Jean-Charles Bastien) : « *Variabilité génétique et plasticité de l'efficacité d'utilisation des ressources (eau et azote chez les Salicacées cultivées en taillis à courte et très courte rotations* ». Directeur de thèse : Prof. Franck Brignolas (EA LBLGC, Université d'Orléans). École doctorale : Ressources, Procédés, Produits Environnement (RP2E). Soutenance le 11 juillet 2013 à Vandœuvre-lès-Nancy.

Devenir après la thèse : Chargé d'expérimentation agronomique au sein de la société Astria Bassin Parisien (Pithiviers).

3. Participation à l'encadrement de la thèse de **Sophie Dillen** (financement flamand FWO) 2004 – 2009 : « *Genetic variation in growth and its determinants in two poplar families grown at two sites* ». Directeur de thèse : Prof. Reinhart Ceulemans (Pleco, Université d'Anvers, Belgique). Soutenance le 24 avril 2009 à Wilrijk (Belgique).

Devenir après la thèse : Trois ans de post-doctorat au sein de l'Université d'Anvers (financement FWO).

Analyse

Je me suis investi depuis 2004 dans l'**encadrement de trois doctorants**, deux (J. Toillon, C. Gana) en tant que co-encadrant officiellement reconnu par l'École Doctorale RP2E de l'Université de Lorraine (respectivement avec Franck Brignolas et Daniel Epron) et un (S. Dillen) en tant qu'appui à l'encadrement (avec Reinhart Ceulemans) à Anvers. Parallèlement à cela, une autre étudiante, Emilie Kartner, abandonnait la thèse que je venais d'être autorisé à co-encadrer avec Daniel Epron pour raisons personnelles en 2011. La thèse, commencée un an auparavant, était financée par la Région Lorraine et le CIRAD.

Dans le cadre de la thèse de Sophie Dillen, j'ai co-signé dix articles dans des revues internationales à comité de lecture et un chapitre d'ouvrage avec elle entre 2007 et 2011. La thèse soutenue en juillet 2013 par Julien Toillon a donné lieu à trois articles dans des revues nationales et internationales à comité de lecture. D'autres publications sont en préparation. Les travaux issus de la thèse de Cécilia Gana, soutenue en février 2016, sont en cours de valorisation.

Je tire des bilans assez mitigés des thèses de Julien Toillon et Cécilia Gana pour des raisons aussi bien professionnelles qu'humaines. Dans les deux cas, les travaux étaient menés dans le cadre de projets ANR et les étudiants ont eu des difficultés à dégager leurs propres objectifs parmi ceux du projet. Dans le cas de Julien, la distance entre ses deux co-encadrants (Orléans – Nancy) a sans doute contribué à rendre les choses difficiles. Dans le cas de Cécilia, la distance au site expérimental (500 km) et la mortalité grandissante qui y régnait ont affecté aussi bien les résultats des expérimentations que la motivation de l'étudiante. Les expériences négatives comme positives acquises dans le cadre de ces co-encadrements m'ont permis de tirer des leçons pour mes prochains encadrements de doctorants, notamment en veillant à la proximité et à la maturité des dispositifs expérimentaux étudiés et, si possible, à avoir côtoyé l'étudiant au préalable dans le cadre de stage(s) de Master.

4.2. Co-encadrement d'étudiants de premier et deuxième cycles

J'ai encadré ou co-encadré **16 étudiants de Master 1** et **7 étudiants de Master 2** de l'Université de Lorraine depuis mon recrutement à l'INRA, ainsi que **6 étudiants de Maîtrise** de l'Université d'Orléans pendant ma thèse et **6 étudiants de BTS** entre 2001 et 2011 (Figure 1).

4.2.1. Master 1 Forêt, Agronomie et Génie de l'Environnement (FAGE, Université de Lorraine, Nancy)

Période	Etudiant	Co-encadrant	Sujet	Devenir après le stage
Mai – juin 2015	Mathilde Chardon	Caroline Plain	Comparaison de l'évolution temporelle des teneurs en eau du sol en placettes de peupliers et d'aulnes	
Mai – juin 2015	Guillaume Sabourin	–	Croissance aérienne de peupliers et d'aulnes dans une plantation agroforestière composée de mélanges d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote	M2 avec stage à l'Association Française d'AgroForesterie
Mai – juin 2014	Mathieu Peschaud	–	Caractérisation de la variabilité spatiale initiale d'une plantation agroforestière en termes de facteurs édaphiques et de vigueur du matériel végétal	
Mai – juin 2014	Jordan Bello	Pierrick Priault	Effet de l'introduction de l'espèce fixatrice d'azote <i>Robinia pseudoacacia</i> , sur les paramètres photosynthétiques du peuplier en culture mixte	M2 puis thèse à l'Irstea (Nogent-sur-Vernisson)
Mai – juin 2014	Guillaume Foursov	Pierrick Priault	Effet saisonnier du mélange peuplier / robinier sur la morphologie et le fonctionnement photosynthétique du feuillage de robinier	
Mai - juin 2013	Sabrina Debuy	Caroline Plain	Calibration de sondes mesurant l'humidité du sol ; comparaison de deux sols différents	
Mai - juin 2013	Maxence Martin	Pierrick Priault	Effet du mélange peuplier / robinier sur la morphologie et le fonctionnement photosynthétique du feuillage de robinier	M2 puis thèse à Chicoutimi (UQAT, Canada)
Mai - juin 2013	Nicolas Dusart-Marquet	Pierrick Priault	Effet du mélange <i>Populus nigra</i> × <i>P. deltoides</i> / <i>Robinia pseudoacacia</i> sur la morphologie foliaire et les performances photosynthétiques du peuplier	M2 puis thèse à Nancy (EEF)
Juillet - août 2012	Belaid Hamdidi	Daniel Epron	Établissement d'équations allométriques dans un TCR mélangé peuplier / robinier	
Mai - juin 2012	Romain Daumur	Pierrick Priault	Effet de l'introduction d'une espèce fixatrice d'azote, le robinier, sur la photosynthèse du peuplier dans une plantation mélangée des deux espèces	M2 puis thèse au CIRAD (Martinique)
Juin - juillet 2011	Viviane Sogni Tchichelle	Daniel Epron	Effet de la densité de plantation et de pédoclimats contrastés sur la croissance de taillis de peuplier à vocation énergétique	M2 puis thèse en cotutelle France – Congo (Nancy – Pointe-Noire)
Juin - juillet 2011	Cécilia Gana	Daniel Epron	Effets de pédoclimats contrastés sur la croissance de plantations mixtes, peuplier / robinier	M2 puis thèse à Nancy (EEF)
Juin - juillet 2010	Charlotte Grossiord	Daniel Epron	Signature isotopique de la respiration du sol en culture pure ou en mélange	M2, thèse à Nancy (EEF) puis post-doc au Nouveau-Mexique (USA)
Juin - juillet 2010	Claire Amory	Daniel Epron	La respiration du sol dans les plantations mixtes peuplier / robinier : impact du mélange d'espèces	
Juin - juillet 2010	Dramane Konate	Daniel Epron	Effet de la densité de plantation sur la croissance de taillis de peuplier à vocation énergétique	
Juin - juillet 2010	Keita Nsamouni	Daniel Epron	Effet de la compétition sur les relations allométriques dans les plantations mixtes de peuplier et de robinier	

4.2.2. Master 2 Forêt, Agronomie et Génie de l'Environnement (FAGE, Université de Lorraine, Nancy)

Période	Etudiant	Co-encadrants	Sujet	Devenir après le stage
Février – août 2015	Jordan Bello	Pierrick Priault	Impact d'un mélange d'espèces fixatrice/non fixatrice d'azote (robinier / peuplier) sur l'allocation du carbone chez le peuplier dans une plantation à courte rotation	Thèse à l'Irstea (Nogent-sur-Vernisson) depuis décembre 2015
Février – août 2015	Rayhana Laamiri	Nicolas Brosse (LERMAB), Dominique Gérant	Composition du bois en plantations mélangées d'espèces fixatrices d'azote : impact de la ressource en azote	
Février - août 2013	Zahra Menana	Nicolas Brosse (LERMAB), Dominique Gérant	Composition du bois en plantations mélangées d'espèces fixatrices (<i>Acacia mangium</i>) et non fixatrices d'azote (<i>Eucalyptus urograndis</i>) : Impact de la ressource en azote	
Février - août 2013	Mohamed Hamdani	Dominique Gérant	Effet de l'introduction d'une espèce fixatrice d'azote (robinier) dans une plantation expérimentale de peupliers sur les capacités de stockage de l'azote dans les organes pérennes de peupliers	
Février - août 2013	Mahsa Farjad	Pascale Maillard	Impact du mélange robinier/peuplier sur l'assimilation et l'allocation d'azote de peupliers cultivés en plantation à courte rotation	Thèse à l'INRA de Paris depuis octobre 2013
Février - août 2012	Cécilia Gana	Daniel Epron	Allocation du carbone vers le compartiment souterrain dans des plantations pures et mixtes de peupliers et de robiniers	Thèse à l'INRA de Nancy – Université de Lorraine d'octobre 2012 à février 2016
Février - août 2012	Modji Bob	Dominique Gérant	Effet de l'introduction d'une espèce fixatrice d'azote (le robinier) dans une plantation expérimentale de peupliers sur les capacités de mise en réserve du carbone et de l'azote dans les organes pérennes de peupliers	Ingénieure qualité – hygiène – sécurité – environnement chez Geostock (Paris)

4.2.3. Maîtrise Biologie Cellulaire et Physiologie / Maîtrise Sciences de l'Environnement (Université d'Orléans)

Période	Etudiant	Co-encadrants	Sujet
Avril - juillet 2002	Sébastien Méry	Eric Boudouresque	Impact d'un cycle sécheresse-réarrosage sur la croissance de six clones de peupliers euraméricains
Avril - mai 2002	François Mecattini	Eric Boudouresque	Impact d'un cycle sécheresse-réarrosage sur le SLA de six clones de peupliers euraméricains
Avril - mai 2002	Cédric Mercier	Eric Boudouresque	Impact d'un cycle sécheresse-réarrosage sur le statut hydrique de six clones de peupliers euraméricains
Mai - juillet 2001	Sylvain Ribert	Franck Brignolas	Impact de un à trois cycles sécheresse / ré-arrosage successifs sur le RWC et les teneurs en oses solubles de deux cultivars de peuplier euraméricain, 'Luisa_Avanzo' et 'Dorskamp'
Mai - juillet 2001	Pierrick Priault	Franck Brignolas	Impact de un à trois cycles sécheresse / ré-arrosage successifs sur le RWC et les teneurs en oses solubles de deux cultivars de peuplier euraméricain, 'Luisa_Avanzo' et 'Dorskamp'
Mai - juillet 2001	Guillaume Vidal	Franck Brignolas	Estimation des capacités antioxydantes des feuilles de 31 cultivars de peuplier euraméricain

4.2.4. Licence de Biologie des Organismes (Université de Lorraine, Nancy)

Période	Etudiant	Co-encadrant	Sujet
Mars - avril 2007	Sophie Bernard	Daniel Epron, Caroline Plain	Suivi continu de la respiration du sol et de sa composition en carbone 13 en forêt

4.2.5. BTS Biotechnologie / Biochimie / Gestion forestière

Période	Etudiant	Diplôme préparé	Université / Lycée	Co-encadrant	Sujet
Avril 2010 - Juin 2011	Laurent Roux	BTS Gestion Forestière	Lycée Forestier (Meymac, Corrèze)	Aurélie Leplus (AILE)	L'influence de l'environnement sur la productivité et ses déterminants chez le saule, le robinier et le peuplier en fonction du système de culture (TCR / TPCR)
Février - mai 2006	Tanguy Rewers	3 ^{ème} année BTS Biochimie	Karel de Grote-Hogeschool (Anvers)	Nadine Calluy (U. Anvers)	C- en N- bepaling in populierenbladeren en -petiolen
Février - mars 2003	Aurélie Soularue	2 ^{ème} année BTS Biotechnologie	Lycée J. Monod (Saint-Jean-de-Braye, Loiret)	Didier Delay (U. Orléans)	Impact d'une sécheresse d'intensité croissante sur le pouvoir antioxydant des feuilles de deux clones de peuplier euraméricain
Janvier - février 2003	Julien Dubreuil	2 ^{ème} année BTS Biochimie	Lycée J. Cœur (Bourges, Cher)	Didier Delay (U. Orléans)	Étude de l'effet d'une contrainte hydrique sur la teneur et la nature d'oses solubles des feuilles de deux clones de <i>Populus euramericana</i>
Février - mars 2002	Marjorie Breton	2 ^{ème} année BTS Biotechnologie	Lycée J. Monod (Saint-Jean-de-Braye, Loiret)	Jean-Michel Petit (U. Orléans)	Dosage d'un herbicide, le Paraquat, absorbé <i>in vitro</i> par les feuilles de deux clones de peuplier euraméricain, 'Luisa_Avanzo' et 'Dorskamp', par spectrophotométrie et par HPLC
Février - mars 2001	Julien Bouilhol	2 ^{ème} année BTS Biotechnologie	Lycée J. Monod (Saint-Jean-de-Braye, Loiret)	Didier Delay (U. Orléans)	Étude de l'effet d'une contrainte hydrique sur la teneur en oses réducteurs et en composés phénoliques des feuilles de deux clones de <i>Populus euramericana</i>

Analyse

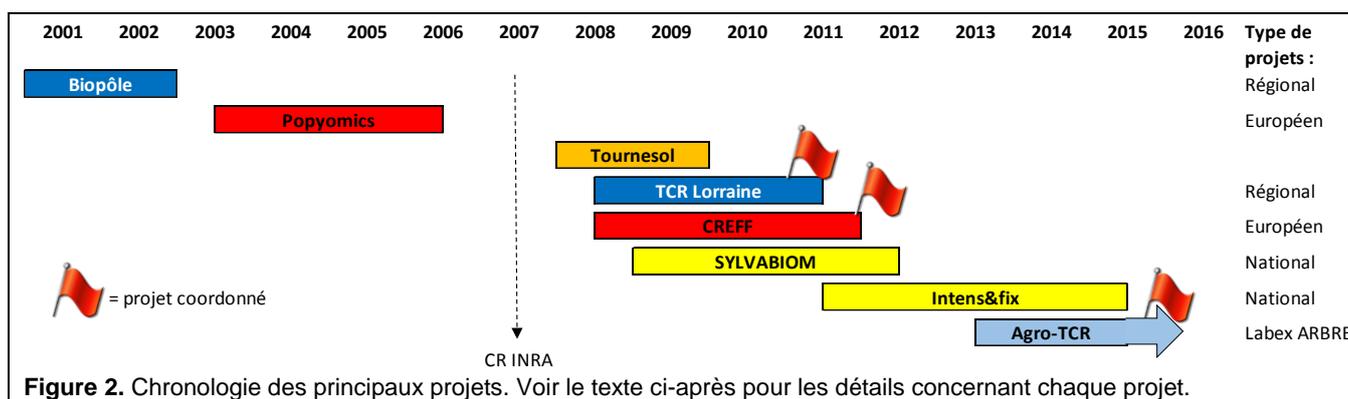
Depuis 2002, je me suis investi dans l'**encadrement d'un nombre conséquent d'étudiants d'horizons variés**, dont plus d'une vingtaine d'étudiants de Master 1 et 2 depuis mon recrutement à l'INRA. Les co-encadrements sur des sujets faisant appel à des disciplines connexes à l'écophysiologie telles que la biochimie ont été particulièrement enrichissants.

J'ai appris au fil des ans à réduire le nombre de stages simultanés et à m'impliquer pleinement et personnellement dans le suivi du stagiaire. La plupart des étudiants de Master encadrés ont persévéré dans la recherche après leur stage, le plus souvent par l'intermédiaire d'un doctorat. Leur stage de Master a ainsi pu contribuer à leur donner goût à la recherche.

5. Projets et collaborations

5.1. Participation à des projets de recherche nationaux et internationaux

Depuis 2001 (époque de ma thèse), les **projets qui ont guidés mes activités de recherche** se sont enchainés sans temps morts, créant ainsi une dynamique. Les projets au sein desquels ma participation était significative sont présentés en Figure 2. Les années 2008 et 2009 ont été particulièrement remarquable, puisque quatre projets y ont été menés en parallèle, de l'échelon régional à l'échelon européen (dont deux que je coordonnais). À partir de 2013, mes activités se resserrent autour de moins de projets, plus ciblés.



Les projets de recherche auxquels j'ai participé depuis 2001 (en tant que coordinateur ou simplement partenaire) sont listés ci-dessous de manière exhaustive par ordre chronologique. Dans chaque cas, la part du financement gérée par mes soins est également indiquée.

5.1.1. Coordination de projets

1. **Projet émergent Région Lorraine** : Mise en place d'un taillis à courte rotation (TCR) atelier en Lorraine : Comment optimiser et maintenir durablement la production de biomasse ligneuse à fins bioénergétiques ? (2008-2011) *Gestion d'un financement de 45 000 €*
Objectifs : Établir et instrumenter une plantation atelier de monocultures et du mélange peuplier / robinier, à trois densités de plantation, afin d'y suivre la dynamique et l'allocation du carbone et de l'azote.
2. **Projet franco-allemand ERA-Net Bioenergy co-financé ADEME (France) / FNR (Allemagne)** : Cost reduction and efficiency improvement of Short-Rotation Coppice (CREFF) (2008-2011). *Gestion d'un financement de 290 000 €*
Objectifs : Documenter les options disponibles en termes de modalités de gestion des plantations à courte rotation, de récolte, de transport et de stockage de la biomasse produite, en collaboration étroites avec les agriculteurs et les industriels, afin d'optimiser la rentabilité de ces systèmes de production en fonction du contexte local.

3. **Projet incitatif** financé par le **Laboratoire d'Excellence (Labex) ARBRE** (Advanced Research on the Biology of Tree and Forest Ecosystems) : Mise en place d'un dispositif atelier agroforestier à Champenoux : optimiser la productivité et la durabilité des systèmes intensifs de culture grâce à la fixation symbiotique de l'azote (Agro-TCR) (2013-2016). **Gestion d'un financement de 15 000 €**
Objectifs : Établir et instrumenter une plantation agroforestière atelier de monocultures et de mélanges d'espèces fixatrices (aulne, luzerne) et non fixatrices d'azote atmosphérique (peuplier, céréales), afin d'y suivre la dynamique et l'allocation du carbone et de l'azote.

5.1.2. Partenaire de projets

4. **Projet Biopôle** financé par la **Région Centre** : Recherche de caractères foliaires morphologiques et physiologiques, indicateurs de la croissance, de la productivité et du niveau de tolérance à la sécheresse de peupliers euraméricains (2001-2002). Coordination : Université d'Orléans, EA LBLGC, Franck Brignolas / INRA Orléans, UR AGPF, Marc Villar.
Objectifs : Valider, sur une trentaine de génotypes de peuplier en serre, les relations entre les traits foliaires et les niveaux de productivité et de tolérance à la sécheresse mis en évidence jusqu'alors pour les génotypes 'Dorskamp' et 'Luisa_Avanzo'.
5. **Projet européen POPYOMICS** (QLK5-CT-2002-00953) : Linking physiology, molecular genetics and genomics in *Populus* to understand and improve yield and quality for biomass and timber production across Europe (2002-2006). Coordination : Université de Southampton, Gail Taylor.
Objectifs : Associer la physiologie, la génétique quantitative et la génomique pour comprendre et améliorer la productivité du peuplier à travers l'Europe, à l'aide d'un dispositif composé de cinq familles d'hybrides de peuplier (près d'un millier de génotypes), répété trois fois (Royaume-Uni, France, Italie).
6. **Projet franco-belge Tournesol** (partenariat Hubert Curien, ministère des Affaires étrangères) : Variabilité génotypique de productivité et d'efficacité d'utilisation de l'eau au sein du genre *Populus* (2008-2009). Coordination : Université d'Orléans, EA LBLGC, Franck Brignolas / Université d'Anvers, Pleco, Reinhart Ceulemans.
Objectifs : Étudier les relations entre productivité et efficacité d'utilisation de l'eau, et leur plasticité, chez 180 génotypes d'une famille de *Populus nigra* × *P. deltoides* plantés en France et en Italie.
7. **Projet Ecophyto R. & D. INRA** (financement du Département EFPA) : Vers la définition d'idéotypes de peuplier pour la culture en TCR : allier productivité, compétitivité, tolérance et résistance à la rouille pour un mélange variétal durable (2009). Coordination : INRA Nancy, UMR IAM, Fabien Halkett.
Gestion d'un financement de 1500 €

- Objectifs : Contribuer à redéfinir les caractéristiques idéales de cultivars (idéotypes) de peupliers permettant d'établir un TCR performant, durable et nécessitant le moins d'intrants possible, en se focalisant sur la détermination des combinaisons de caractères idoines de résistance et de tolérance à la rouille et d'efficience d'utilisation de l'eau et des nutriments.
8. **Projet ANR Bioénergie** : Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques (SYLVABIOM) (2008-2012). Coordination : INRA Orléans, UR AGPF, Jean-Charles Bastien. *Gestion d'un financement de 185 000 €*
- Objectifs : Comparer le potentiel de production de biomasse d'une large gamme d'espèces, connues (peuplier, saule, robinier) ou plus méconnues (résineux), pour des conditions édaphiques et climatiques françaises contrastées et des modalités de gestion de la plantation variables, notamment en terme de choix des ressources génétiques, d'espacement des arbres et de durée des rotations.
9. Investissement dans le cadre du module Ressources du **projet FUTUROL – PROCETHOL 2G** (Recherche et Développement de bioéthanol de 2^{ème} génération, soutenu financièrement par OSEO) en 2009 et 2010. Coordination pour l'INRA : INRA Reims, UMR FARE, Jean Tayeb.
- Objectifs : Mettre sur le marché un procédé, des technologies et des produits (enzymes et levures) pour assurer la production de bioéthanol de 2^{ème} génération à partir de plantes entières dédiées mais aussi de coproduits agricoles et forestiers, résidus verts et autre biomasse lignocellulosique.
10. **Projet franco-brésilien COFECUB – USP** : Introduction d'espèces fixatrices d'azote dans les plantations forestières : effets sur la croissance et le fonctionnement (2010-2013). Coordination : Université de Lorraine, UMR EEF, Daniel Epron.
- Objectifs : Améliorer la compréhension des schémas d'allocation du carbone dans les écosystèmes forestiers gérés ou plantés, ainsi que leur prise en compte dans les modèles couplés sol-végétation-atmosphère.
11. **Projet LIGNOGUIDE** (financement CAS-DAR) : Aide au choix des cultures lignocellulosiques à implanter en fonction des contextes locaux de production (2010-2012). Coordination : Chambre d'Agriculture de Picardie, Emeline Defosse. *Gestion d'un financement de 5000 €*
- Objectifs : Intégrer les dernières connaissances sur les cultures énergétiques, annuelles, pluriannuelles, pérennes et taillis à courte rotation, dans un guide d'aide au choix à destination des agriculteurs et des porteurs de projets.
12. **Projet ANR Systerra** : Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières. Modélisation biophysique et évaluation socioéconomique de l'association d'espèces fixatrices d'azote (Intens&Fix) (2011-2015). Coordination : CIRAD Montpellier, UMR Eco&Sols, Jean-Pierre Bouillet. *Gestion d'un financement de 179 000 €*

Objectifs : Quantifier les principales interactions biophysiques inter- et intra-spécifiques au sein des plantations forestières en mélange avec des espèces fixatrices d'azote, en comparaison aux monocultures.

13. **Projet incitatif** financé par le **Laboratoire d'Excellence (Labex) ARBRE** (Advanced Research on the Biology of Tree and Forest Ecosystems) : Wood composition of Eucalyptus and Poplar from pure and mixed plantations (WOOD-EP-N2) (2014-2015). Coordination : Université de Lorraine, EA LERMAB, Nicolas Brosse. *Gestion d'un financement de 1500 €*

Objectifs : Étudier l'effet du mélange d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote (acacia / eucalyptus au Congo et robinier / peuplier en France) sur les composés carbonés structuraux (lignine, cellulose) et non structuraux du bois de la non fixatrice.

14. **Projet incitatif** financé par le **Laboratoire d'Excellence (Labex) ARBRE** (Advanced Research on the Biology of Tree and Forest Ecosystems) : UPscaling of anatomical, physiological and molecular determinisms of TRANSpiration at wood and leaf levels in poplar trees submitted to water stress (UP-TRANS) (2015-2017). Coordination : INRA Nancy, UMR EEF, Didier LeThiec.

Objectifs : Évaluer l'importance relative des mécanismes adaptatifs de transport de l'eau en réponse à la sécheresse qui sont essentiels pour maintenir ou accroître l'efficacité de transpiration à différentes échelles d'espace et de temps.

Analyse

Dès mon recrutement à l'INRA, l'un de mes principaux objectifs fut d'établir un **dispositif atelier de taillis à courte rotation** afin de pouvoir décrire le fonctionnement écophysologique de ces systèmes de culture intensifs. Ce type d'outil me paraissait essentiel pour fédérer les recherches sur cette nouvelle thématique à Nancy. Plusieurs projets furent déposés à partir de 2008 et certains furent acceptés pour financer l'installation d'un tel dispositif.

Une première plantation mélangée peuplier / robinier, à trois densités de plantation, fut installée en 2010 sur cinq hectares à Moyenvic (Moselle) dans le cadre d'un **projet émergent financé par la Région Lorraine** et soutenue par le département EFPA de l'INRA (environ 25 000 arbres plantés). La plantation a hélas subi une mortalité exceptionnelle dès la première année en raison d'une accumulation d'aléas climatiques et indépendants de notre volonté (ennoyage puis sécheresse, sol saturé en sel, vandalisme, etc.) et a finalement été abandonnée dès 2011 malgré les investissements financiers et humains très lourds fournis en un an.

Par la suite, une deuxième plantation atelier mélangée peuplier / robinier a été mise en place à Saint-Cyr-en-Val (Loiret) en 2011 (environ 1000 arbres plantés). Bien que suivie durant cinq ans dans le cadre du **projet ANR Intens&Fix** et de la thèse de Cécilia Gana, la plantation a été abandonnée à son tour en 2015 en raison des contraintes logistiques liées à son éloignement de Nancy et surtout à la mortalité très importante et croissante des robiniers en raison de conditions édaphiques inadaptées.

En 2014, une troisième plantation atelier, associant cette fois-ci les espèces ligneuses à des espèces herbacées, a été installée sur 3,5 ha à Amance (Meurthe-et-Moselle) sous l'impulsion du Labex ARBRE (**projet incitatif Agro-TCR** ; environ 3500 arbres plantés). Une fois encore, la mortalité des arbres sur le dispositif s'est révélée importante les premières années. Entre 2011 et 2015, les plantations de Moyenvic puis de Saint-Cyr-en-Val étaient intégrées au réseau du SOERE F-ORE-T (Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement, Fonctionnement des écosystèmes forestiers) animé par le GIP ECOFOR, soulignant l'intérêt de la communauté scientifique pour les données bioclimatiques émanant de plantations ligneuses intensives. La plantation agroforestière d'Amance est, elle, candidate pour intégrer le réseau en 2016.

Ces cinq dernières années, l'établissement à répétition d'un dispositif expérimental viable a représenté un énorme investissement en temps, en énergie et en argent qui n'est, à l'heure actuelle, malheureusement toujours pas rentabilisé. Des conditions édaphiques et climatiques continuellement défavorables, une absence d'expérience à l'échelon local concernant la gestion de ce type de plantation, associées à des moyens techniques limités à allouer à cette nouvelle thématique ont contribué à ralentir le développement de cette partie de mon projet personnel. À l'avenir, la plantation agroforestière d'Amance devrait néanmoins permettre le développement de projets de recherche sur le long terme.

5.2. Collaborations significatives

Le réseau de collaborations développé depuis 2000 avec les unités de recherche et les instituts techniques dans le cadre de projets de recherche ou de thèses co-encadrées est représenté en Figure 3. Ces collaborations sont listées ci-dessous de l'échelon local à l'échelon international.

5.2.1. Organismes de Recherche

Au sein de l'UMR Écologie et Écophysiologie Forestières, le TCR, bien que récemment intégré parmi les objets d'étude de l'Unité, m'a permis de développer des activités en collaboration avec les trois équipes de recherche. En effet, les caractéristiques de « forêt simplifiée » du TCR font de lui un modèle particulièrement intéressant quelles que soient les échelles d'étude, de la cellule au peuplement.

- Équipe « *Physiologie et diversité des réponses aux contraintes* » (PhysioDiv), sur le thème de l'impact des contraintes hydrique et à l'ozone sur le peuplier, notamment cultivé en TCR (**Didier Le Thiec, Yves Jolivet** dans le cadre du projet Labex UP-TRANS),
- Équipe « *Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème* » (ARBECO), sur le thème de l'étude de l'allocation et de la dynamique du carbone et de l'azote dans les plantations intensives mélangées (**Daniel Epron, Dominique Gérant, Pascale Maillard, Pierrick Priault** dans le cadre du projet ANR Intens&Fix),
- Équipe « *Dynamique à long terme et dysfonctionnement des écosystèmes forestiers* » (Phytoéco), sur le thème de l'évolution de la biodiversité des herbacées de couverture au sein d'une plantation agroforestière (**Bernard Amiaud, Sandrine Chauchard** dans le cadre du projet Labex Agro-TCR).

De plus, depuis mon doctorat, le traitement et les analyses élémentaires et isotopiques des échantillons se sont quasiment toujours faits en étroite collaboration avec la Plateforme Technique d'Écologie Fonctionnelle de l'UMR (PTEF OC 081, **Nicolas Angeli**).

Au-delà de l'UMR EEF, la liste ci-après dresse un panorama quasi exhaustif des collaborations que j'ai pu développer depuis une quinzaine d'années en France et à travers le monde.

En Lorraine :

- **Laurent Saint-André, Bernd Zeller** : UR Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers (BEF), INRA Nancy, dans le cadre du projet Intens&Fix et de l'établissement du site atelier agroforestier en Lorraine (projet Labex Agro-TCR)
- **Aurélié Deveau** : UMR Interactions Arbres – Microorganismes (IAM), INRA Nancy, dans le cadre du projet Agro-TCR
- **Séverine Piutti** : UMR Laboratoire Agronomie et Environnement (LAE), ENSAIA Nancy, dans le cadre du projet Agro-TCR

- **Nicolas Brosse** : EA Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB), Université de Lorraine, Nancy, dans le cadre du projet WOOD-EP-N₂

Plus largement en France :

- **Franck Brignolas, Stéphane Maury, Régis Fichot** : EA Laboratoire de Biologie des Ligneux et des Grandes Cultures (LBLGC), Université d'Orléans, dans le cadre du projet SYLVABIOM et de l'encadrement de la thèse de Julien Toillon
- **Jean-Charles Bastien, Catherine Bastien, Marc Villar** : UR Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières (AGPF), INRA Orléans, dans le cadre des projets POPYOMICs et SYLVABIOM
- **Jean-Pierre Bouillet, Jean-Paul Laclau, Agnès Robin, Gueric Lemaire** : UMR Écologie fonctionnelle et biogéochimie des Sols et des agro-écosystèmes (Eco&Sols), CIRAD Montpellier, dans le cadre du projet Intens&Fix
- **Christian Dupraz** : UMR Systèmes de cultures tropicaux et méditerranéens (SYSTEM), INRA Montpellier, dans le cadre du projet Intens&Fix
- **Hubert Boizard** : UR Agroressources et impacts environnementaux (Agro-Impact), INRA Mons, dans le cadre du projet Futurol

En Europe et dans le monde :

- **Frank Brodbeck, Michael Nahm** : FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg), Freiburg (Allemagne), dans le cadre du projet ERA-Net Bioenergy CREFF
- **Ludger Eltrop** : IER (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle energieanwendung), Stuttgart (Allemagne), dans le cadre du projet ERA-Net Bioenergy CREFF
- **Thorsten Beimgraben, Stefan Pelz** : HFR (Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg), Rottenburg (Allemagne), dans le cadre du projet ERA-Net Bioenergy CREFF
- **Reinhart Ceulemans** : Pleco (PLant and vegetation ECOlogy), Anvers (Belgique), dans le cadre du projet POPYOMICs et de ma participation à l'encadrement de la thèse de Sophie Dillen
- **Maurizio Sabatti** : DISAFRI (Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue RIsorse), Viterbe (Italie), dans le cadre de la rédaction de deux articles (Marron *et al.* 2010b, Fabbrini *et al.* 2012) suite à mon séjour postdoctoral en 2006
- **Wout Boerjan, Véronique Storme** : VIB (Vlaams Instituut voor Biotechnologie), Gand (Belgique) dans le cadre de la rédaction de deux articles (Dillen *et al.* 2008, Marron *et al.* 2010a) suite à mon séjour postdoctoral à Anvers
- **José Leonardo de Moraes Gonçalves** : Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Université de São Paulo), São Paulo (Brésil) dans le cadre du projet COFECUB
- **Annie DesRochers** : Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT, Canada), dans le cadre des jurys de thèse de Julien Toillon et Lahcen Benomar

5.2.2. Instituts techniques

Depuis mon recrutement à l'INRA, un ensemble de collaborations a également été développé avec les équipes et organismes français possédant l'expérience des TCR et TTCR. Ces collaborations ont permis l'établissement d'un réseau de sites et d'expérimentations TCR / TTCR dans le nord de la France dans le cadre des projets SYLVABIOM, CREFF et Agro-TCR.

- **FCBA** (Institut technologique Forêt, Cellulose, Bois construction, Ameublement, Charrey-sur-Saône) – Alain Berthelot
- **IDF** (Institut pour le Développement Forestier, Orléans / Bordeaux) – François Charnet / Dominique Merzeau
- **Chambre d'Agriculture de Bretagne** (Rennes) – Bertrand Decoopman
- **Chambre d'Agriculture des Vosges** (Épinal) – Eric Meurin
- **UE Génétique et Biomasse Forestières** (GBFOR, INRA Orléans) – Guillaume Bodineau / Patrick Poursat / Michel Verger
- **Pépinière Expérimentale de Guéméné-Penfao (ONF)** – Olivier Forestier
- **UMR LIEC** (Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, Université de Lorraine, Nancy) – Jacques Berthelin
- **Ferme expérimentale de la Bouzule** (ENSAIA, Université de Lorraine, Nancy) – Alexandre Laflotte

5.2.3. Secteur privé

Depuis 2008, les entreprises du secteur privé, associations, coopératives, consultants forestiers, etc. sont fréquemment impliqués dans les projets de recherche *i*) pour faire le lien entre la recherche et les agriculteurs et forestiers (CREFF), *ii*) pour traiter les aspects socioéconomiques des projets (CREFF, Intens&Fix) ou *iii*) pour fournir du matériel végétal pour l'établissement des plantations atelier (SYLVABIOM, Agro-TCR).

- **Pépinières Naudet** (Leuglay) – Luc Picaut
- **Pépinières Alasia Franco Vivai** (Savigliano, Italie) – Fabrizio Nardin
- **UNIQUE Forestry Consultant** (Freiburg, Allemagne) – Axel Weinreich
- **AILE** (Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement, Rennes) – Aurélie Leplus
- **AFAF** (Association Française d'AgroForesterie, Auch) – Fabien Liagre
- **Cosylval** (Coopérative des sylviculteurs d'Alsace, Schiltigheim) – Jean-Louis Besson
- **UPM Stracel** (Strasbourg) – Olivier Meyer

Analyse

La Figure 3 fait ressortir que de nouvelles collaborations sont apparues et que les collaborations sur des projets actuellement en cours ne sont plus les mêmes que celles sur les projets terminés. Cela est révélateur de l'évolution de mon projet de recherche ces dernières années : *i*) de l'étude de la **diversité** et de la **plasticité** au sein des plantations forestières intensives à celle du **fonctionnement** de ces plantations, et *ii*) de l'étude des plantations strictement forestières vers celle des **plantations agroforestières** (voir point 6). Mon réseau de collaborations s'est recentré localement, dans le cadre des projets les plus récents.

Au sein de l'UMR EEF, les collaborations se sont essentiellement développées ces dernières années avec la **composante universitaire de l'Unité** en raison de l'intérêt suscité par les plantations d'arbres intensives chez les collègues travaillant sur les composés de réserve (D. Gérant), sur les herbacées de couverture (B. Amiaud), sur la tolérance à l'ozone (Y. Jolivet) ou encore sur la dynamique et l'allocation du carbone des plantations tropicales intensives (D. Epron). Ces collaborations concernent les trois équipes de l'Unité et se sont développées jusqu'ici autour de projets distincts. Cependant, les perspectives de recherche présentées au point 6.6 ont vocation à réunir des membres des trois équipes autour d'un même objet, la plantation atelier de taillis à courte rotation (TCR) agroforestier de la Bouzule, faisant du dispositif **un outil transversal pour l'Unité** au sein duquel les questions ayant trait aussi bien aux aspects cellulaires qu'aux communautés végétales pourront être traitées conjointement.

6. Activités de recherche

À l'exception de mon année de post-doctorat sur le thème de l'étude de la signature isotopique de la respiration du sol en 2007, mes activités de recherche sont axées depuis 2000 sur **la physiologie et l'écophysiologie d'un arbre modèle : le peuplier**. D'abord orientées sur les **mécanismes impliqués dans la réponse biochimique et physiologique à la sécheresse** de jeunes plants de peuplier élevés en serre, mes activités ont par la suite évoluées vers le **déterminisme environnemental et génétique de la productivité et de l'efficacité d'utilisation de l'eau** chez les hybrides de peuplier (Figure 4). Cette évolution m'a permis d'une part, de m'éloigner progressivement des conditions contrôlées de serre et d'autre part, d'associer l'étude écophysiologique des caractères à leur analyse en génétique quantitative.

Depuis fin 2007, suite à mon recrutement à l'INRA, mon objet d'étude a évolué pour se situer à présent à l'échelle de la plantation intensive d'arbres à fins bioénergétiques (taillis à courte et très courte rotations, TCR / TTCR), composée de peupliers mais également d'autres espèces se prêtant à la culture en taillis telles que saules, eucalyptus ou robiniers. Deux volets ont été développés : *i*) l'étude de la **diversité de la productivité et de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote** au sein de ces espèces cultivées en plantations à rotations courtes, et *ii*) l'étude du **fonctionnement carboné et azoté de plantations mélangées** d'espèces fixatrice (robinier) / non fixatrice (peuplier) d'azote. Le développement de ce dernier thème, élargi à des mélanges d'herbacées (céréales / luzerne) et de ligneux (peuplier / aulne), fixateurs (luzerne / aulne) ou non (céréales / peuplier) d'azote atmosphérique, constitue le corps de mon projet de recherche pour les années à venir.

Dans le bilan synthétique de mes activités de recherches présenté ci-dessous, j'ai choisi d'illustrer les principaux résultats sous forme de figures extraites de ma bibliographie personnelle. Les références soulignées sont issues de ma propre bibliographie présentée à partir de la page 85.

