



HAL
open science

Approche dendroécologique de la réponse des arbres forestiers tempérés au climat et à ses variations

François F. Lebourgeois

► **To cite this version:**

François F. Lebourgeois. Approche dendroécologique de la réponse des arbres forestiers tempérés au climat et à ses variations. Milieux et Changements globaux. Université de lorraine, 2014. <tel-01627014>

HAL Id: tel-01627014

<https://hal.science/tel-01627014v1>

Submitted on 31 Oct 2017

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

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



HAL Authorization

UNIVERSITE DE LORRAINE

RAPPORT

présenté par

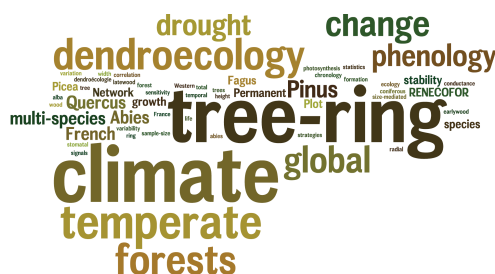
François Lebourgeois

Maître de Conférences AgroParisTech – Centre de Nancy

Docteur en Ecologie Végétale

EN VUE DE L'OBTENTION DE L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES
(DIPLOME NATIONAL INSTITUTE PAR L'ARRETE MINISTERIEL DU 23 NOVEMBRE 1988)

**APPROCHE DENDROECOLOGIQUE
DE LA REPONSE DES ARBRES FORESTIERS TEMPERES
AU CLIMAT ET A SES VARIATIONS**



Vendredi 4 juillet 2014 – 14h30 – Salle Emile Gallé - ENSAIA

Rapporteurs :

Guiot Joel, Directeur de Recherches CNRS, UMR 6635 CEREGE, Europôle de l'Arbois BP80, F-13545, Aix-en-Provence, France

Roger-Estrade Jean, Professeur, AgroParisTech, UMR Agronomie, Avenue Lucien Brétignières, F-78850 Thiverval Grignon

Rozenberg Philippe, Directeur de Recherches, INRA, UMR Amélioration Génétique et Physiologie Forestière (AGF), 2163 avenue de la pomme de pin, CS 4001 Orléans cedex

Examineurs :

Plantureux Sylvain, Professeur, Université de Lorraine, UMR Agronomie et Environnement Nancy-Colmar, École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires (ENSAIA), 2 avenue de la forêt de Haye, 54518 Vandœuvre-lès-Nancy, Cedex

Ponette Quentin, Professeur, Université Catholique de Louvain (UCL), Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale, Earth and Life Institute (ELI), Croix du Sud 2 bte L7.05.09 à 1348 Louvain-la-Neuve

Soudani Kamel, Maître de Conférences-HDR, Université d'Orsay, UMR 8079 ESS, Université Paris-Sud XI, Bâtiment 392, 91405 Orsay cedex

Invité :

Ulrich Erwin, Office National des Forêts, Direction technique et commerciale bois, Département recherche, Bâtiment B, Boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau, France

SOMMAIRE

Curriculum Vitae	4
Tableau synthétique des activités de recherches et d’enseignement	6
Bilan des activités d’enseignement et perspectives	7
Bilan des activités de recherches (1995-2012)	15
Perspectives des activités de recherches	55
Positionnement du projet dans le LERFOB et l’équipe Ecologie Forestière	75
Projets, collaborations, encadrements	77
Publications, communications, documents pédagogiques	87
Annexe 1 : Organigramme du LERFOB	106
Annexe 2 : Liste des encadrements	107
Références citées dans le texte	111

Tableau synthétique des différentes activités enseignement et recherche

Enseignement	Total
ENGREF (1999-2010)	
Charge enseigt. Moyenne en HégTD (2004-2010)	191
Nb de documents pédagogiques	60
Participation à différents modules (en nb)	9
Responsabilité ou Co-responsabilité de modules (nb)	2
Encadrements (responsable/référent)	28
Implication dans des formations permanentes (en nb)	2
AgroParisTech* (depuis 2010)	
Charge enseigt. moyenne HégTD (2011-2013)**	231
Nb de documents pédagogiques	14
Participation à différents modules (en nb)	13
Responsabilité ou Co-responsabilité de modules	5
Encadrements (responsable/référent)	27
Implication dans des formations permanentes (en nb)	2
Recherche	Total
Nb total de publications	90
International / Comité de lecture / référencées ISI	23
National / Comité de lecture / non référencées ISI	20
Transfert / Vulgarisation	19
Actes de colloque	4
Chapitres ouvrages et ouvrages	5
Rapports scientifiques	19
Autres	7
Présentation colloques internationaux et nationaux	33
Poster	5
Encadrements	
Master	5
Thèse	2
Projets	24

*AgroParisTech : fusion de trois écoles (AGRO, ENGREF, ENSIA) et disparition de la formation FIF (ENGREF). Charge réglementaire 192 HégTD

** L'année incomplète de transition 2010-2011 n'a pas été pris en compte (134 HégTD)

Mes publications ainsi que les différents indicateurs d'évaluation sont visibles aux adresses suivantes :

<http://www6.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Le-personnel/Fiches-profil/Scientifiques/LEBOURGEOIS-Francois>

<http://scholar.google.fr/citations?user=j73wFPwAAAAAJ&hl=fr&oi=ao>

https://www.researchgate.net/profile/Francois_Lebourgeois/?ev=hdr_xprf

Bilan des activités d'enseignement et perspectives

La mise en œuvre de la réforme d'AgroParisTech (APT), qui a consisté à la fusion en 2007 des trois cursus ingénieur [agronome (Agro), forestier (FIF), agro-alimentaire (ENSIAA)], a totalement modifié mes activités d'enseignement à partir de la rentrée 2010-2011 (date de la première année de l'application de la réforme). Le nouveau format consiste en une année commune d'enseignement généraliste sur le site de Grignon pour les 340 étudiants inscrits à APT puis par des parcours identifiés en deuxième et troisième année (grade de master) pour la formation forestière et des milieux naturels sur le site de Nancy (40 à 50 étudiants). La disparition de la première année « forestière » à Nancy, dans laquelle je réalisais la majorité de mes enseignements (voir **paragraphe A**) s'est traduite par un très fort investissement pour modifier totalement tous mes enseignements sur le fond et la forme (voir **paragraphe B, page 10**). Entre 2008 et 2009, la préparation de la réforme a été également très consommatrice en temps de réunion (déplacements sur les sites parisiens, visioconférences, réunions) ; temps non évalué par les grilles officielles de déclaration des charges d'enseignement. Ainsi, afin de faciliter la présentation, je dresserai un bilan séparé des enseignements avant la réforme (synthèse sur la période 2004-2005 à 2009-2010 représentative de mes enseignements pour la formation des ingénieurs forestiers, FIF) et depuis (deux années complètes APT, 2010-2011 et 2011-2012).

A. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT SUR LA PERIODE 2004-2005 A 2009-2010 (PRE-REFORME)

1. Bilan et répartition des heures équivalents TD

Sur la période 2004-2005 à 2009-2010 (6 ans), j'ai effectué en moyenne **191 H_{éq}TD** (total 1148 h) qui se sont réparties pour 71% dans la Formation des Ingénieurs Forestiers (FIF première année (1), deuxième (2) et troisième (3)), pour 27% dans celle des ingénieurs du Génie Rural des Eaux et Forêts (GREF 1 et Mastère Forêt, Nature et Société) et pour 2% dans celle du Master FAGE (Forêt, Agronomie et Génie de l'Environnement) (M2, UE 50, Le bois, bio-indicateur des variations de l'environnement, Université Henri-Poincaré, Nancy I) (**Tableau 1**).

Toutes formations confondues, les cours magistraux ont représenté en moyenne 28% du volume horaire et les TD-TP-Tournées 64%. **L'importance de ces derniers était l'expression d'une pédagogie fondée en grande partie sur les projets de terrain et l'encadrement des tournées.** Pour la formation forestière, j'intervenais essentiellement en première année qui représentait environ 70% de mes enseignements (**Tableau 2**).

	FIF1		FIF2		FIF3		Tutorat	% par rapport au total annuel FIF		
	Cours	TD-TP-Visit	Cours	TD-TP-Visit	Cours	TD-TP-Visit		FIF1	FIF2	FIF3
2004-2005	24	48		32			19	59%	26%	15%
2005-2006	33	48		32				72%	28%	0%
2006-2007	32	70		15	4			84%	12%	3%
2007-2008	30	72	12	15	6		12	69%	18%	12%
2008-2009	30	68	8	21	3	5	23	62%	18%	19%
2009-2010	30	68	8	20	3			76%	22%	2%
Moy.	30	62	9	23	4	5	18	70%	21%	9%
Σ	179	374	28	135	16	5	54			

Tableau 2. Décompte des HéqTD pour la seule formation des Ingénieurs Forestiers (FIF) en fonction des années. Le % donne la répartition selon le total des heures effectuées pour la FIF. Par exemple, en 2004-2005, sur les 123 HéqTD FIF, 59% ont été faits en FIF1 (voir **Tableau 1**).

2. Niveaux de responsabilité et disciplines enseignées

Pendant ces six années j'ai été responsable et j'ai assuré les enseignements de dendrologie, de botanique (en partie), de bioclimatologie, d'écophysiologie et de comportements des espèces forestières. Je suis intervenu dans six modules pour la FIF, deux modules pour le GREF et un module pour le Master FAGE. L'ensemble de mon enseignement s'est toujours fait en étroite collaboration avec les enseignements de pédologie (Bernard Jabiol), d'écologie végétale (Jean-Claude Gégout) et de sylviculture-aménagement (Eric Lacombe et Max Bruciamacchie).

Pour les enseignements de la FIF première année, j'étais **responsable** des modules :

- *MV 1.3.* Comportement des essences (intégrant bioclimatologie et écophysiologie) (4 crédits européens, CE)
- *MV 1.2.* Biodiversité végétale (dendrologie, botanique) (2 CE)

Je participais activement aux modules :

Pour les FIF :

- *MV 1.5.* Projet de phytoécologie (FIF1) (6 CE, responsable J.C. Gégout) ; encadrement de la phase de terrain (botanique, station forestière)
- *GF 2.1.* Sylviculture (FIF2) (6 CE, responsable E. Lacombe) ; cours sur la biogéographie des essences forestières en liaison étroite avec la gestion sylvicole
- *GF 2.3.* Aménagement (FIF2) (5 CE, responsable M. Bruciamacchie) ; encadrement d'une tournée sur l'intégration station forestière et aménagement
- *DA 3.2.* Gestion forestière (FIF3) (responsables E. Lacombe et M. Bruciamacchie) ; cours sur l'autécologie des essences en contextes montagnard et méditerranéen et accompagnement de visites

Pour les étudiants du GREF :

- *Module d'Initiation forestière* (GREF 1) (9 CE, responsable B. Ferry) ; TD de dendrologie et cours sur l'autécologie des essences ; encadrement de la phase de terrain (botanique, station forestière) et de la restitution

- *VA Forêt, Nature et Société* (responsable C. Voreux) ; cours de bioclimatologie et autécologie des essences forestières.

Pour le Master FAGE :

- *Module UE 50* (coordonné par J.L. Dupouey, INRA, Champenoux puis E. De Fay, Université de Lorraine) ; cours sur les méthodologies de l'approche dendrochronologique et dendroclimatique

3. Supports pédagogiques

Un total de 60 documents pédagogiques a été réalisé entre **2000 et 2009**. La liste complète détaillée est présentée dans la partie publications et communications. Ces documents concernent aussi bien des cours totalement rédigés ou les impressions des diaporamas powerpoint des différents enseignements (FIF, GREF, Master, Formation permanente) que des mini-guides floristiques pour les projets de terrain, des mini-posters pour les TP, etc. Les créations audiovisuelles correspondent à des comptes-rendus photographiques que je réalisais après les tournées. **En juin 2009, près de 1500 pages** de documents pédagogiques ont ainsi été rédigés.

Un certain nombre de ces documents sont distribués « à la demande » pour des collègues de différents instituts de recherche (INRA, IRSTEA...), de développement ou de gestion (CRPF, IDF, ONF) ou sont utilisés pour *les différentes formations permanentes* que j'assure notamment pour l'Office National des Forêts. C'est notamment le cas pour le parcours « reconnaissance des chênes » mis en place en 2007 dans la forêt de Brin.

B. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT DEPUIS 2010 (POST-REFORME APT)

1. Bilan et répartition des heures équivalents TD

La disparition de la FIF et de la formation du GREF a abouti à une refonte totale des programmes et de mes enseignements avec la nécessité de repenser et de reconstruire *intégralement* mes cours. Ceci a été réalisé en étroite collaboration avec les collègues nancéiens (notamment avec Bernard Jabiol, EC en pédologie, et Eric Lacombe, EC en sylviculture) et parisiens (Jean Roger-Estrade, Professeur en agronomie, et Chantal Loyce, EC en agronomie). La première année 2010-2011 s'est traduite par une sous-charge en enseignement (-42 heures) relative à la disparition de l'ancienne première année FIF. En 2011-2012, en revanche, le bilan a été très excédentaire (+46 h) en raison de la mise en place effective des nouveaux enseignements dans la seconde année APT2 à Nancy (**Tableau 3**). Pour l'année scolaire 2012-2013, la charge a été du même ordre que pour l'année 2011-2012 soit 224 H_{éq}TD.

APT1	Cours	TD et TP	Ac. Visite	Encad.	Déloc. Cours	Tutorat	Exp. Étud.	Rap.	Organ.	Prép. Terrain	VAE	□	% Total
	(EA)	(ED + EE)	(EF)	(EG-EH)	(OA)	(TA)	(TD)	(TC)	(OG)	(OC)	(TK-TL)		
2010-2011	7	39	6	0.8	2.5		1.1		3.1		3.0	59	40%
2011-2012	7	52		1.8	6.0					15.6		82	34%

APT2 (Nancy)	Cours	TD et TP	Ac. Visite	Encad.	Déloc. Cours	Tutorat	Exp. Étud.	Rap.	Organ.	Prép. Terrain	□	%
	(EA)	(ED + EE)	(EF)	(EG-EH)	(OA)	(TA)	(TD)	(TC)	(OG)	(OC)		
2010-2011	6	9		0.1			2.2	4.8			22	15%
2011-2012	9	78	2	1.6	1.0	11		6.0	6.9		116	49%

APT3 (Nancy)	Cours	TD et TP	Ac. Visite	Encad.	Déloc. Cours	Tutorat	Exp. Étud.	Rap.	Organ.	Prép. Terrain	□	%
	(EA)	(ED + EE)	(EF)	(EG-EH)	(OA)	(TA)	(TD)	(TC)	(OG)	(OC)		
2010-2011			10			29	3.9				43	29%
2011-2012		6	5		1.5	11	3.9				27	11%

GREF FNS	Cours	TD et TP	Ac. Visite	Encad.	Déloc. Cours	Tutorat	Exp. Étud.	Rap.	Organ.	Prép. Terrain	□	%
	(EA)	(ED + EE)	(EF)	(EG-EH)	(OA)	(TA)	(TD)	(TC)	(OG)	(OC)		
2010-2011	9						0.8				10	7%
2011-2012	9										9	4%

Master STVE (M2)	Cours	TD et TP	Rap.
	(EA)	(ED + EE)	(TC)
2010-2011	4.5		8.4
2011-2012	4.5		

Année	Total annuel éqTD
2010-2011	150
2011-2012	238
Moy.	194
□	387

Tableau 3. Décompte des HéqTD par type de formation et forme d'enseignement sur la période post-réforme APT. La première année de mise en place correspond à l'année scolaire 2010-2011. Les intitulés et le mode de calcul correspondent à la grille AgroParisTech adoptée à partir de 2006.

2. Niveaux de responsabilité et disciplines enseignées

Pour les trois années de formation (1 an de socle commun sur le site de Grignon et 2 ans de « spécialisation » sur le site de Nancy), **j'interviens dans 13 unités pédagogiques** différentes et **j'assume la responsabilité ou la coresponsabilité de 5** d'entre elles.

En première année (APT1), j'interviens dans les séquences suivantes :

- *Séquence* « Accueil et Ouverture » ; *Unité pédagogique* « Enjeux et Défis ». Participation à l'animation de la Tournée Paysage (3 à 4 groupes de 30 étudiants) ;
- *Séquence* « Sciences du Vivant et du Milieu (SVM) » ; *Unité pédagogique* « Ecosystèmes continentaux et cycles biogéochimiques ». **Responsabilité du TD** « le cerne du bois, un marqueur de l'environnement » (**1,5 heures et 12 groupes** ; 3 enseignants) ;
- *Séquence* « Sciences de la Production et de la Transformation (SPT) » ; **Coresponsabilité** et co-animation (avec B. Jabiol, C. Loyce et J. Roger-Estrade) de l'*Unité pédagogique* « Conduite des peuplements végétaux dans différents milieux ». **Responsabilité directe** du cours magistral (**1,5 heure**) et du TD (**1,5 heure et 12 groupes**) sur la gestion de l'eau en forêt ;
- *Séquence* « Modules Intégratifs » ; **Coresponsabilité** et co-animation avec **Bernard Jabiol, 3 semaines** du *Projet* « Diversité écologique des espaces naturels et forestiers ». Trois semaines de projet associant à la fois la prise de données écologiques dans des contextes forestiers remarquables, l'analyse de données et la rédaction d'un rapport (20-25 étudiants).

En deuxième et troisième année, j'interviens pour **les étudiants nancéiens** des domaines 1 (productions, filières, territoires pour le développement durable) et 3 (gestion et ingénierie de l'environnement).

En deuxième année (APT2), j'interviens dans :

- *Séquence* « Socle commun de domaine 1 »
 - *Unité pédagogique* UC1 « Diagnostics et potentialités des écosystèmes forestiers » (**Responsable, 48 heures**) ;
 - *Unité pédagogique* UC2 « Ecologie et gestion forestière » (Participation) (*responsable : Eric Lacombe, 48 heures*) ;
- *Séquence* « Socle commun du domaine 3 »
 - *Unité pédagogique* UC1 « Bases scientifiques et techniques de l'ingénierie écologique, BSIE » (63 heures). (Participation dans l'Atelier Eau) (*responsable : Bernard Jabiol*) ;
 - *Unité pédagogique* UC2 « Potentialités des écosystèmes et écologie des essences » (**Coresponsable avec Bernard Jabiol, 48 heures**) ;
- *Séquence* « A choix de 48 heures »
 - *Unité pédagogique* UC5 « Interactions animaux et végétaux en forêt ». (**Responsable, 48 heures**) (20-25 étudiants des parcours forêts des D1 et D3) ;
- *Séquence* « Projets »
 - *Unité pédagogique* « Biodiversité végétale et milieux » (Participation) (*responsable : Jean-Claude Gégout, 8 semaines*)

- *Séquence* « Stages 2A »
 - *Unité pédagogique* « Stages 2A ». Référent pour les étudiants demandeurs (voir liste des encadrements)

En troisième année (APT3), j'interviens dans :

- *Séquence* « Dominante »
 - *Unité pédagogique* « DA Gestion forestière » (Participation) (*responsables Eric Lacombe et Max Bruciamacchie*)
- *Séquence* « Stage de fin d'études »
 - *Unité pédagogique* « Stage » Référent pour les étudiants demandeurs

J'interviens également en Master 1 dans le module 805 « Dendroécologie » du Master Sciences et Technologies du Vivants et de l'Environnement (STVE), Mention Sciences forestières, biologie et écologie pour la forêt et la gestion des écosystèmes, spécialités Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes (FGE) et Forest and their Environment (FNE). Dans ce module, dirigé par Stéphane Ponton (INRA-Centre de Nancy, UMR EEF), j'assure 3 heures de cours et 3 heures de TD. Je continue également à intervenir dans la formation du Mastère « Forêt, Nature et Société ».

3. Documents pédagogiques

La nouvelle offre de formation s'est traduite par la réalisation de **14 documents et supports pédagogiques** totalement nouveaux détaillés dans la partie publications et communications. En 2012, j'ai également finalisé la réalisation d'un nouveau manuel de dendrochronologie destiné aux étudiants (Master STVE) et aux chercheurs dans cette discipline (85 pages, voir publications et communications).