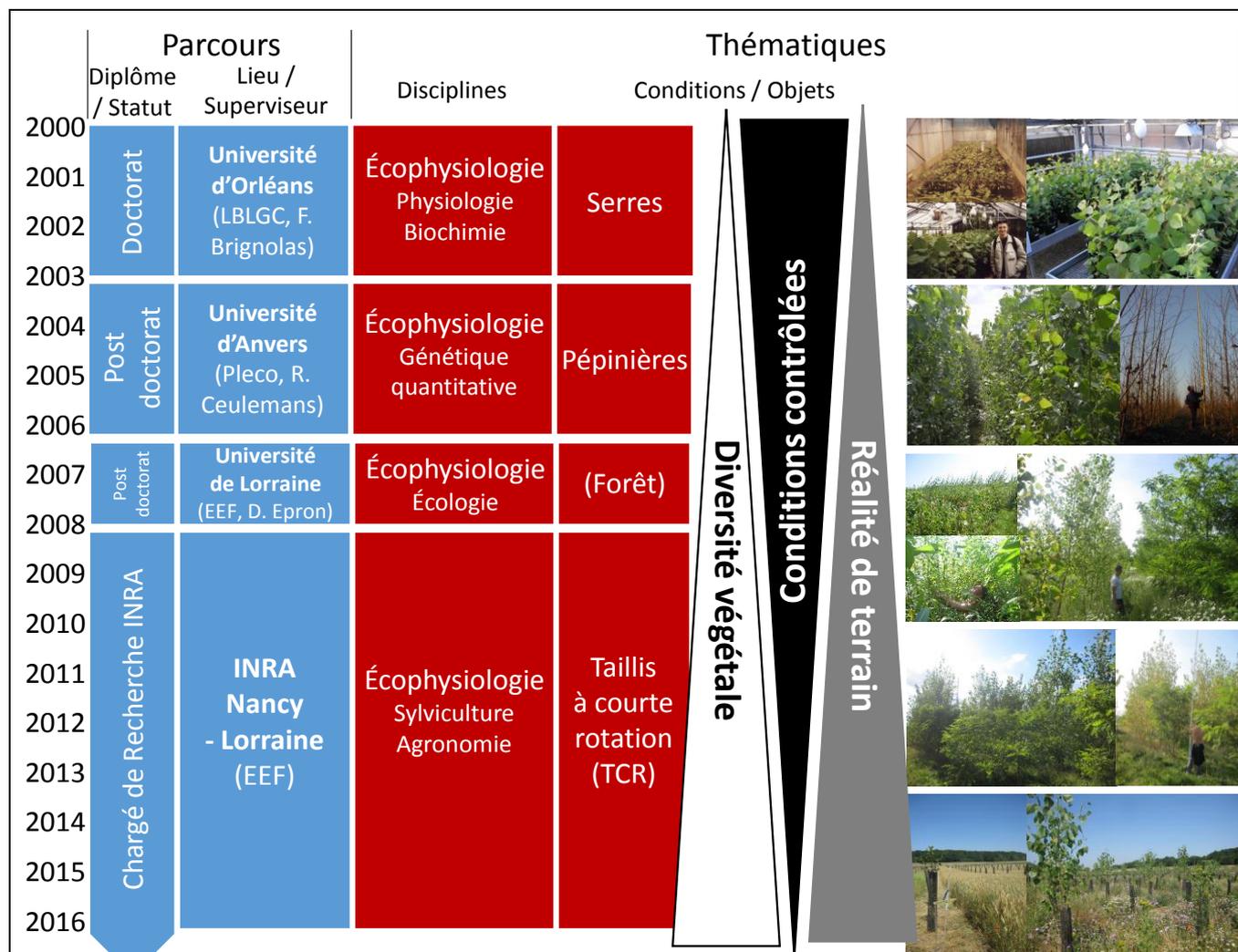


Figure 4. Évolution de ma thématique de recherche et de mon objet d'étude au cours de mon parcours de 2000 à 2016 à Orléans, Anvers et Nancy.

6.1. Quelques éléments de contexte

6.1.1. Le peuplier et la populiculture

Le peuplier occupe une place importante dans l'industrie du bois. Bien que son bois soit léger et peu durable, il est très utilisé pour la production d'emballages légers (cagettes, bourriches d'huitres, boîtes de camembert, etc.), de contre-plaqué, d'allumettes ou de pâte à papier (Balatinecz *et al.* 2013). Il s'agit également d'une espèce se prêtant très bien à la culture en taillis à courte ou très courte rotations (TCR/TTCR) en milieu tempéré, notamment pour la production de bois-énergie, en raison de sa vigueur et de sa capacité à rejeter de souche (Bastien *et al.* 2011, 2015). Le peuplier est également considéré comme un arbre modèle pour la recherche scientifique en raison de sa croissance rapide et continue, de la taille réduite de son génome séquencé, de la facilité avec laquelle il peut être multiplié de manière végétative ou dont ses nombreuses espèces peuvent être croisées entre elles, ou encore de la possibilité de le transformer génétiquement à l'aide d'*Agrobacterium* (Dillen *et al.* 2011b). L'immense diversité du genre *Populus* en termes de forme, vigueur, degré de résistance à tous les types de contraintes biotiques et abiotiques représente d'une part, un formidable outil pour les études de la diversité en génétique quantitative, mais surtout, un atout indéniable pour la sélection de génotypes ayant les propriétés voulues en fonction du contexte (Richardson *et al.* 2013). Les génotypes actuellement cultivés ont été principalement sélectionnés sur la base de leur productivité, de la qualité de leur bois et de leur résistance aux pathogènes. Néanmoins, les changements actuels du climat associés au développement de la populiculture et, par conséquent, à son éloignement progressif des zones alluviales vers des zones moins bien alimentées en eau ont fait naître de nouveaux besoins. Des arbres **plus aptes à tolérer les contraintes environnementales**, notamment la sécheresse, et qui **allient une production de biomasse satisfaisante à une efficacité d'utilisation de l'eau optimale** seront en effet plus susceptibles de correspondre aux besoins des populteurs (Brignolas *et al.* 2012).

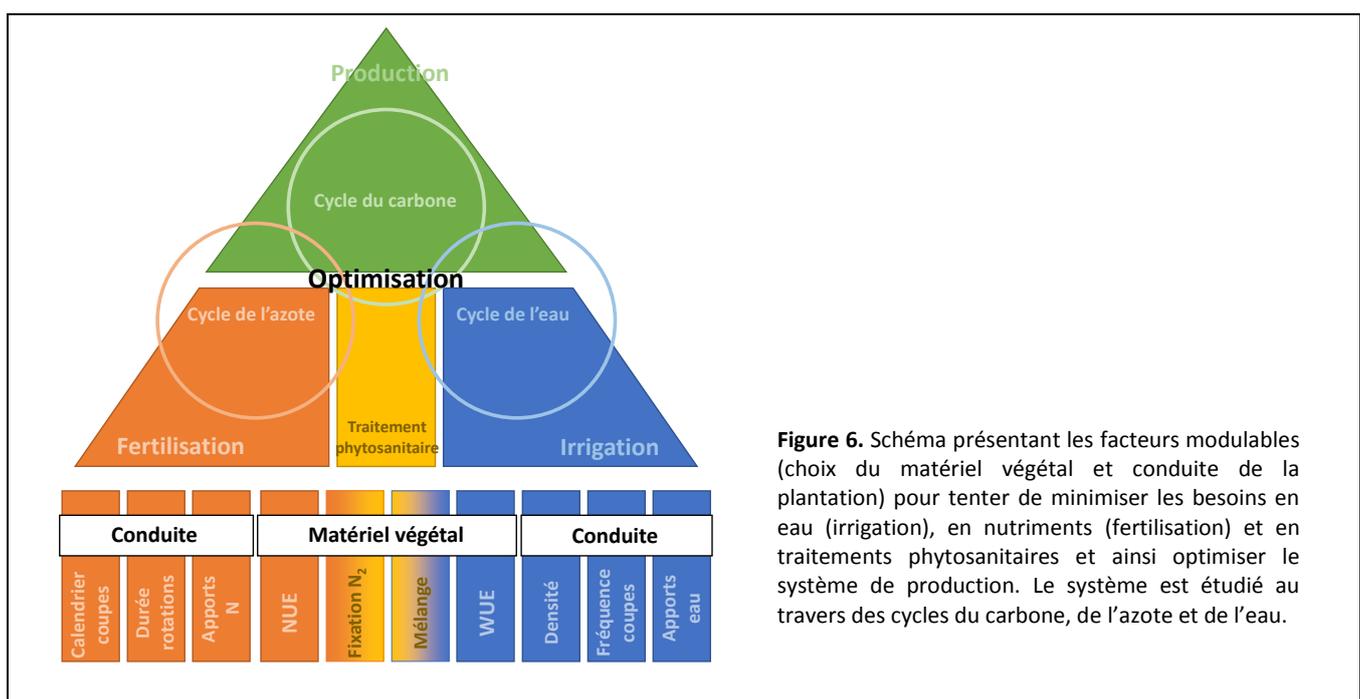
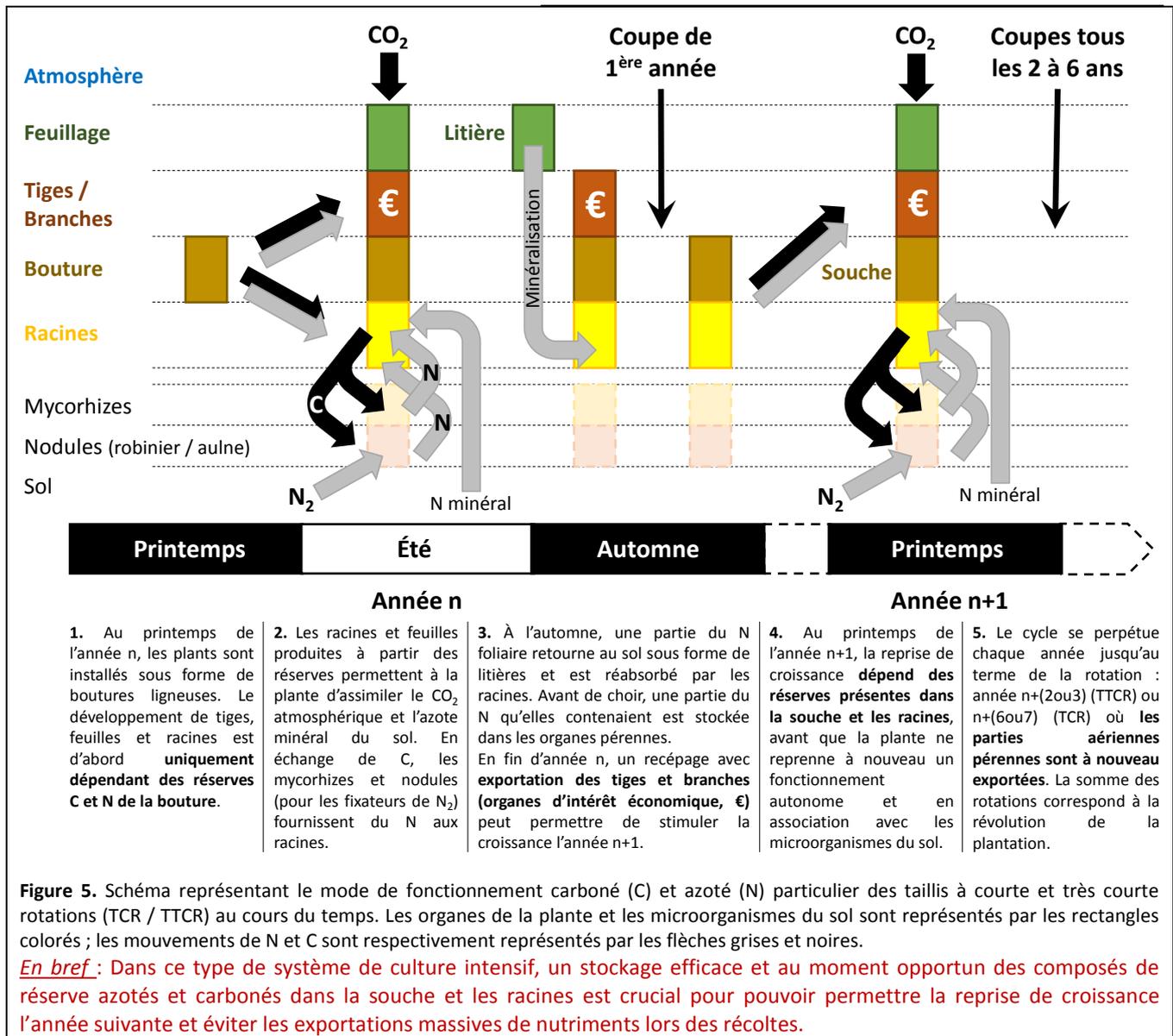
Qu'est-ce que l'efficacité d'utilisation de l'eau ?

L'efficacité d'utilisation de l'eau (water-use efficiency, WUE) correspond à la quantité de biomasse produite par unité d'eau consommée. Elle peut être estimée à différentes échelles (Brignolas *et al.* 2012). À l'échelle du peuplement, WUE correspond au rapport entre la productivité et l'eau transpirée (efficacité de transpiration). À l'échelle de plante entière, WUE est définie comme le rapport entre la biomasse produite et l'eau consommée pendant le même laps de temps. À l'échelle instantanée et foliaire, WUE est calculée comme le rapport entre l'assimilation de CO₂ et la conductance stomatique (WUE intrinsèque). Enfin, à une échelle intégrée sur la durée de vie de l'organe (feuille, tige), WUE intrinsèque est très couramment estimée par l'intermédiaire de la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) avec laquelle elle a été montrée linéairement et négativement corrélée chez de nombreuses espèces (Farquhar *et al.* 1989).

Les plantations très denses et à rotations courtes dédiées ou semi-dédiées à la production de biomasse-énergie (TCR / TTCR) engendrent également des besoins spécifiques en termes de propriétés du matériel végétal planté en raison de leur intensivité et des risques d'appauvrissement des sols qu'elles peuvent entraîner.

6.1.2. Les taillis à courte et très courte rotations

À l'heure où la recherche de solutions de substitution à l'utilisation des carburants fossiles devient un sujet prépondérant pour la communauté scientifique mondiale, la biomasse végétale pourrait représenter une alternative écologiquement et économiquement satisfaisante. Parmi les nombreuses sources de biomasse, la biomasse ligneuse a l'avantage de séquestrer le carbone pour des périodes plus longues et de présenter un bilan environnemental plus favorable que les espèces annuelles (Gabrielle *et al.* 2016). En complément de ce que peut fournir la forêt, la production de ce type de biomasse se fait généralement par l'intermédiaire de plantations en taillis à rotations courtes ou très courtes (TCR et TTCR) (Eppler *et al.* 2007, Bastien *et al.* 2011). Les TCR et TTCR sont des plantations d'arbres à croissance rapide, tels que le peuplier, le saule, le robinier ou encore l'eucalyptus, plantés à forte densité (jusqu'à 20 000 arbres par hectare) et à rotations inférieures à 10 ans. Les taillis à courte rotation (TCR) se différencient des taillis à très courte rotation (TTCR), comme leurs noms l'indiquent, par la longueur des rotations : 5 à 7 ans pour les TCR et 2 à 4 ans pour les TTCR. Pour la production de pâte à papier ou de bois-énergie, les très courtes rotations sont suffisantes. Il s'avère néanmoins que **le manque d'information concernant la conduite de ces plantations de façon à optimiser la production de biomasse et le maintien de la fertilité à long terme sont des freins sévères à leur développement** (Marron 2011). L'exportation fréquente de bois hors de la plantation par rapport à un peuplement forestier traditionnel peut entraîner un appauvrissement du milieu et un déclin rapide de la productivité (Berthelot *et al.* 2000 ; Figure 5). Si le carbone est rarement limitant pour la productivité, son assimilation est par contre très dépendante des teneurs en azote. À grande échelle, une fertilisation minérale ou par l'intermédiaire de matières résiduelles n'est pas une solution économiquement et écologiquement viable à long terme (Marron *et al.* 2015).



Afin de minimiser les besoins de la plantation en termes d'apports en eau, en fertilisant et en traitements phytosanitaires, deux catégories de facteurs peuvent être modulés : **(1) la nature du matériel végétal** planté et **(2) les modalités de conduite de la plantation** (Figure 6). Dans le premier cas, des espèces et des génotypes utilisant plus efficacement l'eau et les nutriments lorsque ceux-ci sont présents en quantité limitante dans le milieu doivent être privilégiés, sachant que les TCR seront le plus souvent installés sur des stations agricoles pauvres de façon à éviter la concurrence avec l'agriculture à fins alimentaires (Jørgensen & Schelde 2001). La disponibilité en azote peut également être accrue par l'utilisation d'espèces ligneuses capables de fixer l'azote atmosphérique telles que le robinier ou l'aune (Grünwald *et al.* 2009). Dans le cas d'une culture en mélange, l'azote fixé pourrait également bénéficier aux espèces ne possédant pas cette propriété. En termes de conduite de la plantation, la fréquence des coupes, le moment auquel elles interviennent dans l'année, la densité de plantation (et donc le degré de compétition entre les arbres), ou l'épandage de matières résiduelles fertilisantes sont autant de facteurs influençant l'allocation et la dynamique du carbone et de l'azote dans ces systèmes.

Entre 2000 et 2006, mes activités de recherche ont évolué de l'étude de **mécanismes physiologiques fins** mis en œuvre en réponse à la sécheresse sur deux génotypes en conditions contrôlées, à l'étude du **déterminisme environnemental et génétique** de traits simplement mesurables sur des centaines de génotypes sur le terrain, indicateurs de la vigueur et de l'efficacité d'utilisation de l'eau des arbres (Figure 4). Depuis 2007 et mon recrutement à l'INRA, mes activités de recherche combinent ces deux aspects en incluant d'une part, l'étude de la **diversité** et de la **plasticité** de la productivité et de l'efficacité d'utilisation des ressources au sein des espèces d'arbres cultivées en TCR/TTCR, et d'autre part, l'étude du **fonctionnement carboné et azoté** de ces plantations intensives, notamment mélangées d'espèces fixatrices et non fixatrices d'azote. Mon projet pour les années à venir conserve ces deux aspects, le second devenant néanmoins largement prépondérant et s'élargissant au fonctionnement des plantations agroforestières.

6.2. Écophysiologie de la réponse à la sécheresse chez le peuplier

Thèse de doctorat 2000-2003

Chronologie des projets :															
2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Région Biopôle															

Peuplier ; Tolérance à la sécheresse ; Déterminants foliaires ; Efficience d'utilisation de l'eau ; Croissance ; Photosynthèse ; Biochimie

Le peuplier est globalement **sensible à la sécheresse** et son niveau de productivité est très étroitement lié à la disponibilité en eau. Néanmoins, le genre *Populus* présente une **grande variabilité génotypique**, en termes (1) de **production de biomasse**, (2) d'**amplitude de la chute de productivité** en réponse au manque d'eau (c'est-à-dire de tolérance à la sécheresse), ainsi que (3) de **mécanismes physiologiques** mis en œuvre en réponse à la contrainte hydrique (Marron *et al.* 2013). Or, les liens entre la productivité des arbres et leurs plus ou moins grandes aptitudes à tolérer la sécheresse, d'une part, et les mécanismes physiologiques mis en œuvre par la plante durant la sécheresse et sa plus ou moins grande aptitude à tolérer le manque d'eau, d'autre part, étaient mal connus. Une connaissance approfondie de la plante et des composantes physiologiques et écophysiologiques de la productivité et de la tolérance à la sécheresse est nécessaire pour aborder ces relations.

L'objectif majeur de ma thèse (2000-2003) était la **mise en évidence**, au niveau de la feuille, de **déterminants de productivité et de tolérance à la sécheresse au sein des hybrides euraméricains**. Pour répondre à cet objectif, notre démarche s'est déroulée en trois phases : (i) **étudier** la réponse des peupliers euraméricains à la sécheresse en termes d'impact sur la physiologie de la feuille et de **mécanismes potentiellement impliqués dans la tolérance à la sécheresse édaphique**, (ii) sur la base de ces observations, **mettre en évidence des déterminants de productivité et de tolérance au manque d'eau** au sein de l'espèce, et (iii) **valider les déterminants** les plus pertinents en conditions de déficit hydrique.

Les génotypes de *Populus deltoides* × *P. nigra*, 'Luisa_Avanzo' et 'Dorskamp', se différencient par leur degré de sensibilité au manque d'eau et par leurs modalités de croissance. De leur comparaison, il est apparu que **la réponse des génotypes à la sécheresse n'est pas spécifique de leur niveau de tolérance**. Les mécanismes visant à réduire les pertes en eau et à protéger l'intégrité de la cellule sont en effet mis en œuvre durant la sécheresse de façon semblable quel que soit le niveau de tolérance à la sécheresse du génotype : réduction de la conductance stomatique et de la croissance foliaire, ajustement osmotique, stimulation des systèmes de lutte contre les oxydations (Marron *et al.* 2002, 2003, 2006a). À son terme, la contrainte hydrique occasionne cependant une réduction de surface foliaire variant en fonction du génotype, le génotype 'Dorskamp' présentant notamment la faculté de stimuler l'apparition et l'étalement de ses feuilles lorsque les conditions hydriques sont redevenues favorables (Figure 7). De plus, il semble que **l'amplitude de cette réduction de surface foliaire soit dépendante des caractéristiques constitutives de croissance et de**

structure des feuilles. Ces caractères foliaires propres même lorsque l'eau n'est pas limitante pourraient représenter des indicateurs intéressants de la productivité et du niveau de tolérance à la sécheresse des hybrides. Il apparaît de plus que, en raison de l'étroite dépendance de l'anatomie et de la physiologie de la feuille avec son stade de développement, il est **primordial de tenir compte de l'âge des feuilles** pour lesquelles les caractères sont estimés (Marron *et al.* 2008 ; Figure 8).

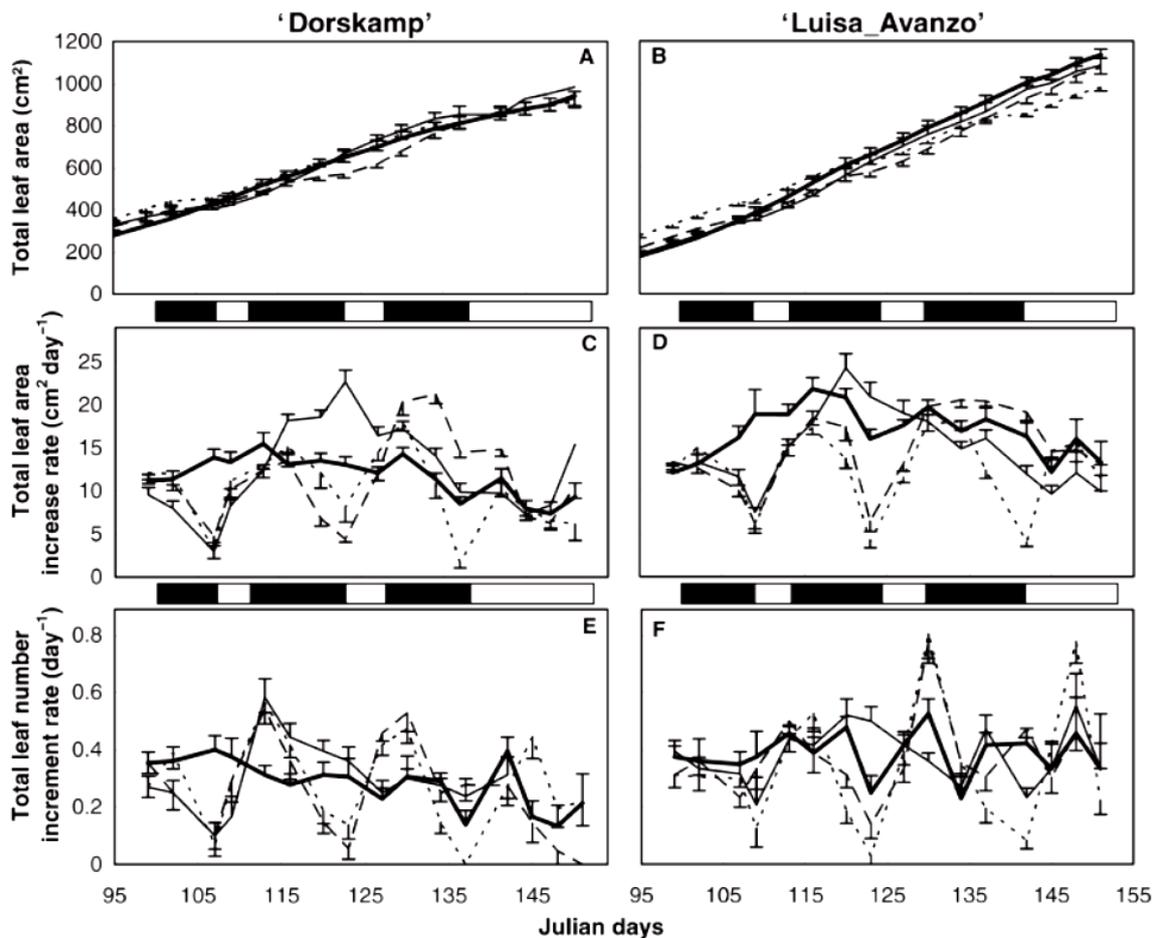


Figure 7. Evolution de la surface foliaire totale (A et B), de la vitesse d'expansion foliaire (C et D) et de la vitesse d'apparition des feuilles (E et F) des plants de 'Dorskamp' et 'Luisa_Avanzo'. Traitements : témoin (ligne continue épaisse), un cycle de déficit hydrique édaphique – ré-arrosage (ligne continue fine), deux cycles (ligne discontinue) et trois cycles (ligne en pointillés). Moyennes (\pm erreurs standards), $n = 12$ plants. La succession de phases de sécheresse (noir) et d'irrigation optimale (blanc) est indiquée par les barres sous les figures.

En bref : Après chaque ré-arrosage, l'expansion foliaire est stimulée pour le génotype 'Dorskamp' uniquement, plus tolérant à la sécheresse, de façon à ce que la surface foliaire totale ne diffère pas entre les traitements en fin d'expérience.

Extrait de Marron *et al.* 2003 – Tree Physiology

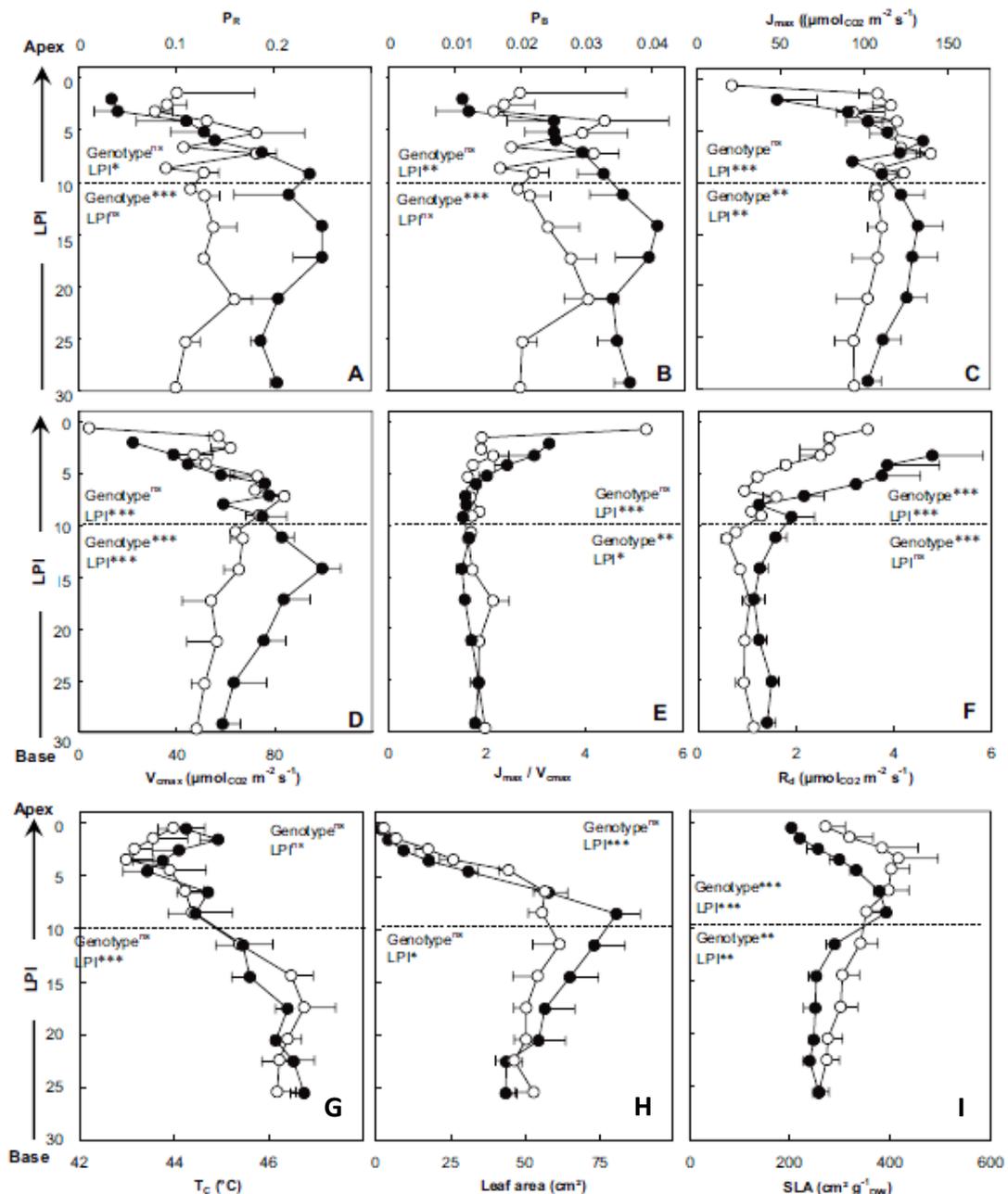


Figure 8. Effet de la position des feuilles sur la tige sur la proportion d'azote foliaire dans la RuBisCO (P_R , A), la proportion d'azote foliaire allouée au transfert photosynthétique d'électrons (P_B , B), la vitesse maximale de transport d'électrons (J_{max} , C), la vitesse maximale de carboxylation (V_{cmax} , D), le rapport J_{max}/V_{cmax} (E), le taux de respiration mitochondriale (R_d , F), la température critique pour le photosystème (T_c , G), la surface des feuilles (H) et leur surface massique (SLA, I) des plants de 'Dorskamp' (blanc) et 'Luisa_Avanzo' (noir). Les feuilles sont indexées du sommet à la base des tiges. Moyennes (\pm erreurs standards), $n = 5$ plants. Les effets de l'index de plastochrone foliaire (LPI) et du génotype ont été testés à l'aide de la procédure du Modèle Linéaire Général en dissociant les LPI supérieurs et inférieurs à 10. Les effets significatifs sont indiqués par des astérisques: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$ et ns pour non-significatif.

En bref : Pour les deux génotypes, les feuilles en croissance présentent des caractéristiques physiologiques tranchées par rapport aux feuilles matures. Elles évoluent rapidement jusqu'à ce que la feuille atteigne le stade adulte.

Extrait de Marron et al. 2008 – Annals of Forest Science

L'élargissement du modèle à 31 génotypes de *Populus deltoides* \times *P. nigra* a révélé une **indépendance** entre la productivité des génotypes et leur efficacité à utiliser l'eau, laissant augurer la possibilité de sélectionner les génotypes pour ces deux critères à la fois. Les paramètres déduits de la relation entre la surface massique des feuilles (SLA) et leurs index de plastochrone (LPI, indicateur de l'âge relatif des

feuilles le long de l'axe foliaire) se sont révélés être des indicateurs précieux de la productivité des génotypes et de leur efficacité d'utilisation de l'eau (Marron *et al.* 2005 ; Figure 9).

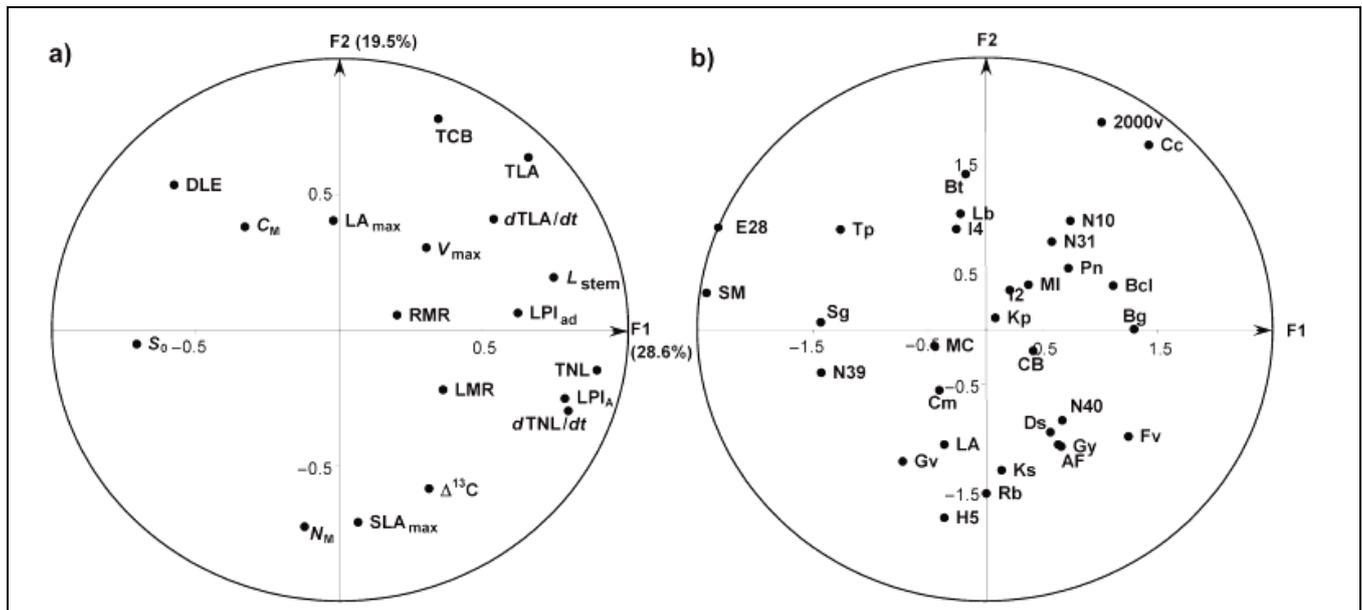


Figure 9. Distribution des 20 variables (a) et projection des 31 génotypes (b) dans le plan F1 × F2 de l'analyse en composantes principales (ACP). Les axes F1 et F2 sont les combinaisons linéaires des variables et ont été construits de façon à maximiser la part de variabilité qu'ils expliquent.

Abréviations : TNL = Nombre total de feuilles ; TLA = Surface foliaire totale ; LMR = Rapport Masse foliaire / Masse totale ; RMR = Rapport Masse racinaire / Masse totale ; TCB = Biomasse sèche totale ; L_{stem} = Longueur de tige ; dTNL/dt = Vitesse d'apparition des feuilles ; dTLA/dt = Vitesse d'expansion foliaire ; V_{max} = Vitesse maximale d'expansion foliaire individuelle ; LPI_{ad} = Index de plastochrone foliaire (LPI) de la première feuille à vitesse d'expansion nulle ; DLE = Durée d'expansion foliaire ; LPI_A = LPI de la feuille à surface massique (SLA) maximale ; S₀ = Pente initiale de la relation (dSLA/dLPI) ; C_M = Teneur en carbone foliaire ; N_M = Teneur en azote foliaire ; LA_{max} = Surface de la plus grande feuille ; SLA_{max} = SLA maximale le long de la tige ; Δ¹³C = Discrimination isotopique foliaire vis-à-vis du carbone 13.

En bref : Une large gamme de variation a été montrée au sein des génotypes de *P. nigra* × *P. deltoïdes* testés. L'orthogonalité entre la biomasse produite (TCB) et l'efficacité d'utilisation de l'eau (via Δ¹³C) augure une indépendance entre ces deux traits.

Extrait de Marron *et al.* 2005 – Tree Physiology

La robustesse des observations effectuées en conditions non limitantes en eau a, par la suite, été testée en conditions de sécheresse. Il semble qu'une **productivité importante soit associée à une plus grande sensibilité à la sécheresse**. Les paramètres descriptifs de la surface foliaire et de sa mise en place se sont, en revanche, avérés être des indicateurs peu fiables de la productivité. Les liens entre la croissance foliaire et l'accumulation de biomasse sont, en effet, très dépendants des conditions environnementales, la plante favorisant l'étalement de la surface au dépend de l'accumulation de biomasse lorsque la lumière est faible ou, au contraire, la limitant lorsqu'elle représente un risque pour la cohésion de la colonne de sève ascendante en conditions de sécheresse.

Analyse

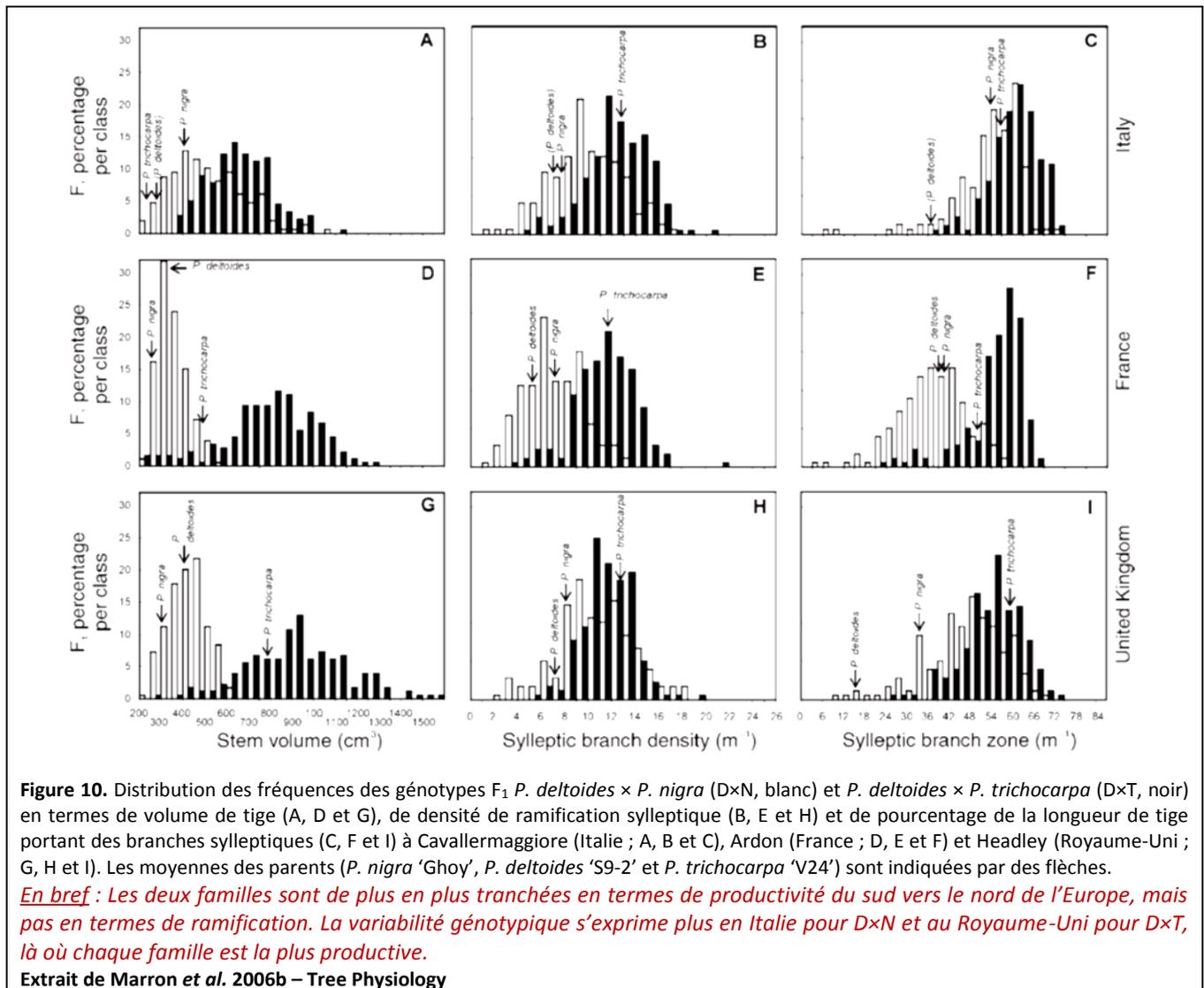
À l'issue de ma thèse, deux des conclusions majeures étaient *i)* qu'une **variabilité considérable** existe parmi les peupliers euraméricains quant à leurs modalités de croissance, leur vigueur et leur efficacité d'utilisation de l'eau, et *ii)* que, parmi ces hybrides, la **production de biomasse ne semble pas liée à l'efficacité avec laquelle ils utilisent l'eau**. Ces conclusions devaient néanmoins être validées en élargissant le modèle à plusieurs niveaux : (1) d'autres espèces et hybrides de peupliers, (2) des conditions de croissance moins contrôlées, plus proches de la réalité de terrain, (3) des plants plus âgées, (4) des environnements contrastés en termes de climat et de sol, et (5) une prise en compte du déterminisme génétique des caractères étudiés.

conditions contrôlées de serre et, **troisièmement**, en effectuant des mesures en trois sites de climats contrastés afin de déterminer l'importance des interactions génotype \times environnement sur les traits de productivité et de tenter de décomposer ces interactions.

6.3.1. Déterminants phénologiques, architecturaux et foliaires de la productivité

Six catégories de paramètres potentiellement révélateurs des performances des arbres ont été estimées sur plus de 10 000 plantes : **1. Dimensions des arbres**, **2. Production de biomasse**, **3. Ramification sylleptique**, **4. Phénologie**, **5. Nombre de rejets après coupe**, et **6. Caractéristiques foliaires**. Les données acquises pour les deux familles belges aux trois sites ont permis d'estimer les **caractéristiques génétiques** de la productivité et de ses déterminants ainsi que la **stabilité des relations** observées entre la productivité des plantes et les traits cités ci-dessus en réponse à des conditions environnementales contrastées. En plus d'être différents en termes de vigueur, de variabilité génétique et d'hétérosis, les deux familles se sont avérées présenter des réponses tranchées aux trois sites.

1. et 2. **Dimension des arbres et production de biomasse.** La comparaison des équations allométriques associant les dimensions des arbres (hauteur, circonférence) à leur biomasse pour les cinq familles aux trois sites a montré qu'une équation unique peut être appliquée quels que soient la famille et le site, à condition que le site anglais ne soit pas pris en compte. Cela peut être dû au fait que ce site a été très affecté par la rouille foliaire pendant la durée du projet (Dillen *et al.* 2007).
3. **Ramification sylleptique.** Des calculs de gains génétiques ont montré que l'utilisation de la ramification sylleptique comme critère additionnel pour la sélection pour le volume de tige n'apportait un gain de précision qu'en Italie pour la famille *P. deltoides* \times *P. nigra* ou au Royaume-Uni pour la famille *P. deltoides* \times *P. trichocarpa*, autrement dit aux sites où les deux familles exprimaient la croissance la plus importante. L'utilisation de la ramification sylleptique comme critère de sélection est par conséquent d'un intérêt limité (Marron *et al.* 2006b ; Figure 10).



4. **Phénologie.** Relativement aux autres traits, les dates de débourrement et d'entrée en dormance des plants se sont avérées des indicateurs peu fiables de la production de biomasse des familles étudiées. En revanche, une importante variabilité génétique et une forte héritabilité ont été mises en évidence pour ces caractères ainsi que pour la durée entre la cessation de croissance et la fermeture du bourgeon apical (Marron *et al.* 2010a, Rohde *et al.* 2010 ; Figures 11 et 12).
5. **Nombre de rejets après coupe.** Une production de biomasse importante était associée à la production de nombreux rejets après coupe. Néanmoins, cette relation était valable au sein de chaque famille mais pas nécessairement entre familles, la famille belge la moins productive (*P. deltooides* × *P. nigra*) produisant significativement plus de rejets (Marron *et al.* 2010a ; Figures 11 et 12).

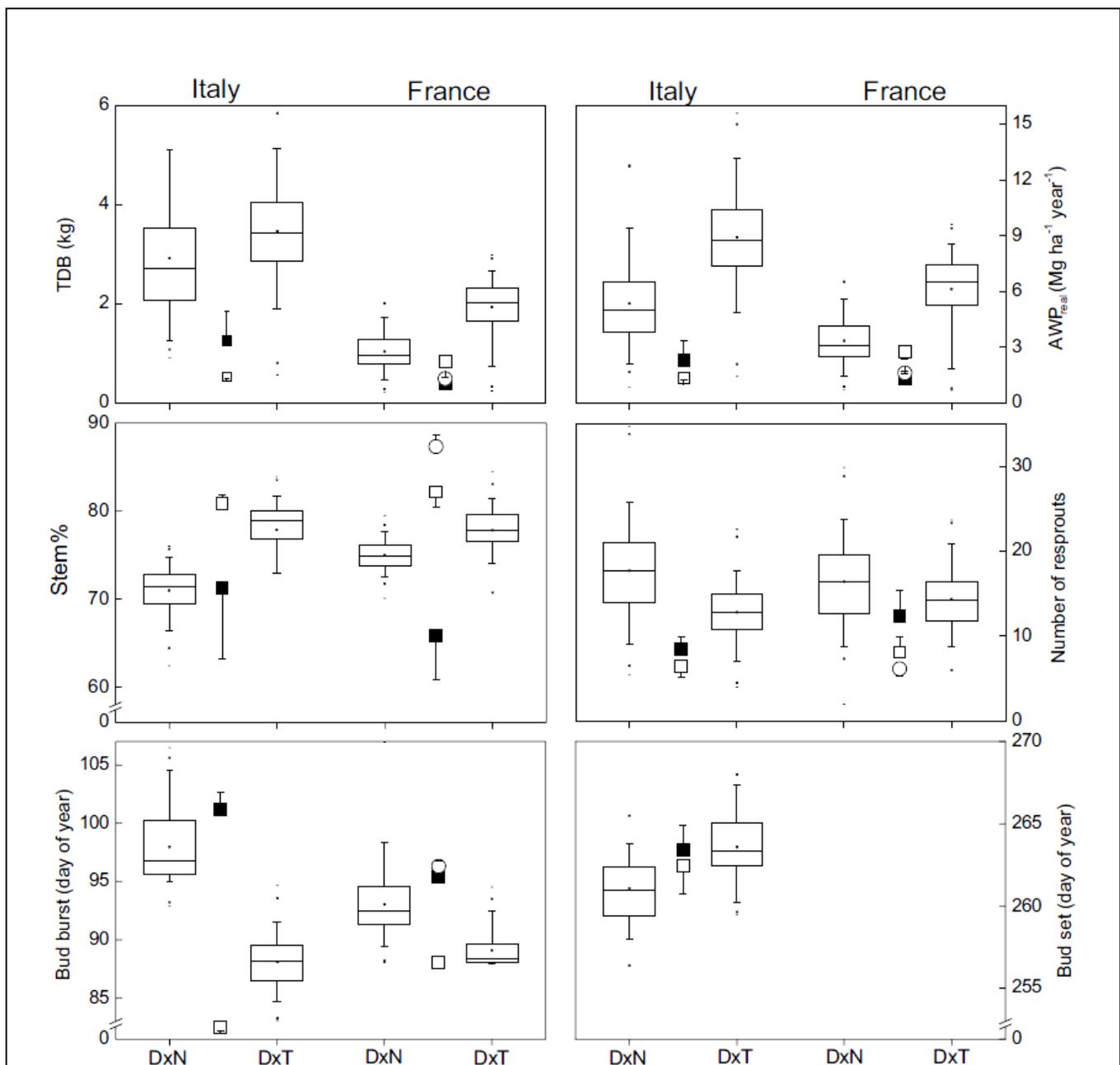


Figure 11. Boîtes à moustaches représentant la biomasse sèche totale aérienne (total dry biomass, TDB), la production de bois aérienne réalisée (realized aboveground woody production, AWP_{real}), le pourcentage de la biomasse investi dans la tige (Stem%), le nombre de rejets et les dates de débourrement (Bud burst) et d'entrée en dormance (Bud set) des familles de *P. deltoidea* × *P. nigra* (D×N) et *P. deltoidea* × *P. trichocarpa* (D×T) et leurs parents (cercle noir pour *P. nigra* 'Ghoy', cercle blanc pour *P. deltoidea* 'S9-2' et carré blanc pour *P. trichocarpa* 'V24') en Italie (Cavallermaggiore) et en France (Ardon). Pour les familles, chaque boîte représente le quartile situé au-dessous (Q1) et au-dessus (Q3) de la valeur médiane. Les barres verticales représentent les valeurs minimales et maximales, excepté pour les génotypes qui sont à plus de 1,5 fois du haut de l'interquartile ($Q3 - Q1$) (croix). Pour les parents, les moyennes (\pm erreurs standards) sont présentées ($n = 10$).

En bref : Les deux familles expriment une variabilité génotypique supérieure en Italie qu'en France en termes de productivité, de production de rejets et de phénologie. Une importante vigueur hybride (hétérosis) est observée pour la plupart des caractères.

Extrait de Marron et al. 2010a – Tree Genetics & Genomes

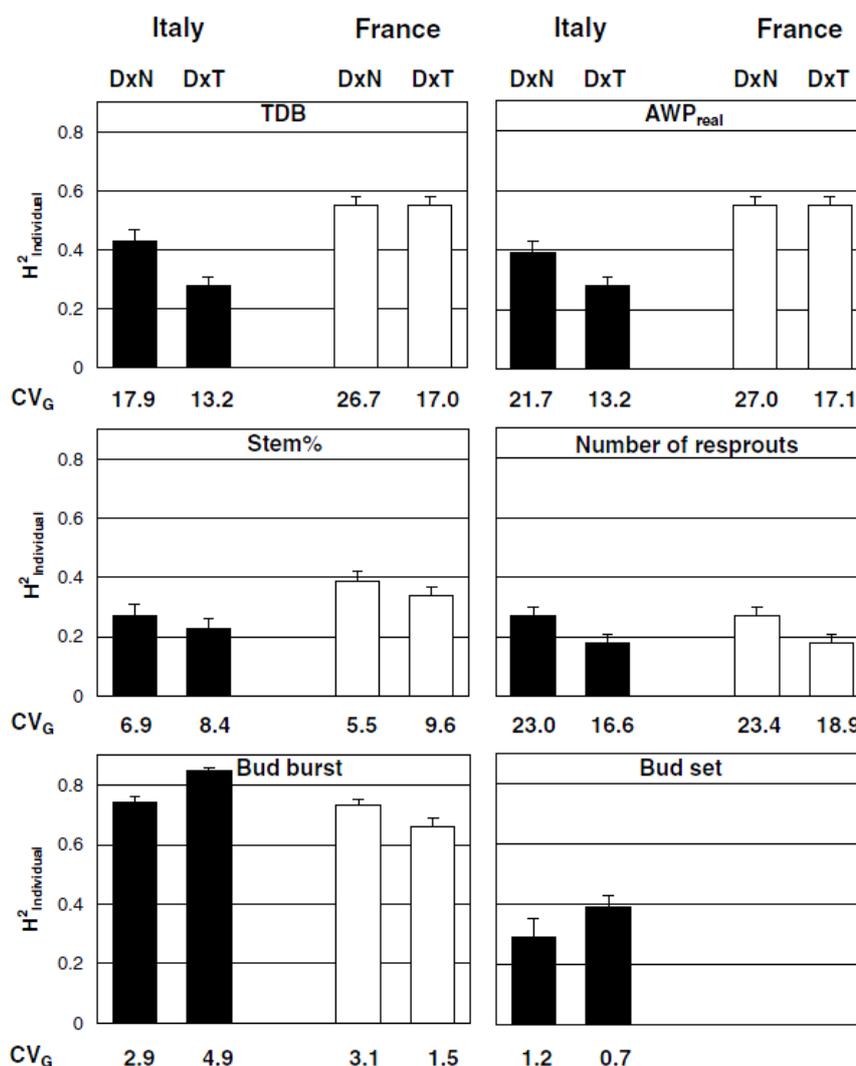


Figure 12. Héritabilités individuelles au sens large ($H^2_{\text{individual}} \pm$ erreurs standards) et coefficients de variation génétique (CV_G , %) de la biomasse sèche totale aérienne (total dry biomass, TDB), la production de bois aérienne réalisée (realized aboveground woody production, AWP_{real}), le pourcentage de biomasse investi dans la tige (Stem%), le nombre de rejets et les dates de débourrement (Bud burst) et d'entrée en dormance (Bud set) des familles de *P. deltooides* × *P. nigra* (D×N) et *P. deltooides* × *P. trichocarpa* (D×T) en Italie (Cavallermaggiore, histogrammes noirs) et en France (Ardon, histogrammes blancs).

En bref : Des héritabilités modérées à fortes (pour la date de débourrement) ont été mises en évidence. Par contre, les coefficients de variation génétiques étaient très faibles pour la phénologie.

Extrait de Marron et al. 2010a – Tree Genetics & Genomes

6. **Caractéristiques foliaires.** Les mesures foliaires (traits de croissance et structuraux) ont été effectuées sur une sélection de géotypes des deux familles belges aux sites français et italien. L'estimation des traits foliaires associée à celle des performances des arbres nous a permis de montrer que la vitesse d'apparition des feuilles associée à la surface de la plus grande feuille le long de la tige était le meilleur indicateur de vigueur des plantes. Il s'est avéré que les relations entre traits foliaires et productivité étaient très dépendantes du site et de la famille considérés. Seules la surface foliaire maximale le long de la tige et les dimensions du pétiole étaient positivement corrélées à la vigueur des plantes quel que soit l'environnement et la famille considérés (Marron & Ceulemans 2006, Marron et al. 2007 ; Figure 13).

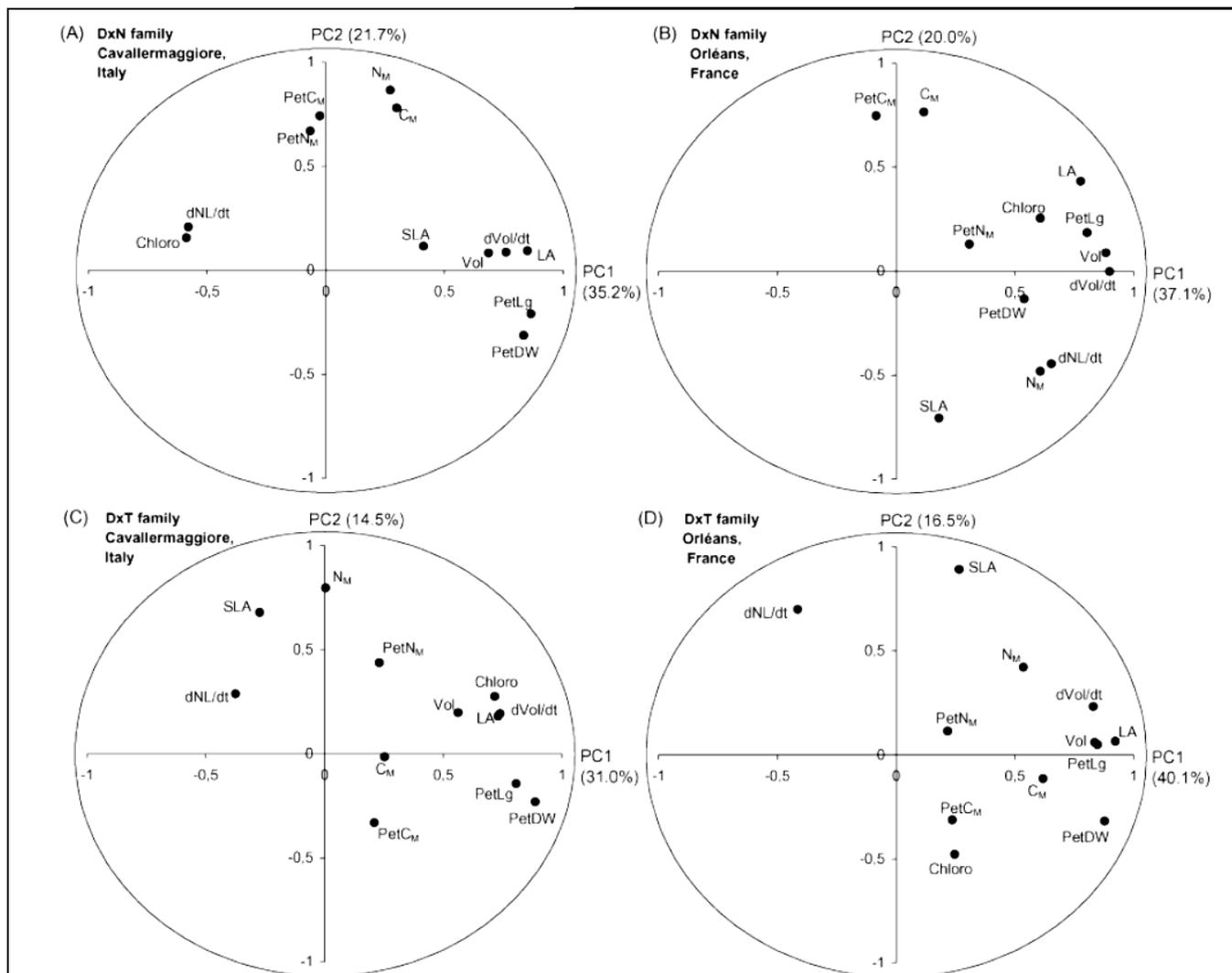


Figure 13. Distribution dans les plans factoriels PC1 × PC2 des analyses en composantes principales (ACP) des traits foliaires et de croissance des familles de *P. deltoides* × *P. nigra* (D×N, A et B) et *P. deltoides* × *P. trichocarpa* (D×T, C et D) à Cavallermaggiore, Italie (A et C) et à Ardon, France (B et D). PC1 et PC2 sont des combinaisons linéaires des variables et ont été construits pour maximiser la part de la variabilité qu'ils expliquent. Les nombres entre parenthèses représentent le pourcentage de variation expliquée par chaque axe. Abréviations : Vol : volume de tige considérée comme un cône, dVol/dt : vitesse d'accroissement en volume, LA : surface foliaire individuelle maximale, SLA : surface massique foliaire, Chloro : teneur en chlorophylles foliaire, N_M : teneur en azote foliaire, C_M : teneur en carbone foliaire, PetLg : longueur du pétiole, PetDW : masse sèche du pétiole, PetN_M : teneur en azote du pétiole, PetC_M : teneur en carbone du pétiole.

En bref : Seules la surface foliaire individuelle et les dimensions du pétiole sont corrélées à la croissance quels que soient la famille et le site.

Extrait de Marron *et al.* 2007 – Environmental and Experimental Botany

Ma participation au projet POPYOMICS s'est achevée en 2006 par deux mois passés à l'Université de Viterbe (Italie) au sein du Department of Forest Environment and Resources. Cette période a été mise à profit pour analyser et valoriser les données recueillies sur la famille italienne de peuplier blanc du projet (*P. alba* × *P. alba*) entre 2003 et 2006. Cette famille intra-spécifique présentait une diversité génétique moindre que les familles interspécifiques du projet (Figure 14). Cependant, contre toute attente, ce croisement intra-spécifique de deux génotypes contrastés de peuplier blanc, espèce native d'Europe, s'est avéré, dans certains cas, plus productif que les familles interspécifiques usuellement utilisés en populiculture à travers le monde (Marron *et al.* 2010b, Fabbrini *et al.* 2012 ; Figure 14). La famille faisait preuve d'une importante plasticité ; les meilleures performances demeuraient néanmoins observées dans le nord de l'Italie, à proximité de l'aire d'origine des parents.

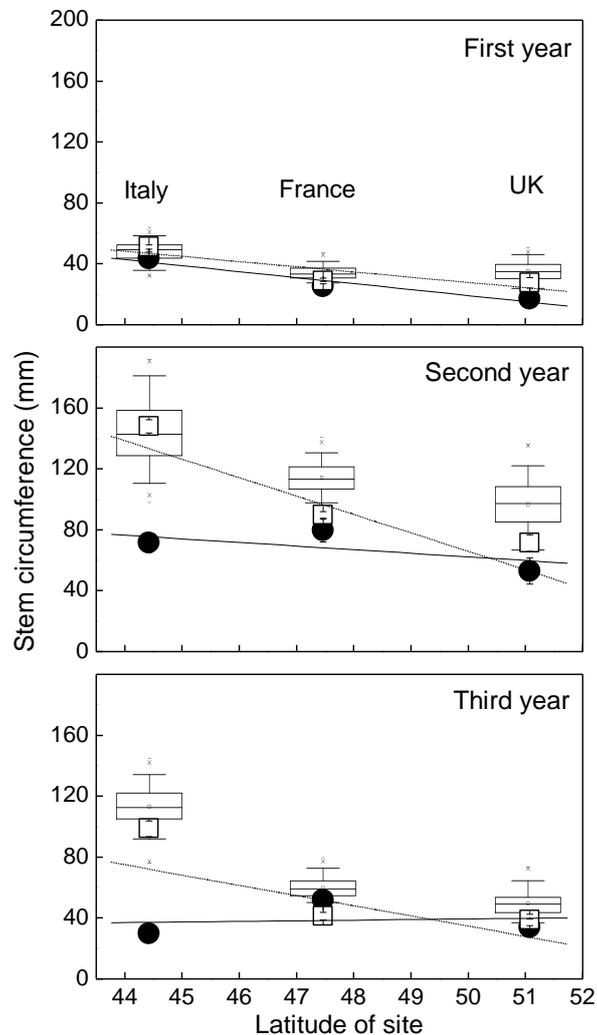


Figure 14. Diversité génétique au sein de la famille *P. alba* × *P. alba* et valeurs des parents en termes de circonférence de la tige à la fin de chacune des trois saisons de croissance à Cavallermaggiore (Italie), Ardon (France) et Headley (Royaume-Uni). Pour la famille, chaque boîte représente le quartile situé au-dessous (Q1) et au-dessus (Q3) de la valeur médiane. Les barres verticales représentent les valeurs minimales et maximales, excepté pour les génotypes qui sont à plus de 1,5 fois du haut de l'interquartile (Q3 – Q1) (croix). Pour les parents, les moyennes (\pm erreurs standards) sont présentées par des cercles noirs pour la femelle '14P11' et par des carrés blancs pour le mâle '6K3' ($n = 10$). Pour les deux parents, les droites de régression entre la circonférence de la tige et la latitude du site sont représentées (ligne continue pour '14P11' et pointillés pour '6K3'). Les arbres étaient récoltés entre la deuxième et la troisième année.

En bref : La plus large variabilité génotypique est exprimée à deux ans. La plasticité est de plus en plus marquée au fil des ans. La famille est beaucoup plus productive sous les latitudes italiennes d'où sont originaires les parents.

Extrait de Marron *et al.* 2010b – Canadian Journal of Forest Research

6.3.2. Efficience d'utilisation de l'eau

Au cours de mon séjour postdoctoral à l'Université d'Anvers, une collaboration étroite s'est poursuivie avec l'Université d'Orléans, notamment dans le cadre d'un projet Tournesol (financement Hubert Curien – Ministère des Affaires étrangères) associant également les Unités EEF de l'INRA de Nancy et AGPF de l'INRA d'Orléans autour du thème de la « *Variabilité génotypique de la productivité et de l'efficience d'utilisation de l'eau au sein du genre Populus* » (2008-2009). Cette collaboration a permis d'aborder la question laissée en suspens à l'issue de ma thèse de la **plasticité des liens entre production de biomasse et efficience d'utilisation de l'eau** au sein de plusieurs familles d'hybrides F₁ de peuplier (Dillen *et al.* 2011a).

L'association des travaux menés dans le cadre de cette collaboration sur les familles de *P. deltoides* × *P. nigra* et *P. deltoides* × *P. trichocarpa* aux sites français et italien du projet POPYOMICs (Dillen *et al.* 2011a) aux études menées depuis 2001 par l'Université d'Orléans et l'INRA de Nancy a permis d'obtenir une palette de conditions de culture (serre, pépinière, peupleraie et taillis à courte rotation à densités variables et pédoclimats contrastés) et de type de matériel végétal (hybrides euraméricains et interaméricains du commerce ou en cours de test, âgés de quelques mois à plusieurs décennies) très variées (Figure 15). De la synthèse de ces études, il est apparu que :

- La variabilité génotypique reste importante quelles que soient les conditions de culture et le type d'hybrides considéré (Figure 15). Cette variabilité est moins marquée pour les hybrides F₁ (Dillen *et al.* 2011a) que pour les hybrides non apparentés (les autres études).
- Les conditions de culture ont un effet fort sur l'efficience d'utilisation de l'eau, les peupliers cultivés en conditions « obscures » de serre étant beaucoup moins efficaces (Marron *et al.* 2005), alors que ceux croissant en conditions limitantes (Monclus *et al.* 2006), voire très limitantes en eau (Toillon *et al.* 2013a) sont plus efficaces pour utiliser l'eau (Figure 15). Cela est dû au facteur influençant de manière prépondérante l'efficience d'utilisation de l'eau : l'assimilation en conditions limitantes en lumière en serre, ou la transpiration en conditions de sécheresse édaphique.
- Quelles que soient les conditions de croissance et le matériel végétal, aucun antagonisme entre la production de biomasse et l'efficience d'utilisation de l'eau n'a été mis en évidence. Dans certains cas, une corrélation positive entre ces deux caractères était observée, alors que, le plus souvent, aucun lien n'était mis en évidence, laissant la possibilité d'une sélection (conjointe ou indépendante) pour les deux caractères.
- Pour un site donné, les classements des géotypes pour leur efficience d'utilisation de l'eau restaient relativement constants entre années (Dillen *et al.* 2011a) et pour des densités de plantation variables (taillis à courte vs. très courte rotations ; Toillon *et al.* 2013a). Les classements étaient par contre significativement modifiés par des conditions pédoclimatiques tranchées (France vs. Italie, Dillen *et al.* 2011a ; Bourgogne vs. Région Centre, Toillon *et al.* 2013a), la sélection des géotypes devant être opérée en fonction des conditions pédoclimatiques de culture.

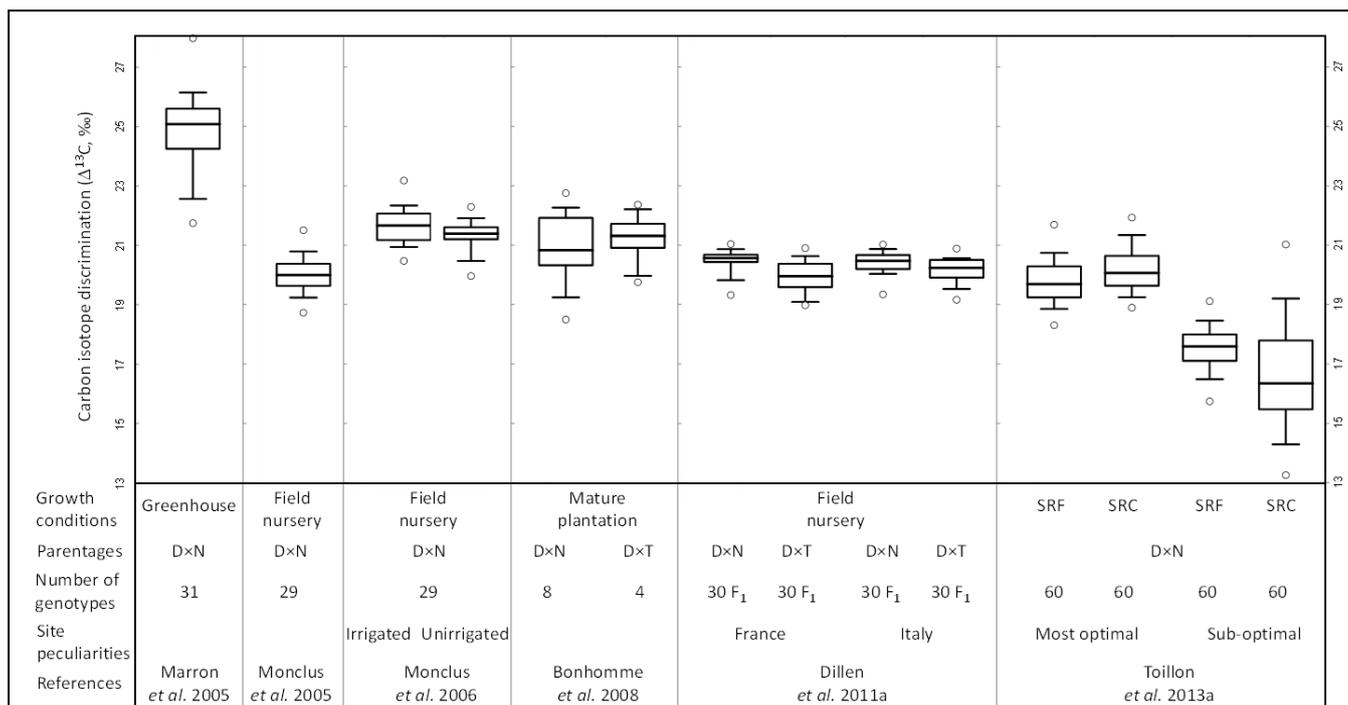


Figure 15. Boîtes à moustaches présentant les valeurs de discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13 ($\Delta^{13}\text{C}$) de six études menées à Orléans (LBLGC), Nancy (EEF) et Anvers (Pleco) en serre, en pépinière, en plantation mature et en taillis à courte (short-rotation forestry, SRF) ou très courte rotations (short-rotation coppice, SRC) avec des hybrides apparentés (F_1) ou non de *P. deltoides* × *P. nigra* (D×N) et *P. deltoides* × *P. trichocarpa* (D×T). Chaque boîte représente le quartile situé au-dessous (Q1) et au-dessus (Q3) de la valeur médiane. Les barres verticales représentent les valeurs minimales et maximales, excepté pour les génotypes qui sont à plus de 1,5 fois du haut de l'interquartile (Q3 – Q1) (cercles). Le nombre de génotypes étudiés et les conditions particulières de sites (application de sécheresse ou localisations géographiques différentes) sont également indiqués.

En bref : La variabilité génotypique pour $\Delta^{13}\text{C}$ est substantielle, d'autant plus que les conditions sont contraignantes pour la lumière (Marron et al. 2005) ou l'eau (Toillon et al. 2013a) et que les hybrides ne sont pas apparentés. Une contrainte pour la lumière entraîne une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'eau ($\Delta^{13}\text{C}$ élevée ; Marron et al. 2005), alors qu'une contrainte pour l'eau occasionne une augmentation ($\Delta^{13}\text{C}$ faible ; Monclus et al. 2006, Toillon et al. 2013a).

6.4. Variabilité temporelle de la signature isotopique de la respiration du sol

Post-doctorat 2007

Flux de CO₂ du sol ; Composition en carbone 13 ; Spectrophotométrie ; Hêtraie ; Respiration des racines et des litières

Dans le cadre de mon séjour postdoctoral au sein de l'UMR EEF en 2006 et 2007, l'acquisition de données de discrimination isotopique du carbone respiré par le sol a été effectuée **en continu à l'aide d'un spectrophotomètre à diode laser modulable (TDLS)**. Les données de ce type étaient, à l'époque, extrêmement novatrices, les suivis antérieurs ayant été essentiellement effectués à partir d'échantillons ponctuels, prélevés à intervalles réguliers, et analysés en spectrométrie de masse. Lors de mon séjour, seules deux équipes étaient équipées de TDLS en France : l'UMR EEF de Nancy et l'UMR ISPA (Interactions Sol – Plante – Atmosphère) de Bordeaux.

L'objectif des travaux effectués était (1) de **valider in situ les mesures de flux de ¹²CO₂ et de ¹³CO₂ comme outil** pour suivre la composition isotopique du carbone de la respiration du sol et (2) **d'évaluer les variations à court terme et saisonnières de la signature isotopique** de la respiration en relation avec les conditions climatiques affectant le fonctionnement de la canopée.

In vivo, les mesures ont été effectuées au sein du site atelier de la hêtraie de Hesse (48°40'N, 7°05'E). De fin juin à mi-novembre 2007, la respiration du sol ainsi que la composition isotopique en ¹³C du CO₂ respiré ont été suivies en continu. Trois embases ont été installées et une chambre de mesure a été déplacée de l'une à l'autre à intervalles réguliers. Les mesures ont été associées aux évolutions de profils de température et de teneur en eau du sol. Avant le début des expériences in situ, le spectrophotomètre à diode laser modulable a également été mis à profit pour estimer, *in vitro*, la composition en ¹³C du CO₂ respiré par des échantillons de litière, de racines et de carottes de sol incubés à température ambiante. Ces mesures ont été associées à une détermination de la composition isotopique en ¹³C des substrats de la respiration racinaire. De façon à valider les mesures effectuées à l'aide du TDLS avec une méthode éprouvée, la composition isotopique en ¹³C du CO₂ respiré par le sol a aussi été établie à partir de Keeling plots qui ont été réalisés aux mêmes intervalles de temps. Cette méthode permet de déterminer la composition en ¹³C du CO₂ respiré par le sol par l'intermédiaire de la composition isotopique en ¹³C d'échantillons de gaz du sol prélevés à concentrations croissantes en CO₂ par spectrométrie de masse (Keeling 1958).

Les Keeling plots nous ont permis de nous assurer de la pertinence des mesures effectuées à l'aide du TDLS. Étonnement, une importante variabilité temporelle de la composition en carbone 13 de la respiration du sol ($\delta^{13}\text{C}$) a pu être observée aussi bien à l'échelle journalière qu'à l'échelle saisonnière (Figure 16). Un cycle journalier probablement dû à une évolution des sources concourant à la respiration pendant la journée a été mis en évidence. **L'amplitude des variations observées au cours de la journée étaient du même ordre de grandeur que celle des variations saisonnières**, soulignant l'importance du moment de la journée auquel les

mesures ponctuelles sont faites pour obtenir des valeurs pertinentes et comparables entre jours. Une importante variabilité spatiale a également été observée, les valeurs extrêmes correspondant au $\delta^{13}\text{C}$ des racines et de la litière mesurés lors des incubations, et sous-entendant que les variations observées entre embases seraient dues à une contribution plus ou moins importante de ces deux sources au flux respiratoire pour les différentes embases (Marron *et al.* 2009).

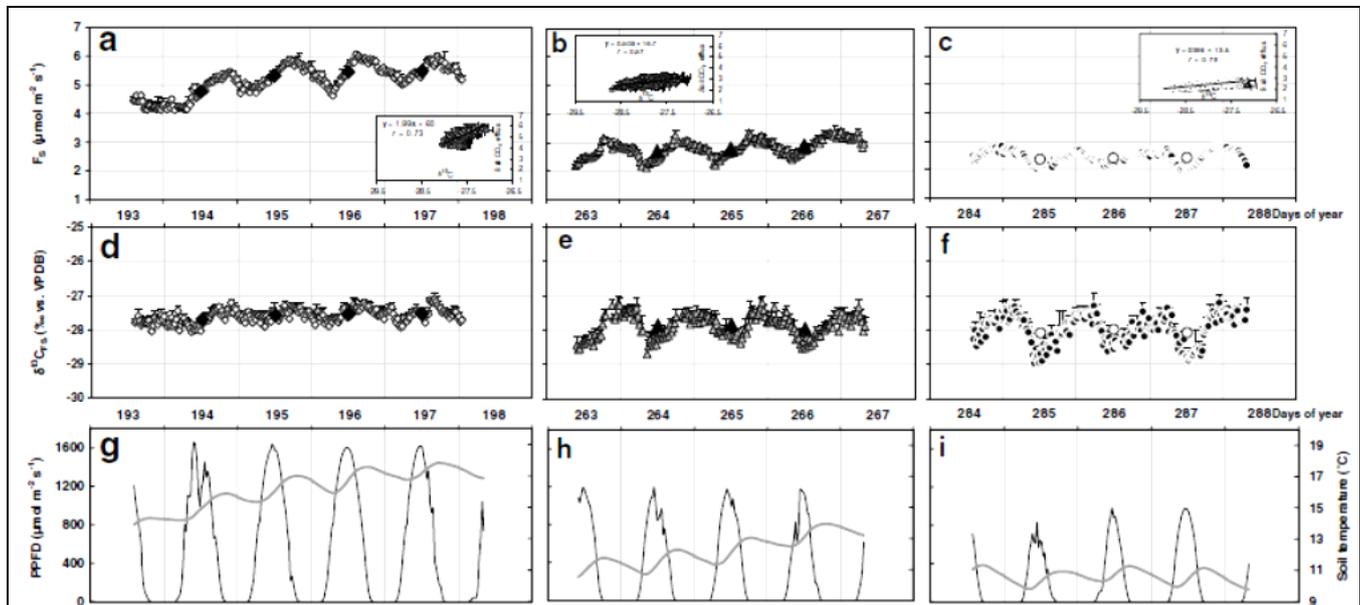


Figure 16. Evolution temporelle du flux de CO₂ du sol (F_s, a à c) et de sa composition en carbone 13 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{F}_s}$, d à e) basés sur les moyennes semi-horaires (losanges blancs, triangles gris et cercles noirs) et sur les moyennes journalières (losanges noirs, triangles noirs et cercles blancs), et densité de flux de photon photosynthétique (PPFD, ligne noire, g à i) et température de l'air (ligne grise, g à i) du 12 au 18 juillet (jours 193 à 198), du 20 au 24 septembre (jours 263 à 267) et du 11 au 15 octobre (jours 284 à 288) 2007. Moyennes (\pm intervalles de confiance) de 6 valeurs par période de 30 minutes et 48 valeurs par jour. La relation entre F_s et $\delta^{13}\text{C}_{\text{F}_s}$ est présentée dans les encarts a à c.

En bref : Les variations journalières de la composition isotopique de la respiration du sol ($\delta^{13}\text{C}_{\text{F}_s}$) sont corrélées au flux lui-même (F_s). Contrairement à F_s, les variations de $\delta^{13}\text{C}_{\text{F}_s}$ semblent plus marquées lorsque la température et la luminosité diminuent. Les variations journalières peuvent être d'un ordre de grandeur comparable aux variations saisonnières.

Extrait de Marron *et al.* 2009 – Plant and Soil

Analyse

Ce volet de mon parcours concernant la composition isotopique de la respiration du sol d'une hêtraie de plaine peut apparaître annexe en regard du reste de mes activités de recherche. Il m'a néanmoins permis d'acquérir l'expérience **de concepts et de méthodes en écophysologie et en isotopie**, concepts utilisés par la suite pour étudier le fonctionnement des plantations d'arbres intensives à fins de production de biomasse-énergie. L'étude de la dynamique du carbone et de l'azote dans ces systèmes de culture inclue, en effet, l'analyse du flux de carbone provenant du sol, ainsi que le suivi des flux d'azote par l'intermédiaire d'un marquage isotopique au ¹⁵N.

6.5. Écophysiologie et conduite des taillis à courte rotation (TCR)

Thématique actuelle, depuis 2007

J'ai été recruté au 1^{er} décembre 2007 au sein de l'UMR INRA de Nancy-Lorraine – Université de Lorraine, Écologie et Écophysiologie Forestières (UMR 1137 EEF) en tant que chargé de recherche de 1^{ère} classe sur le thème de « Écophysiologie et conduite des taillis à courte rotation (TCR) ». Ce recrutement s'intégrait au sein du programme INRA CARBIO (carbone renouvelable et bio-industrie) et plus précisément dans la filière Ressources lignocellulosiques de l'axe Ressources primaires du programme. Le programme avait pour vocation principale le développement des agro-ressources non alimentaires. Dans le contexte actuel de raréfaction des carburants fossiles et de recherche de ressources énergétiques alternatives, **ma mission consiste à chercher à optimiser la production de biomasse ligneuse de systèmes de culture à courte ou très courte rotations en cherchant à minimiser les besoins en eau, en fertilisant et en traitements phytosanitaires**. Le choix d'un matériel végétal adapté au milieu et les modalités de conduite de la plantation (densité, durée des rotations, épandages, etc.) sont les deux catégories de facteurs sur lesquels il est possible de jouer pour optimiser le système. Mes activités s'intègrent au défi IV parmi les axes stratégiques 2010-2020 du document d'orientation INRA : « *Valorisation de la biomasse pour la chimie et l'énergie* », et au Défi 2 du schéma stratégique du Département EFPA (2016-2020) : « *Développer la fonction de production durable (de bois) des systèmes forestiers* ».

Au sein de l'UMR EEF, je suis intégré depuis 2009 dans l'équipe supervisée par Damien Bonal « *Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème* » (ARBECO ; Annexe 1). Le TCR se situe à l'interface entre la foresterie et l'agronomie et correspondait de ce fait, à mon arrivée, à un modèle d'étude nouveau pour l'Unité dont les activités étaient auparavant principalement consacrées à la forêt traditionnellement gérée. La thématique et les sites atelier qui y sont associés devaient être créés de toute pièce. Le TCR représente un modèle unique par son homogénéité qui le rend assimilable à une « forêt simplifiée ». Pour cette raison et parce que la thématique s'intéresse à la fois à l'échelle de l'arbre et à celle du peuplement, des connections pouvaient se développer avec les deux autres équipes de l'UMR aux échelles d'étude et thématiques voisines « *Physiologie et diversité des réponses aux contraintes* » (équipe PhysioDiv) et « *Dynamique à long terme et dysfonctionnement des écosystèmes forestiers* » (équipe Phytoéco).

Au sein de l'UMR EEF, le TCR et la thématique dont il est l'objet se positionnent au confluent des échelles de temps et d'espace, entre les domaines de compétences présents dans les composantes universitaire et INRA de l'Unité, et à la croisée des domaines de recherche des trois équipes de recherche qui composent l'UMR.

Mes activités de recherche actuelles s'articulent autour de deux volets majeurs : *i*) l'étude de la **variabilité génotypique et de la plasticité** en termes de productivité et d'efficacités d'utilisation des ressources (eau, water-use efficiency, WUE ; azote, nitrogen-use efficiency, NUE) des espèces ligneuses à vocation de production de biomasse, et *ii*) l'étude du **fonctionnement** carboné et azoté des plantations à courte rotation. L'étude de la variabilité et du fonctionnement des TCR sont tous deux entrepris en réponse aux variations des facteurs de l'environnement, en termes de conditions pédoclimatiques et de modalités de gestion des plantations (densité de plantation, mélange d'espèces, épandages, etc.).