C. ENCADREMENT DE STAGES

Depuis 1999, j'ai encadré et/ou suivi 42 élèves ingénieurs pour les stages de deuxième et de troisième année et les années optionnelles à l'étranger (césure). J'ai également encadré 3 étudiants en formation BTS et 6 en Master (M1 et M2). J'ai également participé au suivi d'un étudiant dans le cadre de son certificat de recherche de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE) (2007-2009) (voir liste en **Annexe 1**). Sur la période 2009-2013, mon nombre d'encadrement a fortement augmenté et s'est situé entre 6 et 10 par an (tout type de stage confondu). Au total, j'ai suivi 33 étudiants sur cette période.

D. RESPONSABILITES COLLECTIVES AU SEIN D'APT

Mes autres activités pédagogiques sont liées à la participation aux différentes commissions d'AgroParisTech. J'ai été titulaire et représentant des EC dans la commission de cursus de la FIF avant sa disparition. Dans le cadre de la réforme AgroParisTech, j'ai été suppléant de Bernard Jabiol dans le groupe de pilotage et suppléant de Bruno Ferry dans le groupe « Socle Commun ». J'ai également fortement participé aux discussions et aux réunions sur le Centre de Nancy concernant les contenus des nouveaux domaines (notamment le domaine 1 et 3).

Entre 2008 et 2009, j'ai fait partie de la commission qui s'occupait de la réhabilitation complète de notre bâtiment de travail à Nancy (bâtiment « Ile de Corse »). Je représentais les deux équipes occupant les locaux : travail en étroite collaboration avec le cabinet d'architecte responsable du projet (environ 1 million d'euros).

Depuis 2008, je suis suppléant de Bernard Jabiol au Conseil des Enseignants (CE) du département SIAFEE (représentant des EC). Je participe régulièrement aux réunions pédagogiques (commission de cursus) organisées sur le centre de Nancy et plus irrégulièrement aux autres réunions du département (bureau...).

En novembre 2013, j'ai été élu en tant que titulaire dans le collège des Maîtres de Conférences à la Commission Nationale des Enseignants-Chercheurs (CNECA) pour la Section 2 « Milieu, Organismes, Populations ». Cette section gère l'ensemble des dossiers (recrutement, avancement, reclassement, évaluation quadriennale...) de la centaine d'enseignant-chercheur appartenant à cette section (sur les 1000 EC dépendant du ministère de l'agriculture).

E. AUTRES ACTIVITES PEDAGOGIQUES

Depuis 2006, j'ai participé à six jurys de Validation des Acquis par l'Expérience (VAE) et j'ai suivi la première partie de la formation pour l'accompagnement.

En octobre 2010, j'ai mis en place mes pages web dans lesquelles on trouve à la fois une présentation de mes activités de recherche (voir partie recherche) et d'enseignement. Les documents (pdf, ppt...) sont téléchargeables sur : <http://www6.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Le-personnel/Fiches-profil/Scientifiques/LEBOURGEOIS-Francois>

Depuis 2008, j'interviens dans différentes sessions de formation pour l'Office National des Forêts (ONF) et l'Institut national de formation des personnels du ministère de l'agriculture (INFOMA). Les formations principales qui se déroulent **annuellement** s'intitulent « Forêt et Changement climatique » (3h de cours, ONF et INFOMA) et « reconnaissances des chênes sessile et pédonculé, état des connaissances actuelles » (ONF, 2 jours, cours et tournées).

En décembre 2013, j'ai également participé dans le cadre du Centre Permanent d'Initiation à l'Environnement (CPIE) de Champenoux à la formation d'enseignants du secondaire et d'animateurs en environnement (15 personnes) sur l'utilisation d'une mallette pédagogique sur la croissance des arbres et la dendrochronologie.

F. DEVELOPPEMENTS FUTURS

Dans les prochaines années, le premier objectif est de stabiliser la nouvelle offre de formation APT tant sur le fond que sur la forme en renforçant les enseignements transversaux et de terrain déjà mis en place (typiquement enseignements couplés « écologie-gestion »). Sans renfort notable de l'équipe pédagogique sur Nancy et en ayant comme objectif le maintien du niveau de l'offre de formation ingénieur, il apparaît difficile de réduire les enseignements dispensés qui se traduisent par 1) un dépassement notable de la charge d'enseignement et 2) une impossibilité d'investissement plus important dans les formations Master (STVE notamment). Un meilleur équilibre est sans doute possible mais il est trop tôt actuellement pour se prononcer.

Les outils numériques utilisés dans le cadre de l'éducation et de l'enseignement se développent de plus en plus (TICE = technologies de l'information et de la communication pour l'enseignement). Ainsi, il apparaît important d'améliorer l'offre pédagogique disponible via internet : cours en lignes, podcast... La réalisation de mon site internet est une première étape qu'il faut consolider en mettant également en place des interfaces avec le site APT (<https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/>). Même si internet est devenu incontournable, je pense qu'il doit être considéré avant tout comme une aide, un supplément d'informations pour les étudiants et pas le moyen de résoudre le problème du dépassement des quotas d'enseignement.

Dans son projet d'établissement 2007-2011, l'Office National des Forêts s'est engagé, en réponse aux demandes sociales, économiques et environnementales, à affirmer une politique de développement durable en forêts domaniales et à créer un réseau de sites démonstratifs et exemplaires. Cette démarche de développement local associe étroitement les élus et les acteurs locaux. Elle a débouché sur un label de reconnaissance : Forêt d'Exception®. Ce label distingue donc un projet territorial rassemblant des acteurs locaux engagés dans une démarche d'excellence autour d'un patrimoine aux valeurs particulièrement affirmées. Ce programme est piloté par un Comité national d'orientation qui associe les ministères de tutelle et des personnalités qualifiées. Il est prévu qu'une quinzaine de forêts domaniales soient labellisées au terme de l'application du nouveau contrat d'objectifs et de performance 2012-2016 passé entre l'ONF, ses ministères de tutelle et la Fédération nationale des communes forestières. Le projet intégratif de trois semaines de fin de première année (« Diversité écologique des espaces naturels et forestiers »), qui est apparu un projet important et choisi en priorité par les étudiants désirant venir à Nancy, s'est inscrit en 2011-2012 et s'inscrira en 2012-2013 dans le cadre de ce programme (forêt inventoriée : réserve naturelle du Val Suzon, Côte d'Or, région Bourgogne). Dans les années à venir, je souhaite renforcer ce partenariat qui a pour principaux avantages 1) pour les étudiants de réaliser un projet appliqué qui met en scène des acteurs variés et 2) pour la formation d'obtenir des financements durables pour mener à bien le projet.

Bilan des activités de recherches (1995-2012)

Préambule

Mes activités de recherche menées au centre AgroParisTech de Nancy sont intégrées à l'équipe Écologie Forestière qui fait partie de l'Unité Mixte de Recherche INRA-APT 1092 Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB ; directrice Mériem Fournier) (*voir organigramme Annexe 1, page 106*). Le LERFOB (45 permanents) est rattaché aux départements SIAFEE d'AgroParisTech et au champ thématique « méthodes et stratégies pour la gestion des ressources et des milieux naturels » du département EFPA (Écologie des écosystèmes Forestiers, Prairiaux et Aquatiques). Mes travaux s'insèrent dans l'axe 3 « Croissance des espèces et productivité des peuplements » du thème 1 du LERFOB « Distribution des facteurs écologiques et des espèces et changement de productivité des forêts à larges échelles ».

Après mon doctorat soutenu en 1995, le point de départ de mes activités de recherche remonte à ma forte implication et aux travaux menés dans le **RE**seau **N**ational de suivi à long terme des **ECO**systemes **FOR**estiers (RENECOFOR). Les données récoltées dans ce réseau m'ont permis de construire un projet de recherche sur le long terme et d'acquérir des compétences en dendroécologie et phénologie ; compétences qui m'ont permis de mettre en place des collaborations avec différents organismes et d'encadrer ou de participer à l'encadrement de plusieurs étudiants en Master et Doctorat.

Ce rapport présente donc les résultats scientifiques majeurs et l'évolution des questions de recherche. Il présente également les activités mises en œuvre et les moyens mobilisés pour y répondre, notamment les collaborations et les sources de financement. Dans les paragraphes suivants, les lettres suivies d'un chiffre entre crochets renvoient à la liste des publications (pour simplifier, seuls les articles à comité de lecture sont mentionnés).

Mes publications ainsi que les différents indicateurs d'évaluation sont visibles aux adresses suivantes :

<http://www6.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Le-personnel/Fiches-profil/Scientifiques/LEBOURGEOIS-Francois>

<http://scholar.google.fr/citations?user=j73wFPwAAAAJ&hl=fr&oi=ao>

https://www.researchgate.net/profile/Francois_Lebourgeois/?ev=hdr_xprf

1. Le cerne, marqueur temporel des facteurs environnementaux à différentes échelles spatiales

Hors contexte tropical, les arbres produisent chaque année un cerne (*e.g. croissance radiale dite croissance secondaire*) dont la largeur dépend des conditions environnementales et des processus physiologiques propres à l'arbre (Fritts, 1976). Du fait de leur caractère longévif, les arbres sont parmi les organismes vivants qui intègrent, sur des très longues périodes, les variations interannuelles de leur environnement et qui sont, par conséquent, particulièrement sensibles aux modifications du milieu. Leur reproduction tardive couplée à des capacités de dispersion réduite (Aitken *et al.*, 2008) ne leur permettant pas de migrer rapidement en cas de changements rapides des conditions de milieu, on peut donc penser que les changements climatiques vont affecter leur croissance bien avant toute modification de leur répartition spatiale ou d'adaptation locale, faisant de celle-ci un indicateur central des changements environnementaux (Charru, 2012). Le proxy « cerne » intègre donc sur le long terme des facteurs environnementaux multiples qui sont considérés comme « signal objectif » ou « bruit » selon les objectifs des analyses (**Figure 1**). La discipline scientifique qui étudie les relations entre ce proxy et les facteurs du milieu est appelée « dendroécologie ». C'est cette discipline qui représente la plus grande part de mes activités de recherche.

Outre l'âge cambial, défini comme l'âge de l'arbre au moment de l'élaboration du cerne (Becker, 1989 ; Bontemps et Esper, 2011), le climat, à travers ses caractéristiques moyenne et extrême, joue un rôle central dans la croissance secondaire et donc la mise en place du cerne annuel (**Figure 1**) (Fritts, 1976). Ainsi, l'approche dendroclimatologique (*i.e. étude des relations entre la variabilité des largeurs de cernes et celle du climat*), a été et reste une des approches les plus utilisées par la communauté des dendrochronologues. Cette approche permet de mettre en évidence les facteurs climatiques et les saisons clés pour la croissance et, appliquée sur des vastes gradients climatiques, de mettre en évidence l'adaptation des espèces aux conditions locales (**Figure 2**).

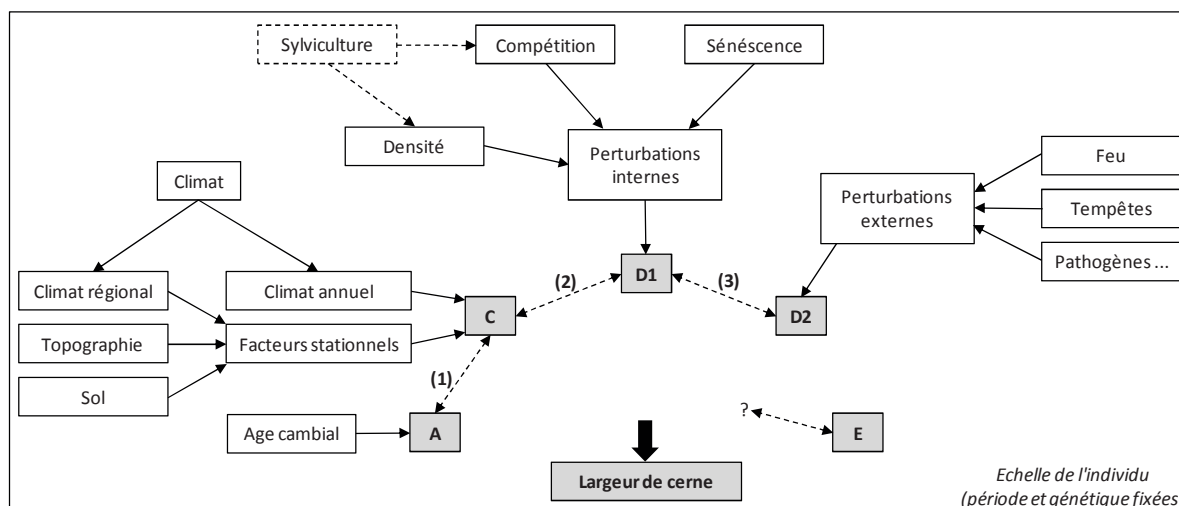
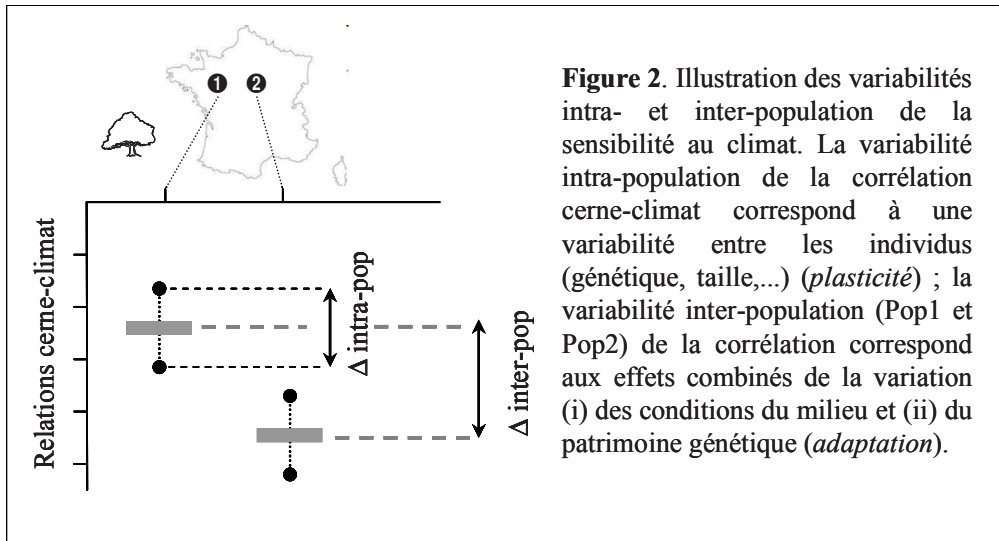
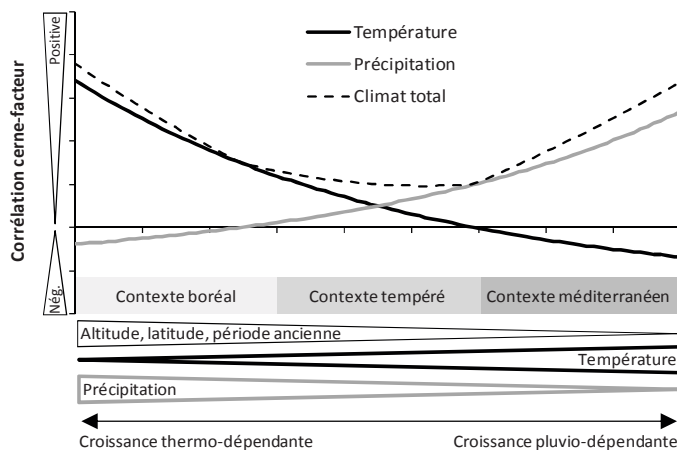


Figure 1. Synthèse des facteurs influençant la variabilité de la largeur de cerne (schéma d'après Mérian, 2012). Les notes (1) à (3) illustrent quelques interactions possibles entre les cinq catégories de signaux (A à D2) du modèle conceptuel linéaire de Cook (1985).



En écologie, un *facteur* est défini comme *une ressource* (= élément qui se consomme ; eau, éléments minéraux, CO₂...) ou *une condition* (qui ne se consomme pas ; température, pH, C/N...) étant susceptible d'avoir une action physiologique directe sur un organisme vivant (Grime, 1977). On peut également définir *les descripteurs* qui intègrent les ressources et les conditions du milieu et qui n'ont pas d'action directe sur la physiologie comme, par exemple, l'altitude, la pente, l'exposition, le type d'humus... A partir de ces notions, il est possible de définir différents principes régissant la présence ou la croissance des espèces. Parmi ceux-ci, le principe du facteur limitant stipule que la croissance d'une espèce ne peut dépasser le niveau permis par la ressource la moins disponible (e.g. l'eau) ou la condition la plus limitante (e.g. la température) (Grime, 1977).

En dendroclimatologie, ce principe s'illustre très bien sur des vastes échelles spatiales (*échelles macro- ou mésoclimatiques*) avec, par exemple, la modification de la réponse des écosystèmes forestiers selon les gradients latitudinaux (Churkina et Running, 1998 ; D'Arrigo *et al.*, 2008) (**Figure 3**). Ainsi, en contexte boréal froid et humide, la mise en place du cerne est généralement thermo-dépendante, c'est-à-dire que les faibles températures limitent la croissance radiale. En contexte méditerranéen chaud et sec, la croissance est fortement pluvio-dépendante bien qu'un effet négatif des températures soit fréquemment observé, les facteurs hydriques et thermiques n'étant pas indépendants. Enfin, en contexte tempéré, la largeur de cerne dépend à la fois des températures et des précipitations.



A une échelle spatiale plus restreinte (*échelle topo-climatique* ou *station forestière*), la réponse au climat peut-être également fortement modulée par certains descripteurs comme l'altitude, l'exposition ou encore l'épaisseur du sol et la réserve maximale en eau du sol (Becker, 1989 ; Bert, 1993 ; Neuwirth *et al.*, 2004 ; Oberhuber et Kofler, 2000 ; van der Maaten, 2012). Un des exemples les plus classiques est l'effet du gradient altitudinal : effet négatif des fortes températures et positif des fortes pluies sur la croissance aux altitudes les plus faibles et inversion aux altitudes les plus élevées (effet positif des températures élevées et négatif des fortes pluies) (Desplanque *et al.*, 1999 ; Lebourgeois et Mérian, 2011).

Enfin, au sein des peuplements (*échelle microclimatique*), les interactions entre individus d'une même espèce ou entre espèces différentes dans le cas des mélanges peuvent également fortement moduler la réponse des espèces aux facteurs environnements (Hooper *et al.*, 2005). A travers des processus de compétition (*i.e. effets négatifs sur les performances individuelles des végétaux*) ou de facilitation (*i.e. effets positifs*) (Bertness et Callaway, 1994 ; Brooker *et al.*, 2008 ; Callaway, 1995 ; Maestre *et al.*, 2009), différents travaux ont ainsi montré que la taille ou le statut social d'un arbre, la densité de tiges et la présence d'espèces différentes dans le peuplement sont des facteurs importants de variation de la sensibilité aux facteurs thermiques et à la ressource en eau (Bréda *et al.*, 1995 ; Castagneri *et al.*, 2012 ; Kohler *et al.*, 2010 ; Martinez-Vilalta *et al.*, 2012 ; Misson *et al.*, 2003 ; Novak *et al.*, 2010 ; Piutti et Cescatti, 1997) (*voir Perspectives des activités de recherches, page 53*).