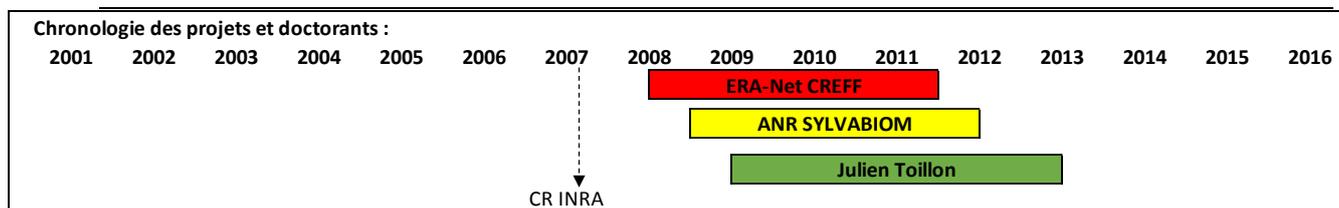
Le volet « *variabilité / plasticité* » est abordé par l'intermédiaire de collaborations étroites avec l'Université et l'INRA d'Orléans (co-encadrement de la thèse Julien Toillon, participation au projet ANR Bioénergies SYLVABIOM, 2008-2013) et plusieurs organismes de recherche allemands (coordination du projet ERA-Net Bioénergies CREFF, 2008-2012).

Le volet « *fonctionnement* » est plus abordé au niveau intra-UMR et par le biais de collaborations avec le CIRAD de Montpellier (co-encadrement de la thèse de Cécilia Gana, participation au projet ANR Systerra Intens&Fix, 2011-2014, mise en place d'un site atelier TCR instrumenté avec l'appui de la Région Lorraine, 2008-2011, et du SOERE F-ORE-T, 2011-2015).

Dans la suite du point 6.5, les deux volets sont illustrés par une sélection de résultats marquants ; chacun est introduit par un état de l'Art présentant les enjeux et amenant les questionnements.

Pour alimenter les deux volets, un réseau de sites a été défini dans le Nord de la France en collaboration avec l'ensemble des organismes français possédant de l'expérience dans l'étude des TCR. Les TCR/TTCR se situant à la marge entre agriculture et foresterie, il s'agit d'organismes techniques et de recherche des deux bords (INRA, FCBA, IDF, Chambres d'Agriculture, etc. ; Figure 3). Les sites étaient soit établis et instrumentés de toutes pièces dans le cadre des projets ANR SYLVABIOM et Intens&Fix, soit déjà installés dans le cadre d'autres projets ou chez des particuliers dans le cadre du projet ERA-Net Bioenergy ADEME CREFF.

6.5.1. Variabilité et plasticité de la productivité et de l'efficacité d'utilisation des ressources



Peuplier ; Saule ; Taillis à courte et très courte rotations ; Efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote ; Productivité ; Densité de plantation ; Contexte pédoclimatique

Ce volet a été abordé dans le cadre de la **thèse de Julien Toillon** (2009-2013), soutenue le 11 juillet 2013 et financée dans le cadre du **projet ANR SYLVABIOM**, ainsi que dans le cadre du **projet ERA-Net Bioenergy CREFF**.

Les objectifs étaient *i*) d'évaluer comment la physiologie de peupliers et de saules dédiés à la production de biomasse est affectée par les **conditions pédoclimatiques**, *ii*) d'évaluer comment la physiologie de la plante est affectée par la **densité de plantation** et *iii*) d'évaluer comment les **relations entre production de biomasse et efficacité d'utilisation de l'eau et de l'azote** sont modulées par les conditions pédoclimatiques et la densité de plantation.

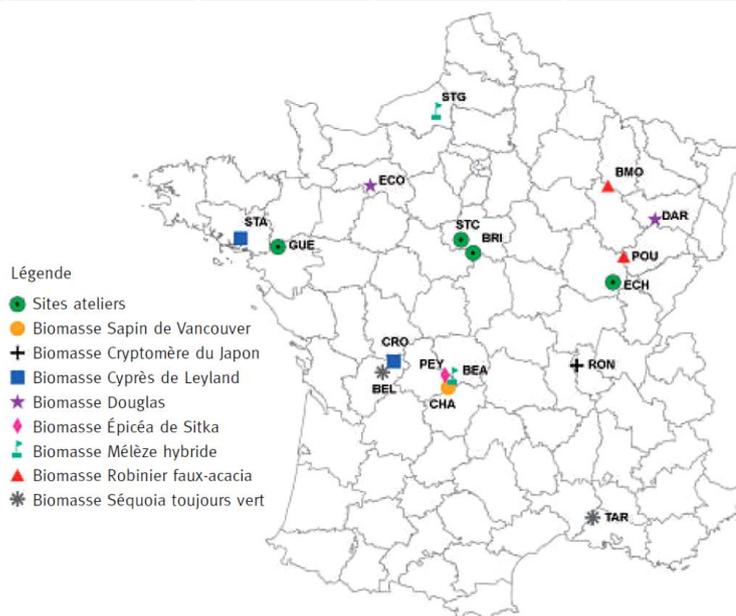
WUE a été estimée indirectement à l'échelle foliaire via la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13 ($\Delta^{13}\text{C}$) et NUE a été estimée à l'échelle de la plante entière via le rapport entre la biomasse aérienne et la quantité d'azote présente dans les tiges pour les quatre dispositifs installés dans le cadre du projet SYLVABIOM (Échigey, 21 ; Guémené-Penfao, 44 ; Brinon-sur-Sauldre, 18 et Saint-Cyr-en-Val, 45 ; Figure 17). Les dispositifs étaient composés (1) de tests génétiques correspondant à des collections de 15 à 56 génotypes de peuplier, saule et robinier et/ou (2) de tests sylvicoles correspondant à la comparaison de la culture en TCR et TTCR d'un nombre plus restreint de génotypes ou provenances (1 à 6) sur des surfaces plus importantes que les tests génétiques (Figure 17).

Site	Guémené-Penfao (44)	Brinon-sur-Sauldre (18)	Saint-Cyr-en-Val (45)	Échigey (21)
Date d'installation	2009	2009	2010	2009
Tests sylvicoles	Peuplier TCR vs. TTCR	Dorskamp	Dorskamp	Dorskamp
	Saule TTCR	6 génotypes	6 génotypes	6 génotypes
	Robinier TCR vs. TTCR	2 provenances		
Tests génétiques	Peuplier TCR vs. TTCR		56 génotypes	56 génotypes
	Saule TTCR		20 génotypes	
	Robinier TCR	15 génotypes		
Sol	Texture	Limono-argileux	Sableux	Sablo-argileux
	Teneur en azote (g kg ⁻¹)	1,7	0,6	0,7
	Humidité du sol estivale (mai-août, %)	17,5	27,7	15,5
Climat	Précipitations estivales (mai-août, mm)	148	257	189
	Température estivale (mai-août, °C)	16,7	17,0	17,4

Figure 17. Caractéristiques des systèmes de culture et conditions pédoclimatiques (période 2009-2011) des quatre sites atelier, et localisation en France des sites atelier et des chantiers de biomasse totale du projet SYLVABIOM.

[ECH : Échigey ; STC : Saint-Cyr-en-Val ; GUE : Guémené-Penfao ; BRI : Brinon-sur-Sauldre ; STG : Sainte-Geneviève-en-Bray ; ECO : Ecouves ; BMO : Bois-Monsieur ; DAR : Darney ; STA : Saint-Avé ; POU : Pouilly-sur-Vingeanne ; BEL : Bel-Air ; CRO : La-Croze ; PEY : Peyrat-le-Château ; BEA : Beaumont-du-Lac ; CHA : Chaud ; RON : Ronno ; TAR : Tarascon]

Extrait de Bastien *et al.* 2015 – Revue Forestière Française

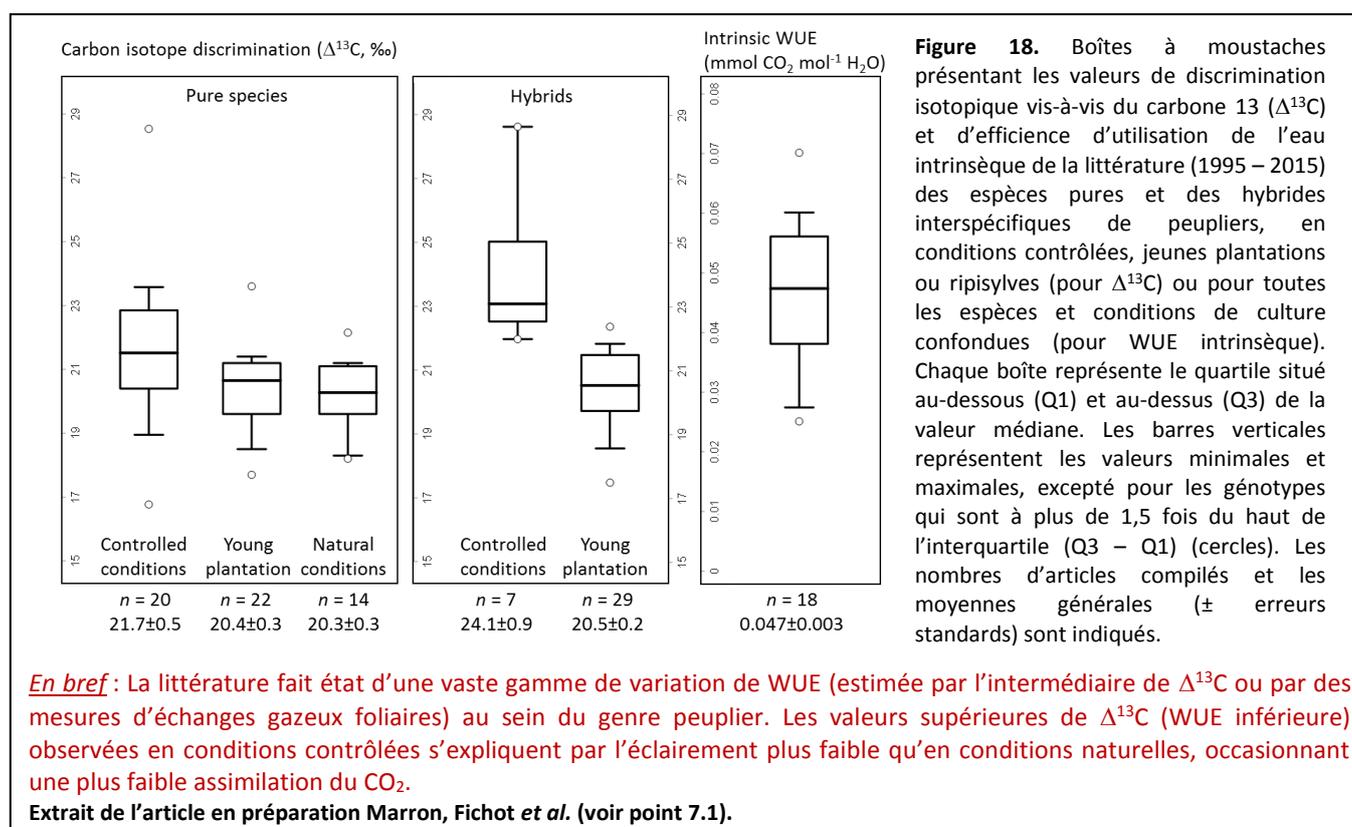


6.5.1.1. État de l'Art et enjeux

Il est maintenant bien établi que **la connaissance de la consommation en eau et en nutriments d'une plante à vocation bioénergétique est cruciale pour la prise de décision locale et l'optimisation technique d'une plantation** (Jørgensen & Schelde 2001). La sélection du matériel végétal pour une région donnée doit être basée sur une évaluation de la demande en eau et en nutriments de la plante en comparaison avec les conditions climatiques et édaphiques locales. L'eau et l'azote sont souvent les principaux facteurs limitants la productivité. De plus, la consommation en eau annuelle et l'efficacité avec laquelle les arbres utilisent les ressources peuvent être des critères de sélection clé dans les programmes d'amélioration génétique pour augmenter la productivité dans les zones sèches et peu fertiles et pour produire des variétés adaptées à de larges gammes de conditions pédoclimatiques.

Les valeurs de WUE collectées jusqu'à aujourd'hui pour les cultures énergétiques (incluant les espèces ligneuses) varient généralement entre 0,3 et 15 g de biomasse sèche par kg d'eau utilisée (Jørgensen & Schelde 2001). La fourchette de variation de WUE généralement observée pour les cultures agricoles classiques est comprise dans cette gamme. Pour le peuplier, les nombreuses études menées (incluant celles résumées au point

6.3.2 du présent mémoire) ont mis en évidence une gamme très large de variation de WUE. La Figure 18 synthétise, au sein du genre peuplier, l'ampleur de la fourchette de variation de WUE exprimée par l'intermédiaire de $\Delta^{13}\text{C}$ ou au niveau intrinsèque, en conditions naturelles ou contrôlées. Bien que de nombreuses définitions de WUE existent, la variation importante observée est due à l'impact fort des conditions environnementales (climat, disponibilité en eau, etc.) et à la nature du matériel végétal utilisé en termes d'âge et de proximité génétique (Marron *et al.* 2005, Monclus *et al.* 2005, 2006). En revanche, **l'impact que pourraient avoir les modalités de gestion de la plantation sur WUE, notamment en termes de densité de plantation des arbres et de durée des rotations, a peu été documenté. D'autre part, les informations concernant le WUE d'autres espèces de TCR/TTCR telles que le robinier et le saule sont relativement fragmentaires par rapport au peuplier.**



La gamme de variation observée pour les efficacités d'utilisation des nutriments tels que N, P et K varie d'un facteur vingt pour les plantes « énergétiques » (Jørgensen & Schelde 2001). Les cultures à fins bioénergétiques présentent généralement des efficacités plus élevées que les cultures agricoles classiques en raison du fait que les plantes présentant de fortes teneurs en lignine et en cellulose sont privilégiées pour la bioénergie. De plus, les cultures énergétiques sont généralement récoltées lorsque la majeure partie des nutriments a été remobilisée vers les organes pérennes, réduisant ainsi les risques d'exportations massives. En termes de NUE, les valeurs reportées dans la littérature pour diverses espèces de peuplier et leurs hybrides couvrent une large gamme de variation, assez proche de celle reportée pour le saule (Tableau 1).

La large gamme de variation observée pour ces deux traits (WUE et NUE) pour de nombreuses espèces à vocation bioénergétique met en évidence la possibilité d'optimiser l'adéquation entre le matériel végétal et les

conditions locales. **En plantations intensives à fins de production de bioénergie, les fortes densités de plantation et les exportations fréquentes de bois jeune, riche en nutriments, sont susceptibles de fortement influencer sur ces deux caractères. L'effet de la densité de plantation et de la longueur des rotations, en fonction du contexte pédoclimatique, a cependant peu été décrit.**

Tableau 1. Valeurs de taux d'exportation d'azote (N_{export}) et d'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) trouvées dans la littérature pour diverses espèces de peuplier et leurs hybrides, ainsi que pour le saule, l'eucalyptus et le Miscanthus.

Species	N_{export} ($\text{kg}_N \text{ha}^{-1} \text{y}^{-1}$)	NUE ($\text{g}_{\text{DW}} \text{g}_N^{-1}$)	References
<i>Populus alba</i>		150	Calfapietra <i>et al.</i> 2007
<i>P. deltoides</i>	7.8 - 12.9	169 - 174	Lodhiyal & Lodhiyal 1997, Swamy <i>et al.</i> 2006
<i>P. nigra</i>		150	Calfapietra <i>et al.</i> 2007
<i>P. popularis</i>		190	Li <i>et al.</i> 2012
<i>P. trichocarpa</i>	18.0 - 58.2		Heilman & Norby 1998, Jug <i>et al.</i> 1999
<i>P. deltoides</i> × <i>P. deltoides</i>		159 - 175	Lodhiyal <i>et al.</i> 1995
<i>P. alba</i> × <i>P. glandulosa</i>		210	Li <i>et al.</i> 2012
<i>P. deltoides</i> × <i>P. nigra</i>	3.5 - 62.6	118 - 368	Calfapietra <i>et al.</i> 2007, Ph.D. thesis Julien Toillon (2013)
<i>P. maximoviczii</i> × <i>P. nigra</i>	11.2 - 16.8		Balagus <i>et al.</i> 2012
<i>P. nigra</i> × <i>P. trichocarpa</i>	13		Coté & Camire 1984
<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltoides</i>	2.0 - 25.0	420 - 450	Gelhay <i>et al.</i> 1997, Berthelot <i>et al.</i> 2000
Mean Poplar	2.0 - 62.6	118 - 450	
Willow	18.0 - 86.0	204 - 344	Heilman & Norby 1998, Tharakan <i>et al.</i> 2005, Adegbidi <i>et al.</i> 2001
Eucalyptus	13.0 - 30.0	155 - 822	Herbert 1996, Laclau <i>et al.</i> 2000, Merino <i>et al.</i> 2005, Safou-Matondo <i>et al.</i> 2005
Miscanthus		135 - 704	Beale & Long 1997, Jørgensen 1997, Jørgensen & Schelde 2001

En bref : Les peupliers hybrides présentent des valeurs globalement supérieures de NUE par rapport aux espèces pures, peut-être en raison d'une vigueur hybride pour ce caractère. Les valeurs de NUE reportées dans la littérature pour les peupliers et pour les saules sont proches. Elles sont néanmoins inférieures à celles reportées pour l'eucalyptus et pour le Miscanthus. Pour toutes ces espèces, la fourchette de variation observée est importante (quasiment du simple au quadruple entre les valeurs extrêmes, pour le peuplier et plus du simple au quintuple pour l'eucalyptus et le Miscanthus). **Extrait de l'article en préparation Toillon *et al.* (voir point 7.1).**

6.5.1.2. Résultats marquants

Afin de répondre au premier de nos objectifs initiaux (*caractériser l'impact des conditions pédoclimatiques sur la physiologie de peupliers et de saules dédiés à la production de biomasse*), deux sites contrastés par leurs conditions pédoclimatiques ont été pris en compte : le sol du site de Échigey se distinguait de celui de Saint-Cyr-en-Val par sa texture (argilo-limoneuse vs. sablo-limoneuse), sa teneur en azote total ($3,2 \text{ g kg}^{-1}$ vs. $0,7 \text{ g kg}^{-1}$) et son humidité relative au cours de l'été ($>40\%$ vs. $<20\%$) (Figure 17). Le site de Échigey présentait des conditions plus favorables à la croissance que celui de Saint-Cyr-en-Val, il fut donc considéré comme site de référence. À l'échelle de la plante entière, **des conditions moins favorables à la croissance impliquaient une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et favorisaient l'expression de sa variabilité génétique** (Figure 19A ; Toillon *et al.* 2013a) ; **en revanche, elles impliquaient une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'azote et réduisaient l'expression de sa variabilité génétique.** À l'échelle de la feuille, des conditions moins favorables à la croissance se traduisaient par une moindre teneur en azote par unité de masse des feuilles, mais par des feuilles plus denses et/ou épaisses, ce qui fait que les teneurs exprimées par unité de surface étaient relativement constantes entre sites.

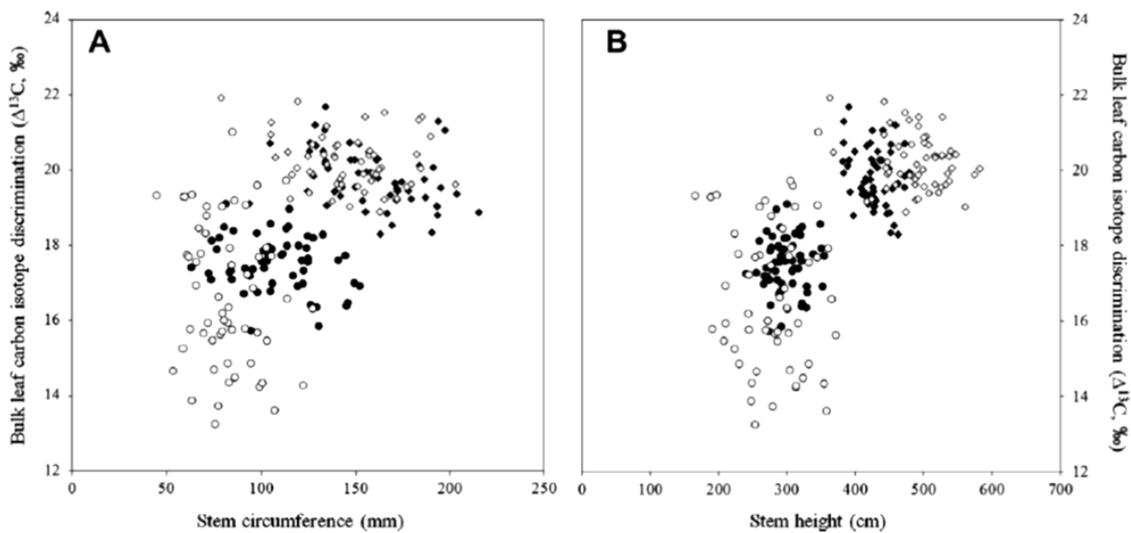


Figure 19A. Relations entre la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13 et la circonférence de la tige (A) ou la hauteur de la tige (B), en TCR (symboles noirs) et en TTCR (symboles blancs) à Échigey (losanges) et à Saint-Cyr-en-Val (cercles) pour les 56 géotypes de peuplier. Les points représentent la moyenne de 5 répétitions par géotype.

Extrait de Toillon *et al.* 2013a – Forest Ecology and Management

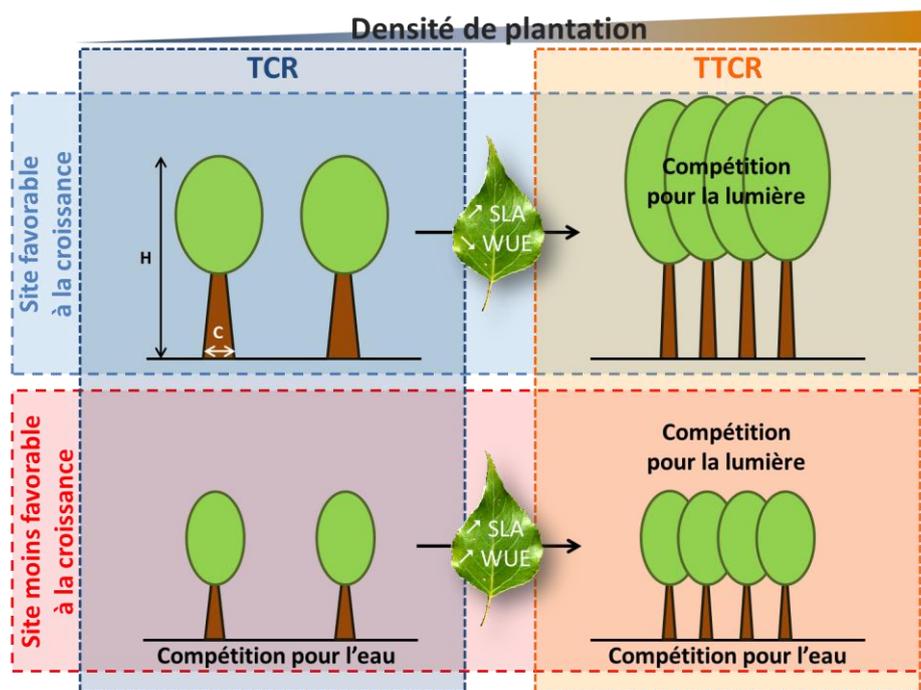


Figure 19B. *En bref* : L'effet de la densité de plantation sur la croissance et sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE, définie au niveau intrinsèque comme le rapport entre assimilation photosynthétique et conductance stomatique) est modulé par le contexte pédoclimatique. Lorsque les conditions sont favorables à la croissance, une augmentation de la densité entraîne une compétition accrue pour la lumière et par conséquent des arbres plus grands, de moindre diamètre, et une efficacité d'utilisation de l'eau réduite (diminution d'assimilation photosynthétique en raison de l'ombrage). Lorsque les conditions sont moins favorables à la croissance en termes de fertilité et d'alimentation en eau, une augmentation de la densité occasionne une compétition accrue pour l'eau et la lumière, source d'une réduction de la croissance secondaire (diamètre) mais pas primaire (hauteur), et d'une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau (réduction de la conductance stomatique pour limiter les pertes en eau).

Extrait de la thèse de doctorat de Julien Toillon - 2009–2013 / Extrait de Bastien *et al.* 2015 - Revue Forestière Française

Les résultats relatifs au deuxième objectif (*évaluer comment la physiologie de la plante est affectée par la densité de plantation*) ne concernaient que le peuplier car les saules ne sont plantés qu'en TTCR. L'effet d'une augmentation de densité de plantation sur la physiologie de la plante était modulé par les conditions pédoclimatiques (Figure 19 ; [Toillon et al. 2013a](#)). Ce résultat majeur et original permet maintenant d'éclaircir les apparentes contradictions observées dans la littérature au sujet des effets de la densité de plantation. **Lorsque les conditions sont favorables à la croissance**, une augmentation de densité de plantation se traduisait par une augmentation de la hauteur des plantes et par une diminution de leur circonférence ; ces variations de phénotype sont classiquement observées en réponse à une compétition accentuée vis-à-vis de la lumière. De plus, **une augmentation de densité de plantation impliquait une diminution de l'efficacité d'utilisation de l'eau due à un effet d'ombrage accentué et de fait, à une diminution de l'assimilation nette de CO₂**. À l'échelle de la feuille, une augmentation de densité de plantation entraînait une diminution de densité et/ou d'épaisseur des feuilles, mais les teneurs en azote par unité de masse augmentaient ce qui fait que les teneurs en azote par unité de surface étaient constantes quelle que soit la densité de plantation. **Lorsque les conditions pédoclimatiques étaient moins favorables à la croissance, une augmentation de densité de plantation se traduisait** simplement par une diminution de la circonférence des plantes et **par une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Ces variations de phénotype s'expliquent cette fois par une compétition accentuée vis-à-vis de la ressource en eau.** À l'échelle de la feuille, une augmentation de densité de plantation impliquait cette fois une diminution des teneurs en azote par unité de surface.

Les résultats relatifs au troisième objectif (*juger des relations entre la productivité, NUE et WUE*) concernaient peuplier et saule. Quel que soit le genre étudié, **une relation positive entre production de biomasse et efficacité d'utilisation de l'eau était détectée uniquement lorsque les conditions de croissance étaient telles qu'elles minimisaient toute source de compétition, que ce soit pour la lumière, l'eau ou les nutriments** (Figure 20 ; [Toillon et al. 2013b](#)). Cette relation pourrait avoir un réel sens physiologique : les génotypes les plus productifs devant alimenter en eau une surface foliaire plus importante, ils compenseraient cette forte demande en réduisant les pertes en eau par unité de surface et donc en augmentant leur efficacité d'utilisation de l'eau via des conductances stomatiques plus faibles. Toutefois, la relation positive observée entre efficacité d'utilisation de l'eau et production de biomasse peut également suggérer que la variabilité génétique observée pour l'efficacité d'utilisation de l'eau est contrôlée par l'assimilation nette de CO₂ ; cette hypothèse est d'ailleurs renforcée par la relation positive observée entre efficacité d'utilisation de l'eau et teneur en azote par unité de masse ou de surface (Farquhar *et al.* 1989, Brugnoli & Farquhar 2000). Les mesures d'échanges de gaz réalisées sur saule montraient cependant une relation négative entre efficacité d'utilisation de l'eau et assimilation nette de CO₂ et une relation négative entre efficacité d'utilisation de l'eau et conductance stomatique, ce qui démontre que la variabilité génétique de l'efficacité d'utilisation de l'eau observée chez les salicacées est liée à une variabilité génétique pour la conductance stomatique. C'est donc l'hypothèse selon laquelle les génotypes les plus productifs compenseraient leur forte demande en eau en limitant leur transpiration via des conductances stomatiques plus faibles qui semble se vérifier dans ce cas d'étude.

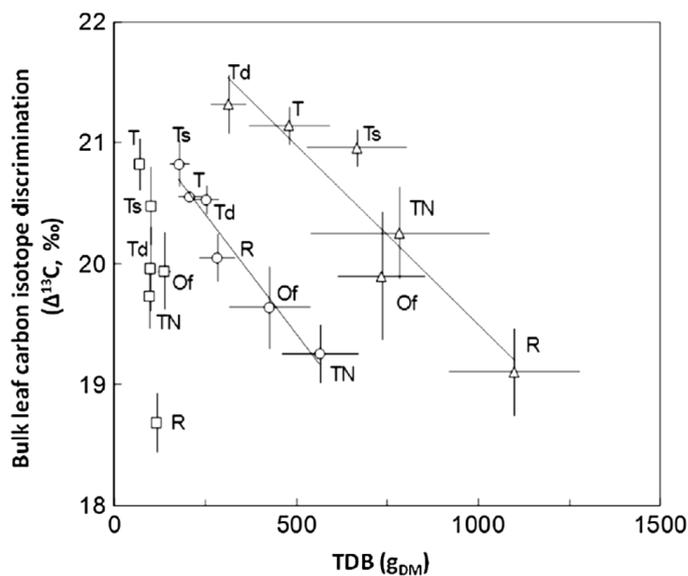


Figure 20. Relations entre la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone ($\Delta^{13}\text{C}$) et la biomasse sèche ligneuse aérienne des plants (total dry biomass, TDB) à Guéméné-Penfao (carrés), Brinon-sur-Sauldre (cercles) et Échigey (triangles). Chaque point représente la moyenne génotypique (\pm erreur standard) ($n = 10$ individus par génotypes). Abréviations des noms des génotypes : Of ('Olof'), R ('Resolution'), TN ('Terra_Nova'), T ('Tora'), Ts ('Tordis') et Td ('Torhild').

En bref : Une relation positive entre la productivité et l'efficacité d'utilisation de l'eau (négative avec $\Delta^{13}\text{C}$) était détectée uniquement lorsque les conditions étaient suffisamment favorables pour permettre l'expression de la variabilité des deux caractères.

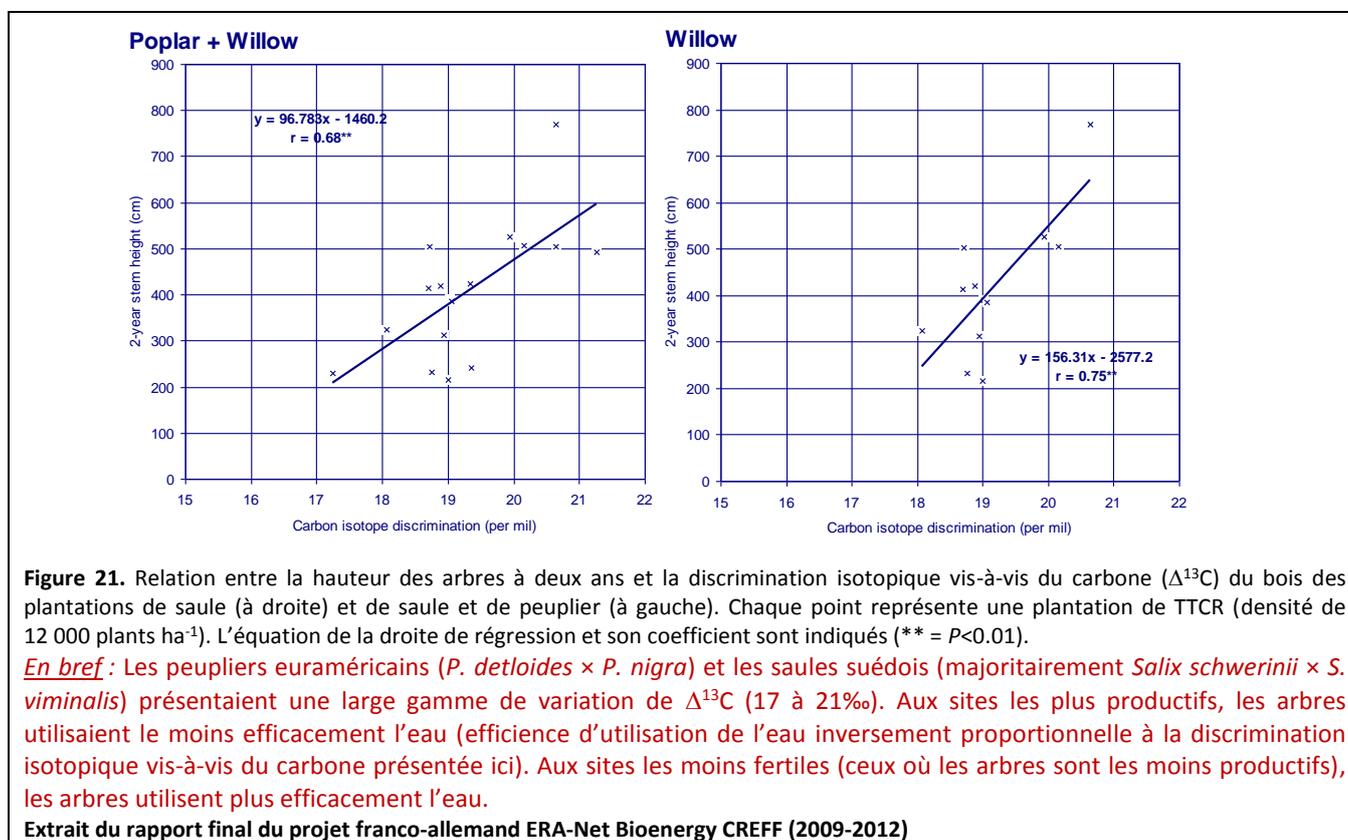
Extrait de Toillon *et al.* 2013b – Biomass and Bioenergy

Les réponses apportées aux trois objectifs physiologiques ont des conséquences appliquées dans le domaine de la sélection. Encore une fois, **aucun antagonisme** (relation positive ou pas de relation mise en évidence) **n'a pu être détecté entre production de biomasse et efficacités d'utilisation de l'eau ou de l'azote**, ce qui suggère la possibilité de sélectionner des génotypes efficaces sans diminuer la production de biomasse. Bien que des interactions génotypes \times sites ou génotypes \times densités de plantation aient été détectées, le classement des génotypes était globalement conservé, surtout entre densités de plantation. Ces résultats suggèrent donc que **la sélection du matériel végétal pour ces caractères (production de biomasse, efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote) peut être effectuée indépendamment de la densité de plantation ; en revanche, la sélection devra tenir compte du contexte pédoclimatique.**

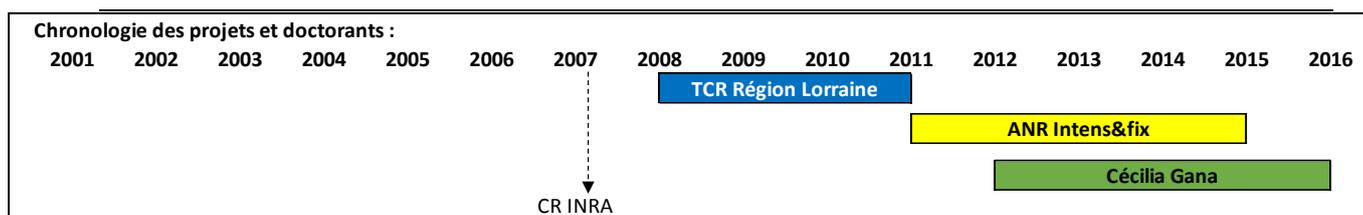
À un niveau encore plus appliqué, et sur la base de l'étude des effets des modalités de gestion des plantations sur la production de biomasse, WUE et NUE, le projet franco-allemand CREFF financé par l'ADEME a permis de définir des directives et des consignes pour l'installation et la gestion de TCR/TTCR à destination des utilisateurs, agriculteurs et forestiers (téléchargeables sur le site du projet : http://www.creff.eu/creff_eng/project_outputs/reports_guides_and_recommandations_from_creff).

L'analyse des caractéristiques de la vingtaine de plantations échantillonnées dans le cadre du projet dans le nord de la France (majoritairement des TTCR de saule établis par des agriculteurs) a permis de mettre en évidence que le rendement est faiblement lié au contexte pédoclimatique lors de la première rotation. En conséquence, lors de ces stades précoces, la façon dont la plantation est gérée (probablement en premier lieu le contrôle des adventices) et les caractéristiques du matériel végétal sont d'une importance primordiale pour

définir le rendement. Plus précisément, diverses recommandations pratiques ont pu être formulées quant à la conduite de la plantation. De fortes **densités de plantations** peuvent être privilégiées, car la compétition entre les arbres n'est pas effective lorsque les rotations sont très courtes, au moins les premières années. Sur des sites pauvres en nutriments, l'**épandage** d'eaux d'épuration s'est révélé plus efficace en tant que fertilisant qu'une fertilisation chimique ou encore qu'un épandage de boues d'épuration. Le **recépage** des plants la première année s'est montré efficace pour stimuler la repousse des plants l'année suivante. Par contre, la saison durant laquelle la **récolte** est effectuée (automne, sans feuilles, ou printemps, avec feuilles) n'a pas vraiment d'impact sur la repousse des arbres les années suivantes. Les effets de l'exportation du feuillage sur la fertilité du sol sont sans doute observables à beaucoup plus long terme. En termes de **matériel végétal**, le robinier a révélé un potentiel très prometteur dans des conditions limitantes en eau en alliant une productivité et une efficacité d'utilisation de l'eau supérieures à celles du peuplier et du saule. Les mélanges d'espèces et de variétés au sein de chaque espèce sont également à privilégier, d'une part, pour limiter les problèmes phytosanitaires et d'autre part, parce que la compétition intra-spécifique ou intra-génotype est plus susceptible d'avoir un effet néfaste sur les rendements que la compétition interspécifique ou inter-génotypes. Fait intéressant, les sites les plus productifs sont ceux auxquels les arbres sont les moins efficaces pour utiliser l'eau (Figure 21). En conséquence, **aux sites les moins fertiles (les moins productifs), les arbres utilisent plus efficacement l'eau (plus de biomasse produite par unité d'eau consommée)**. Ce comportement en réponse à la contrainte est couramment observé, notamment dans le cadre de la thèse de Julien Toillon, l'originalité étant ici la large gamme de sites échantillonnés.



6.5.2. Allocation et dynamique du carbone et de l'azote en plantation mélangée peuplier / robinier



Peuplier ; Robinier ; Taillis à courte rotation ; Fixation symbiotique de l'azote ; Dynamique et allocation du carbone ; Croissance ; Productivité

Le volet « *fonctionnement* » a été développé dans le cadre du projet **ANR Systerra Intens&Fix** (2011-2014) et de la **thèse de Cécilia Gana** (2012-2016) sur le site atelier de Saint-Cyr-en-Val (Loiret). La plantation de peupliers et robiniers (monocultures et mélange) en TCR de Saint-Cyr-en-Val a été mise en place en mars 2011 suite à l'abandon de la plantation établie à Moyenvic (Moselle) en 2010 (**projet émergent Région Lorraine**, 2008-2011). Le site atelier instrumenté (0,7 ha), dont j'étais le responsable scientifique, faisait partie du SOERE F-ORE-T (2011-2015) qui participait au financement de son fonctionnement. Le dispositif atelier a été abandonné fin 2015 en raison d'une mortalité très importante des robiniers et des contraintes logistiques liées à son éloignement de Nancy.

6.5.2.1. État de l'Art et enjeux

Le mélange d'espèces fixatrice / non fixatrice d'azote fait déjà l'objet de nombreuses recherches dans l'hémisphère sud (Forrester *et al.* 2006a, Epron *et al.* 2013). Il s'agit le plus souvent de l'association de l'eucalyptus avec diverses espèces d'acacia, mais également avec d'autres espèces fixatrices d'azote telles que *Falcataria moluccana* (Falcataire des Moluques), *Leucaena leucocephala* (Faux mimosa) ou *Casuarina equisetifolia* (Filao) (Tableau 2). En milieu tempéré, l'association de deux espèces ligneuses (telles que peuplier/robinier ou peuplier/aulne) a peu été décrite. Quelques études ont néanmoins été menées dans les années 80 sur l'effet de l'insertion de plants d'aulne en mélange avec diverses espèces ligneuses. Des effets bénéfiques d'une plantation intercalaire d'aulne sur la croissance de frênes, liquidambars, tulipiers, épicéas, pins et douglas ont été observés (Tarrant & Trappe 1971, Le Tacon *et al.* 1988). Par contre, l'effet fertilisant du mélange de l'aulne avec une espèce à croissance rapide telle que le peuplier était moins évident : soit aucun effet de la fixation de N₂ par l'aulne sur la croissance du peuplier n'était visible à trois ans (Teissier du Cros *et al.* 1984), soit l'aulne était rapidement éliminé par le peuplier (Le Tacon, résultats non publiés). Les études présentées dans le Tableau 2 se sont intéressées à l'effet de mélanges d'espèces ligneuses fixatrices / non fixatrices d'azote diverses et variées sur la productivité du mélange par rapport aux monocultures, en milieu tempéré et tropical. **Les performances des mélanges par rapport aux monocultures variaient drastiquement entre les études**, (1) sans qu'une proportion idéale fixatrice / non fixatrice dans le mélange ne puisse être définie, (2) sans qu'un âge de maturité du mélange optimal ne soit observé et (3) sans qu'un couple d'espèces ne sorte du lot quant à ses performances. Par exemple, dans l'étude de Binkley (1983), le mélange de

l'aulne rouge avec le Douglas à 23 ans pouvait se montrer deux fois plus productif que la monoculture sur un site pauvre en azote ou présenter une productivité 15% inférieure à la monoculture sur un site où l'azote n'était pas limitant (Tableau 2), soulignant la forte dépendance des résultats aux conditions des sites où sont menées les expérimentations.

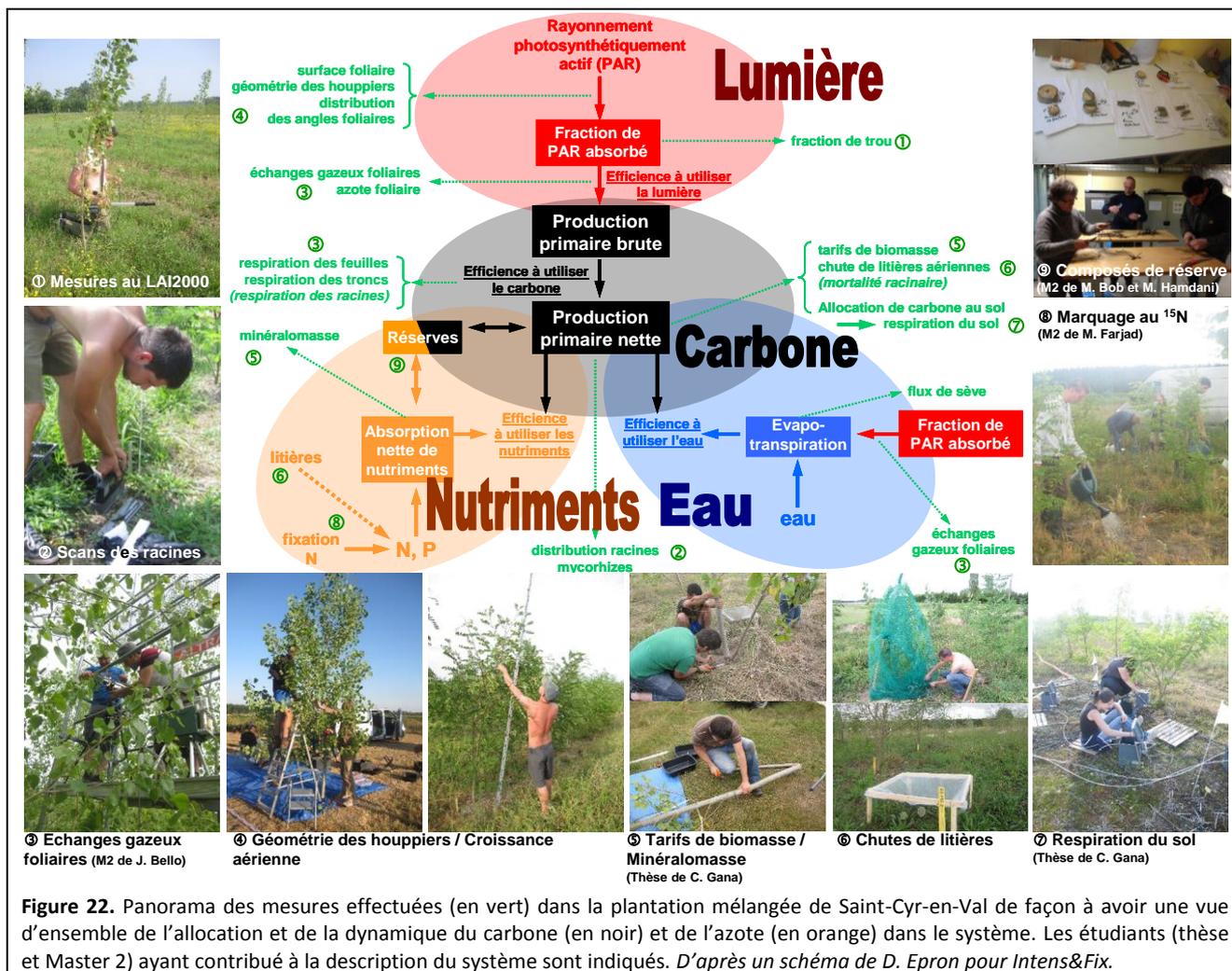
Outre le besoin d'étoffer nos connaissances de ces mélanges de fixateurs / non fixateurs d'azote sous climat tempéré, **une description fine des processus écophysologiques d'interactions mis en place dans le mélange et concourant à définir la production des plantations mixtes est nécessaire. Il s'agit de réussir à faire pencher la balance vers une prépondérance des interactions positives (facilitation, réduction de compétition par rapport aux monocultures) par rapport aux négatives (compétition accrue) et par conséquent, une production augmentée en mélange.**

Tableau 2. Effets du mélange d'espèces fixatrices et non fixatrices d'azote observés dans la littérature sur la production de biomasse ligneuse aérienne. La proportion des deux espèces dans le mélange, l'âge des arbres et le lieu sont indiqués. Les effets ont été calculés en comparant la production du mélange à celle de la monoculture la plus productive (indiquée en gras, sauf lorsque les données d'une des deux monocultures n'étaient pas présentées). Les histogrammes représentent le pourcentage de production de biomasse aérienne ligneuse par rapport à la monoculture la plus productive : <-50%, -50→-25%, -25→0%, 0→+25%, +25→+50%, +50→+75%, >+75%.

Espèce fixatrice	Espèce non fixatrice	Proportion	Âge	Autre facteur étudié	Localisation	Effet du mélange	Référence	Pourcentage du mélange par rapport à la monoculture la plus performante
<i>Acacia mangium</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>grandis</i>	(50/50)	7 ans		Congo	37%	Epron et al. 2013	37%
<i>A. mangium</i>	<i>E. grandis</i>	(50/50)	6 ans		Brésil	-28%	Epron et al. 2013	-28%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50/50)	3 ans		Australie	-8%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	-8%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50/50)	4 ans		Australie	-2%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	-2%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50/50)	5 ans		Australie	0%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	0%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50/50)	6 ans		Australie	9%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	9%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50/50)	9 ans		Australie	17%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	17%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50/50)	11 ans		Australie	30%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	30%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(25:75)	11 ans		Australie	13%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	13%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(75:25)	11 ans		Australie	25%	Khanna 1997, Bauhus et al. 2000, Forrester et al. 2004	25%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50/50)	9,5 ans		Australie	19%	Bauhus et al. 2004	19%
<i>Casuarina equisetifolia</i>	<i>Eucalyptus</i> × <i>robusta</i>	(50/50)	4 ans		Puerto Rico	-8%	Parrotta et al. 1996, Parrotta 1999	-8%
<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>E. × robusta</i>	(50/50)	4 ans		Puerto Rico	40%	Parrotta et al. 1996, Parrotta 1999	40%
<i>Albizia falcataria</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	(66:34)	6 ans		Etats-Unis	17%	DeBell et al. 1989, 1997, Binkley et al. 1992, 2003	17%
<i>A. falcataria</i>	<i>E. saligna</i>	(50:50)	6 ans		Etats-Unis	9%	DeBell et al. 1989, 1997, Binkley et al. 1992, 2004	9%
<i>A. falcataria</i>	<i>E. saligna</i>	(34:66)	6 ans		Etats-Unis	0%	DeBell et al. 1989, 1997, Binkley et al. 1992, 2005	0%
<i>A. falcataria</i>	<i>E. saligna</i>	(25:75)	6 ans		Etats-Unis	-13%	DeBell et al. 1989, 1997, Binkley et al. 1992, 2006	-13%
<i>A. falcataria</i>	<i>E. saligna</i>	(11:89)	6 ans		Etats-Unis	-19%	DeBell et al. 1989, 1997, Binkley et al. 1992, 2007	-19%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50:50)	10 ans	818 arbres/ha	Inde	41%	Samraj et al. 1977	41%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	10 ans	750 arbres/ha	Inde	53%	Samraj et al. 1977	53%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	10 ans	692 arbres/ha	Inde	71%	Samraj et al. 1977	71%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	10 ans	600 arbres/ha	Inde	32%	Samraj et al. 1977	32%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50:50)	5 ans		Australie	-18%	Forrester 2004	-18%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. nitens</i>	(50:50)	2 ans		Australie	-38%	Forrester 2004	-38%
<i>Acacia auriculiformis</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	(25:75)	8 ans		Thaïlande	-33%	Wichienopparat et al. 1998, Snowdon et al. 2003	-33%
<i>A. auriculiformis</i>	<i>E. camaldulensis</i>	(50:50)	8 ans		Thaïlande	-10%	Wichienopparat et al. 1998, Snowdon et al. 2003	-10%
<i>A. auriculiformis</i>	<i>E. camaldulensis</i>	(75:25)	8 ans		Thaïlande	-5%	Wichienopparat et al. 1998, Snowdon et al. 2003	-5%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	(50:50)	4 ans		Brésil	1%	Vezzani et al. 2001	1%
<i>Falcataria moluccana</i>	<i>Eucalyptus saligna</i> / <i>E. grandis</i>	(50:50)	5,5 ans		Hawaii, USA	153%	DeBell et al. 1985	153%
<i>Acacia melanoxylon</i>	<i>E. saligna</i> / <i>E. grandis</i>	(50:50)	5,5 ans		Hawaii, USA	37%	DeBell et al. 1985	37%
<i>Leucaena leucocephala</i> × <i>L. diversifolia</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	(50:50)	4 ans		Hawaii, USA	-15%	Austin et al. 1997	-15%
<i>Falcataria moluccana</i>	<i>E. grandis</i>	(50:50)	4 ans		Hawaii, USA	-2%	Austin et al. 1997	-2%
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	<i>E. grandis</i>	(50:50)	4 ans		Hawaii, USA	30%	Austin et al. 1997	30%
<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	(50:50)	7 ans	Variété 1 L. l.	Brésil	-6%	Moraes de Jesus & Brouard 1989	-6%
<i>L. leucocephala</i>	<i>E. urophylla</i>	(50:50)	7 ans	Variété 2 L. l.	Brésil	-3%	Moraes de Jesus & Brouard 1989	-3%
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	(50:50)	7 ans	Non désherbé	Afrique du Sud	3%	Little et al. 2002	3%
<i>V. unguiculata</i>	<i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	(50:50)	7 ans	Désherbé	Afrique du Sud	-4%	Little et al. 2002	-4%
<i>V. unguiculata</i>	<i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	(66:34)	7 ans	Non désherbé	Afrique du Sud	9%	Little et al. 2002	9%
<i>V. unguiculata</i>	<i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i>	(66:34)	7 ans	Désherbé	Afrique du Sud	-8%	Little et al. 2002	-8%
<i>Acacia crassicaarpa</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	(50:50)	6 ans	Alternances de lignes	Chine	8%	Zhang 2003	8%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(34:66)	6 ans	Alternances de lignes	Chine	-10%	Zhang 2003	-10%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(25:75)	6 ans	Alternances de lignes	Chine	-9%	Zhang 2003	-9%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(40:60)	6 ans	Alternances de lignes	Chine	-8%	Zhang 2003	-8%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(50:50)	6 ans	Mélange pied à pied	Chine	4%	Zhang 2003	4%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(34:66)	6 ans	Mélange pied à pied	Chine	-1%	Zhang 2003	-1%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(25:75)	6 ans	Mélange pied à pied	Chine	3%	Zhang 2003	3%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(40:60)	6 ans	Mélange pied à pied	Chine	9%	Zhang 2003	9%
<i>Acacia crassicaarpa</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	(32:68)	6 ans		Chine	36%	Xiao et al. 1999a, b	36%
<i>A. crassicaarpa</i>	<i>E. urophylla</i>	(43:57)	6 ans		Chine	2%	Xiao et al. 1999a, b	2%
<i>Acacia peregriana</i>	<i>Eucalyptus pellita</i>	(16:84)	10 ans		Australie	-1%	Bristow et al. 2006	-1%
<i>A. peregriana</i>	<i>E. pellita</i>	(59:41)	10 ans		Australie	-40%	Bristow et al. 2006	-40%
<i>A. peregriana</i>	<i>E. pellita</i>	(63:37)	10 ans		Australie	-48%	Bristow et al. 2006	-48%
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50:50)	1,5 an		En pots	13%	Baker et al. 1994	13%
<i>Acacia melanoxylon</i>	<i>Eucalyptus regnans</i>	(17:83)	0,5 an		En pots	-14%	Bi & Turvey 1994	-14%
<i>A. melanoxylon</i>	<i>E. regnans</i>	(33:67)	0,5 an		En pots	-28%	Bi & Turvey 1994	-28%
<i>A. melanoxylon</i>	<i>E. regnans</i>	(50:50)	0,5 an		En pots	12%	Bi & Turvey 1994	12%
<i>A. melanoxylon</i>	<i>E. regnans</i>	(67:33)	0,5 an		En pots	-16%	Bi & Turvey 1994	-16%
<i>A. melanoxylon</i>	<i>E. regnans</i>	(83:17)	0,5 an		En pots	-30%	Bi & Turvey 1994	-30%
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	(50:50)	1 an	N faible	En pots	32%	Forrester et al. 2006b	32%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	1 an	N élevé	En pots	-10%	Forrester et al. 2006b	-10%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	1 an	P faible	En pots	0%	Forrester et al. 2006b	0%
<i>A. mearnsii</i>	<i>E. globulus</i>	(50:50)	1 an	P élevé	En pots	4%	Forrester et al. 2006b	4%
<i>Caragana arborescens</i>	<i>Salix miyabeana</i>	(50:50)	4 ans		Canada (Harris)	-30%	Moukoui et al. 2012	-30%
<i>C. arborescens</i>	<i>S. miyabeana</i>	(34:66)	4 ans		Canada (Harris)	-35%	Moukoui et al. 2012	-35%
<i>C. arborescens</i>	<i>S. miyabeana</i>	(50:50)	4 ans		(Saskatoon 1)	-17%	Moukoui et al. 2012	-17%
<i>C. arborescens</i>	<i>S. miyabeana</i>	(34:66)	4 ans		(Saskatoon 1)	0%	Moukoui et al. 2012	0%
<i>C. arborescens</i>	<i>S. miyabeana</i>	(50:50)	4 ans		(Saskatoon 2)	-27%	Moukoui et al. 2012	-27%
<i>C. arborescens</i>	<i>S. miyabeana</i>	(34:66)	4 ans		(Saskatoon 2)	-57%	Moukoui et al. 2012	-57%
<i>Alnus rubra</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	23 ans	N limitant		USA (Mt. Benson)	97%	Binkley 1983	97%
<i>A. rubra</i>	<i>P. menziesii</i>	23 ans	N non limitant		USA (Skykomish)	-15%	Binkley 1983	-15%
<i>Alnus rubra</i>	<i>Populus trichocarpa</i>	(50:50)	2 ans		Etats-Unis	55%	DeBell & Radwan 1979	55%
<i>Alnus sp.</i>	<i>Populus trichocarpa</i> × <i>deltoides</i>	(50:50)	3 ans		France	-25%	Teissier du Cros et al. 1984	-25%
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Populus deltoides</i>	(70:30)	13 ans		Iran	-43%	Koupar et al. 2011	-43%
<i>A. glutinosa</i>	<i>P. deltoides</i>	(50:50)	13 ans		Iran	-9%	Koupar et al. 2011	-9%
<i>A. glutinosa</i>	<i>P. deltoides</i>	(30:70)	13 ans		Iran	-13%	Koupar et al. 2011	-13%

6.5.2.2. Résultats marquants

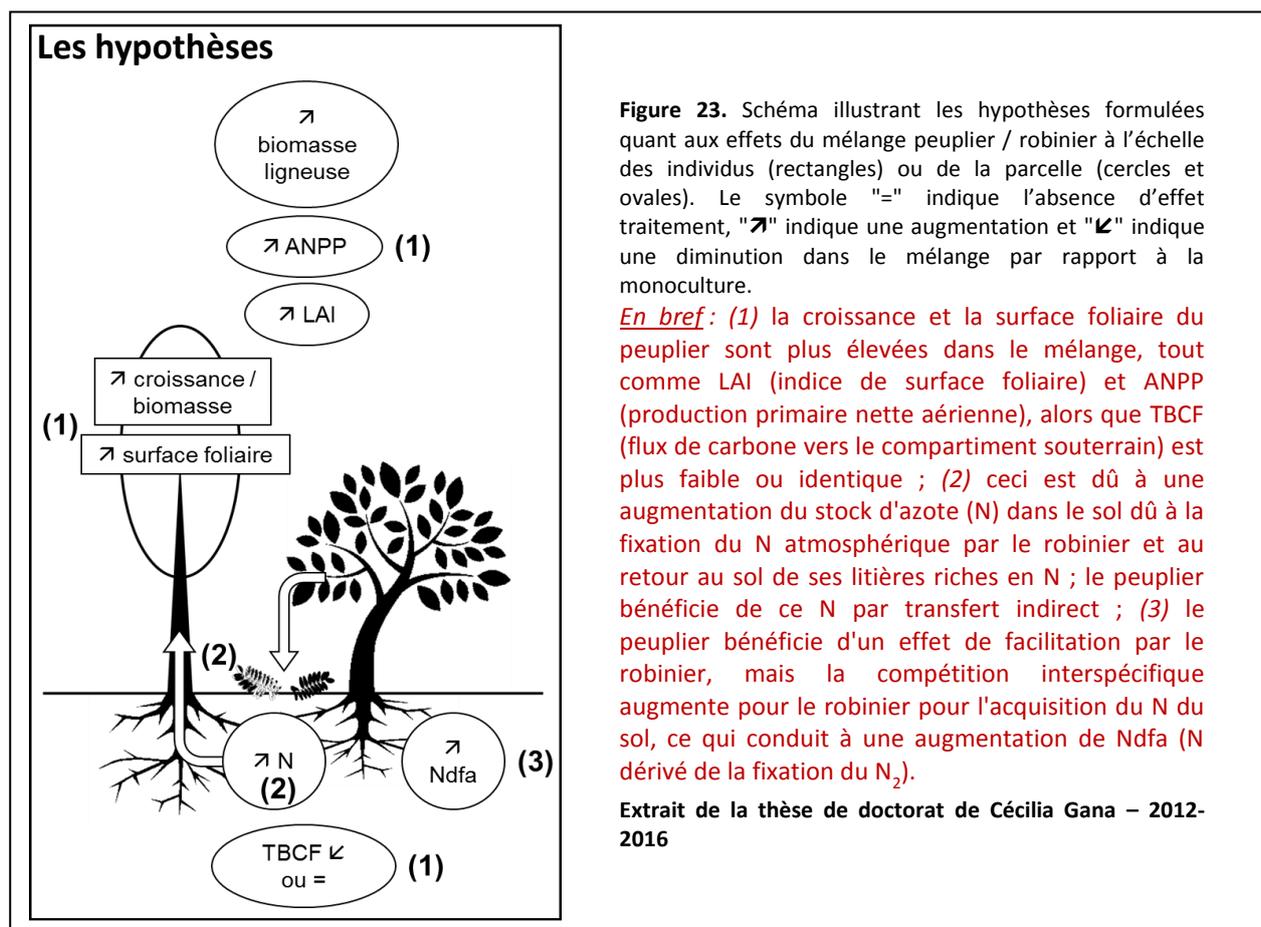
Dans le cadre du projet ANR Intens&Fix et de la thèse de Cécilia Gana, l'étude de l'allocation et de la dynamique du carbone et de l'azote au sein de la plantation mélangée de peuplier et de robinier de Saint-Cyr-en-Val a été entreprise en collaboration avec les membres de l'Unité EEF (Figure 22).



L'objectif de ces travaux était d'évaluer l'impact du mélange peuplier / robinier sur l'acquisition et l'allocation de carbone et de l'azote dans la plantation. Les hypothèses initiales étaient les suivantes (Figure 23) :

- (1) La présence du robinier améliore la croissance et la production de biomasse des peupliers, ainsi que leur surface foliaire. L'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI) est donc plus élevé ce qui permet une assimilation du carbone plus importante, et donc une augmentation de la production primaire nette aérienne (Aboveground Net Primary Production, ANPP) et de la production de biomasse ligneuse. Au contraire, le flux de carbone vers le compartiment souterrain (Total Belowground Carbon Flux, TBCF) diminue ou reste inchangé du fait de l'amélioration de la fertilité.

- (2) Ceci est dû à une augmentation du stock d'azote dans le milieu résultant de la fixation d'azote par rhizobium associé au robinier et au retour au sol des litières de robinier riches en azote, dont le peuplier bénéficie par transfert indirect.
- (3) La compétition interspécifique est moins intense pour le peuplier que la compétition intra-spécifique car il bénéficie de la facilitation par le robinier, mais elle augmente pour le robinier pour l'acquisition de l'azote du sol, ce qui conduit à une augmentation de la fixation d'azote atmosphérique dans le mélange (Gana 2014).



Les quantités d'azote atmosphérique fixé symbiotiquement par le robinier ont été estimées par l'intermédiaire des teneurs en azote ¹⁵N en abondance naturelle dans l'arbre ou enrichies à l'aide d'un marquage isotopique (Peoples *et al.* 1989). La méthode repose sur les différences de composition en ¹⁵N du sol et de l'atmosphère, l'azote du robinier provenant de ces deux sources alors que celui du peuplier provient exclusivement du sol. La différence de composition en ¹⁵N entre sol et atmosphère est accentuée à l'aide du marquage. À deux ans, les teneurs en azote provenant de l'atmosphère représentaient jusqu'à près de 80% de l'azote total des robiniers (Tableau 3). Elles allaient en déclinant tout au long de l'expérience. Les contradictions observées entre les résultats obtenus à trois ans et demi à l'aide des deux méthodes reflètent le mauvais état des robiniers sur la plantation dont les nodules souffraient probablement de l'ennoyage à répétition. Aucun transfert significatif d'azote fixé symbiotiquement par le robinier vers le peuplier n'a pu

être mis en évidence. Le déclin de la plantation au cours du temps était également visible sur la croissance et la production de biomasse du système.

Tableau 3. Pourcentage d'azote dérivé de la fixation du N₂ (% Ndfa) estimé pour les robiniers en monoculture et en mélange par les méthodes d'abondance naturelle et de dilution isotopique (par l'intermédiaire d'un marquage au ¹⁵N) et quantité d'azote fixé dans la biomasse sur pied à 2 (hiver 2013), 2,5 (été 2013) et 3,5 ans (été 2014). Les données à 4,5 ans (été 2015) sont en cours d'analyse. **Extrait de la thèse de doctorat de Cécilia Gana – 2012-2016**

Age de la plantation	Dilution isotopique				Abondance naturelle			
	% Ndfa		Azote fixé dans la biomasse sur pied (kg ha ⁻¹)		% Ndfa		Azote fixé dans la biomasse sur pied (kg ha ⁻¹)	
	Monoculture	Mélange	Monoculture	Mélange	Monoculture	Mélange	Monoculture	Mélange
2 ans	76.3	79.4	23.5	17.7	76.0	77.3	22.0	12.8
2 ans et demi	67.4	64.7	15.6	10.6	-	-	-	-
3 ans et demi	58.6	39.8	26.2	5.8	78.4	90.3	35.8	13.4

En bref : L'azote provenant de la fixation symbiotique représentait jusqu'à presque 80% de l'azote total des robiniers et plus de 20 kg d'azote fixé à l'hectare à deux ans. La fixation diminuait à deux ans et demi ; une diminution de la fixation au cours du temps est un résultat couramment observé. Les données à trois ans et demi sont sans doute biaisées en raison de la mortalité importante observée pour les robiniers.

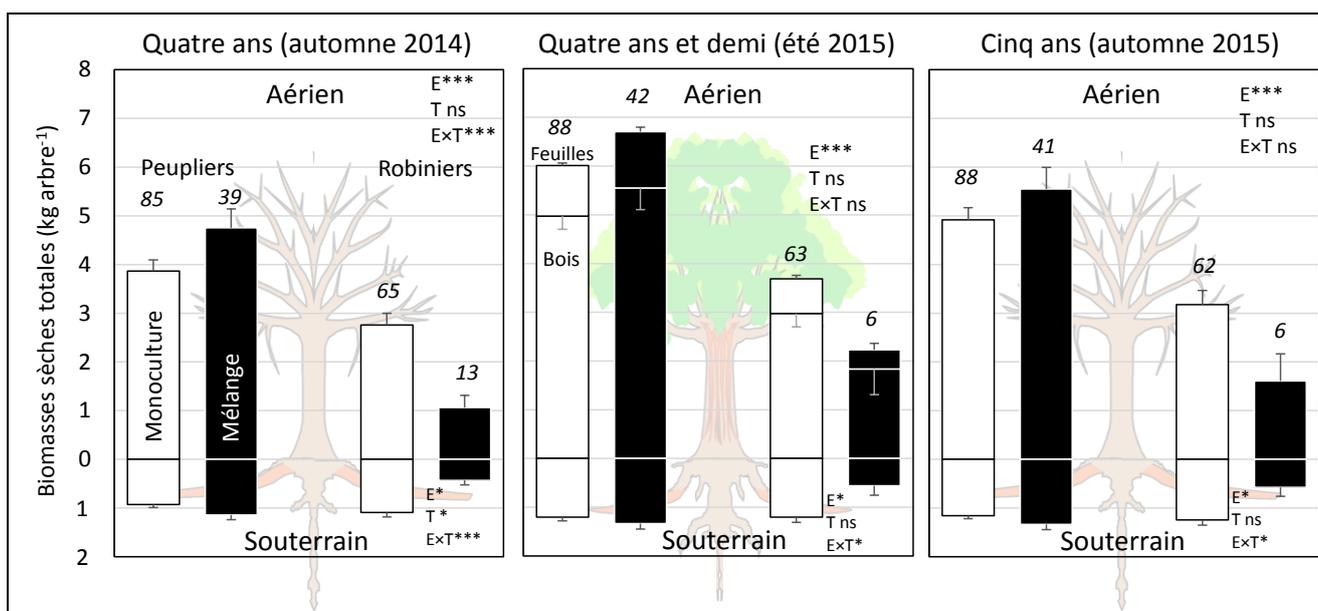


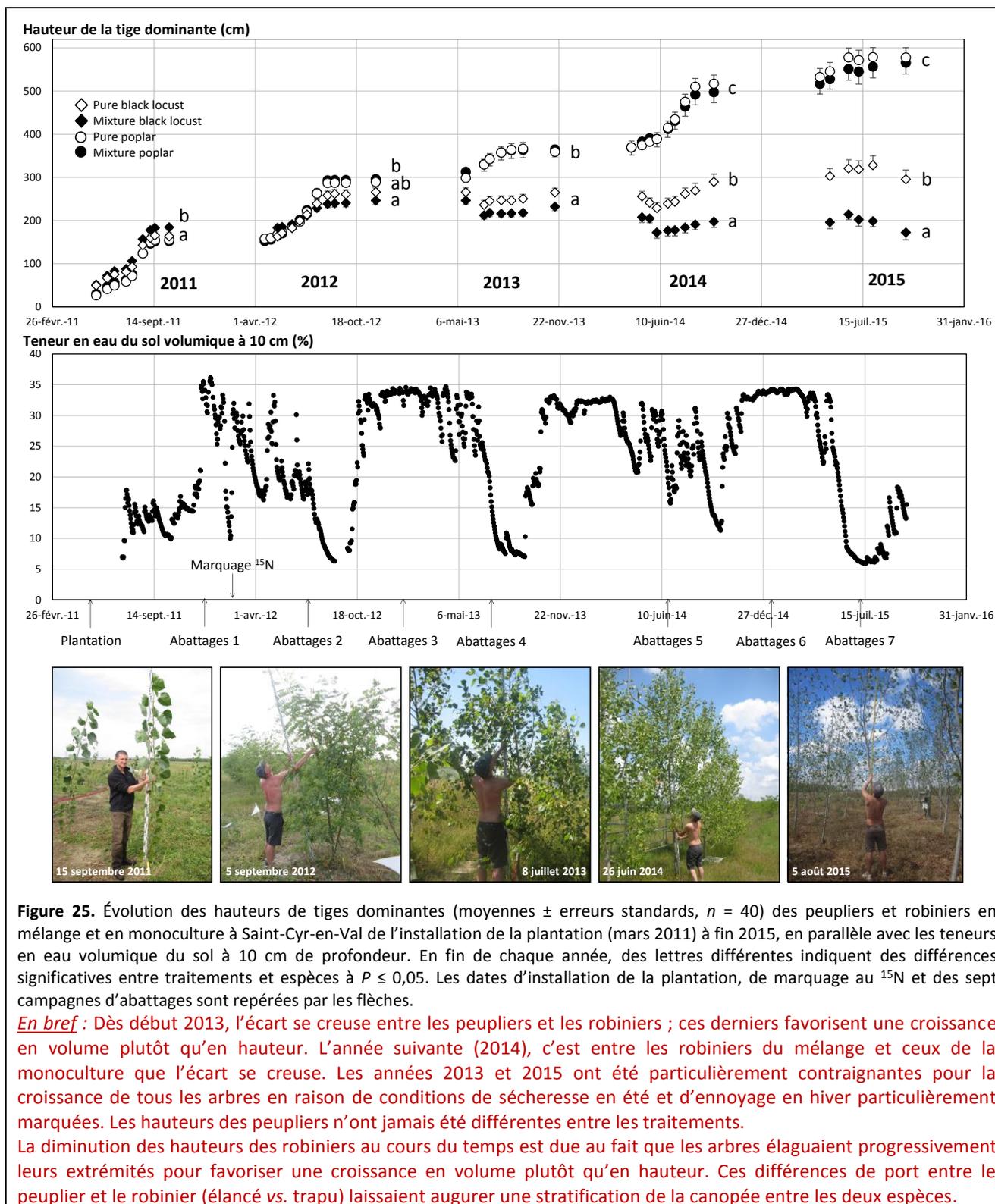
Figure 24. Évolution des biomasses sèches aériennes et souterraines (kg_{MS} arbre⁻¹) des peupliers et robiniers en monocultures et en mélange à Saint-Cyr-en-Val à 4, 4,5 et 5 ans (moyennes ± erreurs standards). Le nombre de répétition est indiqué au-dessus des histogrammes. Pour chaque date et compartiment (aérien / souterrain), la significativité des effets « espèce » (E), « traitement » (T) et leur interaction (ExT) dans l'ANOVA à deux facteurs est indiquée : ***P≤0,001, ns non significatif. À l'été 2015, les biomasses aériennes ligneuses et foliaires sont dissociées (les résultats des statistiques étaient identiques pour les deux compartiments).

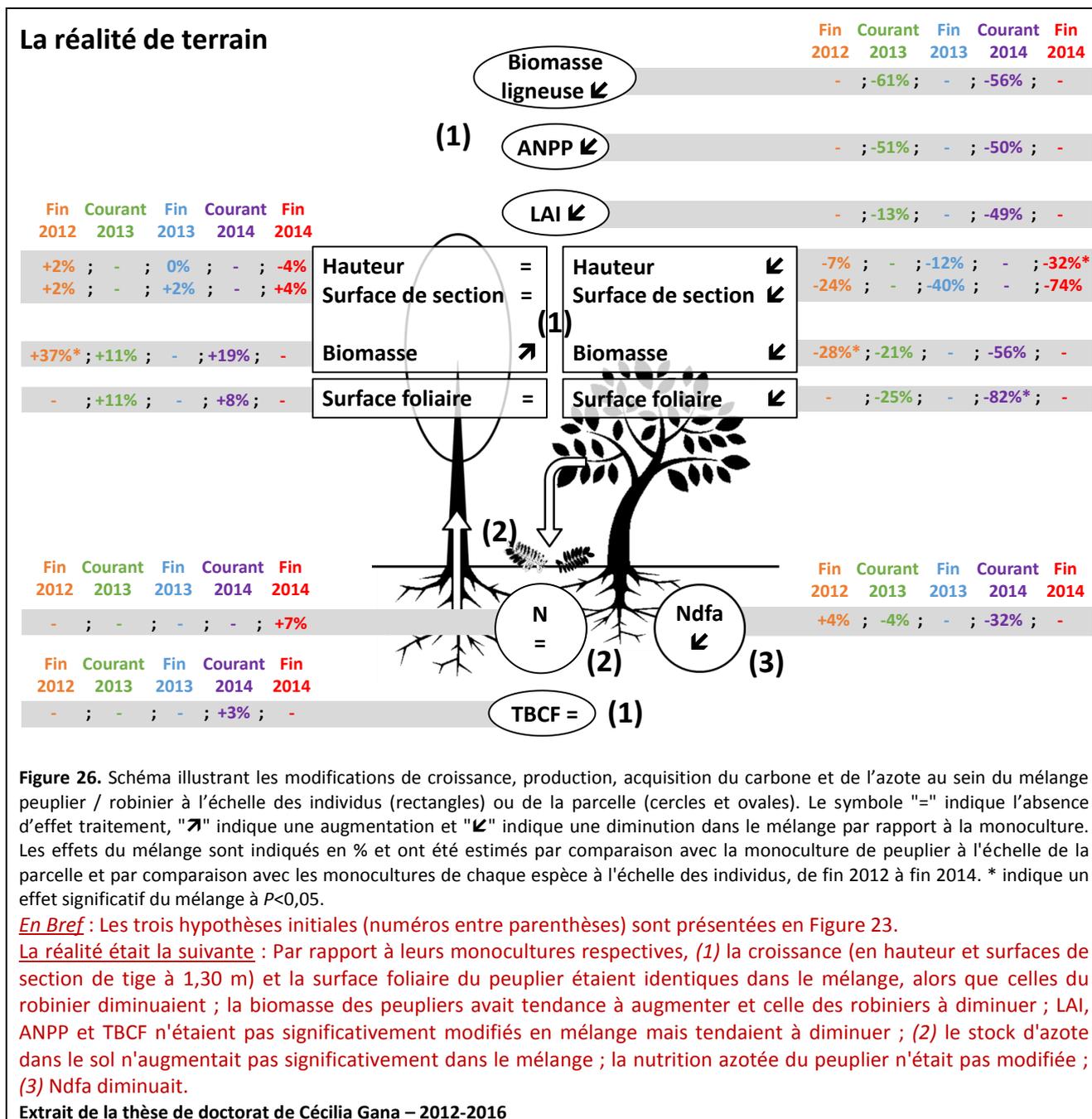
En bref : Bien que l'effet du mélange ne soit quasiment jamais significatif (à l'exception des racines à l'automne 2014), la tendance à des peupliers plus grands et des robiniers plus petits en mélange par rapport à leurs monocultures respectives persiste.

L'effet de facilitation attendu pour le peuplier en mélange avec le robinier n'était pas significatif cinq ans après la mise en place de la plantation (biomasses sèches, Figure 24). Un léger enrichissement en azote et une croissance faiblement stimulée des peupliers en mélange étaient observés au cours des trois premières années. Cet effet était de moins en moins marqué les années suivantes. Par contre,

une intense compétition interspécifique en mélange a drastiquement réduit la survie et la croissance des robiniers (hauteurs de tige, Figure 25). La figure 26 synthétise les principaux effets du mélange aux échelles de l'arbre et du peuplement, entre deux et quatre ans après plantation, période durant laquelle les effets du mélange étaient les plus marqués sur le peuplier (thèse de Cécilia Gana). Bien que très légèrement plus vigoureux en mélange qu'en monoculture, les peupliers sont plantés à une densité deux fois inférieure en mélange ; étant donné la faiblesse du robinier dans cette modalité, **la production de biomasse du mélange à l'hectare était très inférieure à celle des monocultures.**

Il faut noter que ces résultats sont très dépendants des conditions pédoclimatiques du site de Saint-Cyr-en-Val qui ne convenaient à aucune des deux espèces : ennoyage de longue durée en hiver et sécheresses estivales intenses entre 2013 et 2015. Pour ces raisons, le dispositif atelier, qui faisait partie du SOERE (Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement) F-ORE-T (Fonctionnement des écosystèmes forestiers) animé par le GIP Ecofor pendant toute cette période, a été abandonné fin 2015 après cinq années de suivi.





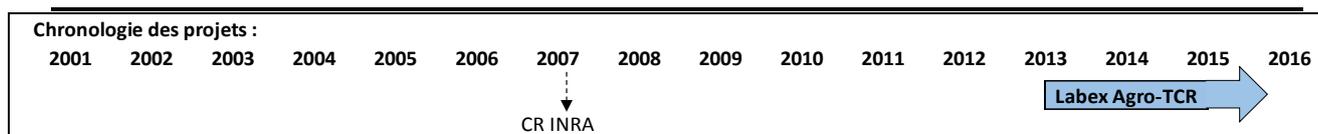
Analyse

Les huit années passées à l'INRA depuis mon recrutement sur le thème de l'écophysiologie et de la conduite des TCR ont vu mûrir mon projet de recherche. Les **années 2008 à 2011** ont été consacrées au montage de toutes pièces de la thématique TCR au sein de l'Unité EEF. Six projets de recherche ont été déposés en 2008 sur le thème des TCR ; trois furent fructueux pour un montant attribué à EEF avoisinant les 500 000€. Malgré ce demi-succès, la mise en place de mon projet s'est faite lentement, notamment en raison du naufrage pur et simple du site atelier TCR/TTTCR installé en 2010 en Moselle (Moyenvic). Le dispositif a en effet subi un certain nombre d'aléas extérieurs entraînant son abandon en 2011. Malgré cela, l'année 2011 a été marquée positivement par le recrutement d'un technicien de recherche essentiellement dévoué à la thématique TCR, et par la mise en place d'un nouveau site atelier TCR en Région Centre (Saint-Cyr-en-Val, Loiret).

En outre, la **période 2011-2013** a vu la signature de mes premières publications en tant que dernier auteur dans le cadre des co-encadrements des thèses de Sophie Dillen et de Julien Toillon (Dillen *et al.* 2011, Toillon *et al.* 2013a, b). Par ailleurs, depuis 2011, les relations se sont développées avec la composante universitaire de l'Unité EEF, recentrant mon réseau de collaborations à l'échelle locale. Finalement, l'installation d'un site atelier à proximité de Nancy (Amance, Meurthe-et-Moselle) en 2014 devrait également rapprocher géographiquement ma thématique de Nancy.

Avoir été recruté pour travailler sur un objet (le TCR) plutôt que sur une thématique proprement dite est à la fois une opportunité et une difficulté. Une opportunité, car toutes les pistes peuvent être explorées... au risque de s'éparpiller sans vraiment trouver sa voie. Une difficulté, car tout est à faire, surtout dans le contexte nancéien où, à mon arrivée, le TCR était un ovni. Aujourd'hui, la difficulté est en partie surmontée car le TCR fait partie intégrante du paysage nancéien, malgré des complications récurrentes pour installer de manière durable un dispositif atelier. Par contre, à mon sens, je n'ai pas réussi à éviter l'éparpillement sans encore parvenir à m'approprier une thématique propre. Cela est sans doute en partie dû à la nécessité initiale de frapper à de nombreuses portes et à de nombreux guichets afin d'obtenir des financements pour espérer un minimum de succès pour démarrer. J'espère et je compte bien remédier à cela dans le cadre du projet présenté ci-après.