2. Problématiques scientifiques majeures (1995-2012, Figure 4, page 21)

En France, la dendroclimatologie s'est fortement développée à la fin des années 1980 dans le cadre d'études menées sur l'écologie d'espèces méditerranéennes (Chênes notamment, Travaux de Tessier, Serre-Bachet) et des travaux menés pour mieux comprendre l'origine des dépérissements forestiers (Sapin pectiné dans le massif Vosgien ; Programme DEFORPA, Travaux de Becker). Suite aux études sur les dépérissements, il est apparu important à la communauté forestière de mettre en place un réseau d'observations à long terme des écosystèmes forestiers de façon à mieux appréhender les effets de la variabilité des conditions environnementales à court, moyen et long terme (Ulrich, 1995). La création du Réseau National de suivi à long terme des Écosystèmes Forestiers (RENECOFOR) a été le point de départ de mes activités de recherches en dendroclimatologie après mon doctorat dans lequel j'avais acquis les compétences dans ce domaine. A partir de là, **le cœur de mes travaux a donc été d'analyser la sensibilité au climat moyen et à ses extrêmes des principales essences forestières françaises sur le XXI^{ème} siècle et le long de gradients climatiques contrastés (Figure 4, page 21, QUESTION 1)**. J'ai donc développé des **approches dendroclimatiques multispécifiques à large échelle spatiale**. Il est important de rappeler que, du fait du calcul d'une chronologie moyenne de croissance à partir des séries individuelles de largeurs de cerne (généralement standardisées), on s'intéresse à la réponse moyenne au climat d'un nombre fini d'individus (qui dépend de l'échantillonnage) et consiste donc en une approche « population » des relations cerne-climat. La dendroclimatologie analyse donc **la sensibilité moyenne d'une population** à l'environnement et à ses évolutions, sans possibilité (dans la majorité des études) de discerner des modulations de cette réponse par les caractéristiques génotypiques propres à chaque individu. En d'autres termes, lorsqu'une différence de réponse au climat est observée entre deux populations, celle-ci contient l'effet de la variation des conditions climatiques et celui de la variabilité génétique (King *et al.*, 2013) (**Figure 2**). On peut supposer que l'effet de la variabilité génétique atténue la différence de réponse strictement liée au climat ; les individus poussant dans un lieu donné pouvant être considérés comme les mieux adaptés aux conditions environnementales locales. La question centrale que j'ai abordée était d'analyser en quoi des espèces arborées forestières présentant des traits fonctionnels distincts (Diaz et Cabido, 2001 ; Violle *et al.*, 2007) convergeaient ou divergeaient quant à leur sensibilité au climat (*e.g. feuillus versus*

résineux ; Chênes versus Hêtre ; Sapin vers Pins...) (voir **partie 4 Résultats, page 25**) et en quoi l'effet des conditions mésoclimatiques étaient modulées par les conditions locales (*i.e. topoclimat, réserve utile maximale en eau du sol, bilan hydrique...*) (**Figure 4, page 21, QUESTION 2**). Ces travaux ont fait l'objet de 11 publications [**A10, 11, 14, 15, 18 ; B2, 4, 6, 11, 12, 14**].

Si la méthodologie d'analyse du signal climatique dans les séries chronologiques est connue depuis longtemps et communément employée (Bunn, 2008, 2010 ; Fritts, 1976 ; Guiot, 1991), la comparaison des résultats acquis avec des protocoles d'échantillonnage différents (notamment quant aux nombres d'arbres échantillonnés par site et utilisés pour construire la chronologie moyenne de la population) et le regroupement de jeux de données provenant de sources multiples pour des méta-analyses (**Figure 5, page 22**) peut biaiser les analyses des relations cerne-climat (**Figure 4, page 21, QUESTION 3**). Ces problèmes de différence d'échantillonnage et des conséquences sur la représentativité de la chronologie moyenne, sur l'intensité du signal contenue dans celle-ci ou encore sur la significativité et les imprécisions des relations cerne-climat de la population ont été étudiés dans la thèse de Pierre Mérian (2009-2012). La finalité de ce travail était de fournir des recommandations pratiques pour obtenir la meilleure estimation possible du signal climatique dans les populations échantillonnées et de quantifier les imprécisions des résultats selon la stratégie adoptée. Ces travaux ont fait l'objet de 5 publications [**A2, 3, 5, 8, 10**].

Un paradigme essentiel de la dendroclimatologie repose sur le principe d'uniformité qui stipule que « *les processus physiques et biologiques qui gouvernent la croissance des arbres poussant actuellement sont les mêmes que ceux du passé et ont le même type d'action* » (Fritts, 1976). Ce principe stipule donc non seulement une stabilité à long terme des facteurs (*e.g. effet de la température sur la population p sur l'ensemble de sa vie*) mais également un effet constant (*e.g. les fortes températures se traduisent toujours par des croissances réduites*). Depuis quelques années, ce principe d'uniformité est mis à mal par les changements environnementaux qui se traduisent par une instabilité temporelle de la réponse des arbres au climat. Ce phénomène a été décrit récemment comme « le problème de la divergence » (D'Arrigo *et al.*, 2008 ; Wilson *et al.*, 2007). Les premières publications illustrant ce problème remontent à la fin des années 1990. Cependant, la divergence est devenue un sujet d'étude à part entière seulement depuis 4 à 5 ans avec les travaux illustrant la levée de la contrainte thermique pour les écosystèmes forestiers résineux poussant dans les hautes latitudes (D'Arrigo *et al.*, 2008). Depuis 3-4 ans, j'ai abordé ces problèmes d'instabilité temporelle des relations cerne-climat (**Figure 4, page 21, QUESTION 4**) dans des contextes encore peu explorés comme la plaine (étude sur le Chêne sessile dans le Nord de la France ou le Châtaignier en région limousine) et les contextes montagnards froid et humide (Vosges) et méditerranéen (étude multi-espèces en région PACA). La question était 1) de savoir si des espèces forestières de contextes tempérées (donc a priori soumis à moins de contraintes climatiques que des espèces poussant en contextes boréaux) avaient également modifié leur comportement en réponse aux changements observés et 2) de mettre en évidence des différences interspécifiques de comportement. Ces travaux ont fait l'objet de 5 publications [**A7, 9, B2, 3, 4**].

Dans l'étude des relations cerne-climat, les choix des régresseurs climatiques sont multiples allant des variables les plus simples (*i.e. température, précipitation*) aux variables intégratives les plus complexes (*i.e. bilan hydrique*) (**QUESTION 2**). A la fin des années 1990, un modèle de bilan hydrique journalier à base écophysologique permettant de quantifier précisément l'intensité et la durée de la sécheresse a été développée au Centre INRA Nancy Lorraine (Bréda *et al.*, 1995 ; Bréda *et al.*, 2006 ; Granier *et al.*, 1999) (actuellement disponible sur le WEB sous le nom de *Biljou*). J'ai été le premier à utiliser ce modèle sur des vastes échelles spatiales dans mes études sur le Hêtre, les Chênes sessile et pédonculé, le Sapin et l'Épicéa dans le réseau RENECOFOR. L'utilisation de ce modèle m'a permis de développer mon second axe de recherches « phénologie » (**Figure 4, page 21, QUESTION 5**). En effet, pour paramétrer ce modèle itératif journalier, il est indispensable de disposer de la longueur de saison de végétation ; données disponibles dans le réseau. J'ai donc été le premier à utiliser les données phénologiques du réseau RENECOFOR avec lesquelles j'ai pu 1) caractériser le

déterminisme climatique de la phénologie foliaire, 2) dresser des cartes phénologiques pour la France et 3) mener des études prédictives sur les changements des cycles foliaires dans le cadre des modifications environnementales. Ces travaux ont fait l'objet de 4 publications [A12, B5, 8, 17]. Afin d'apporter des informations à une échelle plus fine sur les cycles de développement foliaire des Chênes sessile et pédonculé, des mesures sont réalisées depuis 2003 sur trois sites expérimentaux. Ces dispositifs sont également la base de mes études *d'autécologie* visant à mieux comprendre le comportement de ces deux espèces sur les sols hydromorphes. En 2011, ces sites ont été instrumentés de façon à caractériser le contexte microclimatique de croissance des peuplements (température, rayonnement, précipitation). Mon implication sur la phénologie dans le réseau forestier RENECOFOR m'a également permis d'intégrer en 2006 le groupement de recherches sur la phénologie dirigé actuellement par *Isabelle Chuine* (CNRS-CEFE-Montpellier) et dans lequel je fais partie du bureau exécutif (répartition des budgets). Parallèlement à ces travaux sur le bilan hydrique journalier, j'ai également mis en œuvre une démarche de caractérisation mensuelle des bilans hydriques à partir des modèles plus simples développés par *Thorntwaite* et *Palmer*. Ces études ont été intégrées notamment dans les travaux de *Christian Piedallu* sur la caractérisation des bilans en eau dans les écosystèmes forestiers pour prédire la niche des espèces [A4].

La question de *l'adaptation de la gestion forestière pour faire face aux changements climatiques* est apparue dans mes recherches à partir de 2010 (**Figure 4, page 21, QUESTION 6**) et constitue un axe principal de recherche pour les années à venir (*voir partie Perspectives, page 55*). En effet, si l'approche dendroécologique permet de fournir des informations sur la réponse des peuplements forestiers au climat moyen et à ses extrêmes et donc d'apporter des références quantifiées pour raisonner les choix des essences, le gestionnaire a également besoin de telles références pour ses orientations sylvicoles (*Dhôte, 2000 ; Heinimann, 2010 ; Legay et al., 2007 ; Lindner et al., 2010*). La thématique *changement climatique et aménagement forestier* a émergé à la fin des années 1990 dans la communauté scientifique internationale (**Figure 6**). À partir de cette date, l'augmentation des publications a été croissante et près de 1600 articles ont été publiés sur la période récente 2011-2013. Les mots clés *adaptation* et *mitigation* sont également apparus pendant les mêmes périodes. Cette thématique regroupe en réalité des champs scientifiques très différents allant des raisonnements économiques aux problèmes de pathogènes en passant par les modifications de la composition des écosystèmes forestiers. Une analyse bibliographique plus restreinte qui intègre le thème *sylviculture et changement climatique* réduit considérablement le nombre de travaux avec moins de 50 articles publiés en 2013 (**Figure 6**).

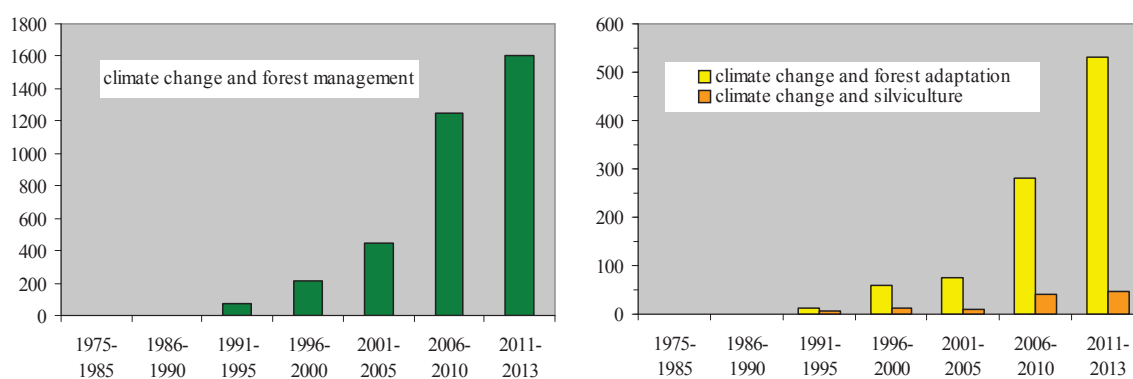
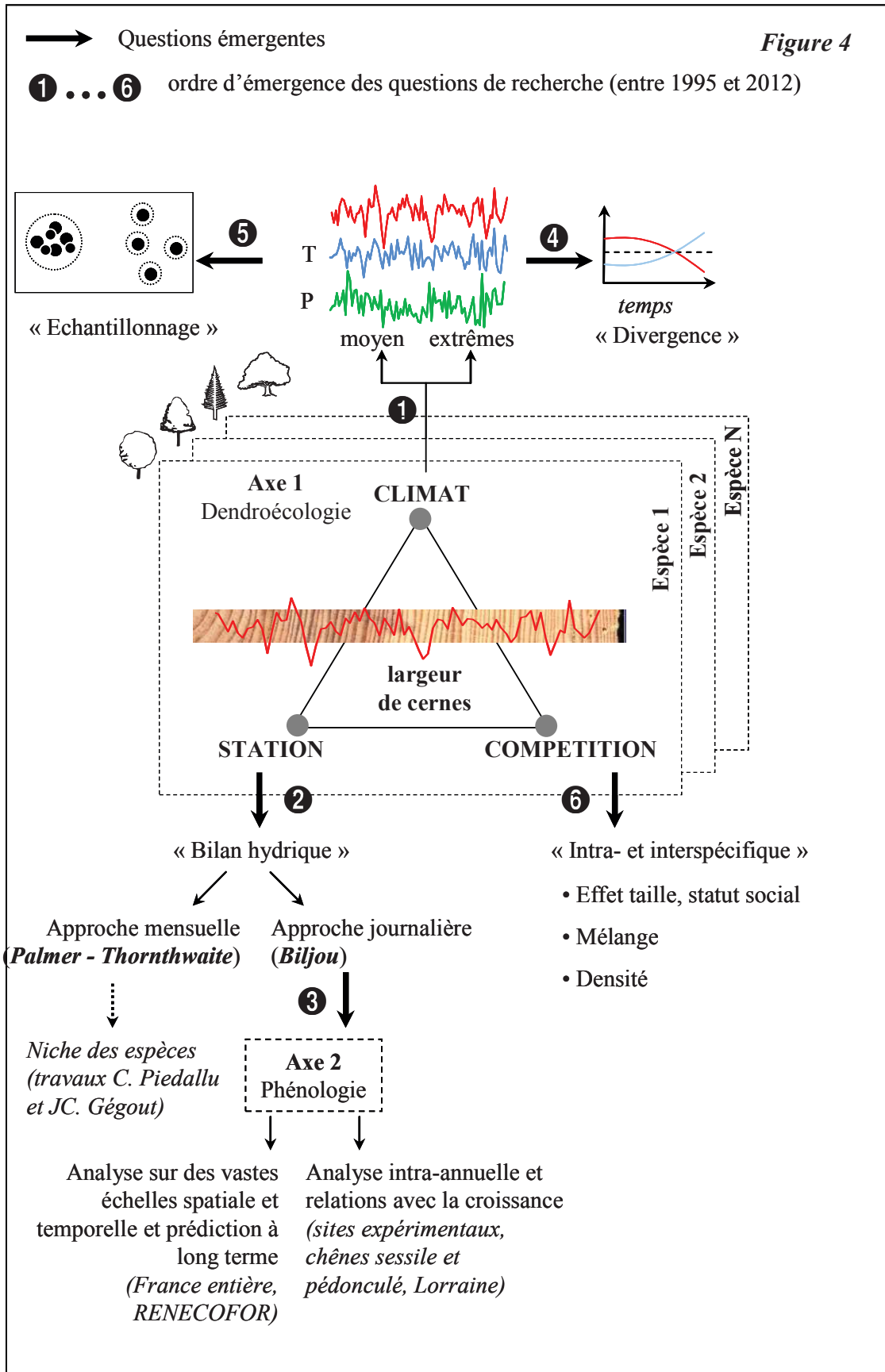


Figure 6. Nombre d'articles scientifiques publiés sur la période 1975-2013 pour différentes thématiques abordant la question du changement climatique et de la gestion. Les recherches documentaires ont été effectuées essentiellement à travers la base internationale de données Web of Knowledge [v 5.13.1] (Web of Science).



3. Jeux de données utilisés et approche mise en œuvre

Depuis 1995, j’ai travaillé sur 11 espèces forestières couvrant tous les contextes mésoclimatiques français : du climat océanique ligérien au contexte montagnard humide et froid vosgien en passant par le climat méditerranéen montagnard (**Figure 5**). Les jeux de données utilisées regroupent 9090 arbres et 776 sites. Ils ont été acquis par des études spécifiques et la mise en place de collaborations entre d’autres équipes de recherche (INRA, IRSTEA) ou de développement (IDF, CRPF, ONF) (voir partie *projets de recherche et collaborations*, page 76).

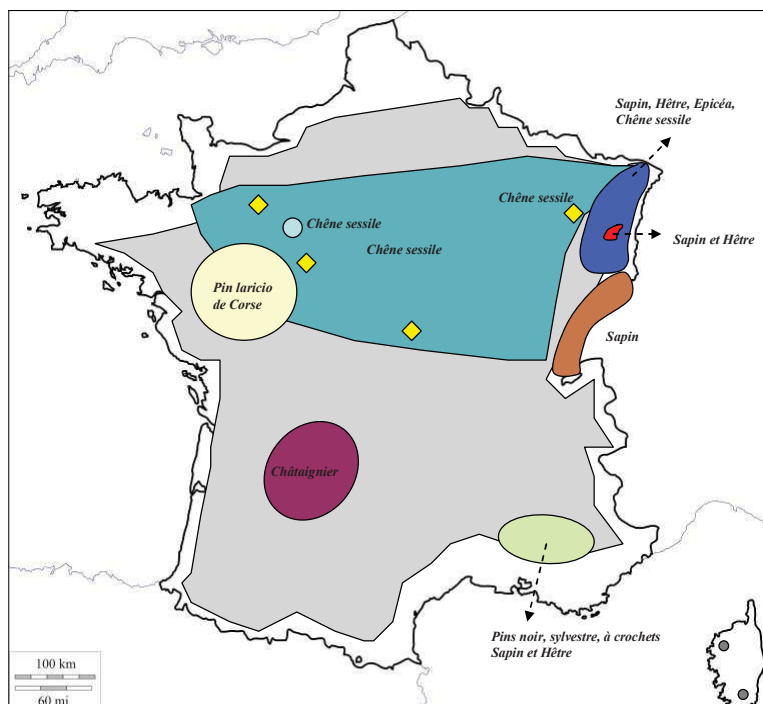


Figure 5. Caractéristiques des jeux de données utilisées pour l’axe 1 « dendroécologie » de mes travaux de recherche entre 1995 et 2012 : 9090 arbres, 776 sites et 11 espèces forestières. Les chiffres en blanc sur fond noir correspondent aux questions émergentes de la **Figure 4**.

- **Renecofor** (10 espèces, 102 sites, 3029 arbres) ① ② ⑤
- **Pays de Loire** (Pin laricio de Corse, 202 sites, 2024 arbres) ① ⑤
- **Paca** (Pins noir, sylvestre, à crochets, Sapin, Hêtre, 64 sites, 293 arbres) ① ④
- **Nord de la France** (Chêne sessile, 31 sites, 720 arbres) ① ④
- **Futaie des Clos** (Chêne sessile, 1 site, 18 arbres) ①
- **Jura** (Sapin, 84 sites, 504 arbres) ⑤
- **Vosges** (Sapin, Hêtre, Epicéa, Chêne sessile, 210 sites, 892 arbres) ① ④ ⑥
- **Vosges** (Sapin, Hêtre, 43 sites, 942 arbres) ① ⑥
- **Limousin** (Châtaignier, 36 sites, 146 arbres) ① ④
- **Coopérative de données et dispositifs LERFOB** (Chêne sessile, 4 sites, 540 arbres) ⑥

Mes travaux mettant en œuvre l’approche dendroécologique sont fondés sur une méthodologie largement éprouvée qui ne sera pas développée ici (voir notamment « Manuel de dendrochronologie », *Lebourgeois et Mérian, 2012* pour une présentation détaillée). Ainsi, j’ai utilisé une double démarche pour appréhender la sensibilité différentielle au climat moyen et à ses extrêmes. La première approche est fondée sur l’analyse des « **années caractéristiques** » (*pointer years*). Ces années témoignent le plus souvent de l’effet de conditions climatiques extrêmes (sécheresse, gelée…). Dans mes travaux, ces années ont toujours été définies selon la méthode de (Becker, 1989). Dans cette méthode, une année est considérée comme caractéristique quand au moins 70 % des arbres échantillonnés présentent une variation commune de croissance d’au moins 10 % par rapport à l’année précédente. L’année est dite « négative » quand elle correspond à une croissance réduite et « positive » dans le cas inverse. Historiquement, ces années étaient utilisées pour « interdater » les séries

chronologiques c'est-à-dire pour vérifier la datation des cernes et donc l'agencement synchrone des séries. Dans le cadre des modifications environnementales et des conséquences possibles sur les écosystèmes forestiers, un regain d'intérêt est né pour ce type d'analyse car ces années donnent une information importante sur la capacité de résistance des arbres à des aléas climatiques extrêmes. La réponse moyenne sur le long terme a été appréhendée par le calcul des **fonctions de corrélation** et de réponse de type *bootstrap* (Biondi et Waikul, 2004 ; Guiot, 1991 ; Zang et Biondi, 2012). Dans cette approche, des séries climatiques (généralement des données mensuelles de températures, des précipitations ou des bilans hydriques) sont confrontées à des séries chronologiques standardisées (*i.e. dans lesquelles seul le signal climatique est conservé*). Pour calculer de meilleurs estimateurs de la corrélation et de son incertitude, *i.e. non conditionnés à une distribution normale des paramètres et des résidus*, une procédure de type *bootstrap* a été introduite dans le calcul de la fonction de réponse dans les années 1980. L'idée générale est de quantifier la dispersion du coefficient de corrélation de vérification à partir d'un grand nombre d'estimations réalisées sur des échantillons successifs du jeu de données initial. Si le jeu de données initial couvre y années, chaque échantillon est obtenu par tirage aléatoire avec remise de y années parmi y , certaines années étant ainsi tirées plusieurs fois. Cet échantillon est ensuite utilisé comme jeu de calibration, les années non tirées formant quant à elles le jeu de vérification. Répétée un nombre important de fois (généralement 1000 fois), cette procédure fournit des estimations du coefficient de corrélation à partir desquelles une valeur médiane et un intervalle de confiance seront calculés. L'un des principaux avantages de la procédure itérative de type *bootstrap* est de pouvoir calculer la significativité de chaque coefficient de corrélation. La comparaison de ces coefficients entre sites, entre espèces... permet d'appréhender la réponse différentielle entre espèces et de mettre en évidence l'effet des conditions stationnelles.

Dans les paragraphes ci-dessous les lettres suivies d'un chiffre entre crochets renvoient à la liste des publications. Seuls les articles à comité de lecture sont mentionnés.

4. Que savons-nous sur la sensibilité de la croissance radiale des arbres au climat ?

Mes études sur des vastes échelles spatiales et plus particulièrement les travaux menés dans le RENECOFOR m'ont permis de dresser un bilan de la réactivité au climat de la croissance radiale des principales essences forestières françaises et d'illustrer l'effet combiné des conditions locales de croissance (**synthèse des études dans Figure 6**) [A10, 11, 14, 15, 18 ; B2, 4, 6, 11, 12, 14].

4.1. Hêtre, Chênes sessile et pédonculé

Le Hêtre apparaît comme une essence réactive au climat avec une réponse assez homogène entre les peuplements. Ainsi, pour cette essence, le bilan hydrique (ou les précipitations) du début d'été (surtout juin) joue un rôle central dans le déterminisme des variations interannuelles (**Figures 7 et 8**). En contexte de plaine, sa sensibilité au climat augmente avec la xéricité locale. Ainsi, le Hêtre est d'autant plus sensible que le sol est superficiel (réserve utile maximale en eau du sol (RUM) inférieure à 100 mm) ou le régime pluviométrique faible (précipitations annuelles inférieures à 700 mm) [A15 et B14].

Pour les Chênes sessile et pédonculé, toutes les études montrent que la variabilité interannuelle de croissance des arbres est beaucoup plus difficile à appréhender. Les modèles sont généralement beaucoup moins explicatifs que ceux du Hêtre et les périodes clés très variables selon les peuplements et les conditions locales considérés (**Figures 7 et 8**). La croissance semble dépendre non seulement des conditions climatiques de la saison de végétation, mais également des conditions automnales et hivernales précédant la mise en place du cerne. Les différences entre les deux Chênes sont faibles même si le Chêne pédonculé semble plus sensible aux sécheresses exceptionnelles. Le Chêne sessile apparaît cependant d'autant plus sensible à la sécheresse estivale que le climat est chaud et sec. En France, cela se traduit par un gradient ouest-est de baisse de sensibilité au climat. Ainsi, dans l'ouest de la France sous climat océanique sec ($P < 700$ mm), il présente une réponse négative forte à la sécheresse estivale (**Figure 9**) et aux températures automnales. En revanche, sa réponse à ses facteurs est très faible dans les conditions plus fraîches et plus humides du climat semi-continental de l'est de la France ($P > 800$ mm) [A9, 16 ; B11, 15]. Les résultats dendroécologiques sont cohérentes avec les connaissances actuelles sur l'écophysiologie de ces deux espèces concernant la sensibilité différentielle au phénomène d'embolie hivernale (Cruziat et al., 2002), la réactivité de l'activité cambiale au printemps et le synchronisme avec les cycles foliaires (Barbaroux et Bréda, 2002 ; Michelot et al., 2012) et la régulation des pertes en eau (Aranda et al., 2005 ; Raffalli-Delerce et al., 2004). Ainsi, les larges vaisseaux des Chênes (bois initial) sont sensibles à l'embolie hivernale et printanière alors que les petits vaisseaux du bois de Hêtre le sont peu. Ainsi, pour le Hêtre la réactivation de la croissance au printemps est donc moins dépendante des réserves carbonées stockées (amidon, etc.) en fin de saison précédente. Le transport de l'eau du sol à la cime étant possible, la croissance radiale du Hêtre commence quelques jours après l'expansion des feuilles et l'assimilation carbonée. Fin juin, entre 30 et 70 % de l'accroissement radial a déjà eu lieu et la croissance s'arrête entre fin août et mi-septembre. De plus, contrairement aux Chênes pour lesquels seuls quelques cernes restent fonctionnels pour le transport de l'eau (en conditions normales), un nombre important de cernes est utilisé pour le flux d'eau chez le Hêtre ce qui rend cette essence beaucoup moins dépendante des vaisseaux formés pendant l'année. Ceci explique, en grande partie, l'importance du bilan hydrique en début de saison pour la mise en place du cerne annuel, et plus particulièrement pour celle du bois initial.

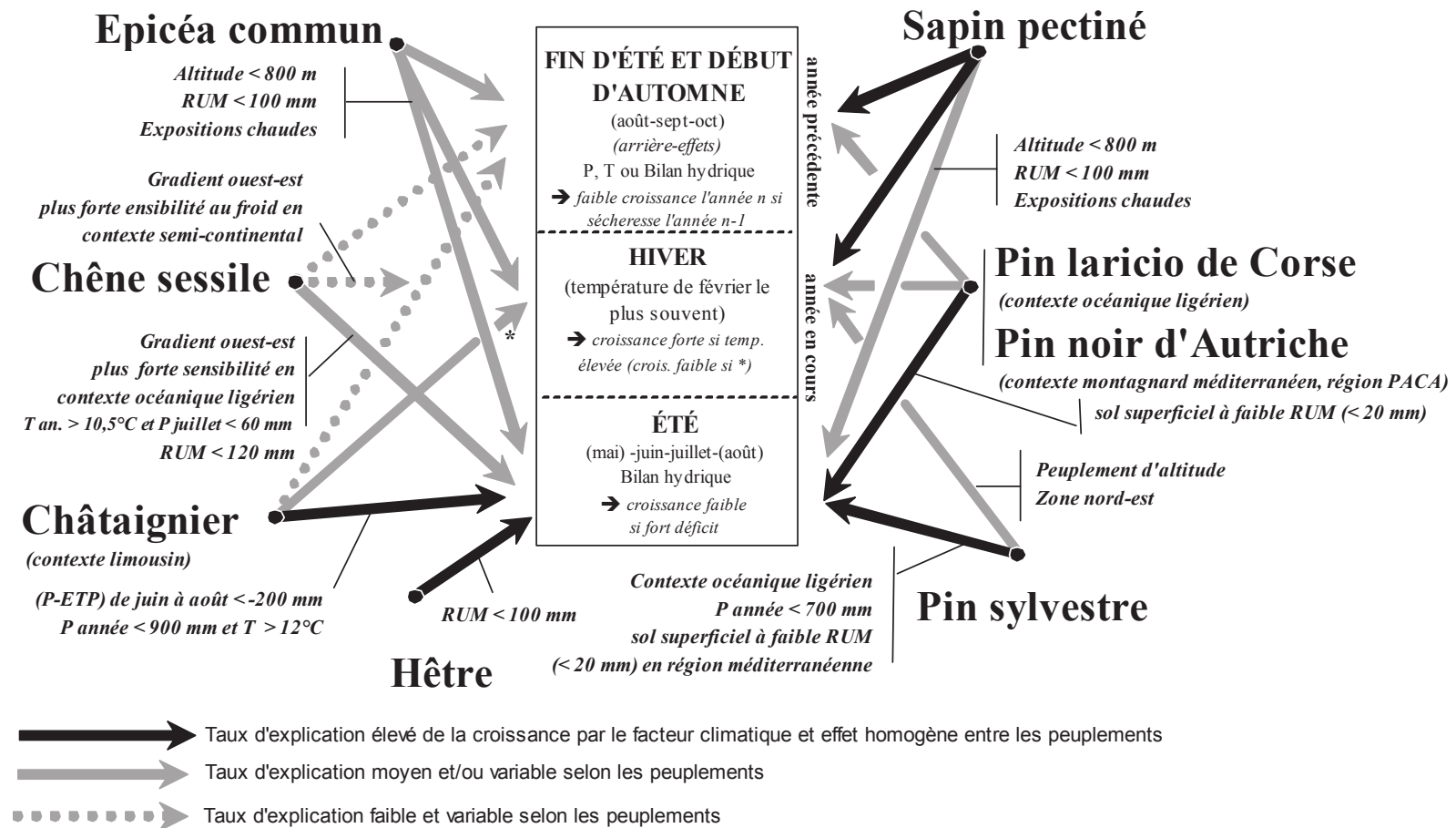
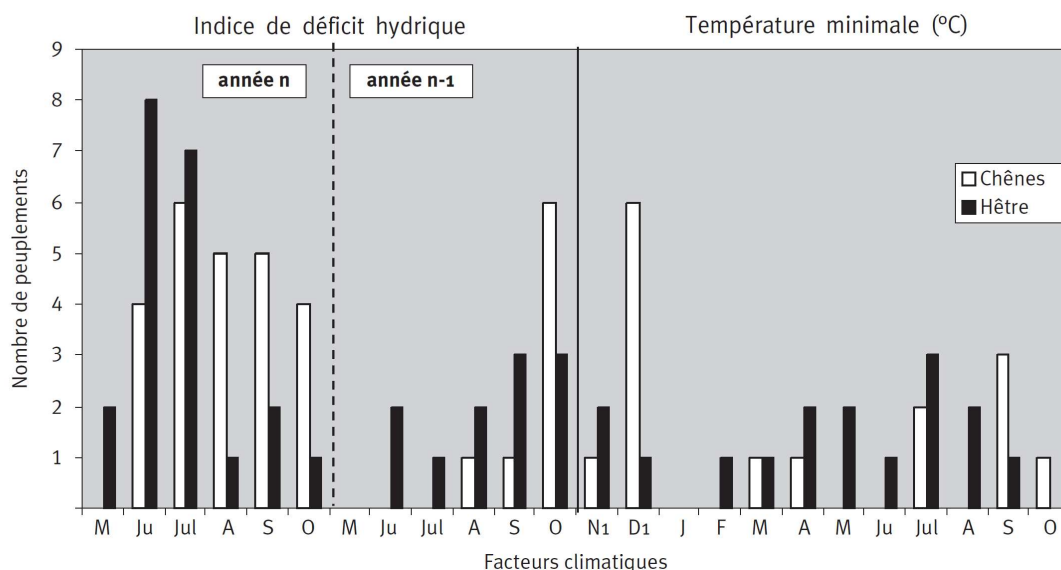


Figure 7. Synthèse du déterminisme climatique de la variabilité interannuelle de la croissance de cinq espèces forestières françaises. Les résultats ont été obtenus par des approches dendrochronologiques menées sur des futaies régulières adultes issues de régénérations naturelles ou de plantations. Le texte entouré précise les conditions dans lesquelles le rôle du facteur devient plus important. Par exemple, pour le Hêtre, l'importance du bilan hydrique (résultats de l'association des pluies, des températures et de la réserve utile maximale en eau du sol, RUM) augmente dans le cas de peuplements poussant sur les sols les plus "secs" (RUM < 100 mm).

Les histogrammes représentent, pour chaque variable climatique, le nombre de peuplements dans lequel le paramètre intervient. Dans le tableau, les valeurs entre crochets correspondent aux moyennes. SM = sensibilité moyenne. Pour les modèles, seules les variables rencontrées dans au moins 4 peuplements sont présentées.



	Hêtre	Chêne
Nb peuplements	15	15
Nb arbres.	450	443
Ht (m)	21,4-30,2	17,7-30,4
Dia (cm)	29-50	25-44
Âge (ans)	54-160	54-139
Dens. (t/ha)	201-764	190-569
Alt. (m)	50-1 300 [470]	57-370 [222]
RUM (mm)	77-274 [133]	59-270 [182]
Lc (mm/an)	1,36-3,80 [2,3]	1,34-2,38 [2,0]
MS	0,199-0,319 [0,266]	0,193-0,294 [0,231]
AC	0,301-0,665 [0,523]	0,386-0,598 [0,499]
An. caract.		
1989	Fréq : 67 % ; EcR(%) : - 34	Fréq : 53 % ; EcR(%) : - 25
1976	Fréq : 80 % ; EcR(%) : - 43	Fréq : 80 % ; EcR(%) : - 31
1958	Fréq : 60 % ; EcR(%) : + 64	Fréq : 80 % ; EcR(%) : + 59
Modèles		
r ²	15,8 % à 57 % [34,1 %]	6,8 % à 52,3 % [28,5 %]
Fact. climat.		
8-10 peupl.	BH juin [26,6 %]	
6-7 peupl.	BH juil.	BH juil. [18,5 %] BH oct. (n-1) Temp. déc. (n-1)
4-5 peupl.		BH juin BH août BH sept. BH oct.

Figure 8. Comparaison de la réponse au climat des peuplements de Hêtre et de Chêne sessile et pédonculé du RENECOFOR [d’après publication **B11**]. Les indices de déficit hydrique (=bilan hydrique) sont issus du modèle « Biljou » développé par Granier et al. (1999). N1 et D1 = novembre et décembre de l’année qui précède la mise en place du cerne. MS = sensibilité moyenne ; AC = auto-corrélation d’ordre 1.

Pour le Chêne, la production de larges vaisseaux avant l'apparition des feuilles est nécessaire pour une restauration de l'intégrité du système conducteur au printemps. Plusieurs auteurs ont également montré qu'une partie non négligeable de l'accroissement radial était acquis avant la sortie des nouvelles feuilles et le développement complet du houppier (jusqu'à 30 %). Cet accroissement est possible grâce à la forte remobilisation printanière des réserves carbonées stockées en automne. En favorisant un stockage de carbone important et la translocation des différents nutriments des feuilles aux branches et aux bourgeons avant la sénescence, les automnes humides participent donc à la mise en place d'un cerne large l'année suivante. D'une façon similaire, en diminuant le pourcentage de vaisseaux embolisés, les températures hivernales clémentes permettent le maintien de l'intégrité du système conducteur et donc de meilleures conditions de croissance. Par la suite, la croissance aérienne des Chênes est organisée en vagues successives et, au cours de l'été, la même branche peut produire plusieurs générations de feuilles. Des déficits hydriques pendant l'été limitent donc le développement foliaire, diminuent le taux de photosynthèse et ralentissent voire stoppent la croissance.

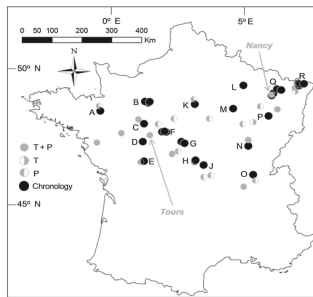
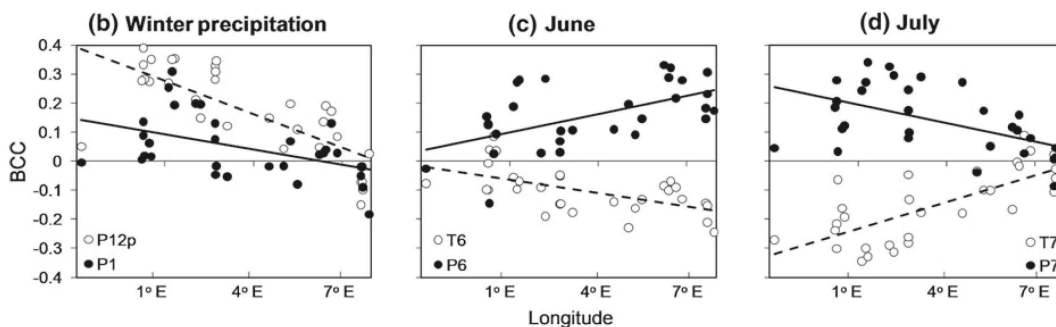
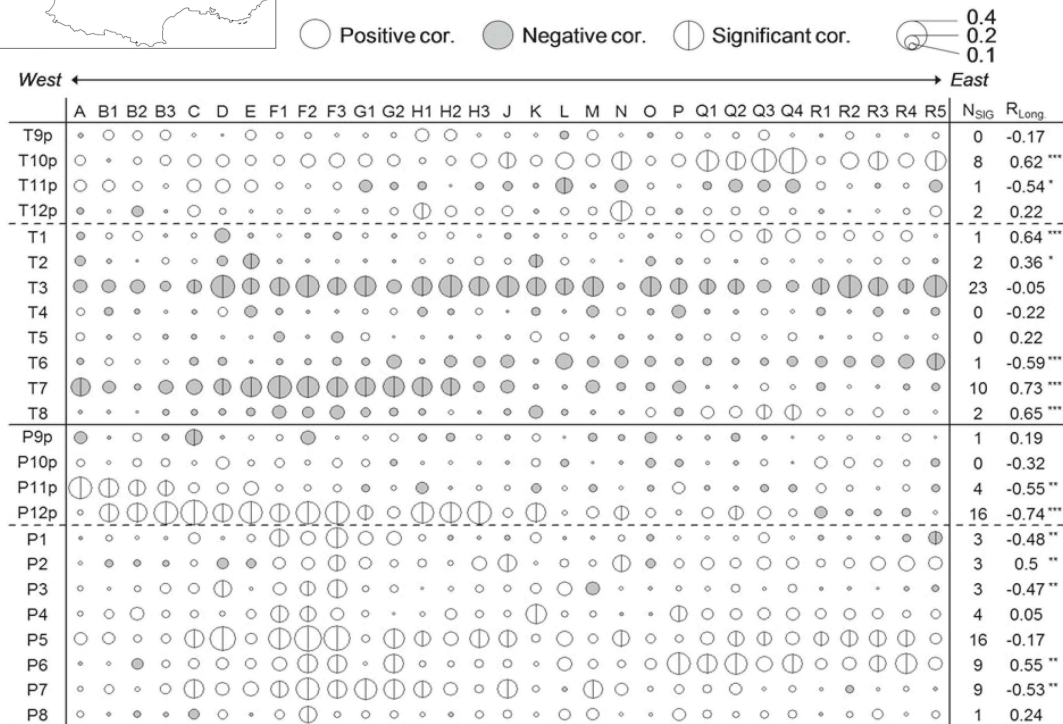


Figure 9. Réponse au climat du Chêne sessile (31 peuplements) le long d'un gradient Ouest/Est dans la moitié Nord de la France. BCC = coefficient de corrélation bootstrap. La taille et la couleur des ronds indiquent le niveau et le sens des corrélations. N sig = nombre de chronologies sur les 31 répondant au facteur. R long = corrélation avec la longitude. T et P = température et précipitation ; p = année précédente [d'après publication A9].



4.2. Sapin pectiné et Epicéa commun

Les comportements du Sapin pectiné et de l’Épicéa commun sont très proches (**Figure 7 page 26 et Figure 10**) [A7, 10, 11, 14 ; B6]. Toutes les études menées sur ces essences en contexte montagnard soulignent que le régime thermique joue un rôle plus important que le régime hydrique, particulièrement en fin d’été (août) ou en automne (septembre ou octobre de l’année précédent la mise en place du cerne) et en hiver (février), avec des réductions de croissance liées au froid hivernal qui augmentent avec l’altitude. Globalement, le Sapin apparait plus thermophile que l’Épicéa (forte réponse aux températures sur l’ensemble de la saison de végétation) et plus sensible aux aléas climatiques extrêmes : plus fortes réductions de croissance en cas de froid intense ou de sécheresses prononcées. Pour les deux espèces, la sensibilité à la sécheresse estivale est néanmoins d’autant plus forte que la xéricité locale augmente : exposition sud, altitude < 800 m et/ou RUM < 100 mm (**Figure 7 page 26**).