6.6. Perspectives de recherche à quatre ans



Agroforesterie ; Peuplier ; Aulne ; Taillis à courte rotation ; Croissance ; Productivité ; Allocation du carbone ; Efficience d'utilisation des ressources ; Fixation symbiotique de l'azote

Avec la fin récente de plusieurs projets d'envergure sur le thème de la **variabilité et de la plasticité de la production de biomasse et de ses déterminants** (SYLVABIOM, CREFF, thèse de Julien Toillon), mes activités se sont resserrées autour du volet « **fonctionnement des plantations intensives mélangées d'espèces fixatrice et non fixatrice d'azote** » dans le cadre du projet Intens&Fix et de la thèse de Cécilia Gana. J'ai choisi d'ajouter une **dimension agroforestière** à ce thème pour la suite de mon projet.

Associer des espèces herbacées fixatrices d'azote aux arbres à croissance rapide pourrait permettre de remédier à certains des reproches faits aux TCR tels que l'épuisement des sols, le non-respect de l'environnement ou la concurrence avec les cultures alimentaires. L'agroforesterie apparaît comme une voie de diversification écologique des exploitations agricoles dans le contexte agricole européen. Les intérêts de ce modèle de production sont nombreux tant du point de vue de la production agricole que de la protection de l'environnement. Les systèmes agroforestiers sont notamment bénéfiques pour la biodiversité qui est le support de services écosystémiques essentiels comme la fertilité des sols ou la régulation biologique. Dans ce contexte (et de façon à rapprocher géographiquement le site atelier TCR mélangé instrumenté du Centre INRA de Nancy - Lorraine), un financement nous a été accordé par le Laboratoire d'Excellence (Labex) ARBRE pour installer un dispositif agroforestier en Lorraine.

6.6.1. État de l'Art et enjeux

L'**agroforesterie** est pratiquée depuis des millénaires mais le terme n'a fait son apparition qu'à la fin des années 70. Il est défini comme l'association d'arbres (ou d'arbustes) avec des herbacées (cultures ou prairies) ou du bétail, impliquant généralement des interactions à la fois économiques et écologiques entre les arbres et les autres composantes du système (Lundgren 1982, Dupraz & Liagre 2011). En France, intercaler des peupliers avec des céréales était à la mode au 18^{ème} siècle et couvre encore aujourd'hui près de 6000 ha en régions alluviales. Le développement de la mécanisation après-guerre et des monocultures à grande échelle a entraîné le déclin de l'agroforesterie traditionnelle (Eichhorn *et al.* 2006). Pourtant, l'association des arbres et des herbacées a prouvé son intérêt (1) en réduisant le ruissellement et l'érosion des sols, (2) en améliorant la structure des sols par l'apport de matière organique, (3) en améliorant également l'activité microbienne des sols, les taux d'infiltration, la disponibilité en eau et en nutriments des sols et la suppression des mauvaises herbes, et (4) en augmentant la productivité globale des mélanges par rapport aux

monocultures en raison d'un partage de niches au niveau aérien comme souterrain entre les espèces. De façon à chiffrer ce dernier avantage, des indices tels que le « land equivalent ratio » (LER) ont été développés de façon à calculer la supériorité en terme de rendement du mélange d'espèces par rapport aux monocultures (Mead & Willey 1980). Le mélange est plus productif que les monocultures lorsque le rapport est supérieur à 1. En milieu tempéré, des LER variant entre 0,98 et 2,40 ont été reportés dans la littérature pour divers types de mélanges agroforestiers (Grünewald *et al.* 2007, Graves *et al.* 2010, Rivest *et al.* 2010). Les bornes de cette fourchette correspondent néanmoins à des cas particuliers (différence de fertilité des sols entre mélange et monocultures comparés, ou immaturité des peuplements) et la modélisation prévoit plutôt des LER variant entre 1,0 et 1,4 en Europe (Graves *et al.* 2007).

L'agroforesterie silvoarable (excluant l'élevage ; Burgess *et al.* 2005) est déjà pratiquée dans de nombreuses régions d'Europe : 10 à 16% des dehesas espagnoles et montados portugais seraient dédiés à ces systèmes ; 2000 ha ont été plantés en France rien qu'au cours de l'hiver 2007-2008 ; la vallée du Po en Italie ou le Royaume-Uni sont coutumiers de la culture de céréales sous des peupleraies (Eichhorn *et al.* 2006). Il faut néanmoins préciser qu'il s'agit, dans la plupart des cas, de cultures agricoles disposées entre des arbres largement espacés, limitant les problèmes de concurrence entre espèces pour les ressources. **Les connaissances sur la productivité de ces systèmes mélangés sont limitées en comparaison des monocultures forestières ou agricoles (Graves *et al.* 2010), et leur productivité est rarement étudiée comme étant le résultat des interactions positives (facilitation, diminution de compétition) ou négatives (compétition) entre les espèces sur les allocations et sur la dynamique du carbone, des nutriments et de l'eau dans le système.** Enfin, les études à long terme sur ce sujet restent rares et sont nécessaires pour évaluer comment le fonctionnement de ces systèmes va évoluer dans le temps (Tsonkova *et al.* 2012). Bien qu'on observe actuellement un regain d'intérêt pour l'agroforesterie en France et en Europe, les recherches y sont encore peu développées contrairement à l'Amérique du Nord ou à l'Asie (Powell & Bork 2004, Efhami Sisi *et al.* 2012).

La question du maintien de la fertilité des sols tout en limitant les apports en fertilisants minéraux est primordiale à la fois pour les cultures herbacées et pour les plantations d'arbres intensives à fins bioénergétiques. **Les effets bénéfiques des systèmes agroforestiers sur le maintien de la fertilité des sols seront certainement accrus par l'utilisation d'espèces, dans le mélange, capables de fixer l'azote atmosphérique,** herbacées (luzerne, trèfle, pois) ou ligneuses (aulne, robinier, acacia). L'apport d'azote au système par ces espèces n'est pas négligeable : des capacités de fixation d'azote de la luzerne de 150 à 230 kg N ha⁻¹ an⁻¹ ont été observées (Tisdale & Nelson 1974, Walton 1983), alors que pour des placeaux d'aulnes en conditions naturelles, des taux de fixation de 40 à 150 kg N ha⁻¹ an⁻¹ ont été rapportés (Luken & Fonda 1983, Binkley *et al.* 1994, Cleveland *et al.* 1999).

6.6.2. Dispositif expérimental

La première étape du projet a été la mise en place d'une **plantation atelier instrumentée associant des espèces fixatrices d'azote** (aulne, luzerne) **aux espèces d'intérêt économique** (peuplier, céréales) sur une parcelle agricole de l'exploitation expérimentale de la Bouzule située sur la commune d'Amance (Meurthe-et-Moselle, Lorraine). La plantation est composée :

- (1) de placettes strictement « forestières » (peuplier et aulne en monocultures, mélange peuplier / aulne),
- (2) de placettes strictement agricoles (céréales et luzerne en monoculture), et
- (3) de placettes agroforestières associant les arbres aux cultures agricoles (mélange peuplier/luzerne, mélange aulne/céréales), **de façon à pouvoir évaluer l'effet fertilisant des fixateurs d'azote sur les non fixateurs.**

En complément, deux mélanges d'herbacés de couverture ont été semés dans les placettes composées uniquement d'arbres, **afin d'estimer leur effet sur la croissance des arbres et inversement, l'effet de la plantation sur la diversité du cortège floristique et sa dynamique** durant la période d'exploitation des plantations. Ce dernier objectif cherche à pallier à deux aspects négatifs très décriés des monocultures : leur faible biodiversité et leur impact sur le paysage. La plantation a vocation à devenir, à plus ou moins long terme,

- (i) un **site expérimental de recherche**, base de projets nationaux et internationaux,
- (ii) un **lieu de formation** : organisation de travaux pratiques et de projets pour les étudiants du master FAGE, de la licence professionnelle « Espaces Naturels : gestion durable des espaces forestiers et développement local », de l'ENSAIA et du module de formation doctorale SIFER, etc., et
- (iii) une **vitrine pour les agriculteurs** lorrains qui ont des questionnements sur la faisabilité technique de ces systèmes, avec notamment la dissémination des résultats par l'intermédiaire de la chambre d'agriculture de Lorraine qui a déjà fait preuve de son intérêt.

Cette alliance de l'appliqué et du fondamental et le fait de s'adresser à trois types d'auditoire (scientifiques, étudiants, agriculteurs) confèrent à la plantation une originalité majeure. Le dispositif est un outil pédagogique et expérimental fédérateur de futurs projets ambitieux, mis en place pour le long terme. En effet, l'intérêt d'un tel dispositif est également de pouvoir suivre des successions de rotations car les données de la littérature concernent essentiellement des plantations jeunes en première rotation en raison des durées souvent réduites des projets de recherche qui les animent. Le fait que la plantation soit tout à la fois, (1) intensive (densité de plantation des arbres élevée qui devrait mener rapidement à des interactions entre les arbres), (2) mélangée d'espèces fixatrices et non fixatrices d'azote, et (3) agroforestière représente la principale originalité du dispositif. **Il s'agit de systèmes de culture innovants dont le fonctionnement écophysologique est peu ou pas documenté.**

La plantation a été installée au printemps 2014 sur une superficie de 3,5 ha (trois blocs, sept traitements, environ 3500 arbres répartis sur 100 lignes ; Figure 27). En guise de céréales, du blé a été planté durant les deux premières années (2014-2015) ; il a été remplacé par du triticales en troisième année (2016). Une caractérisation approfondie de l'état initial du sol a été effectuée (composition élémentaire, texture, biodiversité microbienne, densité apparente, analyses NIRS / MIRS, etc.). L'instrumentation du dispositif est en cours : station météo, profils d'humidité et de température du sol, etc. Le site est candidat pour intégrer le SOERE F-ORE-T en 2016. Les premiers suivis de croissance en hauteur des arbres dans les différents traitements effectués en 2015 mettent déjà en évidence un fort effet du traitement, la concurrence avec les herbacées dans les parcelles agroforestières altérant très significativement la survie et la croissance des peupliers comme des aulnes (Figure 28). Des regarnis des arbres ont été réalisés à répétition pour remédier à ce problème, mais cette hétérogénéité initiale entre traitements pourrait compliquer l'interprétation des résultats futurs. Bien que la différence ne soit pas significative, les rendements en blé en deuxième année étaient également inférieurs dans les parcelles agroforestières par rapport à la monoculture ($40,3 \pm 2,5$ quintal ha^{-1} vs. $49,0 \pm 3,6$ quintal ha^{-1}), suggérant que, à ce stade, le traitement agroforestier est plus contraignant que les monocultures pour les arbres comme pour les céréales.

Outre les activités déjà initiées sur le dispositif par les autres partenaires du projet Labex qui a financé son installation (étude de l'évolution de la diversité des herbacées de couverture, étude de la diversité microbienne du sol, etc. ; Figure 27), **le cœur de mon propre projet, visant à décrire le fonctionnement écophysologique des mélanges par rapport aux monocultures, consistera à suivre la production, l'allocation du carbone et les efficacités d'utilisation des ressources (eau et azote) des arbres.** Les questions générales auxquelles le projet cherche à répondre sont : *Comment le mélange d'espèces affecte l'allocation du carbone et l'utilisation des ressources par rapport aux monocultures ? Est-ce que l'effet de facilitation liée à la fixation symbiotique de l'azote sera prépondérant par rapport aux interactions négatives entre espèces (compétition), entraînant une augmentation de la productivité en mélange ? Est-ce que les interactions entre espèces seront comparables dans le cas d'un fixateur d'azote ligneux ou herbacé ?*

Figure 27. Poster de présentation de la plantation expérimentale.

An instrumented agroforestry site in Lorraine: optimizing productivity and sustainability of intensive cropping systems through symbiotic nitrogen fixation



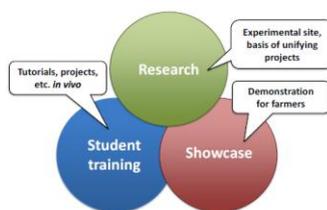
Nicolas MARRON¹, Séverine PIUTTI², Bernard AMIAUD¹, Daniel EPRON¹, Alexandre LAFLOTTE³, Erwin DALLÉ¹

1. UMR Ecologie et Ecophysologie Forestières, UMR 1137 INRA - Université de Lorraine, Route d'Amance, 54280 Champenoux / BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy - marron@nancy.inra.fr
2. Laboratoire Agronomie et Environnement, UMR 1121 INRA - Université de Lorraine, 2 avenue de la forêt de Haye, TSA 43602, 54518 Vandœuvre Cedex.

3. Domaine expérimental de la Bouzule, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Agro-alimentaires (ENSAIA) - Université de Lorraine, 54280 Champenoux

Issues

- In temperate areas, intensive timber plantations for energy purposes, such as **short rotation coppice (SRC)**, are criticized.
- They are known to deplete the soil in nutrients and to **bring no real profit**.
- The combination of **atmospheric nitrogen fixing species** with fast growing species (i.e. poplar) may be a sustainable alternative.
- The nitrogen fixing species can be woody (alder) or grass (alfalfa).



Objectives

- Research in agroforestry is lacking behind in France and Europe, unlike North America and Asia.
- The **agroforestry** plantation in Lorraine has the **triple function** of being an experimental research site, an opportunity for students for field courses, and a showcase for farmers.



July 2, 2015: Poplar monoculture



July 15, 2015: Alder row as a border of agroforestry (alder / wheat) and forestry plots (alder monoculture)



August 13, 2015: Poplar monoculture. Behind: Wheat plot



Semi-mechanic weeding around the trees

Partnership



The project is lead by the INRA – Lorraine University Unit, “Forest Ecology and Ecophysiology (UMR 1137 EEF)” in close collaboration with the INRA – Lorraine University Unit “Laboratory Agronomy and Environment (UMR 1121 LAE)”. The “Trees – Micro-organisms Interactions (UMR 1138 IAM)” and “Biogeochemical cycles in Forest Ecosystems (UR 1138 BEF)” Units also contribute. The establishment of the site was supported by the French National Research Agency through the Laboratory of Excellence ARBRE (ANR-12- LABXARBRE-01).



Site

The field of 5 hectares belongs to the experimental farm of La Bouzule (Meurthe-et-Moselle, 48° 44'N, 6° 18' E). It presents a slight slope to the south where it is bordered by a river. The annual average rainfall is 823 mm and the mean annual temperature is 9.6°C. The soil is composed of two-thirds of clay and one-third of silt. The plantation has been installed in April 2014, with *Populus deltoides* × *P. nigra* cuttings and *Alnus glutinosa* seedlings (almost 3500 plants). A station for the continuous monitoring of soil and climatic conditions is currently being installed.

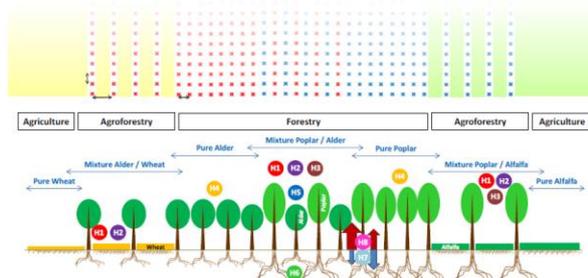


Layout

The plantation is composed of three types of plots:

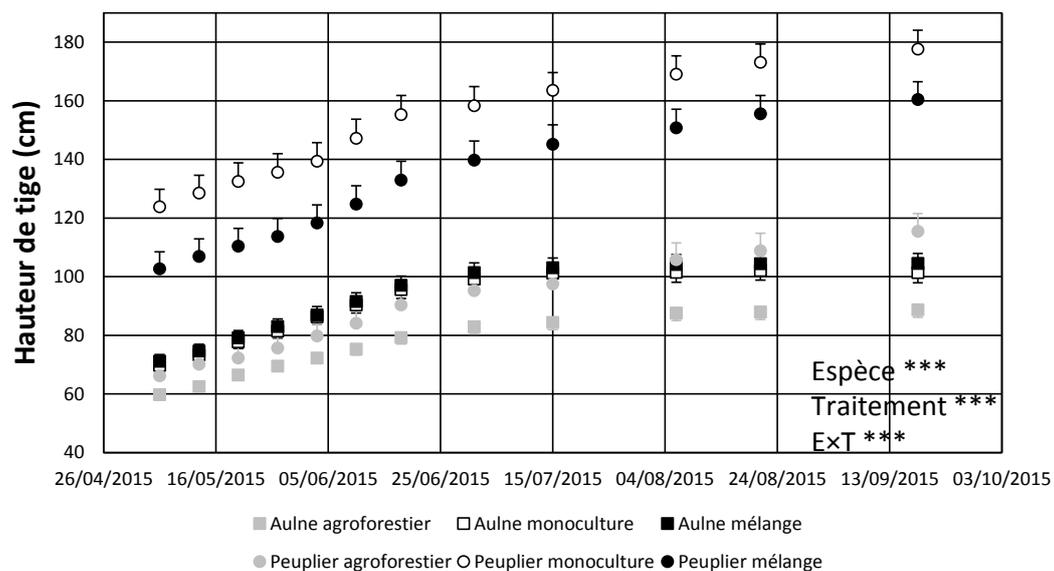
- **Agricultural plots** (pure wheat, pure alfalfa),
- **Forest plots** (pure poplar, pure alder, mixture poplar / alder)
- **Agroforestry plots** (mixture poplar / alfalfa, mixture alder / wheat)

In addition, two herbaceous mixtures were planted in the forest plots to estimate the ecological impact of the tree plantations on floristic diversity.



Scientific hypotheses

- H1:** The **growth** of the non-nitrogen-fixing species is **stimulated** by fixing species in the mixture ...
- H2:** ... **through an increase of the nitrogen stock** in the soil ...
- H3:** ... resulting in **increased leaf area and photosynthetic assimilation** of non-fixing species
- H4:** In forest plots, the **competition** is more intense in monoculture for poplar; inversely for alder
- H5:** **Canopy stratification** in the mixture allows better capture of the light resource
- H6:** A **stratification of root systems** in the mixture allows better capture of water and nutrients
- H7:** The fraction of assimilated carbon allocated to the underground compartment is lower in the mixture
- H8:** The **aboveground production is improved** in the mixture
- The ratio “Net Primary Production” / “Carbon flux to the underground compartment” increases in the mixture (**H9**)



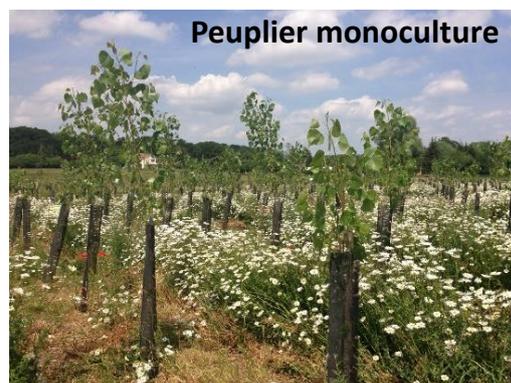
Aulne - Blé



Peuplier - Luzerne



Aulne - Peuplier



Peuplier monoculture

Figure 28. Évolution des hauteurs de tiges au cours de la saison de végétation 2015 (2^{ème} année de croissance) des peupliers et des aulnes en monoculture, en mélange entre eux et respectivement en mélange avec la luzerne et le blé (mélanges agroforestiers). Dans l'ANOVA à deux facteurs, les effets « espèce », « traitement » et leur interaction étaient significatifs à $P \leq 0,001^{***}$.

En bref : Les peupliers étaient nettement plus grands que les aulnes, sauf dans le traitement agroforestier. La concurrence avec la luzerne impactait très significativement le développement des peupliers. Dans une moindre mesure, les aulnes souffraient également de la concurrence avec le blé. Les peupliers en monoculture présentaient les hauteurs les plus importantes. Les aulnes n'étaient pas significativement différents en monoculture et en mélange avec le peuplier.

Dès le milieu du mois de juin 2015 et pour tout le reste de la saison de végétation, une intense sécheresse a drastiquement ralenti la croissance de tous les plants.

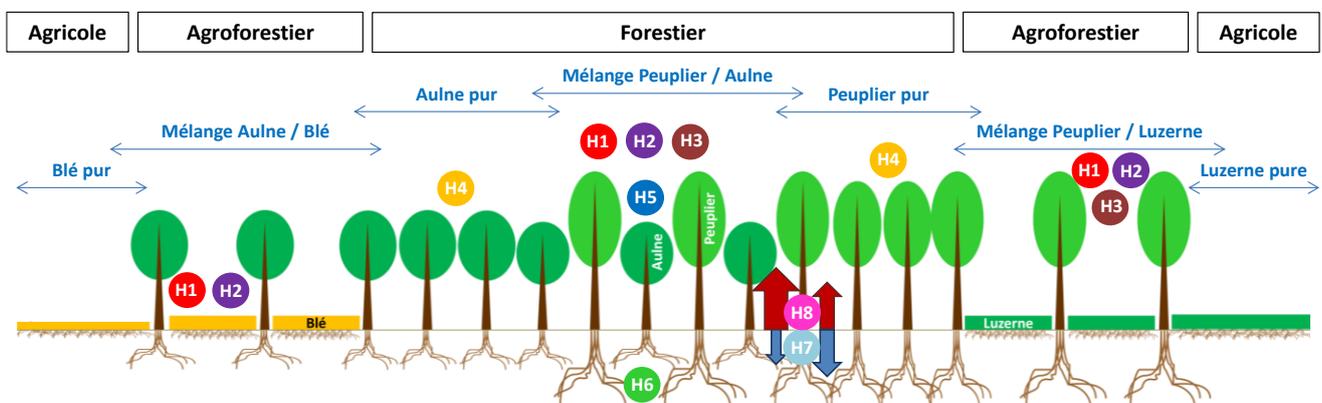
6.6.3. Production de biomasse et allocation du carbone

Une fois la phase d'installation des arbres passée (trois – quatre ans ; 2017-2018), **l'étude des effets des divers types de mélanges d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote sur le fonctionnement et la production des parcelles sera entreprise**. Dans les mélanges fixateurs / non fixateurs d'azote, des hypothèses proches de celles formulées pour le mélange peuplier / robinier en termes d'effets sur l'allocation du carbone et de l'azote seront testées (Figure 27). Le Tableau 4 présente les hypothèses formulées et la façon dont nous y répondrons, à l'échelle de l'arbre et à celle du peuplement.

Les hypothèses principales sont (1) qu'un effet de facilitation va dominer dans les mélanges en raison de l'enrichissement du milieu en azote par les fixateurs d'azote (aulne / luzerne) qui sera bénéfique aux espèces compagnes (peuplier / céréales) et (2) que la compétition interspécifique (dans les mélanges) sera moins forte que la compétition intra-spécifique (dans les monocultures) en raison d'un partage des niches entre les espèces. Le résultat sera une productivité accrue des parcelles mélangées par rapport aux monocultures.

Tableau 4. Hypothèses formulées quant aux effets du mélange d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote sur l'allocation du carbone et de l'azote, et méthodes employées pour y répondre à l'échelle de l'arbre et du peuplement. Les numéros H1 à H8 font références aux hypothèses telles que schématisées ci-dessous et en Figure 27.

<u>Ce que l'on s'attend à observer dans les plantations mélangées :</u>	<u>Comment on va l'évaluer :</u>		
	<u>A l'échelle de l'arbre</u>	<u>A l'échelle du peuplement</u>	
Interaction entre les fixatrices et les non fixatrices d'azote de type facilitation	Croissance des arbres suivie de manière non destructive	Tarifs de biomasses ponctuels appliqués sur les inventaires complets des dimensions des arbres ; production des cultures herbacées évaluée annuellement	H1
→ Par l'intermédiaire de l' augmentation du stock global d'azote dans le milieu grâce à la fixation d'azote symbiotique (via les chutes de litières et/ou le turnover des racines)		Marquage à l'azote ¹⁵ N associé aux valeurs de ¹⁵ N en abondance naturelle pour estimer la fixation symbiotique ; recueil régulier des litières aériennes et au sol	H2
→ Qui va causer une augmentation de l'assimilation photosynthétique du peuplier	Suivi des capacités photosynthétiques des arbres et estimations ponctuelles des surfaces foliaires	Suivi de l'indice foliaire (LAI)	H3
Compétition intra-spécifique plus intense que la compétition interspécifique			H4
→ En raison d'une stratification de la canopée entre les deux espèces entraînant un meilleur partage de la ressource lumineuse	Description complète de la canopée (distribution du feuillage, surfaces et angles foliaires, etc.)		H5
→ et d'une stratification des systèmes racinaires permettant un meilleur partage des ressources en eau et en nutriments	Fosses pédologiques pour l'établissement de profils racinaires	Profils d'humidité du sol mesurée en continu	H6
Flux de carbone vers le compartiment souterrain plus faible dans les mélanges en raison de l'apport d'azote symbiotique	Prélèvements par carottages, pesées et analyses C/N de racines	Mesures de respiration du sol, prélèvements et analyses C/N des litières, du sol et des racines	H7
Production aérienne améliorée en raison de l'augmentation de la disponibilité des différentes ressources	Abattages des arbres et estimations des biomasses et des teneurs aériennes en C/N	Tarifs de biomasses ponctuels appliqués sur les inventaires complets des dimensions des arbres ; production des cultures herbacées évaluée annuellement	H8



6.6.4. Efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote

Un accent particulier sera également mis sur l'étude de l'effet des différents types de mélanges sur l'efficacité avec laquelle les espèces ligneuses utilisent les ressources en eau et en azote (WUE et NUE). L'efficacité avec laquelle les arbres utilisent les ressources en plantations mixtes a peu été documentée, qui plus est sous climat tempéré. Cependant, **étant donné que la productivité ainsi que la disponibilité et l'absorption des ressources lumineuses et nutritionnelles peuvent être affectées par le mélange, des changements associés d'efficacité d'utilisation des ressources pourraient jouer un rôle important pour déterminer la productivité du mélange** (Binkley *et al.* 2004, Richards *et al.* 2010). WUE sera estimée aux échelles de la feuille, de l'arbre et du peuplement par des mesures d'échanges gazeux foliaires, des mesures de flux de sève associées à des estimations ponctuelles des biomasses et par l'intermédiaire de la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13. Un index de NUE sera calculé comme le rapport entre la biomasse aérienne ligneuse et l'azote total de l'arbre, incluant celui perdu dans les litières.

Une supériorité des fixateurs d'azote par rapport aux non fixateurs en termes de WUE a déjà été largement décrite dans la littérature (King *et al.* 2013, Schulze *et al.* 1998, Zheng & Shangguan 2007a, 2007b). Elle est attribuée à un investissement en azote plus conséquent dans la machinerie photosynthétique dans le cas des fixateurs. Les résultats des projets SYLVABIOM et Intens&Fix montraient effectivement que les robiniers présentaient des valeurs de WUE (estimées par l'intermédiaire de la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone ou comme le rapport entre assimilation de CO₂ et conductance stomatique) supérieures à celles des saules et des peupliers cultivés dans les mêmes conditions (Figure 29). Par contre, les valeurs de NUE étaient plus faibles pour les robiniers que pour les peupliers (Figure 29). Cette supériorité des non fixateurs par rapport aux fixateurs en termes de NUE était également observée au Congo (Pointe-Noire) et au Brésil (Itatinga, état de São Paulo) pour l'eucalyptus et l'acacia dans le cadre du projet Intens&Fix.

En termes d'effet du mélange sur NUE des non fixateurs, **si l'azote est l'élément limitant, la levée de cette limitation par l'apport par la fixation symbiotique (effet de facilitation) devrait entraîner une réduction de NUE dans le mélange**. C'est ce qui était observé au Brésil et au Congo dans le cadre d'Intens&Fix. En France (Saint-Cyr-en-Val), la NUE du peuplier n'était pas différente entre la monoculture et le mélange, soulignant le fait que l'azote n'était probablement pas limitant dans ce cas (Figure 29). Par contre, le robinier en mélange présentait des valeurs supérieures de NUE et WUE par rapport à la monoculture, mettant en évidence une contrainte accrue, sans doute pour l'eau, pour cette espèce dans le mélange. Une méta-analyse des données de la littérature a montré que 65% des études pour lesquelles des valeurs de NUE pouvaient être calculées montraient une variation de NUE supérieure à 10% dans les mélanges (avec des espèces fixatrices d'azote ou non) par rapport aux monocultures, et 44% des études montraient une réduction de NUE dans le mélange (21% montraient une augmentation) (Richards *et al.* 2010). Il a en outre été montré qu'une fertilisation azotée entraînait une diminution de NUE chez le peuplier

(Li *et al.* 2012). En termes d'utilisation de l'eau, l'effet attendu du mélange avec une fixatrice d'azote est un changement d'allocation du carbone en faveur des parties aériennes et au dépend des racines qui va également causer un moindre prélèvement d'eau dans le mélange et, par conséquent, **une efficacité de transpiration plus élevée qu'en monoculture** (Coomes & Grubb 2000). À l'échelle de l'arbre, une augmentation de WUE, estimée par l'intermédiaire de $\Delta^{13}\text{C}$, est un phénomène couramment observé en réponse à une fertilisation minérale ou organique chez diverses espèces et hybrides de peuplier (DesRochers *et al.* 2006, Yin *et al.* 2009, Larchevêque *et al.* 2011). Cela a été attribué à l'action conjointe d'une augmentation de l'assimilation photosynthétique et d'une diminution de la conductance stomatique.

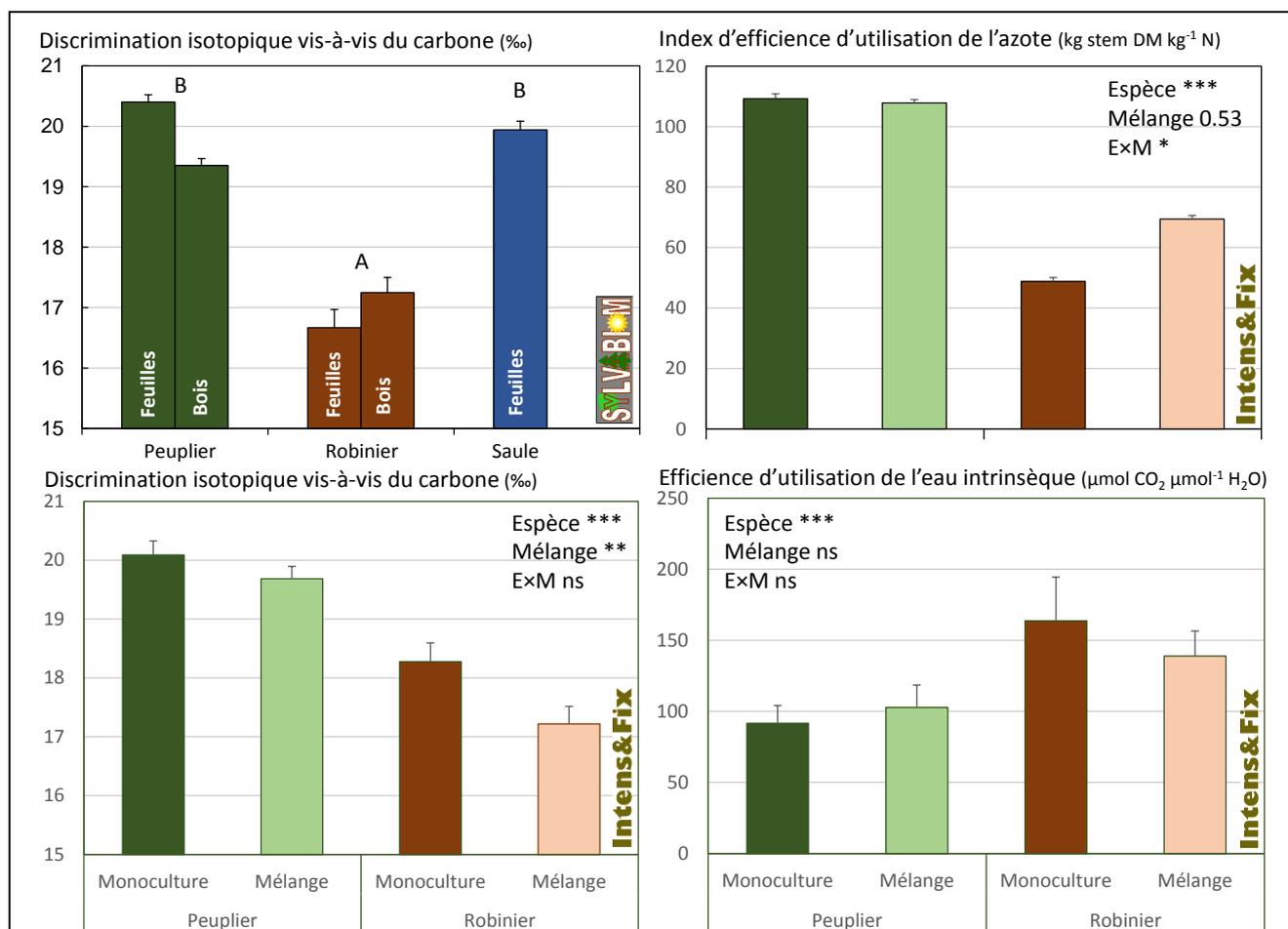


Figure 29. Valeurs de discrimination isotopique vis-à-vis du carbone ^{13}C , d'efficacité d'utilisation de l'eau intrinsèque (assimilation du CO_2 / conductance stomatique pour l'eau) et d'index d'efficacité d'utilisation de l'azote [biomasse aérienne / (azote total dans la biomasse + azote des litières)] pour le peuplier, le robinier et le saule en monocultures à deux ans dans le cadre du projet SYLVABIOM ou pour le peuplier et le robinier en monocultures et en mélange à trois ans dans le cadre du projet Intens&Fix. Peuplier : *Populus deltoides* × *P. nigra*, génotype 'Dorskamp' ; Robinier : *Robinia pseudoacacia*, provenance 'Nyirseg' ; Saule : six génotypes hybrides de *Salix viminalis* et *S. schwerinii* (voir Toillon *et al.* 2013b pour le détail des génotypes et leurs parentés). Moyennes ± erreurs standards ($n \geq 8$). Pour SYLVABIOM, des lettres différentes indiquent des différences significatives entre espèces pour $P < 0.05$. Pour Intens&Fix, les effets espèce, mélange et leur interaction sont indiqués pour l'ANOVA à deux facteurs : * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, ns non significatif.

En bref : Le robinier présente une efficacité d'utilisation de l'eau supérieure ($\Delta^{13}\text{C}$ inférieure) à celle du peuplier et du saule. En revanche, l'efficacité d'utilisation de l'azote du robinier est inférieure à celle du peuplier. L'effet du mélange peuplier / robinier est peu marqué. Néanmoins, les robiniers utilisent légèrement plus efficacement les deux ressources en mélange, sans doute en raison de la compétition avec le peuplier.

Les hypothèses formulées en termes d'effets des mélanges d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote sur les efficacités d'utilisation des ressources en eau et en azote, ainsi que les méthodes qui seront mises en œuvre pour y répondre à l'échelle de l'arbre et à celle du peuplement sont résumées en Tableau 5.

Tableau 5. Hypothèses formulées quant aux effets du mélange d'espèces fixatrices / non fixatrices d'azote sur les efficacités d'utilisation de l'eau et de l'azote, et méthodes employées pour y répondre à l'échelle de l'arbre et du peuplement.

<u>Ce que l'on s'attend à observer dans les plantations mélangées :</u>	<u>Comment on va l'évaluer :</u>	
	A l'échelle de l'arbre	A l'échelle du peuplement
Efficacité d'utilisation de l'eau accrue en raison de l'augmentation de l'assimilation photosynthétique, de la biomasse ligneuse produite et du moindre prélèvement d'eau	Mesures du rapport Assimilation / Conductance stomatique et de $\Delta^{13}\text{C}$ (efficacités instantanée et intrinsèque)	Mesures de transpiration à l'aide de capteurs de flux de sève, associées aux estimations de productivité (efficacités de transpiration)
Efficacité d'utilisation de l'azote réduite si l'azote n'est plus limitant		Estimation de la quantité de biomasse aérienne ligneuse produite par unité d'azote absorbé (dans la biomasse et dans les litières) : Index d'efficacités d'utilisation de l'azote

6.6.5. En outre...

Comme mentionné en en-tête de ce chapitre, le volet traitant de la diversité et de la plasticité de la production de biomasse et de ses déterminants va fortement régresser dans mes futurs projets au profit du volet relatif au fonctionnement des plantations mélangées dans les années à venir. Néanmoins, ce volet ne disparaît pas totalement grâce notamment au projet UP-TRANS coordonné par Didier Le Thiec (équipe PhysioDiv de l'UMR EEF) et financé par le Labex ARBRE et dans le cadre duquel les plantations de TCR / TTCR de Saint-Cyr-en-Val et d'Échigey du projet SYLVABIOM vont être utilisées pour **évaluer sur une dizaine des génotypes de peuplier présents, les caractéristiques hydrauliques et anatomiques qui leur confèrent une plus ou moins grande tolérance à la sécheresse.**

Les caractéristiques du bois les plus prometteuses en termes de réponse à la sécheresse, basées sur une expérience préalable d'arrêt d'arrosage en serre, seront mesurées sur des arbres des deux sites dont la principale différence est leur alimentation en eau tranchée. Les caractéristiques du bois (hydrauliques, anatomiques et en termes de composition) seront estimées en collaboration avec la Plateforme Xylosciences de l'UMR LERFOB et l'UMR PIAF (Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier) de Clermont-Ferrand. Sur la base des données issues de la thèse de Julien Toillon ([Toillon *et al.* 2013a](#)), dix génotypes de *P. deltoides* × *P. nigra* présentant des comportements tranchés en termes de liens entre leur productivité, leur efficacité d'utilisation de l'eau et leur degré de tolérance à la sécheresse ont, d'ores et déjà, été sélectionnés en partenariat avec le GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) Peuplier (Figure 30).

Les génotypes sélectionnés feront également l'objet de l'évaluation de leurs niveaux de tolérance à l'ozone en interaction avec la sécheresse (notamment via l'efficacité de leurs systèmes de détoxification des formes activées de l'oxygène produites de manière accrue en réponse aux stress) dans le cadre d'un projet porté par Yves Jolivet (équipe PhysioDiv de l'UMR EEF) et actuellement soumis à l'ANR.

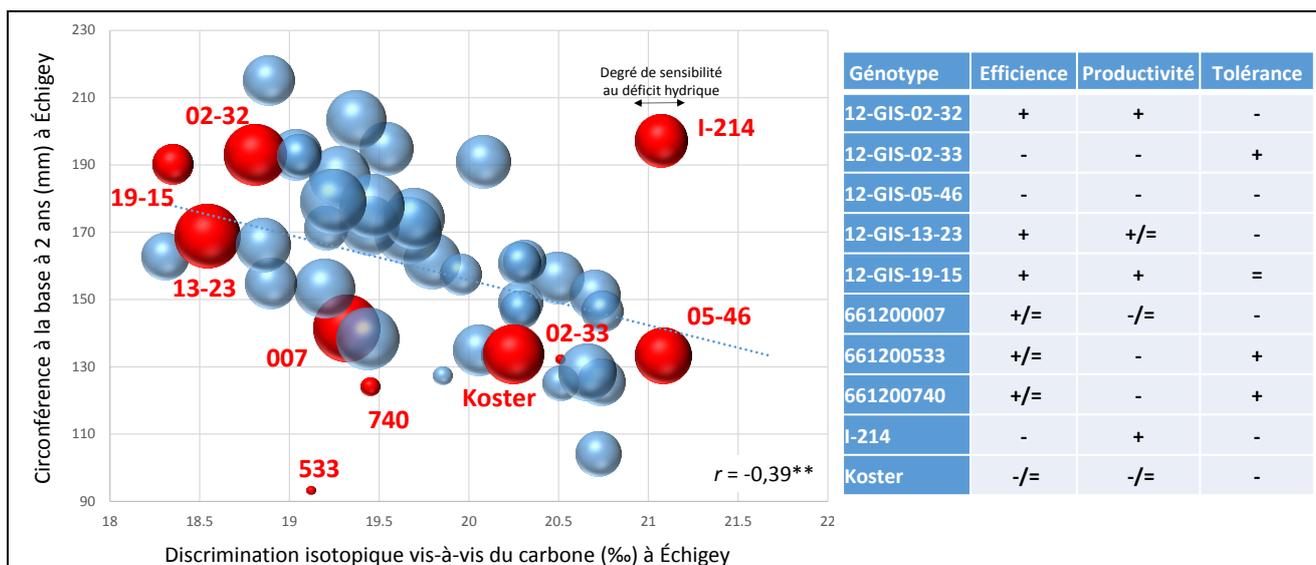


Figure 30. Relation entre la **production** de biomasse (estimée via la circonférence des arbres à la base) et l'**efficacité d'utilisation de l'eau** (estimée via la discrimination isotopique vis-à-vis du carbone 13) des 56 génotypes de *Populus deltoides* × *P. nigra* au site le plus productif du projet SYLVABIOM (Échigey, Côte d'or) en TCR à deux ans. Le diamètre des bulles correspond au degré de **sensibilité à la contrainte** (essentiellement hydrique ; Toillon *et al.* 2013a) des génotypes estimé par la différence entre les circonférences des arbres au site d'Échigey et au site très contraint de Saint-Cyr-en-Val, pondérée par la circonférence à Échigey. Les génotypes présentant les circonférences les plus affectées par la contrainte (les plus sensibles) ont les plus gros diamètres de bulles. Le coefficient de corrélation de Pearson (r) entre production et efficacité était significatif à $P < 0,01^{**}$.