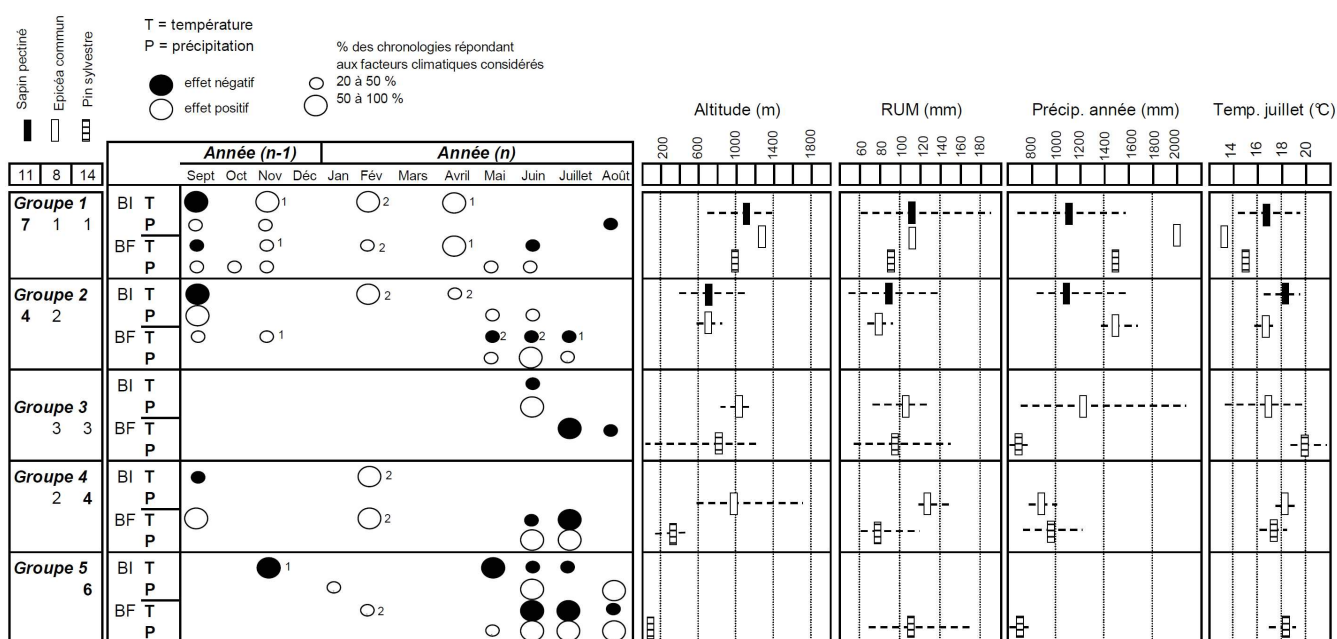


Figure 10. Réponses au climat pour le bois initial (BI) et le bois final (BF) du Sapin pectiné (11 peuplements et 328 arbres), de l’Épicéa commun (8/239) et du Pin sylvestre (14/419) du RENECOFOR. Pour chaque groupe et chaque espèce, la valeur moyenne (barre verticale) et la gamme de variation (ligne pointillée) pour la RUM (Réserve Utile Maximale en eau du sol en mm), l’altitude (m), les précipitations annuelles (mm / an) et la température moyenne de juillet (°C) sont précisées. Les chiffres sous les espèces et les groupes correspondent au nombre de peuplements. Pour les températures (T), les ronds sans numéro indiquent que ce sont les températures maximales (Tmax) qui influencent exclusivement la croissance des peuplements. Au contraire, le chiffre 1 indique que les corrélations ont été significatives seulement avec les températures minimales (Tmin). Enfin, le chiffre 2 indique qu’il n’y a pas de réponse commune et donc que, selon le peuplement, c’est la Tmin ou la Tmax qui influence la croissance (d’après publications B6).

4.3. Pins sylvestre, noir et laricio

Comparés au Sapin et à l'Épicéa, les Pins sylvestre, noir et laricio sont généralement beaucoup moins sensibles au froid hivernal, bien que la sensibilité à la température de février du Pin sylvestre augmente pour les peuplements sous climat froid. En revanche, les Pins sont particulièrement sensibles aux sécheresses printanière et estivale (**Figure 7 page 26**) [A7, 11 ; B3, 6]. Ainsi, comme le Chêne sessile, les Pins sylvestre et laricio poussant dans un contexte océanique peu arrosé ($P < 700$ mm) sont très sensibles aux précipitations sur l'ensemble de la saison de végétation (**Figure 10**). Une même réponse a été observée sur les sols les plus superficiels en contexte supra-méditerranéen et montagnard en région PACA pour les Pins noir et sylvestre (**Figure 11**)

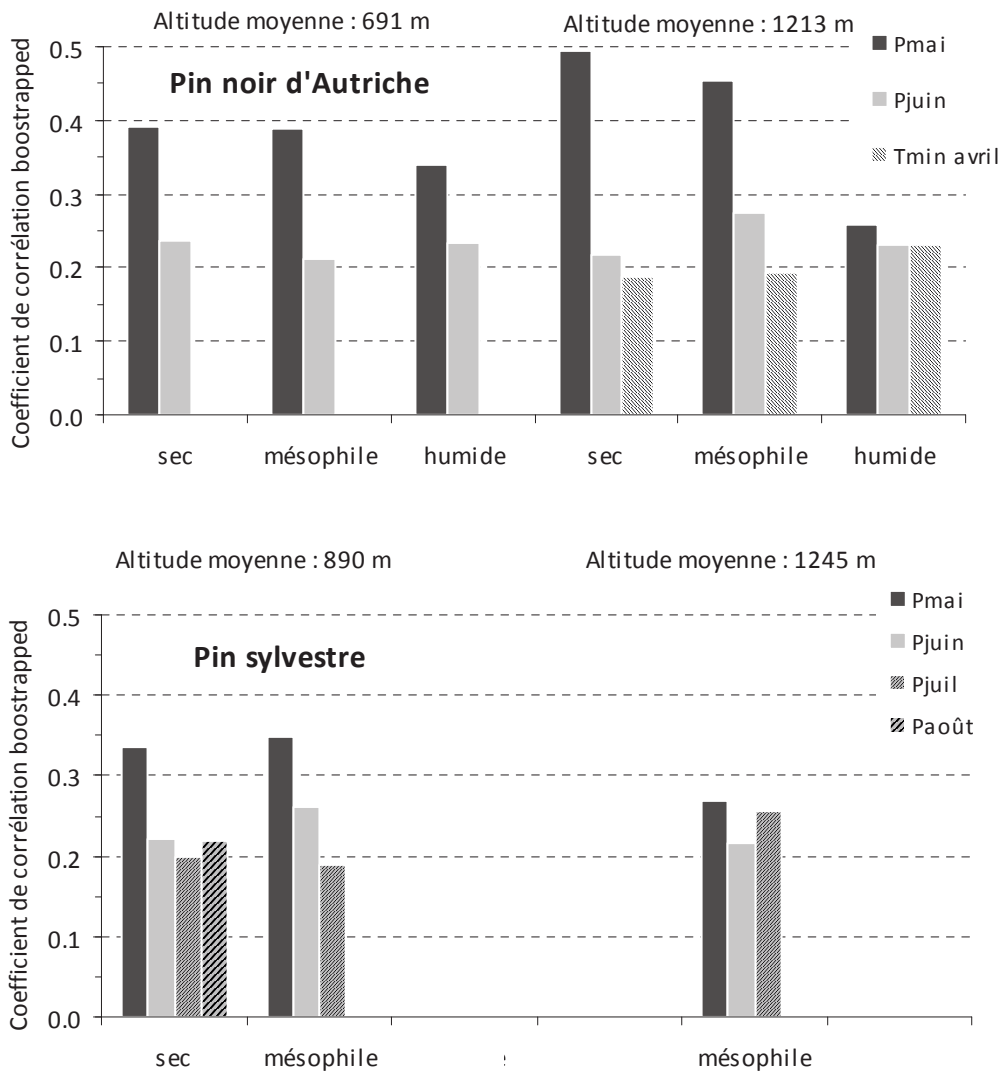


Figure 11. Synthèse des principaux facteurs climatiques influençant la croissance du Pin noir d'Autriche (22 peuplements et 104 arbres) et du Pin sylvestre (13/59) en région PACA. Plus la barre de l'histogramme est importante et plus le facteur joue un rôle important. P = précipitations ; Tmin = température minimale. Seuls les facteurs les plus discriminants entre modalité sont représentés (d'après publication B3).

4.4. Le Châtaignier

Une seule étude en région Limousine a été menée sur cette essence [B2]. Dans ce contexte, la réponse du Châtaignier aux pluies durant la saison de végétation apparaît très forte (Figure 12). Ainsi, dans la Châtaigneraie limousine, les années à croissance réduite sont associées à des cumuls de précipitation entre mai et juillet inférieurs à 200 mm alors que les fortes croissances correspondent généralement à plus de 300 mm. Les contextes les moins arrosés ($P < 900$ mm) et les plus chauds ($T > 12^{\circ}\text{C}$) apparaissent comme les zones de plus fortes réponses.

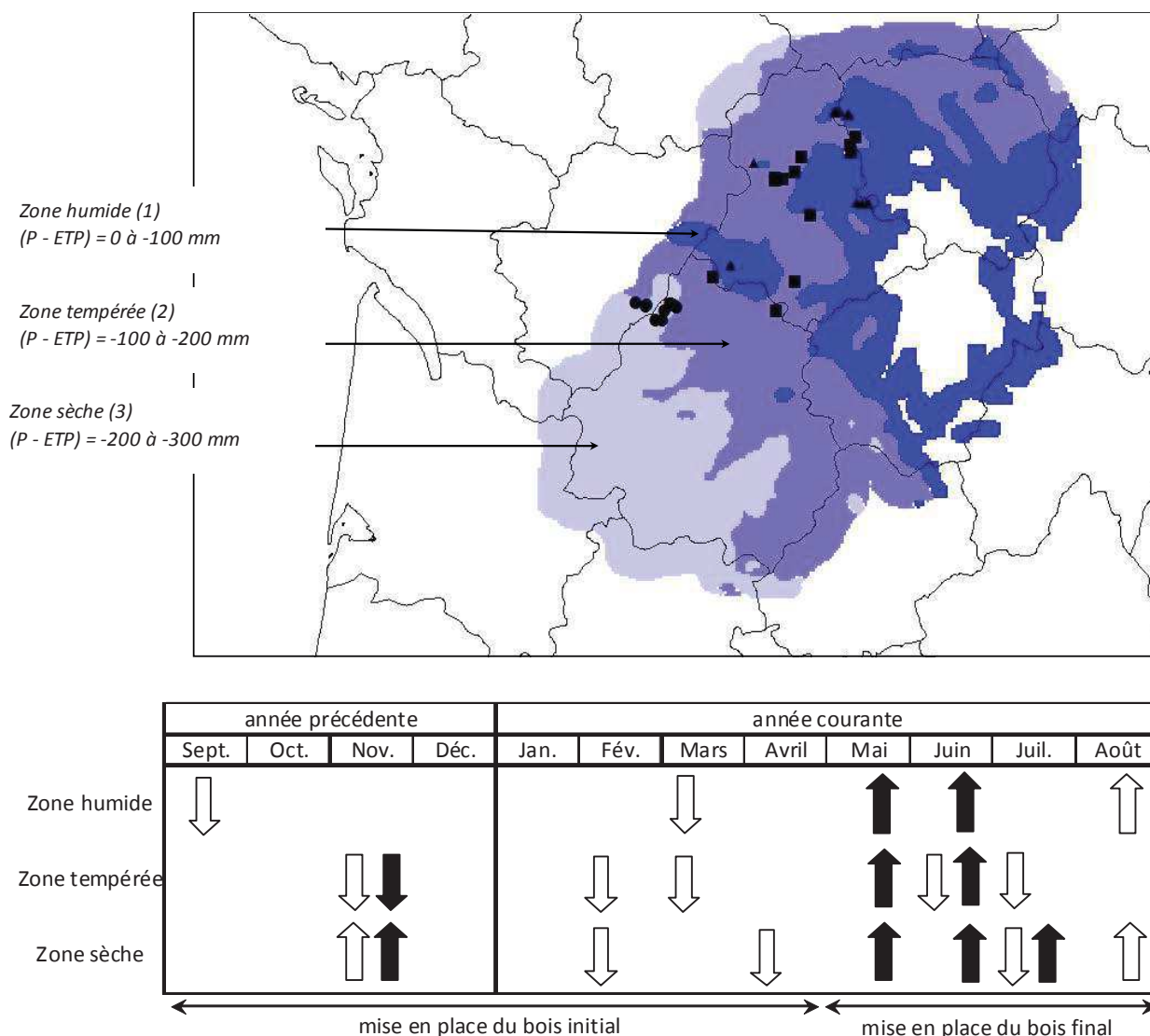


Figure 12. Localisation géographique des 36 peuplements échantillonnés (146 arbres) dans les trois zones climatiques (somme des $(P - ETP)$ Turc) de mars à septembre ; moyenne 1961-1990 ; données spatialisées de Météo-France (AURHELY) et du LERFOB). Zone 3 : 11 peuplements (ronds noirs) et 47 arbres. Zone 2 : 13 peuplements (carrés noirs) et 48 arbres. Zone 1 : 12 peuplements (triangles noirs) et 51 arbres. Pour la réponse au climat, une flèche vers le bas indique un effet négatif du facteur et une flèche vers le haut un effet positif. Les flèches blanches correspondent à la température et les flèches noires aux précipitations. Par exemple, les températures (maximales ici) élevées en février, mars ou avril se traduisent par une réduction de la largeur du bois initial et des précipitations abondantes en mai et juin avec une zone de bois final large. Les fonctions de corrélation bootstrapped ont été calculées sur la période 1945-2009 (d'après publication B2).

4.5. Modification de la réponse au cours du XX^{ième} siècle ?

Les premiers travaux mettant en évidence des ajustements des réponses des arbres aux modifications environnementales sur des vastes échelles spatiales remontent aux années 1990 mais la première synthèse a été faite en 2008 par D'Arrigo et al. [B4]. Ces études, menées sur les forêts boréales de conifères, ont montré que le réchauffement climatique observé depuis les années 1970-80 s'était traduit par une levée de contrainte thermique et une diminution de la corrélation entre la croissance et la température estivale. Mes études menées dans différents écosystèmes tempérés ont confirmé ses ajustements de réponse en plaine sur le Chêne sessile [A9, B2] et en montagne sur les résineux [A7]. Par exemple, pour la chênaie sessiliflore dans la moitié Nord de la France, une réduction de la corrélation a été observée entre la croissance et les pluies de juillet sur la période 1914-1993 [A9]. Pour les Pins et le Sapin pectiné, on constate une réponse de plus en plus forte aux températures printanières (centrées sur avril) que ce soit en contexte supra-méditerranéen montagnard dans la région PACA [A7] (Figure 13) ou en contexte semi-continentale Vosgien (Figure 14). Ce comportement est interprété comme une réponse à la levée de contrainte thermique résultant des réchauffements notables observés pour ces périodes printanières au cours des dernières décennies.

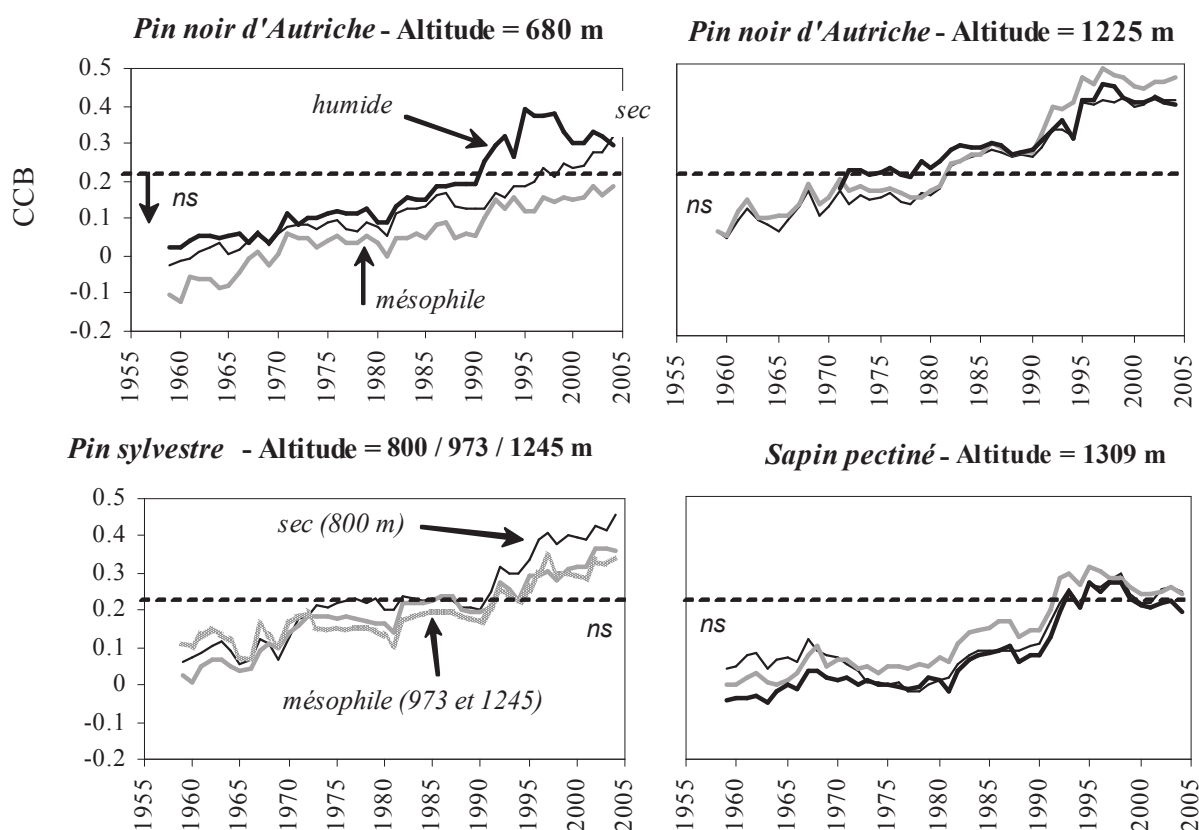


Figure 13. Evolution temporelle des coefficients de corrélation boostrapped (CCB) entre la température moyenne minimale d'avril et les indices de croissance pour des peuplements de Pin noir d'Autriche (22 peuplements et 104 arbres), de Pin sylvestre (13/59) et de Sapin pectiné (9/37) en région PACA. Les CCB ont été calculés sur 46 périodes de 50 ans (1910 - 1959 à 1955 - 2004) pour chaque espèce et chaque condition écologique échantillonnée : gradients d'altitude et de xéricité locale. La ligne en pointillés représente le seuil de significativité à 5% (voir publication [A7]).

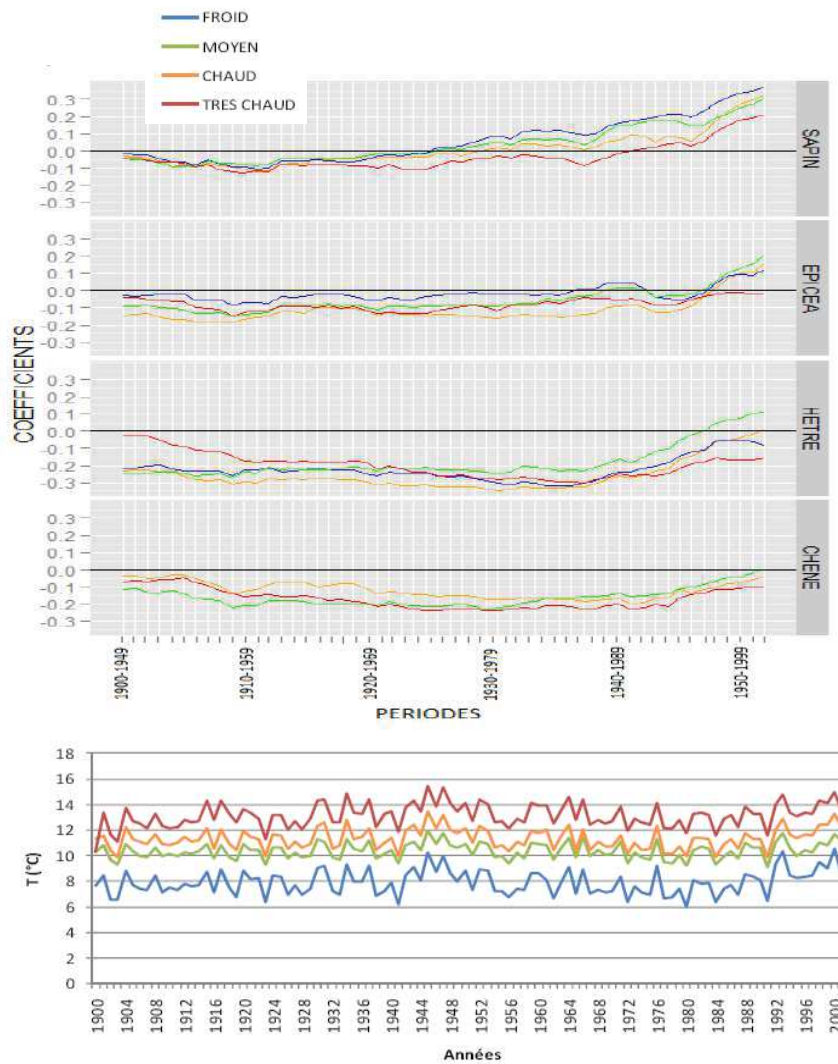


Figure 14. Evolution de la réponse aux températures moyennes de mars-avril-mai du Hêtre, du Chêne sessile, du Sapin et de l'Epicéa dans le massif Vosgien selon la strate thermique dans laquelle les arbres ont été échantillonnés. Froid = T moyenne annuelle < 7°C ; moyen = [7 à 8[; chaud = [8 à 9]; très chaud > 9°C. La figure montre les coefficients de corrélation bootstrap pour 54 périodes de 50 ans (1900-1949 à 1953-2002) et les variations de la température sur la période 1900-2002 (résultats non publiés issus du master de Nicolas Gomez, 2011).

5. Quelles stratégies d'échantillonnage pour améliorer la qualité de la chronologie moyenne et des relations cerne-climat ? [A2, 3, 5, 8, 10, B1]

L'utilisation de sources de données multiples provenant de protocoles d'échantillonnage variés ou encore la prise en compte de nombre différents d'arbres pour construire les chronologies moyennes peuvent avoir des conséquences sur la représentativité et l'intensité du signal contenue dans celles-ci ou encore sur la significativité et les précisions des relations cerne-climat de la population. Ainsi, par rapport à la réponse de la population (valeur dite vraie pour un nombre infini d'arbres), les valeurs estimées (par exemple les coefficients de corrélation cerne-climat) sur les n échantillons peuvent présenter une dispersion élevée, une faible précision ou encore un biais important (**Figure 15**).

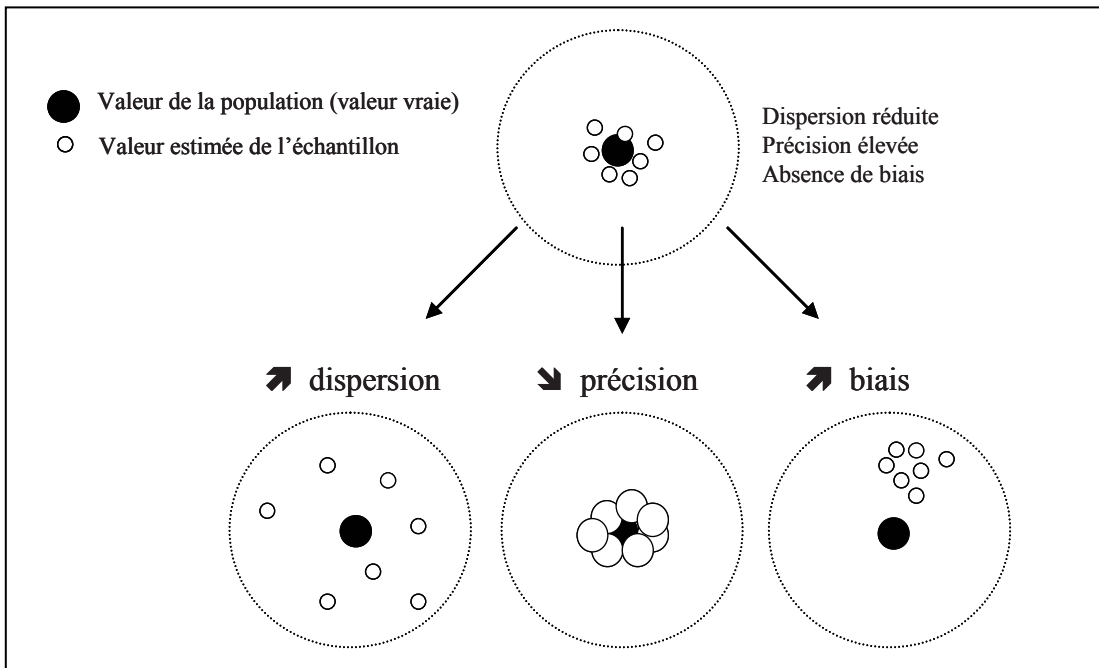


Figure 15. Illustration des différentes sources d'erreur d'estimation de la réponse de n échantillons par rapport à la réponse de la population (n infini) (modifié d'après (Mérián, 2013).

Afin d'apporter des recommandations pour l'échantillonnage des arbres en vue de la meilleure estimation possible du signal climatique dans les peuplements échantillonnés et de quantifier les imprécisions des résultats selon la stratégie adoptée, des études spécifiques ont été menées notamment dans le cadre de la thèse de Mérián (2012).

5.1. Effet du nombre d'arbres échantillonnés sur la qualité de la chronologie moyenne et sur la précision des coefficients de corrélation [A8]

Dans les études dendroécologiques, la taille de l'échantillon correspond généralement au nombre d'arbres dominants carottés par placette. Comme la représentativité de la chronologie augmente avec la taille de l'échantillon (Briffa et Jones, 1990 ; Mäkinen et Vanninen, 1999), la stratégie d'échantillonnage résulte d'un compromis entre la quantité de travail à faire sur le terrain et la qualité de l'estimation de la réponse de la population. Le degré de faisabilité dépend bien entendu de l'objectif de l'étude et de l'erreur que le chercheur est prêt à accepter. Différents travaux ont mis en évidence quelques statistiques pour quantifier la robustesse de la chronologie telles que la corrélation moyenne inter-arbre (r) ou encore le signal exprimé dans la population (*expressed population signal* ; EPS) (Wigley *et al.*, 1984). Pour un peuplement donné, la force du signal climatique dans les séries individuelles d'indices de croissance (c'est-à-dire issues de la standardisation) est estimée par la corrélation moyenne entre l'ensemble des paires possibles des séries selon la formule suivante :

$$r = \frac{1}{2n(n-1)} \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^n r_{ij} \right)$$

où n est le nombre de séries d'indices disponibles, i et j les séries correspondantes aux arbres i et j et r_{ij} la corrélation entre ces deux séries. La valeur r varie de 0 quand les séries sont totalement indépendantes à 1 quand les séries sont strictement identiques. Une valeur élevée de r indique que les variations interannuelles sont synchrones entre les arbres et donc que leur réponse est homogène. r est donc une mesure de la force du signal commun et $(1-r)$ du bruit correspondant.

Le calcul de l'EPS quantifie la force relative du signal commun r par rapport au signal total (signal commun + bruit) (Mérian, 2013 ; Wigley *et al.*, 1984) :

$$\text{EPS} = \frac{r}{r + \frac{1-r}{n}}$$

Les valeurs de l'EPS oscillent entre r et 1 ; la valeur de 1 traduisant un bruit nul et une estimation « parfaite » du signal (quand n tend vers l'infini). La valeur de 0,85 est souvent admise comme le seuil minimum d'acceptabilité c'est-à-dire qu'au dessus de ce seuil on estime que le signal contenu dans la chronologie moyenne est fort et représentatif du signal théorique de la population (= nombre infini d'arbres).

Les données du réseau RENECOFOR (58 futaies régulières équiennes) ont été utilisées de façon 1) à quantifier la diminution de l'EPS selon le nombre d'arbres échantillonnés par peuplement et 2) mettre en évidence des différences éventuelles entre les espèces forestières (Hêtre, Chêne sessile, Pin sylvestre, Sapin pectiné, Epicéa commun) [A8]. Pour cela, les différents calculs ont été effectués en diminuant progressivement le nombre d'arbres pris en compte : 28 arbres pour le maximum et 3 arbres pour le minimum. Cette diminution se traduit par une décroissance exponentielle des valeurs d'EPS (**Figure 16**). Des différences notables apparaissent également entre les essences selon leur trait fonctionnel, notamment l'opposition espèce tolérante à l'ombrage ou non (sciaphile / héliophile). Pour un nombre donné d'arbres échantillonnés, les espèces héliophiles (*Quercus petraea* et *Pinus sylvestris*) montrent un coefficient de corrélation inter-arbre et des valeurs d'EPS plus élevés (plus forte similitude de réponse entre arbres) que les espèces sciaphiles (*Abies alba*, *Fagus sylvatica* et *Picea abies*). Pour atteindre la valeur de 0,85 de l'EPS à partir de carottage d'arbres dominants, il faudra

donc échantillonner en futaie régulière équienne au moins 6 arbres pour le Chêne sessile, 11 pour le Pin sylvestre, 18 pour le Sapin pectiné et 27 pour le Hêtre et l'Épicéa commun.

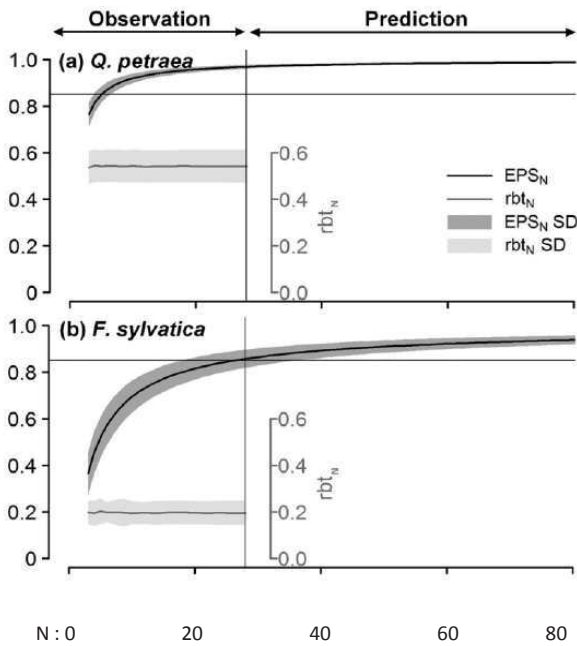


Figure 16. Exemple de diminution des valeurs d'EPS selon le nombre d'arbres carottés (N) par peuplement pour les Chênaies (17 sites) et les Hêtraies (17) du réseau RENECOFOR. Les données après $N = 28$ correspondent aux prédictions issues du modèle obtenu pour la gamme 3 à 28 (observations). La corrélation inter-arbre par site est également précisée (r_{bt}). SD = écart-type. Le trait fin indique la valeur 0,85 pour l'EPS ; valeur généralement admise comme étant le seuil d'acceptabilité (Wigley *et al.*, 1984) pour la représentativité de la chronologie moyenne (voir publication [A8]).

A partir de ces résultats, nous avons également quantifié les changements des coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) cerne-climat selon le nombre d'arbre pris en compte (Figures 17 et 18). Pour les 5 espèces étudiées, la diminution du nombre d'arbres pris en compte (de 28 à 3) se traduit par une réduction des valeurs des CCB de 10 % pour les espèces héliophiles à plus de 25% pour les espèces dryades ou de ½ ombre.

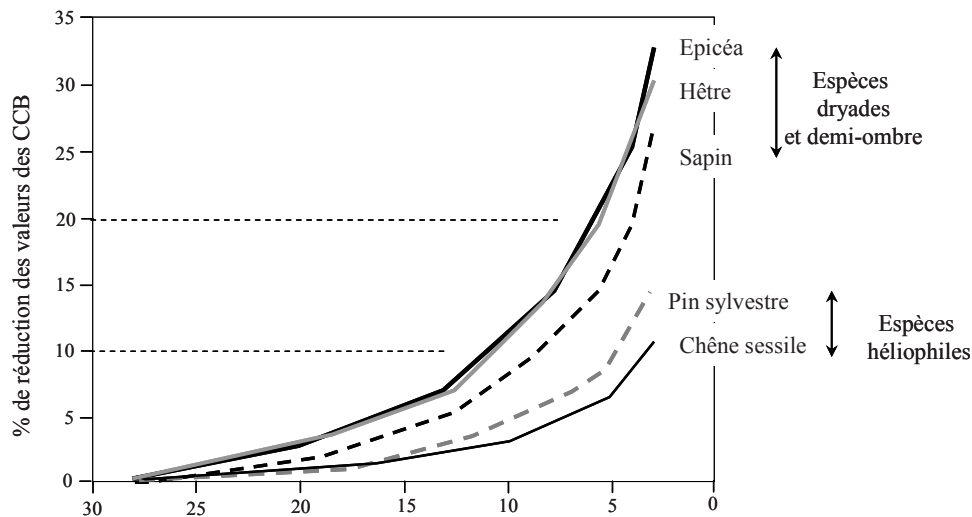


Figure 17. Réduction des coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) en fonction de la taille de l'échantillon ($n = 28$ à 3) pour 5 espèces dans le réseau RENECOFOR (58 sites). Pour chaque espèce, les CCB ont été établis sur la période 1949-1994 (régresseurs climatiques : températures et bilans hydriques climatiques ($T-ETP_{Turc}$) mensuels). Par exemple, pour le Sapin pectiné, le passage de 28 (valeurs de référence) à 3 arbres pour le calcul des CCB (CCB_3 versus CCB_{28}) se traduit par une réduction relative des CCB de plus de 25%. La figure montre clairement les différences de comportement entre les espèces héliophiles et sciaphiles. (voir publication [A8]) (Modifié d'après Mérian, 2013).

La diminution du nombre d'arbres pris en compte modifie également la significativité des CCB (passage de valeurs significatives à des coefficients non-significatifs). La **Figure 18** illustre les changements pour le Sapin pectiné quand on passe de 28 arbres à 3 arbres (zone B dans la **Figure 18**). L'analyse réalisée sur les 5 espèces montre que les changements peuvent atteindre 8% et qu'ils augmentent fortement quand on passe le seuil de 10 arbres (**Figure 19**). Ceci est la conséquence de l'augmentation des écart-types (SD) des CCB (=diminution de la précision). Par exemple, pour $n=10$ arbres, SD_{10} est en moyenne de 0,08 pour les dryades et inférieur à 0,06 pour les héliophiles ([A8]).

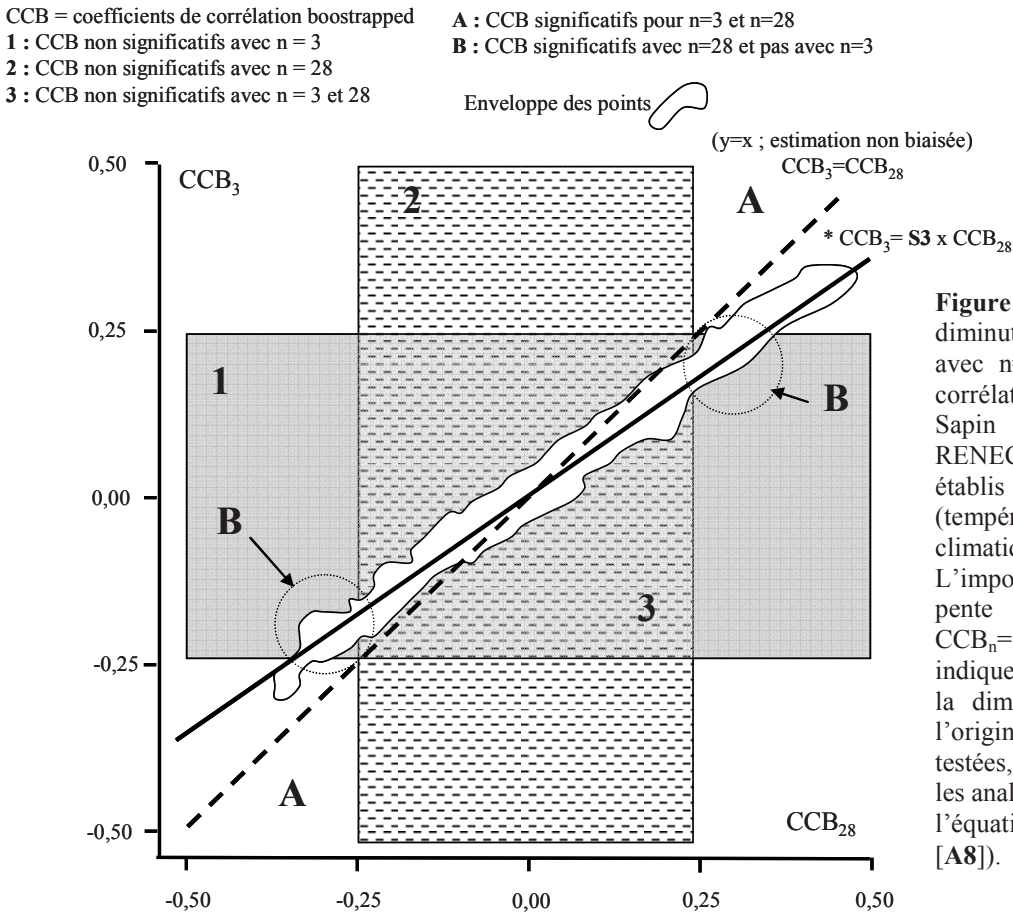


Figure 18. Illustration des effets de la diminution de la taille de l'échantillon (ici avec $n=3$ et 28) sur les coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) pour le Sapin pectiné dans le réseau RENECOFOR (10 sites). Les CCB ont été établis sur la période 1948-1994 (températures et bilans hydriques climatiques ($T-ETP_{Turc}$) mensuels). L'importance du biais est estimée par la pente S_n (ici S_3) de la droite $CCB_n = S_n CCB_{28}$. Une pente inférieure à 1 indique que les CCB approchent zéro avec la diminution de n . (* : l'ordonnée à l'origine étant identique pour les 5 espèces testées, il n'a pas été pris en compte dans les analyses et non présenté pour simplifier l'équation) (modifié d'après publication [A8]).

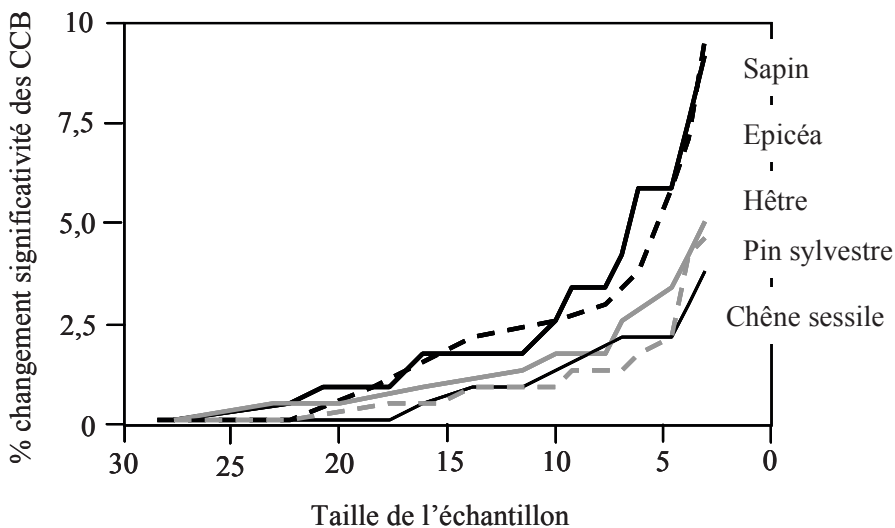


Figure 19. Changement de significativité (significatif à non-significatif) des coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) selon la taille de l'échantillon pour 5 espèces du réseau RENECOFOR (58 sites). Les CCB ont été calculés sur la période commune 1949-1994 (d'après publication [A8]).