En bref : Les génotypes en rouge ont été sélectionnés en raison de leurs comportements tranchés et variés en termes de production, d'efficacité et de sensibilité (cf. tableau accolé). Ils vont être intégrés dans des projets visant à approfondir (1) les caractéristiques de leur bois (hydrauliques, anatomiques et en termes de composition) en lien avec leur niveau de tolérance au déficit hydrique et (2) leur comportement en réponse à l'interaction entre le stress hydrique et le stress à l'ozone, notamment en termes de lutte contre les formes activées de l'oxygène (collaborations avec D. Le Thiec et Y. Jolivet, projet Labex UP-TRANS).

6.7. Conclusion

J'ai eu la chance au cours de mon parcours dans la recherche de garder depuis maintenant plus de 15 ans **un fil conducteur constant** : l'étude de l'**écophysiologie du peuplier**. Ce thème a été enrichi au fil des collaborations et des expériences par les apports d'autres disciplines telles que la biochimie, la génétique quantitative, l'écologie fonctionnelle, etc. qui m'ont permis de changer d'échelle tout en gardant un objet d'étude relativement fixe (voir la Figure 4). Une autre chance associée à ma thématique de recherche est de pouvoir **allier la recherche fondamentale à des finalités appliquées de manière assez simple**. Ce pont relativement facile entre « fondamental » et « appliqué » se concrétise par des dialogues très fréquents et enrichissants avec les acteurs de l'industrie du bois, des instituts techniques et les agriculteurs et forestiers (voir la Figure 3). Enfin, tout au long de mon parcours, la **proximité de la composante universitaire** a toujours été un élément très constructif pour l'évolution de mon activité de recherche. Cela est sans doute dû à des thématiques plus proches et des compétences plus en adéquation avec celles recherchées pour développer mon projet du côté universitaire que du côté INRA.

Par ailleurs, **même si parfois mitigées, mes premières expériences de l'encadrement de doctorants ont été enrichissantes**. Elles m'ont en effet permis d'établir une liste de recommandations pour mes prochains encadrements : (1) mettre à disposition de l'étudiant un dispositif expérimental robuste et facilement accessible ; (2) bien définir des objectifs distincts de ceux du projet dans lequel s'intègre la thèse ; (3) avoir déjà travaillé avec l'étudiant dans le cadre de stage(s) de Master avant de s'engager avec lui pour une thèse ; (4) s'assurer que l'étudiant soit bien conscient de la distinction entre un doctorat et un CDD et qu'il s'agit d'un travail qu'il effectue, en premier lieu, pour préparer son propre avenir, tout en ayant un rôle primordial dans la thématique de recherche de ses encadrants. Ce dernier point est particulièrement important à mon sens.

Depuis mon recrutement à l'INRA, le développement de ma thématique de recherche en fonction des projets financés a été, selon moi, une source d'éparpillement, mais c'était un passage obligé, l'argent restant le nerf de la guerre. Cette phase de tâtonnement a cependant été bénéfique, me permettant d'établir un **large réseau de collaborations aussi bien scientifiques que techniques**, et d'avoir une vision d'ensemble du monde des plantations forestières intensives incluant **les aspects non seulement scientifiques, mais également économiques, sylvicoles, réglementaires**, etc. Cette phase passée, j'ai réduit mon champ d'action ces dernières années pour revenir à un cœur de projet essentiellement axé sur l'étude du fonctionnement écophysiologique des plantations mélangées.

7. Publications et communications

Mon **bilan de publication** depuis 2002 fait état d'environ **deux articles publiés par an, en moyenne**, dont près de la moitié en tant que premier auteur (Figure 31). À partir de 2011, j'ai signé dernier auteur dans le cadre des co-encadrements de thèses avec Franck Brignolas, Reinhart Ceulemans et Daniel Epron. Je ne tiens pas compte dans la représentation ci-dessous des quatre articles dans des revues forestières de vulgarisation (à comité de lecture) à destination des utilisateurs de la recherche (*Revue Forestière Française* et *Forêt Privée*) ; ce type de production est, à mon sens, particulièrement important et complémentaire des publications à caractère strictement scientifique. En 2014, un creux dans mes activités de publication reflète sans doute les difficultés rencontrées depuis quelques années pour lancer de manière pérenne mon projet de recherche et notamment, les échecs à répétition de mise en place de plantations atelier, activité très consommatrice de temps et d'énergie. Depuis 2009, mes articles sont cités **une centaine de fois par an** environ (**h-index : 16** d'après ResearchID de Thomson Reuters – ResearchGate Score : 28). En outre, j'ai eu à de nombreuses occasions l'opportunité de présenter mes travaux dans le cadre de congrès internationaux et de symposiums nationaux (invité ou non), rassemblant aussi bien la communauté scientifique que les utilisateurs, forestiers comme agriculteurs (voir liste exhaustive ci-dessous).

Pour les « Articles scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture », j'ai indiqué la notoriété de la revue à 5 ans dans le référentiel NORIA (NOtorité des Revues et Indicateurs d'Articles) de l'INRA : « **Exceptionnel** » correspond aux outliers supérieurs de la statistique en boîte à moustaches ; « **Excellente, Correcte, Acceptable, Médiocre** » sont respectivement les quartiles Q1, Q2, Q3, Q4 des distributions des facteurs d'impact relatives à une catégorie du Web Of Science donnée (par exemple, Forestry, Plant Sciences, Ecology, etc.). J'ai également décrit quelle était ma contribution dans chaque cas.

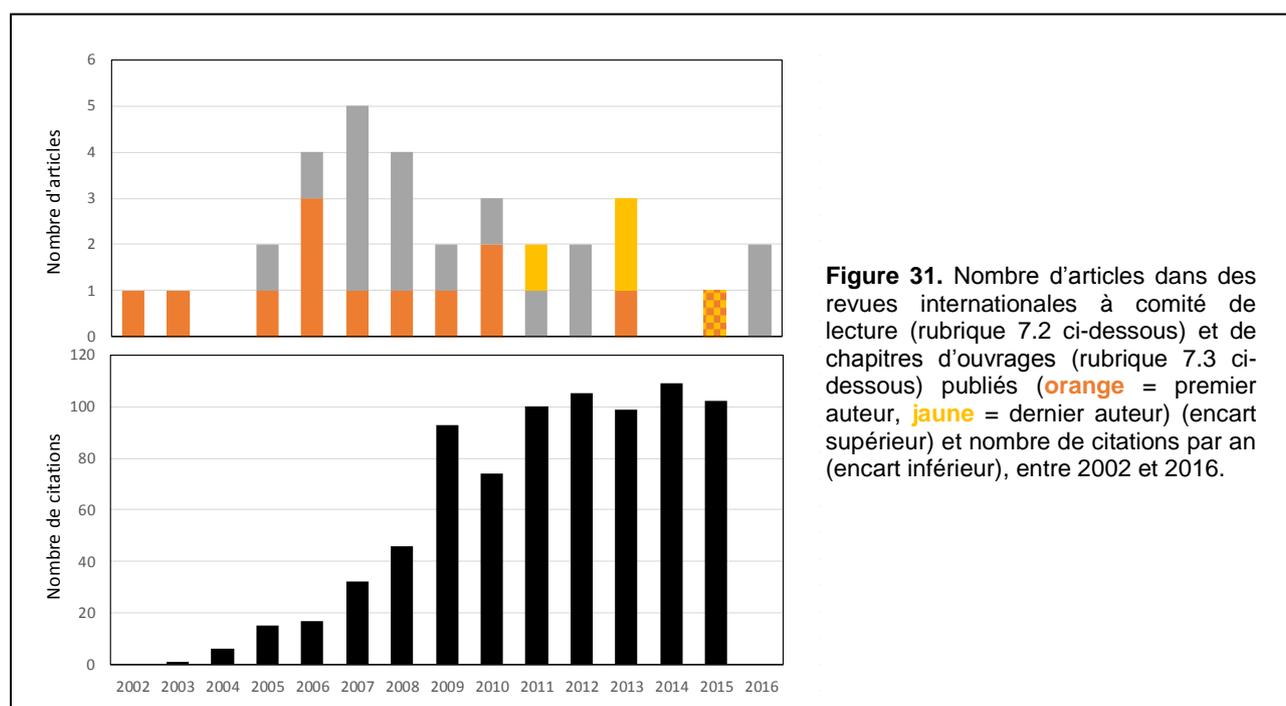


Figure 31. Nombre d'articles dans des revues internationales à comité de lecture (rubrique 7.2 ci-dessous) et de chapitres d'ouvrages (rubrique 7.3 ci-dessous) publiés (orange = premier auteur, jaune = dernier auteur) (encart supérieur) et nombre de citations par an (encart inférieur), entre 2002 et 2016.

7.1. Articles en préparation

- Toillon, J., E. Dallé, G. Bodineau, A. Berthelot, J.-C. Bastien, F. Brignolas and **N. Marron**. Plasticity of yield and nitrogen removal in 56 *Populus deltoides* × *P. nigra* genotypes under short-rotation coppice conditions. A soumettre pour publication à la revue *Forest Ecology and Management*.
- **Marron, N.**, R. Fichot, S. Chamaillard, R. Monclus, J. Toillon, F. Rasheed, L. Bonhomme, M. Villar, C. Bastien, R. Ceulemans, E. Dreyer and F. Brignolas. Water-use efficiency in poplars: an overview of physiological determinants, modulation by the environment, and relationship with growth. A soumettre pour publication à la revue *Annals of Forest Science*.
- Gana, C., P. Maillard, D. Gérant, D. Epron and **N. Marron**. Biological N₂ fixation and nitrogen accumulation in mixed-species plantations of poplar and black locust.

Analyse

Les projets de publications listés ci-dessus, avancés à ce jour à des degrés divers, témoignent d'une part, de collaborations encore vivaces avec les Universités d'Orléans et d'Anvers, et d'autre part, de la valorisation encore en cours des travaux de thèse de Julien Toillon et de Cécilia Gana sur les volets aussi bien « *Diversité* » que « *Fonctionnement* » des TCR (respectivement dans le cadre des projets ANR SYLVABIOM et Intens&Fix). Ma place parmi les coauteurs indique tantôt un rôle d'encadrant, tantôt un rôle de rédacteur (par exemple pour la revue sur l'efficacité d'utilisation de l'eau du peuplier coordonnée par Franck Brignolas).

7.2. Articles scientifiques dans des revues internationales à comité de lecture

1. Gana, C., Y. Nouvellon, **N. Marron**, J.L. Stape and D. Epron. Sampling and interpolation strategies derived from the analysis of continuous soil CO₂ efflux measurements in temperate and tropical plantations. Soumise à la revue *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* en février 2016.
Notoriété à 5 ans correcte (Plant sciences, Soil sciences)
Contribution : Encadrement de la thèse de Cécilia Gana avec D. Epron
2. **Marron, N. 2015**. Agronomic and environmental effects of land application of residues in short-rotation tree plantations: a literature review. **Biomass & Bioenergy**. 81: 378-400.
Notoriété à 5 ans excellente (Energy and fuels, Agricultural engineering, Biotechnology and applied microbiology)
Contribution : Revue rédigée suite à l'expertise collective (Esco) MAFOR
3. Toillon, J., R. Fichot, E. Dallé, A. Berthelot, F. Brignolas and **N. Marron. 2013a**. Planting density affects growth and water-use efficiency depending on site in *Populus deltoides* × *Populus nigra*. **Forest Ecology and Management**. 304: 345-354.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)
Contribution : Encadrement de la thèse de Julien Toillon – Participation active à tous les stades : terrain, analyses des données, rédaction
4. Toillon, J., B. Rollin, E. Dallé, M. Feinard-Duranceau, J.-C. Bastien, F. Brignolas and **N. Marron. 2013b**. Variability and plasticity of productivity, water-use efficiency, and nitrogen exportation rate in *Salix* short-rotation coppice. **Biomass & Bioenergy**. 56: 392-404.
Notoriété à 5 ans excellente (Energy and fuels, Agricultural engineering, Biotechnology and applied microbiology)

Contribution : Encadrement de la thèse de Julien Toillon – Participation active à tous les stades : terrain, analyses des données, rédaction

5. Monclus R., J.-C. Leplé, C. Bastien, P.-F. Bert, M. Villar, **N. Marron**, F. Brignolas and V. Jorge. **2012**. Integrating genome annotation and QTL position to identify candidate genes for productivity, architecture and water-use efficiency in *Populus* spp. **BMC Plant Biology**. 12: 173-187.
Notoriété à 5 ans excellente (Plant sciences)
Contribution : Collecte et analyse de données dans le cadre du projet européen POPYOMICs
6. Fabbrini F., M. Gaudet, C. Bastien, G. Zaina, A. Harfouche, I. Beritognolo, **N. Marron**, M. Morgante, G. Scarascia-Mugnozza and M. Sabatti. **2012**. Phenotypic plasticity, QTL mapping and genomic characterization of bud set in black poplar. **BMC Plant Biology**. 12: 47-62.
Notoriété à 5 ans excellente (Plant sciences)
Contribution : Collecte et analyse de données dans le cadre du projet européen POPYOMICs
7. Dillen S.Y., R. Monclus, C. Barbaroux, C. Bastien, R. Ceulemans, E. Dreyer, M. Villar, F. Brignolas and **N. Marron**. **2011a**. Is the ranking of poplar genotypes for carbon isotope discrimination stable across sites and years in different pedigrees? **Annals of Forest Science**. 68: 1265-1275.
Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)
Contribution : Article issu d'une collaboration Nancy – Orléans – Anvers (projet franco-belge Egide Tournesol) – Coordination du projet, collecte des données, analyses, rédaction dans le cadre de la thèse de Sophie Dillen
8. Rohde, A., V. Storme, V. Jorge, M. Gaudet, N. Vitacolonna, F. Fabbrini, T. Ruttink, G. Zaina, **N. Marron**, S. Dillen, M. Steenackers, M. Sabatti, M. Morgante, W. Boerjan and C. Bastien. **2011**. Bud set in poplar – genetic dissection of a complex trait in natural and hybrid populations. **New Phytologist**. 189: 106-121.
Notoriété à 5 ans exceptionnelle (Plant Sciences)
Contribution : Collecte et analyse de données dans le cadre du projet européen POPYOMICs
9. **Marron N.**, L. Ricciotti, C. Bastien, I. Beritognolo, M. Gaudet, I. Paolucci, F. Fabbrini, F. Salani, S.Y. Dillen, R. Ceulemans, M.P.C. Pinel, G. Taylor, G. Scarascia-Mugnozza and M. Sabatti. **2010b**. Plasticity of growth and biomass production of an intraspecific *Populus alba* L. family grown at three sites across Europe during three growing seasons. **Canadian Journal of Forest Research**. 40: 1887-1903.
Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)
Contribution : Issu du travail de post doctorat à Viterbe, Italie en 2006 – Collecte et analyse des données, rédaction
10. **Marron, N.**, V. Storme, S.Y. Dillen, C. Bastien, L. Ricciotti, F. Salani, M. Sabatti, A.M. Rae, R. Ceulemans and W. Boerjan. **2010a**. Genomic regions involved in productivity of two interspecific poplar families in Europe. 2. Biomass production and its relationships with tree architecture and phenology. **Tree Genetics and Genomes**. 6:533-554.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry, Horticulture)
Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Collecte et analyses des données, rédaction – Collaboration avec l'Université de Gand, Belgique, pour les analyses de génétique
11. Dillen, S.Y., **N. Marron**, M. Sabatti, R. Ceulemans and C. Bastien. **2009**. Relationships among productivity determinants in two poplar hybrid families grown during three years at two contrasting sites. **Tree Physiology**. 29: 975-987.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)
Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Collecte et analyses des données – Participation à l'encadrement de la thèse de Sophie Dillen – Collaboration avec l'INRA d'Orléans

12. **Marron, N., C. Plain, B. Longdoz and D. Epron. 2009.** Seasonal and daily time course of the ¹³C composition of soil CO₂ efflux recorded with a tunable diode laser spectrophotometer (TDLS). **Plant and Soil.** 318: 137-151.
Notoriété à 5 ans excellente (Agronomy, Plant sciences, Soil science)
Contribution : Travaux issu de mon post doctorat à Nancy (2007) – Acquisition et analyses des données avec Caroline Plain, rédaction

13. Dillen, S.Y., V. Storme, **N. Marron**, C. Bastien, M.P.C. Pinel, R. Ceulemans and W. Boerjan. **2009.** Genomic regions involved in productivity of two interspecific poplar families in Europe. **1.** Stem height, circumference and volume. **Tree Genetics and Genomes.** 5: 147-164.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry, Horticulture)
Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Collecte et analyses des données, rédaction – Collaboration avec l’Université de Gand, Belgique, pour les analyses de génétique

14. Dillen, S.Y., **N. Marron**, B. Koch and R. Ceulemans. **2008.** Genetic variation in stomatal traits and carbon isotope discrimination in two hybrid poplar families (*Populus deltoides* × *P. nigra* and *P. deltoides* × *P. trichocarpa*). **Annals of Botany.** 102: 399-407.
Notoriété à 5 ans excellente (Plant sciences, All sciences)
Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Participation à l’analyse des données et à la rédaction

15. **Marron, N., F. Brignolas, F.M. Delmotte and E. Dreyer. 2008.** Modulation of leaf physiology by age and in response to abiotic constraints in young cuttings of two *Populus deltoides* × *P. nigra* genotypes. **Annals of Forest Science.** 65: 404-411.
Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)
Contribution : Travaux menés durant mon doctorat à Orléans – Réalisation de l’expérimentation à Nancy, analyse des données, rédaction

16. Al Afas N., **N. Marron**, I. Laureysens and R. Ceulemans. **2008.** Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). **Forest Ecology and Management.** 255: 1883-1891.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)
Contribution : Participation à l’analyse des données et à la rédaction dans le cadre de la thèse de Najwa Al Afas

17. Al Afas, N., **N. Marron**, C. Zavalloni and R. Ceulemans. **2008.** Growth and production of a short-rotation coppice culture of poplar – IV: Fine root characteristics of five poplar clones. **Biomass & Bioenergy.** 32: 494-502.
Notoriété à 5 ans excellente (Energy and fuels, Agricultural engineering, Biotechnology and applied microbiology)
Contribution : Participation à l’analyse des données et à la rédaction dans le cadre de la thèse de Najwa Al Afas

18. Dillen S.Y., **N. Marron**, C. Bastien, L. Ricciotti, F. Salani, M. Sabatti, M.P.C. Pinel, A.M. Rae, G. Taylor, R. Ceulemans. **2007.** Effects of environment and progeny on biomass estimations of five hybrid poplar families grown at three contrasting sites across Europe. **Forest Ecology and Management.** 252: 12-23.
Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)
Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Participation à l’expérimentation, à l’analyse des données et à la rédaction

19. **Marron N., S.Y. Dillen and R. Ceulemans. 2007.** Leaf determinants of productivity in poplar depend on environmental conditions and genetic background. **Environmental and Experimental Botany.** 61: 103-116.
Notoriété à 5 ans excellente (Plant sciences, Environmental sciences)

Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Participation à l'expérimentation, à l'analyse des données et à la rédaction

20. Al Afas N., N. Marron and R. Ceulemans. 2007. Variability in *Populus* leaf anatomy and morphology in relation to canopy position, biomass production, and varietal taxon. **Annals of Forest Science**. 64: 521-532.

Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)

Contribution : Participation à l'analyse des données et à la rédaction dans le cadre de la thèse de Najwa Al Afas

21. Rae A.M., M.P.C. Pinel, C. Bastien, M. Sabatti, N.R. Street, J. Tucker, C. Dixon, N. Marron, S.Y. Dillen and G. Taylor. 2008. QTL for yield in bioenergy *Populus*: Identifying G×E interactions from growth at three contrasting sites. **Tree Genetics and Genomes**. 4: 97-112.

Notoriété à 5 ans excellente (Forestry, Horticulture)

Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Participation au recueil et à l'analyse des données de terrain

22. Al Afas N., N. Marron and R. Ceulemans. 2006. Clonal variation in stomatal characteristics related to biomass production of twelve poplar (*Populus*) clones in a short rotation coppice culture. **Environmental and Experimental Botany**. 58: 279-286.

Notoriété à 5 ans excellente (Plant sciences, Environmental sciences)

Contribution : Participation à l'analyse des données et à la rédaction dans le cadre de la thèse de Najwa Al Afas

23. Marron N. and R. Ceulemans. 2006. Genetic variation of leaf traits related to productivity in a *Populus deltoides* × *P. nigra* family. **Canadian Journal of Forest Research**. 36: 390-400.

Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Réalisation de l'expérimentation, analyse des données, rédaction

24. Marron N., C. Bastien, M. Sabatti, G. Taylor and R. Ceulemans. 2006b. Plasticity of growth and sylleptic branchiness in two poplar families grown at three sites across Europe. **Tree Physiology**. 26: 935-946.

Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon post doctorat à Anvers – Réalisation de l'expérimentation, analyse des données, rédaction

25. Marron N., S. Maury, C. Rinaldi and F. Brignolas. 2006a. Impact of drought and leaf development stage on enzymatic antioxidant system of two *P. deltoides* × *nigra* clones. **Annals of Forest Science**. 63: 323-327.

Notoriété à 5 ans correcte (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon doctorat à Orléans – Réalisation d'une partie de l'expérimentation dans le cadre du stage de Cécile Rinaldi, rédaction

26. Monclus R., E. Dreyer, F.M. Delmotte, M. Villar, D. Delay, E. Boudouresque, J.-M. Petit, N. Marron, C. Bréchet and F. Brignolas. 2005. Productivity, leaf traits and carbon isotope discrimination in 29 *Populus deltoides* × *P. nigra* clones. **New Phytologist**. 167: 53-62.

Notoriété à 5 ans exceptionnelle (Plant Sciences)

Contribution : Comparaison des données de Romain Monclus en pépinière avec les données obtenues durant en serre durant mon doctorat à Orléans

27. Marron N., M. Villar, E. Dreyer, D. Delay, É. Boudouresque, J.-M. Petit, F.M. Delmotte, J.-M. Guehl and F. Brignolas. 2005. Diversity of leaf traits related to productivity in 31 *Populus deltoides* × *P. nigra* clones. **Tree Physiology**, 25: 425-435.

Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon doctorat à Orléans – Réalisation de l'expérimentation, analyse des données, rédaction

28. **Marron N.**, E. Dreyer, É. Boudouresque, D. Delay, J.-M. Petit, F.M. Delmotte and F. Brignolas. **2003**. Impact of successive drought and re-watering cycles on growth and specific leaf area of two *Populus × canadensis* (Moench) clones, 'Dorskamp' and 'Luisa_Avanzo'. **Tree Physiology**, 23: 1225-1235.

Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon doctorat à Orléans – Réalisation de l'expérimentation, analyse des données, rédaction

29. **Marron N.**, D. Delay, J.-M. Petit, E. Dreyer, G. Kahlem, F.M. Delmotte and F. Brignolas. **2002**. Physiological traits of two *Populus × euramericana* clones, Luisa Avanzo and Dorskamp, during a water stress and re-watering cycle. **Tree Physiology**, 22: 849-858.

Notoriété à 5 ans excellente (Forestry)

Contribution : Travaux menés durant mon DEA à Orléans – Réalisation de l'expérimentation, analyse des données, rédaction

7.3. Chapitres d'ouvrages

1. Gabrielle, B., H. Wernsdorfer, **N. Marron** and C. Deleuze. **2016**. **Biomass feedstocks** (Chapter 2). *In Biomass supply chains for bioenergy and biorefining*. Eds. J.B. Holm-Nielsen and E.A. Ehimen. Woodhead Publishing series in Energy. pp.

Contribution : Rédaction de la partie traitant de la biomasse provenant des systèmes ligneux dédiés (TCR / TCCR)

2. **Marron, N.**, B. Gielen, F. Brignolas, J. Gao, J.D. Johnson, D.F. Karnosky, A. Polle, G. Scarascia-Mugnozza, W.R. Schroeder and R.Ceulemans. **2013**. **Abiotic stresses** (Chapter 7) *In Poplars and Willows: Trees for Society and the environment*. Eds. J.G. Isebrands and J. Richardson. CAB International. pp 337-442.

Contribution : Coordination de la rédaction de ce chapitre – Rédaction des parties sur l'impact de la sécheresse et des fortes températures

3. Dillen, S.Y., O. El Kasmioui, **N. Marron**, C. Calfapietra and R. Ceulemans. **2011b**. **Poplar** (Chapter 14). *In Energy Crops*. Eds. N.G. Halford and A. Karp. Royal Society of Chemistry (SRC). Cambridge, UK. pp 275-300.

Contribution : Rédaction de l'introduction de ce chapitre sur le genre Populus et de la partie sur les limites au développement des TCR à grande échelle

7.4. Articles scientifiques dans des revues nationales à comité de lecture

1. Bastien, J.C., A. Berthelot, F. Brignolas, **N. Marron**, S. Maury, G. Bodineau, J. Gauvin, J. Toillon, E. Dallé, A. Delaunay, I. Le Jan, F. Charnet, P. Maine, D. Merzeau. **2015**. Augmenter le niveau de production de biomasse des cultures ligneuses dédiées ou semi-dédiées – Principaux enseignements du projet SYLVABIOM. **Revue Forestière Française**, 3: 249-262.

2. Epron, D., L. Mareschal, **N. Marron**, J.-P. Laclau, C. Marsden, J. Ranger, Y. Nouvellon, L. Saint-André, J.-P. Bouillet. **2011**. Les enjeux environnementaux des plantations forestières intensives. **Forêt Privée**, 320: 66-74.

3. Bastien, J.-C., **N. Marron**, A. Berthelot, A. Leplus. **2011**. Les systèmes dédiés à la production de bois énergie en France – Travaux de recherche et projets en cours. **Revue Forestière Française**, 63: 217-228.
4. **Marron, N. 2011**. Réduction des coûts et amélioration de l'efficacité de la filière Taillis à courte rotation : le Projet franco-allemand « CREFF ». **Revue Forestière Française**. 63: 229-234.

7.5. Communications dans des congrès et colloques

7.5.1. Communications orales invitées lors de conférences internationales

1. **Marron N. 2015**. Intensification of forest plantations through the use of associated tree nitrogen fixing species.
Conférence franco-chinoise sur l'agro-écologie dans le contexte du changement climatique, **PÉKIN**, Chine, 3-5 juin.
2. **Marron N. 2014**. Success story from the 3rd call: Cost reduction and efficiency improvement of Short-Rotation Coppice (CREFF).
Conference on 10 years ERA-Net Bioenergy – Research for the agri-forestry sector, bio-based industries, energy consumers and for society, **HANOVRE**, Allemagne, 10-11 novembre.
3. **Marron N. 2009**. Efficacités d'utilisation de l'eau et des nutriments des espèces ligneuses à vocation bioénergétique.
Journée technique du FCBA, **PARIS**, France, 16 juin.
4. **Marron N., R. Monclus, S.Y. Dillen, M. Villar, C. Bastien, E. Dreyer, R. Ceulemans and F. Brignolas. 2008**. Diversity of traits associated with biomass production, water-use efficiency and water stress tolerance in the poplar genus.
TREEBREEDDEX, poplar breeding strategies in Europe: lessons from the past and challenges for the next decade, **ORLÉANS**, France, 18-19 septembre.
5. **Marron N., R. Monclus, S.Y. Dillen, R. Ceulemans, E. Dreyer and F. Brignolas. 2007**. Diversity of leaf traits related to productivity and water-use efficiency in poplars.
Refining plant functional classifications for earth system modelling. QUEST PFT-FTI workshop, **ALICANTE**, Espagne, 7-9 février.

7.5.2. Communications lors de symposiums et congrès internationaux

7.5.2.1. Communications orales

1. **Marron, N., R. Monclus, L. Bonhomme, R. Fichot, S. Chamaillard, F. Rasheed, J. Toillon, C. Bastien, E. Dreyer and F. Brignolas. 2014**. Water-use efficiency in hybrid poplars: an overview of 15 years of research.
6th International Poplar Symposium, **VANCOUVER**, Canada, 21-23 juillet.
2. **Marron, N. 2012**. CREFF – Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice.
4th WoodWisdom-Net Research Programme Seminar in collaboration with ERA-Net Bioenergy, **HELSINKI**, Finlande, 7-8 février.
3. Toillon, J., B Rollin, E Dallé, J-C Bastien, F Brignolas and **N Marron. 2011**. Optimization of wood production in bioenergy plantations: 1. through the use of adequate plant material in terms of resource use efficiencies.

Poplar Council of Canada Conference & Annual Meeting 'Poplars and Willows on the Prairies: Traditional Practices meet Innovative Applications', **EDMONTON**, Canada, 18-22 septembre.

4. Plain, C., F. Parent, B. Longdoz, **N. Marron** and D. Epron. **2010**. Daily work with stable isotope spectroscopy instruments in Hesse forest.
BASIN meeting, UC **BERKELEY** (USA), 12 décembre.
5. Epron, D., **N. Marron**, J.-P. Laclau, Y. Nouvellon and J.-P. Bouillet. **2010**. Do we have relevant ecophysiological indicators of efficient water use by planted trees?
VI Workshop de Melhoramento – XLI Reunião Técnico-Científica do PTSM, Adaptação genotípica ao estresse hídrico e térmico, **BOTUCATU**, Brésil, 11 août.
6. Dreyer, E., O. Brendel, D. Le Thiec, **N. Marron** and F. Brignolas. **2010**. Is water use efficiency a useful and relevant for adaptation to local conditions and for breeding? Present knowledge and research needs.
Forest Ecosystem Genomics and Adaptation, San Lorenzo de El Escorial, **MADRID**, Espagne, 9-11 juin.
7. **Marron N.**, C. Plain, B. Longdoz, D. Gérant and D. Epron. **2007**. Temporal variation of ^{13}C signature of soil respiration in a beech forest ecosystem coupled with tunable diode laser spectrophotometer.
Automated Soil Respiration Measurements, **DURHAM**, New Hampshire, USA, 10-12 septembre.
8. **Marron N.**, C. Plain, B. Longdoz and D. Epron. **2007**. Temporal variation of ^{13}C signature of soil respiration in a beech forest ecosystem measured with a tunable diode laser spectrophotometer.
2nd International Workshop on Stable Isotope Ratio Infrared Spectrometry (SIRIS), **FLORENCE**, Italie, 7-8 septembre.
9. Dillen S.Y., **N. Marron** and R. Ceulemans. **2006**. Leaf determinants of productivity in poplar depend on environmental conditions and genetic background.
Population Genetics and Genomics of Forest Trees: from Gene Function to Evolutionary Dynamics and Conservation, **MADRID**, Espagne, 1-6 octobre.
10. Rohde A., T. Ruttink, S.Y. Dillen, **N. Marron**, F. Fabbrini, V. Storme, V. Jorge, A. Rae, I. Paolucci, M. Gaudet, G. Taylor, R. Ceulemans, M. Steenackers, M. Sabatti, C. Bastien and W. Boerjan. **2006**. An integrated approach to bud set in poplar: phenotypes, candidate genes, and QTLs.
Population Genetics and Genomics of Forest Trees: from Gene Function to Evolutionary Dynamics and Conservation, **MADRID**, Espagne, 1-6 octobre.
11. Dillen S.Y., **N. Marron**, N. Al Afas, I. Laureysens and R. Ceulemans. **2006**. Experience and research on short rotation in Flanders.
Biomass for Energy: Challenges for Agriculture. **BRUGES**, Belgique, 25-26 Septembre.
12. **Marron N.**, S.Y. Dillen, C. Bastien, P. Poursat, J. Gauvin, A.M. Rae, M.P.C. Pinel, G. Taylor, M. Sabatti, L. Ricciotti, F. Salani, R. Ceulemans. **2006**. Site conditions affect expression of genetic variability for biomass production and its determinants in five poplar families at three sites in Europe. 1. Direct estimation of growth performance: tree dimensions and biomass production.
4th International Poplar Symposium, **NANKIN**, Chine, 4-9 juin.
13. **Marron N.**, S.Y. Dillen and R. Ceulemans. **2005**. Heterosis and genotype \times Environment interaction in biomass production of two poplar families grown at two contrasting sites in Europe.
14th European biomass conference for energy industry and climate protection, **PARIS**, France, 17-21 octobre.
14. Monclus R., **N. Marron**, F. Brignolas, D. Le Thiec, M. Villar, F.M. Delmotte and E. Dreyer. **2004**. Age effects on functional leaf determinants of water-use efficiency and productivity in poplar clones.

Poplar-Symposium, Understanding poplar: from genes to functions, **GÖTTINGEN**, Allemagne, 13-15 mai.

15. **Marron N.**, M. Villar, E. Dreyer, É. Boudouresque, D. Delay, J.-M. Petit, F.M. Delmotte and F. Brignolas. **2002**. Morphological and physiological foliar traits indicators of growth, productivity and drought tolerance level of 31 *Populus* × *canadensis* clones.
International Poplar Symposium III on Basic and Applied Aspects of Poplar and Willow Biology, **UPPSALA**, Suède, 26-29 août.

7.5.2.2. Posters

1. Gana, C., D. Epron, D. Gérant, P. Maillard, C. Plain, P. Priault, and **N. Marron**. **2014**. How does poplar / black locust mixture influence growth and functioning of each species in a short-rotation plantation?
6th International Poplar Symposium, **VANCOUVER**, Canada, 21-23 juillet.
2. Toillon J., E. Kartner, B. Rollin, E. Dallé, L. Roux, L. BesDeBerc, R. Leray and **N. Marron**. **2011**. Optimization of wood production in bioenergy plantations.
26th New Phytologist Symposium: Bioenergy Trees. **NANCY**, France. 17-19 mai.
3. Dillen, S., R. Monclus, N. Al Afas, E. Dreyer, R. Ceulemans, F. Brignolas and **N. Marron**. **2010**. Wood production determinants in poplar: where are we?
5th International Poplar Symposium, **ORVIETO**, Italie, 20-25 septembre.
4. Gaudet, M., C. Bastien, C. Beritognolo, F. Fabbrini, V. Jorge, **N. Marron**, F. Mecucci, M. Sabatti and G. Scarascia-Mugnozza. **2010**. Comparative mapping analysis and QTLs associated to adaptive traits across European *Populus* native species.
5th International Poplar Symposium, **ORVIETO**, Italie, 20-25 septembre.
5. Toillon, J., B. Rollin, G. Bodineau, J. Gauvin, A. Berthelot, J.-C. Bastien, F. Brignolas and **N. Marron**. **2010**. Wood production determinants in poplar: where are we going?
5th International Poplar Symposium, **ORVIETO**, Italie, 20-25 septembre.
6. **Marron, N.**, B. Rollin, M. Nahm, F. Brodbeck, J. Focke, T. Beimgraben, S. Haid, A. König, L. Eltrop, L. Van den Kerchove and A. Weinreich. **2010**. Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice (CREFF): A German-French ERA-Net project.
18th European Biomass Conference and Exhibition from Research to Industry and Markets, **LYON**, France, 3-7 mai.
7. Ngao, J., C. Damesin, D. Berveiller, N. Chemidlin Prevost Boure, F. Maunoury-Danger, C. Plain, **N. Marron**, C. Bathellier, J. Ghashghaie, M.F. Cotrufo and D. Epron. **2008**. Impact of water stress on sugar contents and soil and trunk CO₂ effluxes in a Mediterranean shrub ecosystem.
Joint European Stable Isotope User Meeting (JESIUM), **PRESQU'ÎLE DE GIENS**, France, 31 août – 5 septembre.
8. Dillen, S.Y., **N. Marron**, B. Koch and R. Ceulemans. **2008**. Can stomatal traits serve as indirect selection criteria for clonal discrimination of more performing and water-use efficient poplar hybrids?
16th European Biomass Conference and Exhibition from Research to Industry and Markets, **VALENCE**, Espagne, 2-6 juin.
9. **Marron N.**, C. Plain, B. Longdoz and D. Epron. **2007**. Temporal variation of ¹³C signature of soil respiration in a beech forest ecosystem measured with a tunable diode laser spectrophotometer.
American Geophysical Union (AGU), Fall Meeting, **SAN FRANCISCO**, Californie, USA, 10-14 décembre.

10. **Marron N.**, C. Plain, B. Longdoz and D. Epron. **2007**. Temporal variation of ¹³C signature of soil respiration in a beech forest ecosystem measured with a tunable diode laser spectrophotometer. The Role of Soils in the Terrestrial Carbon Balance, Final Conference of the ESF Programme, **PONT-À-MOUSSON**, France, 20-22 novembre.
11. Dillen, S.Y., **N. Marron**, C. Bastien, L. Ricciotti, F. Salani, M. Sabatti, M.P.C. Pinel, A.M. Rae, G. Taylor and R. Ceulemans. **2007**. Effects of environment and progeny on biomass estimations of five hybrid poplar families grown at three contrasting sites across Europe. 15th European Biomass Conference and Exhibition from Research to Industry and Markets, **BERLIN**, Allemagne, 7-11 mai.
12. Al Afas, N., **N. Marron** and R. Ceulemans. **2006**. Dynamics of biomass production in a poplar plantation over 11 years and three rotations. Biomass for Energy: Challenges for Agriculture. **BRUGES**, Belgique, 25-26 Septembre.
13. Dillen S.Y., **N. Marron**, C. Bastien, P. Poursat, J. Gauvin, M. Sabatti, L. Ricciotti, F. Salani, A.M. Rae, M.P.C. Pinel, N. Street, G. Taylor and R. Ceulemans. **2006**. Site conditions affect expression of genetic variability for biomass production and its determinants in five poplar families at three sites in Europe. 2. Indirect estimation of growth performance: phenology, ramification and resprouting. 4th International Poplar Symposium, **NANKIN**, Chine, 4-9 juin.
14. Rae A.M., M.P.C. Pinel, C. Bastien, M. Sabatti, N.R. Street, J. Tucker, C. Dixon, **N. Marron**, S.Y. Dillen and G. Taylor. **2006**. QTL for yield in bioenergy *Populus*: identifying G×E interactions for growth at three contrasting sites. 4th International Poplar Symposium, **NANKIN**, Chine, 4-9 juin.
15. Dillen S.Y., **N. Marron** and R. Ceulemans. **2005**. Environmental influence on the aboveground biomass production of two poplar families grown in Central France and Northern Italy. 14th European biomass conference for energy industry and climate protection, **PARIS**, France, 17-21 octobre.
16. **Marron N.** and R. Ceulemans. **2004**. Heterosis and genotype × environment interaction of two poplar pedigrees grown in three contrasting environments. 12th New Phytologist Symposium. Functional genomics of environmental adaptation in *Populus*, **GATLINBURG**, Tennessee, USA, 10-13 octobre.
Lors du symposium, ce poster a été récompensé par le « Best poster award ».
17. **Marron N.**, E. Dreyer, É. Boudouresque, D. Delay, J.-M. Petit, F.M. Delmotte and F. Brignolas. **2002**. Impact of 1 to 3 successive water-stress and re-watering cycles on foliar growth and specific leaf area of two *Populus × euramericana* clones, ‘Luisa_Avanzo’ and ‘Dorskamp’. 13th Congress of the Federation of European Societies of Plant Physiology, **HERAKLION**, Grèce, 1-6 septembre.

7.5.3. Communications lors de réunions plénières de projets internationaux

1. **Marron N.**, E. Dallé, M. Nahm, F. Brodbeck, J. Focke, T. Beimgraben, S. Haid, L. Eltrop, L. Van den Kerchove and A. Weinreich. **2012**. Projet ERA-Net „Réduction de coûts et amélioration de l’efficacité des taillis à courte et très courte rotation“ / ERA-Net Projekt „Kostenreduktion und Effizienzsteigerung von Kurzumtriebs-bewirtschaftung“. Réunion de clôture du projet ERA-Net Bioenergy CREFF, **KRAICHTAL**, Allemagne, 4 avril.
2. **Marron N.**, M. Nahm, J. Focke, S. Haid and L. Van den Kerchove. **2010**. Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice (CREFF) – One year later... CREFF ERA-Net Bioenergy annual seminar, **ROTTENBURG**, Allemagne, 10-11 février.