5.2. Nombre d'arbres échantillonnés versus nombre de peuplements [A5]

On a vu précédemment que le nombre total d'arbres échantillonnés influençait fortement la qualité de la chronologie moyenne et la précision des relations entre les cernes et le climat. Ainsi, si un nombre total d'arbres échantillonnés de 30 apparaît suffisant pour mener à bien une étude dendroclimatologique pour la majorité des espèces forestières, il est également important de savoir si on obtient les mêmes résultats en échantillonnant les 30 arbres (t) dans un peuplement (p) ou en prenant seulement 1 arbre dans 30 peuplements.

Pour mener à bien cette étude (voir publication [A5]), nous avons réutilisé une partie des séries chronologiques des peuplements de Pin laricio de Corse échantillonnés en région Pays de Loire pour ma thèse. Au total 84 sites et 10 arbres par site ont été utilisés. L'effet du nombre de peuplements (p) a été testé en faisant varier p de 3 à 84 (20 modalités) et celui du nombre d'arbres (t) en faisant varier t de 1 à 10 (10 modalités). Au total, 200 combinaisons ont donc été testées de la plus « faible » (3,1) à la plus « grande » (84, 10).

Sur la qualité de la chronologie de référence, il apparaît que le nombre de peuplements échantillonnés influence davantage les différents indicateurs de qualité du signal (comme l'EPS par exemple) que le nombre d'arbres échantillonnés par peuplement (**Figure 20**). Par exemple, l'échantillonnage de 10 peuplements au lieu de 3 permet, pour une espèce héliophile comme le Pin laricio de Corse, d'augmenter l'EPS de 53% quand on échantillonne seulement 1 arbre par site (3,1 => 10,1) contre seulement 28% pour un total de 10 arbres par peuplement (3,1 => 3,10).

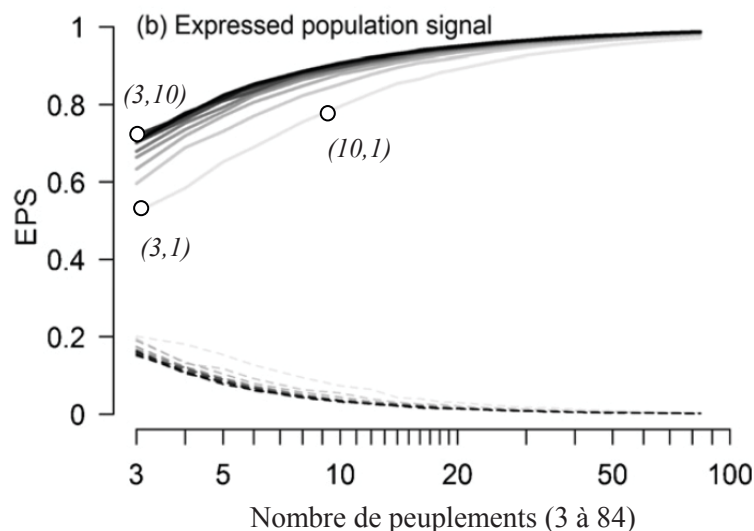


Figure 20. Evolution de l'EPS selon le nombre de peuplements pris en compte (p de 3 à 84) et d'arbres échantillonnés par peuplement (t de 1 à 10) pour le pin laricio de Corse en région Pays de Loire. Les lignes indiquent le nombre d'arbres (ligne gris clair pour 1 arbre ; ligne noire épaisse pour 10 arbres). En haut moyenne et en bas écart-type (d'après publication A5).

Sur la **qualité du signal climatique**, il apparaît que plus le nombre d'arbres échantillonnés et de peuplements est élevé, plus les corrélations entre les cernes et le climat sont fortes (positives ou négatives) et les écart-types de ces corrélations faibles (**Figure 21**). La **Figure 22** montre que les effets de l'augmentation ($p \times t$) varient selon la significativité du régresseur considéré. Ainsi, les modalités ($p \times t$) ne modifient pas la réponse pour les paramètres non-significatifs (a). Pour les paramètres « juste significatifs » (b) ou significatifs (c), l'augmentation du nombre de peuplements augmente fortement la significativité ($CCB > 0,2$) et ceci d'autant plus que le nombre d'arbres par peuplement est faible.

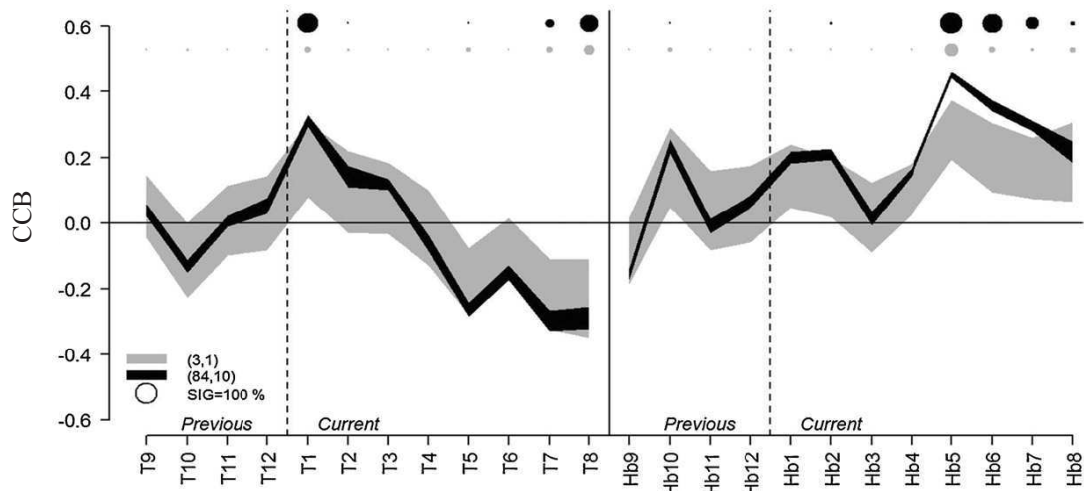


Figure 21. Coefficients de corrélation boostropés (CCB) obtenus entre les différents régresseurs climatiques et les cernes pour le Pin laricio de Corse en région Pays de Loire selon l'effort d'échantillonnage effectué. (3,1) = 3 peuplements et 1 arbre par peuplement ; (84, 10) = 84 peuplements et 10 arbres par peuplements. T = température moyenne ; Hb = Bilan hydrique climatique (Précipitation – EvapoTransPiration). Les numéros indiquent les mois de l'année de septembre de l'année précédente à août de l'année en cours (d'après publication A5).

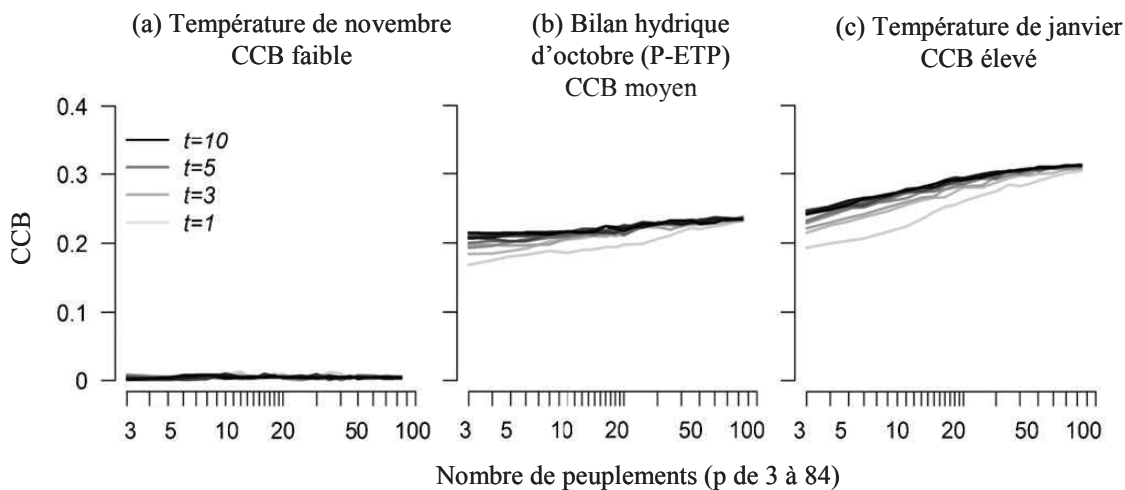


Figure 22. Effet de l'augmentation du nombre d'arbres échantillonnés par peuplements (t de 1 à 10) et du nombre de peuplements (p de 3 à 84) sur la significativité des coefficients de corrélation boostropés (CCB) pour trois régresseurs climatiques (Pin laricio de Corse en région pays de Loire) (d'après publication A5).

5.3. Méthode de correction des coefficients de corrélation [A2, 3]

Les paragraphes précédents ont montré que les nombres totaux d'arbres et de peuplements influençaient fortement la qualité de la chronologie moyenne et la précision des relations entre les cernes et le climat. Toute étude dendroclimatique étant fondée sur l'estimation des relations cernes-climat sur une population « restreinte » (POP_r) avec un nombre fini de t arbres, les coefficients de corrélation sont toujours biaisés (généralement inférieurs) par rapport à ceux que l'on pourrait obtenir si on pouvait échantillonner l'ensemble des arbres de la population (POP).

A partir de 504 chronologies de Sapin pectiné dominants échantillonnés dans le massif du Jura, dans trois contextes climatiques tranchés, nous avons montré que l'on pouvait obtenir des coefficients de corrélation « non biaisés » en appliquant la formule suivante :

$$CCB_{POP} = \frac{1}{\sqrt{EPS_{POP_r}}} \times CCB_{POP_r}$$

- CCB_{POP} = coefficients de corrélation bootstrapped de la population ;
- CCB_{POP_r} = coefficients de corrélation bootstrapped de la population de t arbres échantillonnés
- EPS_{POP_r} = « expressed population signal » calculé sur la population échantillonnée

La **Figure 23** illustre l'effet de la correction pour le bilan hydrique du mois de septembre de l'année précédente (BH-9) (facteur clé pour la croissance du Sapin pectiné dans le contexte jurassien étudié) selon les différentes combinaisons (nombre de placettes p x nombre d'arbres t par placette) pour les trois gradients écologiques (moyenne climatique 1961-1990) :

- L : Altitude = 802 m ; température moyenne annuelle = 7,9°C ; (P-ETP) juillet = -20 mm ;
- M : Altitude = 951 m ; température moyenne annuelle = 7,0°C ; (P-ETP) juillet = -10 mm ;
- H : Altitude = 1080 m ; température moyenne annuelle = 6,1°C ; (P-ETP) juillet = 3 mm ;

La ligne pointillée correspond au coefficient de corrélation corrigé obtenu pour (BH-9) pour l'échantillon maximum de 164 arbres (28 peuplements de 6 arbres) [CCB COR (28,6)]. L'application de la correction permet, pour toutes les associations p x t de réduire fortement les « besoins » en échantillonnage. Ainsi, pour la situation L, en appliquant la correction, il suffit d'échantillonner 10 placettes de 1 arbre ou 5 placettes de 6 arbres pour obtenir le même niveau de significativité que sur 164 arbres. Pour les situations plus contraignantes (altitudes plus élevées), la correction permet de descendre sous les 10 arbres. Ceci est cohérent avec le principe des facteurs limitants et d'une réponse plus homogène des arbres dans les situations les plus contraignantes (signal commun plus fort, valeur d'EPS plus élevée, etc.)

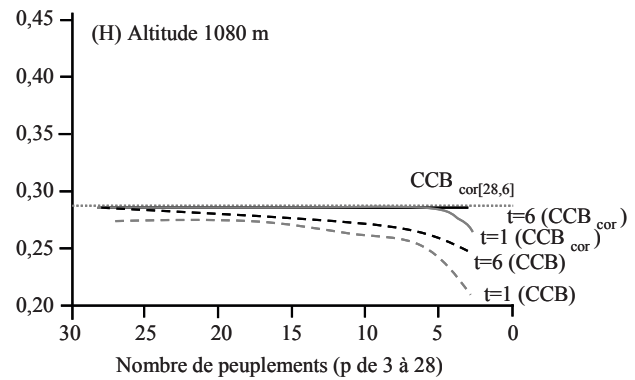
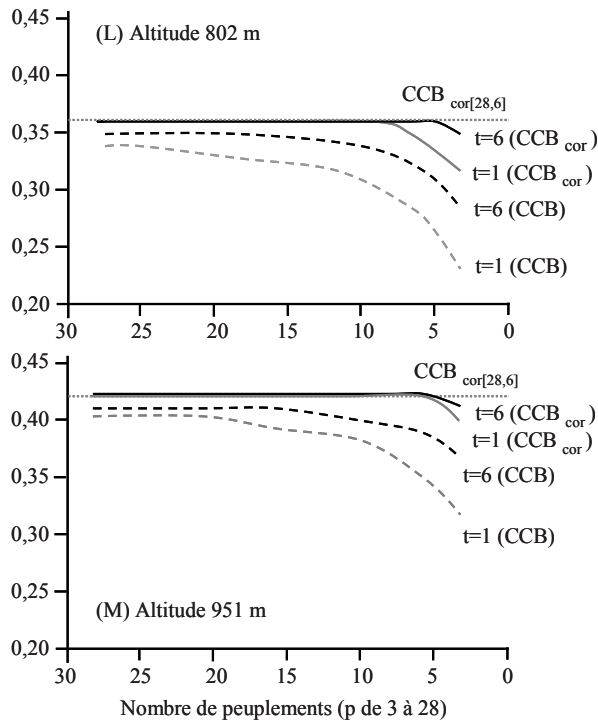


Figure 23. Effet de la correction (COR) sur les coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) selon les associations nombre de peuplements (p) x nombre d'arbres (t) pour le Sapin pectiné poussant dans le massif du Jura dans trois conditions écologiques différentes (L = 802 m ; M = 951 m ; H = 1080 m). CCB pour le bilan hydrique climatique (P-ETP) du mois de septembre de l'année précédant la mise en place du cerne (facteur clé pour la croissance du Sapin dans ce contexte). CCB_{COR} [28,6] = coefficient corrigé obtenu sur les 164 arbres.

5.4. Effets de la taille des arbres sur la réponse au climat [A10, B1]

En dendroécologie, la croissance est très souvent estimée au travers de la largeur de cerne des arbres de gros diamètres c'est-à-dire les arbres généralement dominants. Ces derniers ont été historiquement privilégiés dans les stratégies d'échantillonnage car leur croissance est moins affectée par la compétition inter-individus que les arbres de petits diamètres, souvent dominés. Cependant, si la sensibilité au climat varie selon la taille des arbres, une telle stratégie d'échantillonnage ne permet pas d'estimer correctement la réponse au climat de l'ensemble du peuplement.

Pour répondre à cette question, une étude a été menée sur 61 peuplements échantillonnés dans le RENECOFOR (5 espèces, 1220 arbres, figure ci-contre, **Tableau 1**). Dans chaque peuplement, la sensibilité au climat a été analysée sur les dix plus gros (dominants) et les dix plus petits arbres (codominants) sur la base du diamètre à 1,3 m. Celui-ci a varié de 33 à 44 cm pour les petits diamètres (PDi) et 43 à 57 cm pour les gros arbres (GDi) (Différence moyenne = 27 %).

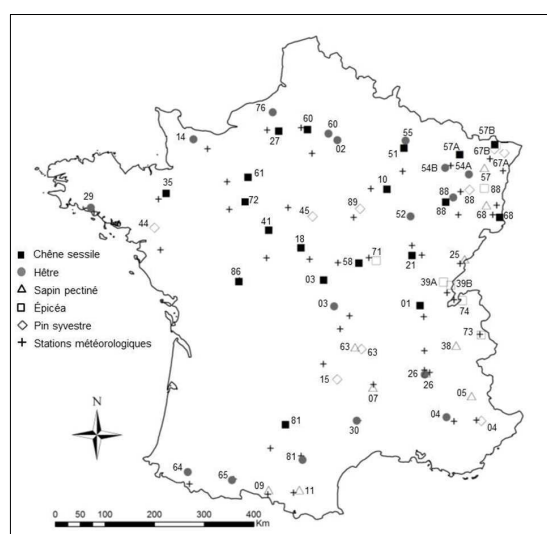


Tableau 1. Caractéristiques stationnelles et de peuplement par espèce [moyenne (écart-type)]. N = nombre de peuplement par espèce (d'après publication **BI**).

Espèce		Chêne sessile (n = 19)	Hêtre (n = 17)	Sapin pectiné (n = 10)	Epicéa (n = 6)	Pin sylvestre (n = 9)
Altitude		210 (82)	528 (441)	1008 (284)	1057 (408)	521 (537)
pH		4,4 (0,2)	5,0 (0,8)	4,8 (0,7)	4,8 (0,5)	4,3 (0,4)
Réserve utile maximale (mm)		130 (45)	98 (40)	85 (24)	73 (35)	86 (43)
Hauteur (m)		26,2 (2,4)	27,0 (3,0)	26,9 (2,0)	27,9 (4,7)	23,7 (2,4)
Densité (n / ha)		551 (169)	405 (185)	384 (76)	482 (137)	487 (160)
Diamètre à 1,3 m (cm)	GDi	46,0 (7,1)	45,9 (5,7)	56,5 (6,5)	52,3 (6,3)	42,4 (4,1)
	PDi	36,0 (5,0)	35,2 (4,9)	43,9 (5,7)	42,3 (5,0)	33,4 (2,2)
Age	GDi	94 (29)	96 (32)	100 (29)	94 (50)	65 (12)
	PDi	89 (24)	94 (31)	93 (30)	89 (47)	63 (10)
Température moyenne trentenaire (°C)	Annuelle	10,1 (0,7)	9,3 (1,8)	7,8 (1,4)	7,3 (1,4)	9,4 (1,3)
	Janvier	2,2 (1,3)	2,0 (2,3)	0,2 (1,8)	-1,0 (1,3)	1,5 (1,8)
	Juillet	18,4 (0,8)	17,2 (1,4)	16,3 (1,2)	15,8 (1,5)	17,8 (1,0)
Bilan hydrique trentenaire (mm)	Annuel	123 (111)	423 (355)	673 (194)	866 (384)	211 (188)
	JJA	-163 (33)	-123 (40)	-54 (65)	4 (89)	-143 (64)

Aucune différence n'a été mise en évidence entre les réponses au climat des gros et des petits arbres pour les essences à tendance héliophile (Chêne sessile, Epicéa commun et Pin sylvestre) (**Figure 24**). En revanche, pour les essences tolérantes à l'ombrage (Hêtre commun et Sapin pectiné), les gros arbres dominants présentent une sensibilité plus forte au stress hydrique estival que les plus petits arbres codominants, cet écart augmentant avec la xéricité locale (réserve utile maximale plus faible, ou climat plus chaud et sec). Ces résultats suggèrent que, pour les essences tolérantes à l'ombrage, 1) les gros arbres pourraient être plus sensibles aux changements climatiques, notamment au stress hydrique estival en contexte xérique, et 2) les futures études sur la sensibilité au climat devraient se baser sur un échantillonnage stratifié en fonction de la taille pour fournir une estimation non biaisée de la réponse du peuplement forestier (voir partie *perspectives de recherches*, paragraphe 2.1).