3. **Marron N.**, A. Weinreich, F. Brodbeck, T. Beimgraben and A. König. **2009**. Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice (CREFF) - on small field sizes and under unfavorable site conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain.
CREFF ERA-Net Bioenergy kick-off meeting, **NANCY**, France, 4-6 février.
4. **Marron N.**, A. Weinreich, F. Brodbeck, T. Beimgraben and A. König. **2008**. Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice (CREFF) - on small field sizes and under unfavorable site conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain.
ERA-NET Bioenergy kick-off meeting, **POTSDAM**, Allemagne, 9 septembre.
5. **Marron N.**, S.Y. Dillen, R. Ceulemans, E. Dreyer and F. Brignolas. **2008**. Genetic variability in productivity and water-use efficiency within the *Populus* genus.
Réunion annuelle du Projet franco-allemand Tournesol (financement Egide). Variabilité génétique de productivité et d'efficience d'utilisation de l'eau au sein du genre *Populus*, **ANVERS**, Belgique, 9-10 juin.
6. Dillen S.Y., **N. Marron** and R. Ceulemans. **2006**. Bud set of the *Populus deltoides* × *P. nigra* and *P. deltoides* × *P. trichocarpa* in Italy.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **VENISE**, Italie, 10-12 mai.
7. **Marron N.**, S.Y. Dillen and R. Ceulemans. **2006**. Final report: suggestions from Antwerp.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **VENISE**, Italie, 10-12 mai.
8. **Marron N.**, S.Y. Dillen, A.M. Rae, C. Bastien, M. Sabatti and R. Ceulemans. **2005**. Retrospective of 30 months of work within the workpackage 2 – First comparison between the five pedigrees.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **NANCY**, France, 1-2 décembre.
9. **Marron N.**, S.Y. Dillen, C. Bastien, M. Sabatti, A.M. Rae and R. ceulemans. **2005**. Management of the physiological data – Multi-site and multi-pedigree analysis.
Réunion de travail du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **VITERBO**, Italie, 3-4 novembre.
10. **Marron N.** and R. Ceulemans. **2005**. Phenology of the *Populus deltoides* × *nigra* and *P. deltoides* × *trichocarpa* pedigrees across Europe.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **UMEÅ**, Suède, 19-23 février.
11. Dillen S.Y., **N. Marron** and R. Ceulemans. **2005**. Harvest protocol during winter 2004-2005.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **UMEÅ**, Suède, 19-23 février.
12. **Marron N.** and R. Ceulemans. **2004**. Workpackage 2: Protocol reminder.
Belgium pedigrees growth across Europe.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **ORLÉANS**, France, 20-22 septembre.
13. **Marron N.** and R. Ceulemans. **2004**. Workpackage 2: Antwerp University 2003-2004 contribution.
Réunion semestrielle du Projet Européen POPYOMICs (QLK5-CT-2002-00953), **GAND**, Belgique, 18-20 février.

14. **Marron N.**, M. Villar, E. Dreyer, D. Delay, É. Boudouresque, J.-M. Petit, F. M. Delmotte, J.-M. Guehl and F. Brignolas. **2003**. Functional diversity among *Populus × canadensis* cultivars. Réunion annuelle du Projet Européen Establish (QLK-CT-2000-01377), **NANCY**, France, 23-25 octobre.

7.5.4. Communications lors de conférences nationales

7.5.4.1. Communications orales

1. Gana, C., C. Plain, P. Priault, D. Gérant, D. Epron et **N. Marron**. **2013**. Impact d'un mélange d'espèces fixatrice / non fixatrice d'azote (robinier / peuplier) sur l'allocation et la dynamique du carbone d'une plantation à courte rotation. Séminaire FORGECO. Forêt et écosystèmes cultivés : vers une intensification écologique ? **GRENOBLE**, France, 3-4 décembre.
2. Toillon, J., F. Brignolas et **N. Marron**. **2013**. Variabilité génétique et plasticité de l'efficacité d'utilisation des ressources chez des Salicacées cultivées en TCR et TTCR. Séminaire de restitution des projets ANR Bioénergies EMERGE et SYLVABIOM, **CHAMPENOUX**, 19 septembre.
3. Gana, C., **N. Marron**, C. Plain et D. Epron. **2013**. Impact d'un mélange d'espèces fixatrice / non fixatrice d'azote (*Robinia pseudoacacia* / *Populus × euramericana*) sur l'allocation et la dynamique du carbone d'une plantation à courte rotation. Les ateliers du Regefor 2013 : la gestion de la fertilité des sols forestiers est-elle à un tournant ? **CHAMPENOUX**, France, 10-12 juin.
4. Toillon, J., F. Brignolas et **N. Marron**. **2011**. Variabilité et plasticité de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) et relations avec la productivité chez les saules. 5^{ème} journée jeune chercheur, Société Française des isotopes stables (SFIS), **BREST**, France. 12-14 octobre.
5. Bastien J.C., A. Berthelot, **N. Marron**, A. Leplus. **2009**. Les systèmes dédiés à la production de bois énergie. Les ateliers du Regefor 2009 : la forêt face aux défis énergétiques, **CHAMPENOUX**, France, 8-10 juin.
6. **Marron N.** **2009**. Réduction des coûts et amélioration de l'efficacité de la filière TCR – Projet franco-allemand issu de l'ERA-Net Bioénergie. Les ateliers du Regefor 2009 : la forêt face aux défis énergétiques, **CHAMPENOUX**, France, 8-10 juin.

7.5.4.2. Posters

1. Clivot H., **N. Marron**, E. Dallé, B. Amiaud, A. Laflotte et S. Piutti. **2015**. Mise en place d'un dispositif atelier et suivi temporel de l'effet de pratiques agroforestières sur le fonctionnement microbien des sols. Journée d'échange Agroforesteries tempérées, Agroforesteries : quand recherche et terrain collaborent, **MARCIAC**, France, 29 juillet – 1^{er} août.
2. Laamiri R., Z. Menana, **N. Marron**, J. Ruelle, L.S. Koutika, D. Epron, D. Gérant et N. Brosse. **2015**. Wood composition of eucalyptus and poplar from pure and mixed plantations.

Les ateliers du Regefor 2015 : les innovations dans les usages du bois interpellent la gestion forestière, **CHAMPENOUX**, France, 15-17 juin.

3. Toillon J., F. Brignolas et **N. Marron**. **2010**. Productivité, efficacités d'utilisation de l'eau et des nutriments chez le peuplier, le saule et le robinier en fonction du système de culture et du contexte pédoclimatique.
Séminaire ANR - ADEME : « Bioénergies de 3^{ème} génération » - Forum scientifique du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) et du programme Bioénergies (BIO-E), **PARIS**, France, 21-22 janvier.
4. Berthelot A., J.C. Bastien, **N. Marron**, F. Brignolas et F. Charnet. **2010**. Le réseau d'essais du projet SYLVABIOM.
Séminaire ANR - ADEME : « Bioénergies de 3^{ème} génération » - Forum scientifique du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) et du programme Bioénergies (BIO-E), **PARIS**, France, 21-22 janvier.
5. **Marron N.**, A. Berthelot, F. Brignolas, F. Charnet et J.C. Bastien. **2009**. Nouveaux concepts de cultures ligneuses pour la production de biomasse à des fins bioénergétiques – Le projet SYLVABIOM.
Séminaire ANR - ADEME : « Bioénergies de 3^{ème} génération » - Forum scientifique du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) et du programme Bioénergies (BIO-E), **PARIS**, France, 3-4 février.
6. **Marron N.**, C. Plain, B. Longdoz et D. Epron. **2007**. A new technique to measure the isotopic composition of carbon dioxide respired by plants and soils.
IX^{èmes} Journées d'Ecologie Fonctionnelle, **BIARRITZ**, France, 19-22 mars.
7. Brignolas F., **N. Marron**, R. Monclus, L. Bonhomme, M. Villar, E. Dreyer, D. Meese, D. Morabito et C. Barbaroux. **2005**. Diversité de l'efficacité de l'utilisation de l'eau chez les peupliers euraméricains.
18^{ème} Colloque Biotechnocentre, **MUR-DE-SOLOGNE** (Loir et Cher), France, 3-4 novembre.
8. Dillen S.Y., **N. Marron** et R. Ceulemans. **2005**. Comparison of growth performance of two poplar pedigrees grown at three contrasting sites across Europe.
Starters in het bosonderzoek (Débutants dans la recherche forestière), **BRUXELLES**, Belgique, 22 mars.
9. **Marron N.**, F. Brignolas et E. Dreyer. **2003**. Impact of leaf age on tolerance to photo-oxidations in two *Populus x euramericana* clones.
2^{èmes} Rencontres d'Écophysiologie de l'Arbre, **LA ROCHELLE**, France, 8-12 décembre.
10. **Marron N.**, F. Brignolas, D. Delay, J.-M. Petit, F.M. Delmotte et E. Dreyer. **2002**. Impact de l'âge des feuilles sur la thermotolérance de deux clones de peuplier euraméricain, 'Luisa_Avanzo' et 'Dorskamp'.
15^{ème} Colloque Biotechnocentre, **SEILLAC** (Loir et Cher), France, 7-8 novembre.

7.5.5. Communications lors de séminaires

1. **Marron, N. 2013**. Les taillis à courte rotation vont-ils sauver le monde ?
Séminaire inter-unités de l'INRA de Lorraine, **CHAMPENOUX**, 22 novembre.
2. **Marron, N. 2012**. Les taillis à courte rotation vont-ils sauver le monde ?
Journée des retraités INRA, **CHAMPENOUX**, 12 octobre.
3. **Marron, N. 2012**. Réduction des coûts et amélioration de la filière TCR : bilan du projet ERA-Net

- Bioenergy CREFF.
Séminaire de Centre, INRA Nancy, **CHAMPENOUX**, 14 juin.
4. Toillon, J., B. Rollin, E. Dallé, J.-C. Bastien, F. Brignolas et **N. Marron**. 2011. Optimization of wood production in bioenergy plantations.
Séminaire de l'Université d'Anvers, **ANVERS**, Belgique, 4 novembre.
 5. Toillon, J., F. Brignolas et **N. Marron**. 2011. Relations entre production de biomasse et efficacité d'utilisation des ressources chez le saule (*Salix* spp L.).
Séminaire de Centre, INRA Nancy, **CHAMPENOUX**, 20 octobre.
 6. Toillon, J., F. Brignolas et **N. Marron**. 2011. Variabilité et plasticité de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) et de l'azote (NUE) et relation avec la biomasse chez les saules.
Réunion de travail Equipe ARCHE, Université d'Orléans, **ORLÉANS**, 20 mai.
 7. Toillon, J., F. Brignolas et **N. Marron**. 2011. Variabilité génétique et liens entre productivité, WUE et NUE chez le peuplier, le saule et le robinier en réponse à l'environnement.
Séminaire des doctorants du département EFPA, **LYON**, France. 10-12 janvier.
 8. **Marron N.** 2009. Les taillis à courte et très courte rotation à EEF.
Conférence Biomasse – Biomasse-énergie – Les projets du centre INRA de Nancy, **CHAMPENOUX**, France, 27 janvier.
 9. **Marron N.** 2008. Les taillis à courte et très courte rotation à l'INRA de Nancy.
Journée d'information des agriculteurs de Meuse, Chambre d'Agriculture de Meuse, **VILLERS-LE-SEC**, France, 17 décembre.
 10. **Marron N.** 2008. Evaluation des taillis à courte rotation pour la filière bioénergie.
Séminaire de l'UMR Écologie et Écophysiologie Forestières, **NANCY**, France, 26 juin.
 11. **Marron N.** 2008. Evaluation des taillis à courte rotation pour la filière bioénergie : les projets de l'INRA de Nancy.
Journée d'information des agriculteurs de Meurthe-et-Moselle, Chambre d'Agriculture de Meurthe-et-Moselle, **NANCY**, France, 13 février.
 12. **Marron N.**, R. Monclus, S.Y. Dillen, R. Ceulemans, E. Dreyer et F. Brignolas. 2007. Variabilité des traits foliaires en relation avec la productivité et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez le peuplier.
IX^{èmes} Journées d'Ecologie Fonctionnelle, **BIARRITZ**, France, 19-22 mars.
 13. **Marron N.** 2007. Comprendre et améliorer la productivité du peuplier en associant physiologie à génétique : le projet Européen POPYOMICS.
Séminaire de l'UMR Écologie et Écophysiologie Forestières, **NANCY**, France, 27 mars.
 14. **Marron N.** 2006. Déterminisme écophysiologique et génétique de la production de bois chez le peuplier.
Séminaire du laboratoire d'Écophysiologie Végétale et Agronomie (EVA) de l'Université de Caen, **CAEN**, France, 10 mai.
 15. **Marron N.** 2006. Écophysiologie de la réponse à la sécheresse et de la productivité du peuplier.
Séminaire de l'équipe d'Agrophysiologie des Plantes Annuelles Cultivées (APAC) de l'Unité d'Agronomie du centre INRA de Clermont-Ferrand, **CLERMONT-FERRAND**, France, 3 février.
 16. **Marron N.** 2005. Poplar ecophysiology. **Part 2**: Leaf evolution from initiation to senescence. **Part 3**: Drought influence.
Séminaire du groupe de recherche « Plant and Vegetation Ecology » (PLECO), Université d'Anvers, **ANVERS**, Belgique, 17 mars.

17. **Marron N. 2004.** Quantitative genetic of productivity determinants in poplar.
Séminaire du groupe de recherche « Plant and Vegetation Ecology » (PLECO), Université d'Anvers, ANVERS, Belgique, 1^{er} octobre.
18. **Marron N. 2004.** Poplar ecophysiology. **Part 1:** The private life of poplar.
Séminaire du groupe de recherche « Plant and Vegetation Ecology » (PLECO), Université d'Anvers, ANVERS, Belgique, 25 mai.
19. **Marron N., M. Villar, E. Dreyer, D. Delay, É. Boudouresque, J.-M. Petit, F.M. Delmotte, J.-M. Guehl et F. Brignolas. 2003.** Caractères foliaires de productivité et de discrimination isotopique vis-à-vis du carbone chez 31 cultivars de *P. × canadensis* (Moench).
Séminaire ECOGENE – Approches du fonctionnement des végétaux en relation avec leur environnement combinant écophysologie, génétique et génomique, VERSAILLES, France, 27-28 novembre.
20. **Marron N., M. Villar, E. Dreyer, D. Delay, É. Boudouresque, J.-M. Petit, F.M. Delmotte, J.-M. Guehl et F. Brignolas. 2003.** La structure des feuilles comme indicateur de la productivité et de la discrimination isotopique du carbone chez les peupliers euraméricains.
V^{èmes} Journées d'Écologie Fonctionnelle, NANCY, France, 12-14 mars.
21. **Marron N. 2002.** Croissance comparée des boutures de deux clones de peuplier euraméricain connus pour leur différence de résistance à la sécheresse.
7^{ème} Colloque Sciences en Sologne, ORLÉANS, France, 29-30 mai.
22. **Marron N. 2002.** Écophysologie comparée de deux clones de peuplier euraméricain, 'Dorskamp' et 'Luisa_Avanzo', en réponse à la sécheresse.
Séminaires INRA NANCY, France, 8 février / ORLÉANS, France, 13 mai.
23. **Marron N. 2001.** Stratégies de résistance à la sécheresse de deux clones de peuplier.
6^{ème} Colloque Sciences en Sologne, ORLÉANS, France, 14-15 juin.

7.6. Rapports finaux de projets de recherche

1. Rapport final du **projet ANR Systerra Intens&Fix** « *Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières. Modélisation biophysique et évaluation socio-économique de l'association d'espèces fixatrices d'azote* ». **2011-2015.** J.P. Bouillet, J. Wery, D. Epron, C. Plassard, M. Dulcire
2. Rapport final du **projet ANR Bioénergies SYLVABIOM** « *Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques* ». **2008-2013.** J.C. Bastien, **N. Marron**, A. Berthelot, F. Brignolas, S. Maury, F. Charnet, D. Merzeau
3. Rapport final du **projet franco-allemand ERA-Net Bioenergy CREFF** “*Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice on small field sizes and under unfavorable conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain*”. **2009-2012.** **N. Marron**, T. Beimgraben, L. Bes De Berc, F. Brodbeck, L. Eltrop, J. Focke, S. Haid, M. Härdtlein, M. Nahm, S. Pelz, U.H. Sauter, L. Van den Kerchove, A. Weinreich
4. Rapport final du **projet européen POPYOMICS** (QLK5-CT-2002-00953) “*Linking physiology, molecular genetics and genomics in Populus to understand yield and quality for biomass and timber production across Europe*”. **2002-2006.** R. Ceulemans, A.M. Rae, N.R. Street, M.P.C. Pinel, **N. Marron**, S.Y. Dillen, L. Ricciotti, F. Salani, G. Taylor, M.Sabatti, G. Scarascia-Mugnozza, C. Bastien

7.7. Documents destinés à des utilisateurs de la recherche

Guide technique taillis à courte et très courte rotations (TCR-TTCR) (en français et en anglais), issu du **projet franco-allemand ERA-Net Bioenergy CREFF** “*Cost reduction and efficiency improvement of Short Rotation Coppice on small field sizes and under unfavorable conditions by focusing on high product quality and a product-oriented cooperative value chain*”. **2009-2012.**

8. Références non issues de ma propre bibliographie

- Adegbidi H.G., Volk T.A., White E.H., Abrahamson L.P., Briggs R.D., Bickelhaupt D.H.** 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. *Biomass and Bioenergy*. 20: 399-411.
- Austin M.T., Brewbaker J.L., Wheeler R., Fownes J.H.** 1997. Short-rotation biomass trial of mixed and pure stands of nitrogen-fixing trees and *Eucalyptus grandis*. *Australian Forestry*. 60: 161-168.
- Baker D.D., Du D., Fried M.** 1994. Influence of combined nitrogen level and *Eucalyptus* competition on dinitrogen fixation in nodulated *Casuarina*. *Protoplasma*. 183: 24-28.
- Balásus A., Bischoff W.A., Schwarz A., Scholz V., Kern J.** 2012. Nitrogen fluxes during the initial stage of willows and poplars in short-rotation coppices. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 175: 729-738.
- Balatinecz J., Mertens P., De Boever L., Yukun H., Jin J., van Acker J.** 2013. Properties, processing and utilization (Chapter 10). *In Poplars and Willows: Trees for Society and the environment*. Eds. J.G. Isebrands and J. Richardson. CAB International. pp 527-561.
- Bauhus J., van Winden A.P., Nicotra A.B.** 2004. Aboveground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research*. 34: 686-694.
- Beale C.V., Long S.P.** 1997. Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C-4-grasses *Miscanthus × giganteus* and *Spartina cynosuroides*. *Biomass and Bioenergy*. 12: 419-428.
- Berthelot A., Ranger J., Gelhaye D.** 2000. Nutrient uptake and immobilization in a short-rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *Forest Ecology and Management*. 128: 167-179.
- Bi H., Turvey N.D.** 1994. Interspecific competition between seedlings of *Pinus radiata*, *Eucalyptus regnans* and *Acacia melanoxylon*. *Australian Journal of Botany*. 42: 61-70.
- Binkley D.** 1983. Ecosystem production in Douglas-fir plantations: Interaction of red alder and site fertility. *Forest Ecology and Management*. 5: 215-227.
- Binkley D., Cromack Jr. K., Baker D.D.** 1994. Nitrogen fixation by red alder: Biology, rates, and controls. *In Biology and management of red alder*. Ed. Hibbs D.E. *et al.* pp. 57-72, Oregon State Univ. Press, Corvallis.
- Binkley D., Stape J.L., Ryan M.G.** 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*. 193: 5-16.
- Binkley D., Dunkin K.A., DeBell D., Ryan M.G.** 1992. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albizia* in Hawaii. *Forest Science*. 38: 393-408.
- Bonhomme L., Barbaroux C., Monclus R., Morabito D., Berthelot A., Villar M., Dreyer E., Brignolas F.** 2008. Genetic variation in productivity, leaf traits and carbon isotope discrimination in hybrid poplars cultivated on contrasting sites. *Annals of Forest Science*. 65: 503-511.
- Brignolas F., Paillassa E., Fichot R.** 2012. Vers de nouveaux critères de sélection pour la populiculture dans un contexte de climat changeant. *Forêt-entreprise*. 204: 59-64.
- Bristow M., Vanclay J., Brooks L., Hunt M.** 2006. Growth and species interactions of *Eucalyptus pellita* in a mixed and monoculture plantation in the humid tropics of north Queensland. *Forest Ecology and Management*. 233: 338-343.
- Brugnoli E., Farquhar G.D.** 2000. Photosynthesis fractionation of carbon isotopes. *In Photosynthesis: physiology and metabolism*. Eds. R.C. Leegood, T.D. Sharkey, S. Von Caemmerer. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers. pp 399-434.
- Burgess P.J., Incoll L.D., Corry D.T., Beaton A., Hart B.J.** 2005. Poplar (*Populus* spp) growth and crop yields in a silvoarable experiment at three lowland sites in England. *Agroforestry Systems*. 63: 157-169.
- Calfapietra C., De Angelis P., Gielen B., Lukac M., Moscatelli M.C., Avino G., Lagomarsino A., Polle A., Ceulemans R., Mugnozza G.S., Hoosbeek M.R., Cotrufo M.F.** 2007. Increased nitrogen-use efficiency of a short-rotation poplar plantation in elevated CO₂ concentration. *Tree Physiology*. 27: 1153-1163.
- Cleveland C.C., Townsend A.R., Schimel D.S., Fisher H., Howarth R.W., Hedin L.O., Perakis S.S., Latty E.F., Von Fischer J.C., Elseroad A., Wasson M.F.** 1999. Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*. 13: 623-645.
- Coomes D.A., Grubb P.J.** 2000. Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. *Ecological Monographs*. 70: 171-207.

- Coté B., Camire C.** 1984. Growth, nitrogen accumulation, and symbiotic dinitrogen fixation in pure and mixed plantings of hybrid poplar and black alder. *Plant and Soil*. 78: 209-220.
- DeBell D.S., Radwan M.A.** 1979. Growth and nitrogen relations of coppiced black cottonwood and red alder in pure and mixed plantings. *Botanical Gazette*. 140: S97-S101.
- DeBell D.S., Whitesell C.D., Schubert T.H.** 1985. Mixed plantations of *Eucalyptus* and leguminous trees enhance biomass production. USDA Forest Service Research Paper. PSW-175.
- DesRochers A., van den Driessche R., Thomas B.R.** 2006. NPK fertilization at planting of three hybrid poplar clones in the boreal region of Alberta. *Forest Ecology and Management*. 232: 216-225.
- Dupraz C., Liagre F.** 2011. Agroforesterie, des arbres et des cultures. 2^{ème} éditions. Editions France Agricole. 432 p.
- Efhami Sisi D., Karimi A.N., Pourtahmasi K., Taghiyari H.R.** 2012. The effects of agroforestry practices on fiber attributes in *Populus nigra* var. *betulifolia*. *Trees*. 26: 435-441.
- Eichhorn M.P., Paris P., Herzog F., Incoll L.D., Liagre F., Mantzanas K., Mayus M., Moreno G., Papanastasis V.P., Pilbeam D.J., Pisanelli A., Dupraz C.** 2006. Silvoarable systems in Europe-past, present and future prospects. *Agroforestry Systems*. 67: 29-50.
- Eppler U., Petersen J.E., Couturier C.** 2007. Short rotation forestry, short rotation coppice and energy grasses in the European Union: Agro-environmental aspects, present used and perspectives. EEA Specific Contract n° 2 3604/B2006/EEA.52793. Deliverable Task 2b: Background report on current SRF/SRC cropping patterns in Europe. pp 95-162.
- Epron D., Nouvellon Y., Mareschal L., Moreira R.M., Koutika L.-S., Geneste B., Delgado-Rojas J.S., Laclau J.-P., Sola G., Gonçalves J.L.M., Bouillet J.-P.** 2013. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia* stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. *Forest Ecology and Management*. 301: 102-111.
- Farquhar G.D., Ehleringer J.R., Hubick K.T.** 1989. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*. 40: 503-537.
- Forrester D.I.** 2004. Mixed-species plantation of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing trees. Ph.D. Thesis. The Australian National University, Canberra. 214 p.
- Forrester D.I., Bauhus J., Khanna P.K.** 2004. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *Forest Ecology and Management*. 193: 81-95.
- Forrester D.I., Bauhus J., Cowie A.L., Vanclay J.K.** 2006a. Mixed-species plantations of eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review. *Forest Ecology and Management*. 233: 211-230.
- Forrester D.I., Cowie A.L., Bauhus J., Wood J., Forrester R.I.** 2006b. Effects of changing the supply of nitrogen and phosphorus on growth and interactions between *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* in a pot trial. *Plant and Soil*. 280: 267-277.
- Gana C.** 2014. Introduction d'espèces fixatrices d'azote au sein de plantations à courte rotation. *Revue Forestière Française*. 4: 599-603.
- Gelhay D., Ranger J., Bonneau M.** 1997. Biomass and nutrient content of a short rotation coppice of Beaupre poplars planted on a non-alluvial acidic soil improved by fertilization. *Annales Des Sciences Forestieres*. 54: 649-665.
- Graves A.R., Burgess P.J., Palma J.H.N., Herzog F., Moreno G., Bertomeu M., Dupraz C., Liagre F., Keesman K., van der Werf W., Koeffeman de Nooy A., van den Briel J.P.** 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*. 29: 434-449.
- Graves A.R., Burgess P.J., Palma J., Keesman K.J., van der Werf W., Dupraz C., van Keulen H., Herzog F., Mayus M.** 2010. Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling*. 221: 1744-1756.
- Grünewald H., Böhm C., Quinkenstein A., Grundmann P., Eberts J., von Wühlisch G.** 2009. *Robinia pseudoacacia* L.: A lesser known tree species for biomass production. *Bioenergy Research*. 2: 123-133.
- Heilman P., Norby R.J.** 1998. Nutrient cycling and fertility management in temperate short rotation forest systems. *Biomass and Bioenergy*. 14: 361-370.
- Herbert M.A.** 1996. Fertilizers and *Eucalyptus* plantations in South Africa. In *Nutrition of Eucalypts*. Eds. P.M. Attiwill and M.A. Adams. CSIRO, Australia. pp 303-325.

- Jørgensen U.** 1997. Genotypic variation in dry matter accumulation and content of N, K and Cl in *Miscanthus* in Denmark. *Biomass and Bioenergy*. 12: 155-169.
- Jørgensen U., Schelde K.** 2001. Energy crop water and nutrient use efficiency. Prepared for the International Energy Agency Bioenergy Task. 17 p.
- Jug A., Hofmann-Schielle C., Makeschin F., Rehfuss K.E.** 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. II. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. *Forest Ecology and Management*. 121: 67-83.
- Keeling C.D.** 1958. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 13: 322-334.
- King J.S., Ceulemans R., Albaugh J.M., Dillen S.Y., Domec J.C., Fichot R., Fischer M., Leggett Z., Sucre E., Trnka M., Zenone T.** 2013. The challenge of lignocellulosic bioenergy in a water-limited world. *Bioscience*. 63: 102-117.
- Koupar S.A.M., Hosseini S.M., Tabari M., Modirrahmati A., Golchin F.H.** 2011. Effects of pure and mixed plantations of *Populus deltoides* with *Alnus glutinosa* on growth and soil properties: A case study from Foman Region, Iran. *African Journal of Agricultural Research*. 6: 5261-5265.
- Laclau J.P., Bouillet J.P., Ranger J.** 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*. 128: 181-196.
- Larchevêque M., DesRochers A., Larocque G.** 2011. Comparison of manure compost and mineral fertilizer for hybrid poplar plantation establishment on boreal heavy clay soils. *Annals of Forest Science*. 68: 849-860.
- Le Tacon F., Bouchard D., Garbaye J.** 1988. Augmentation de la croissance initiale du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) par épandage de boues de station d'épuration urbaine et plantation intercalaire d'aulne blanc (*Alnus incana* (L.) Moench.). *Revue Forestière Française*. 2: 117-125.
- Li H., Li M., Luo J., Cao X., Qu L., Gai Y., Jiang X., Liu T., Bai H., Janz D., Polle A., Peng C., Luo Z.B.** 2012. N-fertilization has different effects on the growth, carbon and nitrogen physiology, and wood properties of slow- and fast-growing *Populus* species. *Journal of Experimental Botany*. 63: 6173-6185.
- Little K.M., Schumann A.W., Noble A.D.** 2002. Performance of a *Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* hybrid clone as influenced by a cowpea cover-crop. *Forest Ecology and Management*. 168: 43-52.
- Lodhiyal L.S., Lodhiyal N.** 1997. Nutrient cycling and nutrient use efficiency in short rotation, high density central Himalayan Tarai poplar plantations. *Annals of Botany*. 79: 517-527.
- Lodhiyal L.S., Singh R.P., Singh S.P.** 1995. Structure and function of an age series of poplar plantations in central Himalaya. 2. Nutrient dynamics. *Annals of Botany*. 76: 201-210.
- Luken J.O., Fonda R.W.** 1983. Nitrogen accumulation in a chronosequence of red alder communities along the Hoh River, Olympic National Park, Washington. *Canadian Journal of Forest Research*. 13: 1228-1237.
- Lundgren B.** 1982. Introduction [Editorial]. *Agroforestry Systems*. 1: 3-6.
- Mead R., Willey R.W.** 1980. "The concept of land equivalent ratio" and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*. 16: 217-228.
- Merino A., Balboa M.A., Soalleiro R.R., Gonzalez J.G.A.** 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management*. 207: 325-339.
- Monclus R., Dreyer E., Villar M., Delmotte F.M., Delay D., Petit J.M., Barbaroux C., Le Thiec D., Bréchet C., Brignolas F.** 2006. Impact of drought on productivity and water-use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *P. nigra*. *New Phytologist*. 169: 765-777.
- Moraes de Jesus R., Brouard J.S.** 1989. *Eucalyptus*-*Leucaena* mixture experiment. I. Growth and yield. *International Tree Crops Journal*. 5: 257-269.
- Moukoui J., Farrell R.E., Rees K.J.C.V., Hynes R.K., Bélanger N.** 2012. Intercropping *Caragana arborescens* with *Salix miyabeana* to satisfy nitrogen demand and maximize growth. *BioEnergy Research*. 5: 719-732.
- Parrotta J.A.** 1999. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*. 124: 45-77.
- Peoples M.B., Faizah A.W., Rerkasem B., Herridge D.F.** 1989. Methods for evaluating nitrogen fixation by nodulated legumes in the field. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. 76 p.

- Powell G.W., Bork E.W.** 2004. Competition and facilitation in mixtures of aspen, alfalfa, and marsh reedgrass. *Canadian Journal of Forest Research*. 34: 1858-1869.
- Richards A.E., Forrester D.I., Bauhus J., Scherer-Lorenzen M.** 2010. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology*. 30: 1192-1208.
- Richardson J., Isebrands J.G., Ball J.B.** 2013. Ecology and physiology of poplars and willows (Chapter 3). *In Poplars and Willows: Trees for Society and the environment*. Eds. J.G. Isebrands and J. Richardson. CAB International. pp 92-123.
- Rivest D., Cogliastro A., Bradley R.L., Olivier A.** 2010. Intercropping hybrid poplar with soybean increases soil microbial biomass, mineral N supply and tree growth. *Agroforestry Systems*. 80: 33-40.
- Safou-Matondo R., Deleporte P., Laclau J.P., Bouillet J.P.** 2005. Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. *Forest Ecology and Management*. 210: 193-204.
- Samraj P., Chinnamani S., Haldorai B.** 1977. Natural versus man-made forest in Nilgiris with special reference to run-off, soil loss and productivity. *Indian Forester*. 103: 460-465.
- Schulze E.D., Williams R.J., Farquhar G.D., Schulze W., Langridge J., Miller J.M., Walker B.H.** 1998. Carbon and nitrogen isotope discrimination and nitrogen nutrition of trees along a rainfall gradient in northern Australia. *Australian Journal of Plant Physiology*. 25: 413-425.
- Snowdon P., Wichienopparat W., Khanna P.K.** 2003. Growth, above-ground biomass and nutrient content of eucalypts and acacias grown in mixture in a tropical environment – evaluation for one full rotation. In: *International Conference on Eucalypt Productivity*, Hobart, Australia.
- Swamy S.L., Mishra A., Puri S.** 2006. Comparison of growth, biomass and nutrient distribution in five promising clones of *Populus deltoides* under an agrisilviculture system. *Bioresource Technology*. 97: 57-68.
- Tarrant R.F., Trappe J.M.** 1971. The role of *Alnus* in improving the forest environment. *Plant and Soil*, special volume. 335-348.
- Teissier du Cros E., Jung G., Bariteau M.** 1984. Alder-*Frankia* interaction and alder-poplar association for biomass production. *Plant and Soil*. 78: 235-243.
- Tharakan P.J., Volk T.A., Nowak C.A., Abrahamson L.P.** 2005. Morphological traits of 30 willow clones and their relationship to biomass production. *Canadian Journal of Forest Research*. 35: 421-431.
- Tisdale L.S., Nelson L.W.** 1974. *Soil fertility & fertilizers*, 3rd edn. Collier Macmillan, London, p. 402.
- Tsonkova P., Böhm C., Quinkenstein A., Freese D.** 2012. Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review. *Agroforestry Systems*. 85: 133-152.
- Vezzani F.M., Tedesco M.J., Barros N.F.** 2001. Alteracoes dos nutrientes no solo e nas plantas em consorcio de eucalipto e acacia negra. *Revista brasileira de Ciencia do solo*. 25 : 225-231.
- Walton P.D.** 1983. *Production and management of cultivated forages*. Reston Publishing Company, Inc., Va.
- Wichienopparat W., Khanna P.K., Snowdon P.** 1998. Contribution of acacia to the growth and nutrient status of eucalypts in mixed-species stands in Ratchaburi, Thailand. In: *Proceedings of the International Workshop on Recent Developments in Acacia Planting*. Hanoi, Vietnam, October 27-30, 1997. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra.
- Xiao W., Wang S., Chen X., Lu J., Wu G., Xiao L., Chen Y., Kang S., Chen J., Lin J., Zhou Q., Zhang X.** 1999a. Biomass of eucalypts and *Acacia crassicaarpa* mixed forests and its influence to soil. *Forestry Science and Technology*. 15: 8-15.
- Xiao W., Wang S., Chen X., Xiao L., Wu G., Lou Z., Chen Y., Kang S., Lin J., Su G., Chaohui Y., Lin L., Yu Y.** 1999b. Economic benefits analysis of eucalypts and *Acacia crassicaarpa* mixed forest. *Forestry Science and Technology*. 15: 1-7.
- Yin C.Y., Pang X.Y., Chen K.** 2009. The effects of water, nutrient availability and their interaction on the growth, morphology and physiology of two poplar species. *Environmental and Experimental Botany*. 67: 196-203.
- Zhang N.** 2003. Experiment on Eucalypt U6 clone intercropping with *Acacia crassicaarpa*. Master's Thesis. Research Institute of tropical Forestry and Leizhou Forest Bureau.
- Zheng S.X., Shangguan Z.P.** 2007a. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of nine dominant species in the Loess Plateau of China. *Photosynthetica*. 45: 110-119.
- Zheng S.X., Shangguan Z.P.** 2007b. Spatial patterns of foliar stable carbon isotope compositions of C-3 plant species in the Loess Plateau of China. *Ecological Research*. 22: 342-353.

Annexe 1. Organigramme de l'Unité EEF (UMR 1137) au 1^{er} décembre 2015.

UMR 1137 INRA-UL EEF au 01/12/2015
Jean-Marc GUEHL (Directeur), Yves JOLIVET (Directeur-adjoint)

<p>Gestion de l'unité - EB01 Laurence LE MAOUT</p>	<p>Audrey CHARDIN (AI) Laurence LE MAOUT (TR) Katy POIRET (TR 90 %)</p>	<p>Adeline VUILLAUME (TR) Manon MALIK (CDD)</p>
<p>Physiologie et diversité de la réponse aux contraintes EB06 Didier LE THIEC</p>	<p>Fonctionnement intégré de l'arbre et de l'écosystème EB05 Damien BONAL</p>	<p>Phytoécologie forestière EB02 Jean-Luc DUPOUEY</p>
<p>Chercheurs et enseignants-chercheurs</p> <p>Dany AFIF (Mdc) M-Béatrice BOGEAT-TRIBOULOT (CR) Oliver BRENDEL (CR) Mireille CABANE (Mdc) Erwin DREYER (DR) Anthony GANDIN (Mdc) Jean-Marc GUEHL (DR) M-Paule HASENFRATZ-SAUDER (Mdc) Irène HUMMEL (CR) Yves JOLIVET (Pr) Didier LE THIEC (DR) M-Noëlle VAULTIER (Mdc)</p> <p>Chargé de mission : Pierre DIZENGREMEL (Pr émérite)</p> <p>ITA et IATOS Cyril BURE (TR) David COHEN (AI) Joelle GERARD (AI) Stéphane MARTIN (TR) (1) Nathalie AUBRY (TR 80 %) Franck RADNAI (TR) Béatrice RICHARD (IE 80 %)</p> <p>Doctorants Maxime DURAND Nicolas DUSART Théo GERARDIN</p>	<p>Chercheurs et enseignants-chercheurs</p> <p>Damien BONAL (DR) Dorine DESALME (Mdc) Daniel EPRON (Pr) Dominique GERANT (Mdc) Bernard LONGDOZ (CR) Pascale MAILLARD (CR) Nicolas MARRON (CR) Pierrick PRIAULT (Mdc)</p> <p>Chargé de mission : André GRANIER</p> <p>ITA et IATOS Carole ANTOINE (ATP) (1) Pascal COURTOIS (TR) Erwin DALLE (TR) Bruno GARNIER (TR) Patrick GROSS (IE) Jean-Baptiste LILY (IE) Stéphane MARTIN (TR) (1) Caroline PLAIN (IE)</p> <p>Post-doc Emilie DELOGU Virginie MOREAUX</p> <p>CDD Jérémy MAUER Alwin NAIKEN</p> <p>Doctorants Pierre-Antoine CHUSTE Yanwen DONG Alexandre FRULEUX Cécilia GANA Laura HEID Nicha KANPANON Viviane TCHICHELLE</p>	<p>Chercheurs et enseignants-chercheurs</p> <p>Bernard AMIAUD (Pr) Nathalie BREDA (DR) Sandrine CHAUCHARD (Mdc) Jean-Luc DUPOUEY (DR) Catherine MASSONNET (CR 80 %) Stéphane PONTON (CR)</p> <p>Accueil Louis-Michel NAGELEISEN</p> <p>Chargé de mission : Yves LEFEVRE</p> <p>ITA et IATOS Vincent BADEAU (IR) Joseph LEVILLAIN (IR) Patrick BEHR (TR) François GEREMIA (AI 80 %) Pierre MONTPIED (IR) Erwin THIRION (TR) Cyrielle VISINE (ATP)</p> <p>Post-doc Juliette BOIFFIN Bastien GERARD Rémi WORTEMANN</p> <p>CDD Quentin CHAFFAUX</p> <p>Doctorants Yoran BORNOT Maxime BURST Anaïs DENARDOU-TISSERAND</p>
<p>Plateau technique de systèmes d'informations géographiques & bases de données - EB07 Damien MAURICE</p>	<p>Alain BENARD (IE) Damien MAURICE (IE) Sébastien GUIWARCH (AI) Béatrice NOIRTIN (TR) Nathalie LEROY (IE) Timothée OLIVAR (CDD)</p>	
<p>Plateforme technique d'écologie fonctionnelle - EB04 Isotopie - Analyses minérales - Microscopie Nicolas ANGELI</p>	<p>Nicolas ANGELI (IR) Patrick RIVERON (ATP) Carole ANTOINE (ATP) (1) Christophe ROSE (AI) Claude BRECHET (IE) Karine BOUCHY (CDD) Christian HOSSANN (TR) Jacqueline MARCHAND (AI)</p>	

(1) agents intervenants dans 2 équipes (50 % - 50 %) - EB = Enveloppe budgétaire

■ : Personnel UL ■ ■ ■ : Personnel INRA ■ : Personnel autres organismes