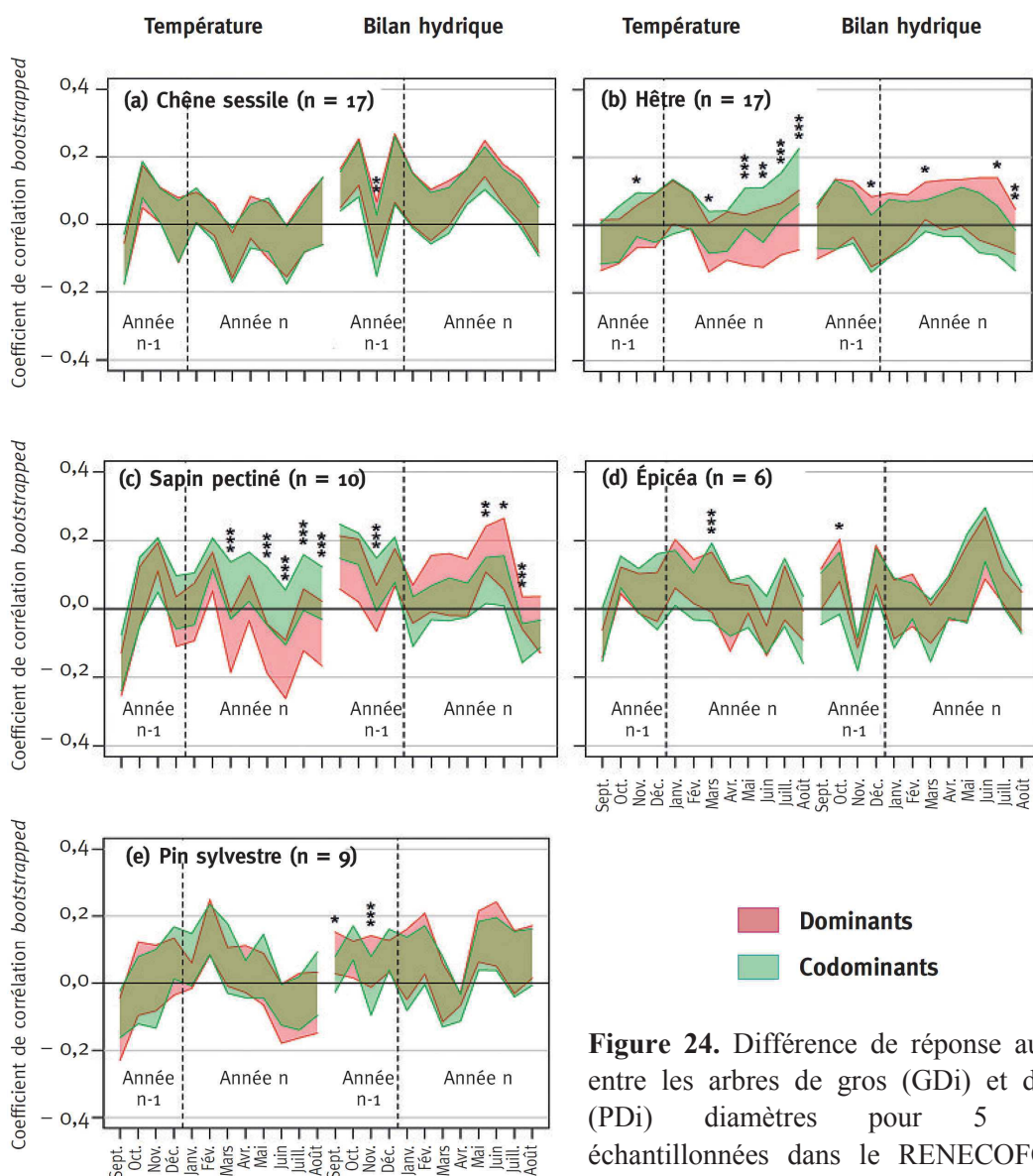


Figure 24. Différence de réponse au climat entre les arbres de gros (GDi) et de petits (PDi) diamètres pour 5 espèces échantillonnées dans le RENECOFOR. Le nombre de * indique des différences significatives aux seuils de 1%, 5% et 10% (n= nombre de peuplements) (d'après publication **B1**).

6. Que savons-nous du déterminisme climatique de la phénologie foliaire des arbres forestiers adultes en contexte tempéré européen [A12 ; B5, 8, 17] ?

Depuis que la phénologie a émergé comme thématique de recherches en écologie, de nombreuses études ont mis en évidence les facteurs modulant les cycles de la floraison ou de la feuillaison au sein des communautés végétales et sur des vastes échelles spatiales (Chuine, 2000 ; Parmesan, 2007). Les observations in situ sont fondamentales pour le suivi précis des cycles de développement des différentes espèces (Menzel et al., 2006). En France, pour les espèces forestières adultes, ce sont les observations réalisées depuis 1997 dans le réseau RENECOFOR qui correspondent aux séries homogènes les plus longues disponibles. Les différents projets menés avec les données du réseau (période 1997-2006) ont permis d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des cycles foliaires (débourrement, jaunissement et durée de la saison de végétation) des 10 principales espèces forestières arborées françaises [B8, 17] et d'établir des modèles de prédictions de ces cycles dans le futur selon différents scénarii climatiques [A12, B17].

Pour les Chênaies, le débourrement commence en moyenne vers la mi-avril et le jaunissement vers la mi-octobre (période 1997-2006) (Tableau 2). Le gradient Ouest-Est correspond à une saison de végétation plus courte à l'Est (180-190 jours contre 210-220 jours) en conséquence d'un débourrement plus tardif (retard de 2 jours par degré de longitude) et d'un jaunissement plus précoce (5-10 jours). Pour le Hêtre, la saison de végétation débute plus tard vers la fin de la troisième semaine d'avril. Le jaunissement des feuilles intervenant début octobre, la saison de végétation est en moyenne de 180 jours. Le débourrement est plus tardif pour les résineux et dépend fortement de l'altitude (retard d'environ 1,5 jours par 100 m).

Espèces	Débourrement			
	n	ddl	dd2	durée (jours)
Feuillus				
<i>Fagus sylvatica</i>	178	112 (12,3) [71-181]	121 (10,0) [98-188]	9,0 (5,4)
<i>Quercus petraea</i>	182	100 (10,2) [78-124]	111 (12,3) [88-195]	11,1 (6,8)
<i>Quercus robur</i>	71	100 (13,0) [71-125]	112 (14,7) [78-137]	12,9 (9,7)
<i>Quercus petraea</i>				
nord-est	82	105 (8,9) [83-124]	115 (10) [90-153]	10,9 (7,7)
nord-ouest	100	95 (9,1) [78-114]	107 (12,7) [88-195]	11,4 (6,0)
<i>Quercus robur</i>				
nord-est	37	109 (6,6) [97-125]	117 (6,5) [97-132]	8,9 (4,8)
nord-ouest	34	89 (9,8) [71-108]	107 (18,8) [78-137]	16,9 (11,6)
Conifères				
<i>Abies alba</i>	98	133 (12) [102-172]	141 (11,9) [116-179]	9,0 (4,2)
<i>Larix decidua</i>	10	130 (5) [122-138]	141 (6,2) [129-146]	10,5 (4,9)
<i>Picea abies</i>	83	132 (11,5) [97-166]	142 (11,3) [114-173]	10,8 (6,3)
<i>Pinus nigra ssp. Laricio</i>	14	121 (14,9) [104-159]	131 (14,7) [114-166]	10,2 (4,1)
<i>Pinus pinaster</i>	46	115 (17,8) [80-156]	126 (16,4) [97-163]	11,6 (6,6)
<i>Pinus sylvestris</i>	108	125 (12) [90-159]	135 (12,3) [104-166]	10,9 (5,8)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	48	124 (11,9) [97-142]	136 (11,6) [111-161]	12,1 (6,2)

Tableau 2. Dates moyennes (écart-type) [minimum-maximum] de débourrement (ddl et dd2) et de jaunissement (jj1 et jj2) pour chaque espèce (période 1997-2006). Les données sont exprimées en jour julien. n = nombre d'observations disponibles. La durée de la saison de végétation donnée dans ce tableau correspond à la différence entre jj2 et dd1 dd1 : date à laquelle 10% des arbres observés présentent au moins 20 % des bourgeons ouverts (dd2 = 90 % des arbres avec au moins 20 % des bourgeons ouverts) ; jj1 : date à laquelle 10 % des arbres observés présentent au moins 20 % des feuilles jaunes (jj2 = 90 % des arbres avec au moins 20 % de feuilles jaunes).

Espèces	Jaunissement			durée (jours)	Durée de la saison de vég. (jours)
	n	jj1	jj2		
Feuillus					
<i>Fagus sylvatica</i>	179	275 (16,5) [223-318]	292 (16) [244-332]	16,8 (10,3)	180 (22) [112-245]
<i>Quercus petraea</i>	188	284 (14,2) [247-323]	300 (11,3) [264-334]	15,8 (9,1)	200 (15,5) [154-245]
<i>Quercus robur</i>	72	283 (15,8) [251-332]	300 (14,6) [272-345]	16,6 (8,4)	200 (25,4) [161-266]
<i>Quercus petraea</i>					
nord-est	87	283 (14,7) [247-317]	298 (11,9) [264-325]	14,8 (9,2)	192 (14,8) [154-231]
nord-ouest	101	286 (13,6) [248-323]	302 (10,5) [271-334]	16,6 (9)	207 (12,9) [182-245]
<i>Quercus robur</i>					
nord-est	35	278 (10,9) [258-302]	292 (10,1) [272-316]	13,4 (7,5)	181 (10,8) [161-217]
nord-ouest	37	288 (18,1) [251-332]	307 (14,1) [285-354]	19,5 (8,2)	220 (20,8) [189-266]
Conifères					
<i>Larix decidua</i>	10	273 (4,7) [264-282]	288 (5,0) [278-293]	14,7 (2,2)	158 (7,6) [147-168]

Pour le débournement, il est possible de relier les dates de phénophases à des facteurs géographiques comme la longitude (**Figure 25**) ou à des variables climatiques simples comme les conditions thermiques du mois de mars par (**Figure 26**). Par exemple, une augmentation de l'ETP en mars de 10 mm se traduit par une avancée du débournement entre 4 et 9 jours selon les espèces (moyenne : 6,8 jours). Concernant la température, une augmentation de 1°C pendant cette période se traduit par une précocité de 2 à 5 jours environ. Ces modèles ont été utilisés pour établir des cartes phénologiques spatialisées sur la France des dates moyennes des phénophases (données climatiques spatialisées sur la période 1991-2000) (**Figures 27 et 28**).

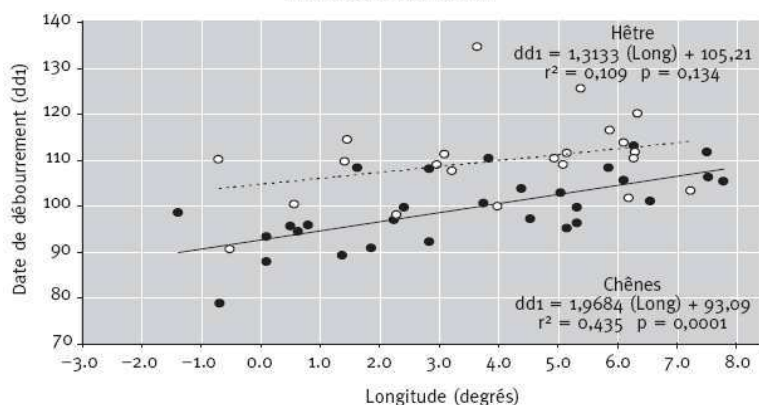


Figure 25. Relation entre la date moyenne de débournement (dd1, 1997-2006) et la longitude pour les Hêtraies (ronds blancs) et les Chênaies (ronds noirs) du réseau RENECOFOR.

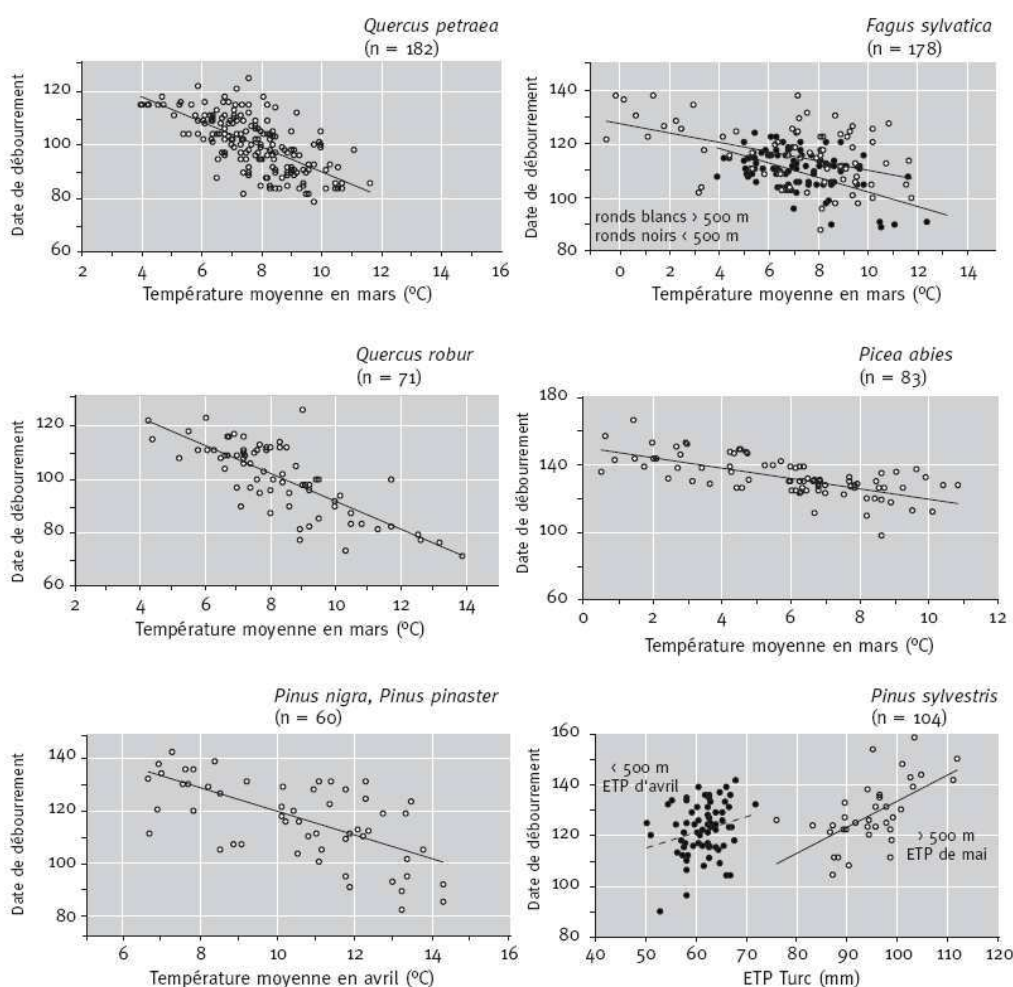


Figure 26. Relation entre la date de débournement (dd1, 1997-2006) et les conditions thermiques printanières pour quelques espèces échantillonnées dans le RENECOR (n = nombre d'arbres).

Afin de mettre en évidence d'éventuels changements des cycles de développement foliaires des arbres forestiers, les modèles bioclimatiques prédictifs ont été intégrés à huit prévisions de changement climatiques : deux scénarios de développement économique (A2 et B2) et quatre modèles de circulation atmosphérique (HadCM3, CGCM2, CSIRO2 et PCM). Les dates moyennes sur les périodes futures 2041-2070 et 2071-2100 ont été cartographiées et les dérives analysées (**Figure 27**). À la fin du XXI^{ème} siècle, nos modèles prédisent par rapport aux moyennes 1991-2000 une avance moyenne de la date de débourrement de 5,3 et 5,9 jours pour les Chênes et le Hêtre (moyenne pour les 8 scénarios), un retard de jaunissement de 10,9 et 7 jours et un rallongement de la saison de végétation de 10,3 et 10,9 jours. Les changements sont plus importants selon le scénario le plus pessimiste HadCM3-A2 et varient également très fortement selon la région considérée et, pour une même région, entre les deux espèces.

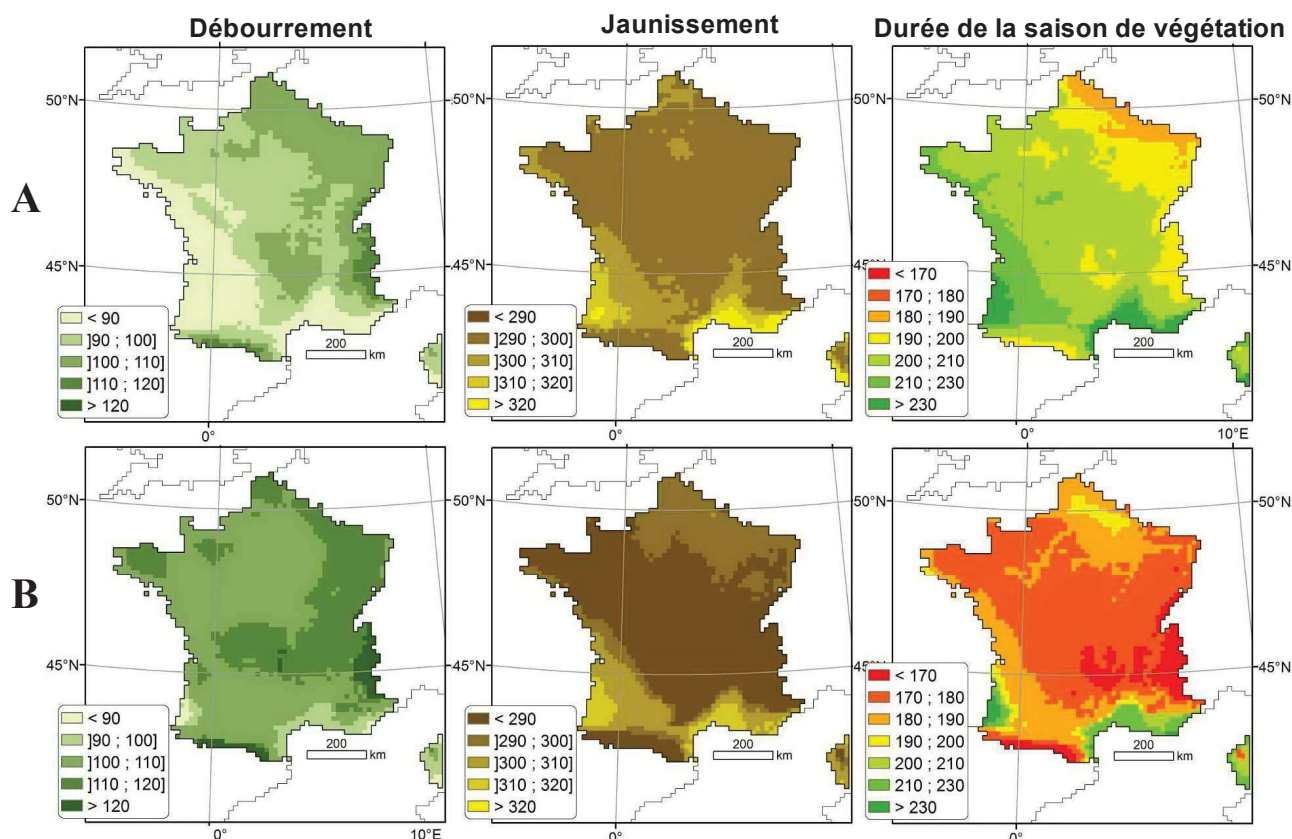


Figure 27. Cartes des dates moyennes des dates de débourrement (dd1), jaunissement (jj2) et de la durée de la saison de végétation pour les Chênes sessile et pédonculé (A) et le Hêtre (B) sur la période 1991-2000. Ces cartes ont été générées à partir des modèles issus des algorithmes des forêts aléatoires de Breiman prenant en compte exclusivement des facteurs climatiques parmi lesquels la température, le rayonnement ou l'évapotranspiration potentielle de janvier, mars et octobre jouent un rôle central. Les modèles expliquent entre 35 et 54 % de la variance avec des erreurs de prédiction variant de 7 à 15 jours selon le paramètre considéré.

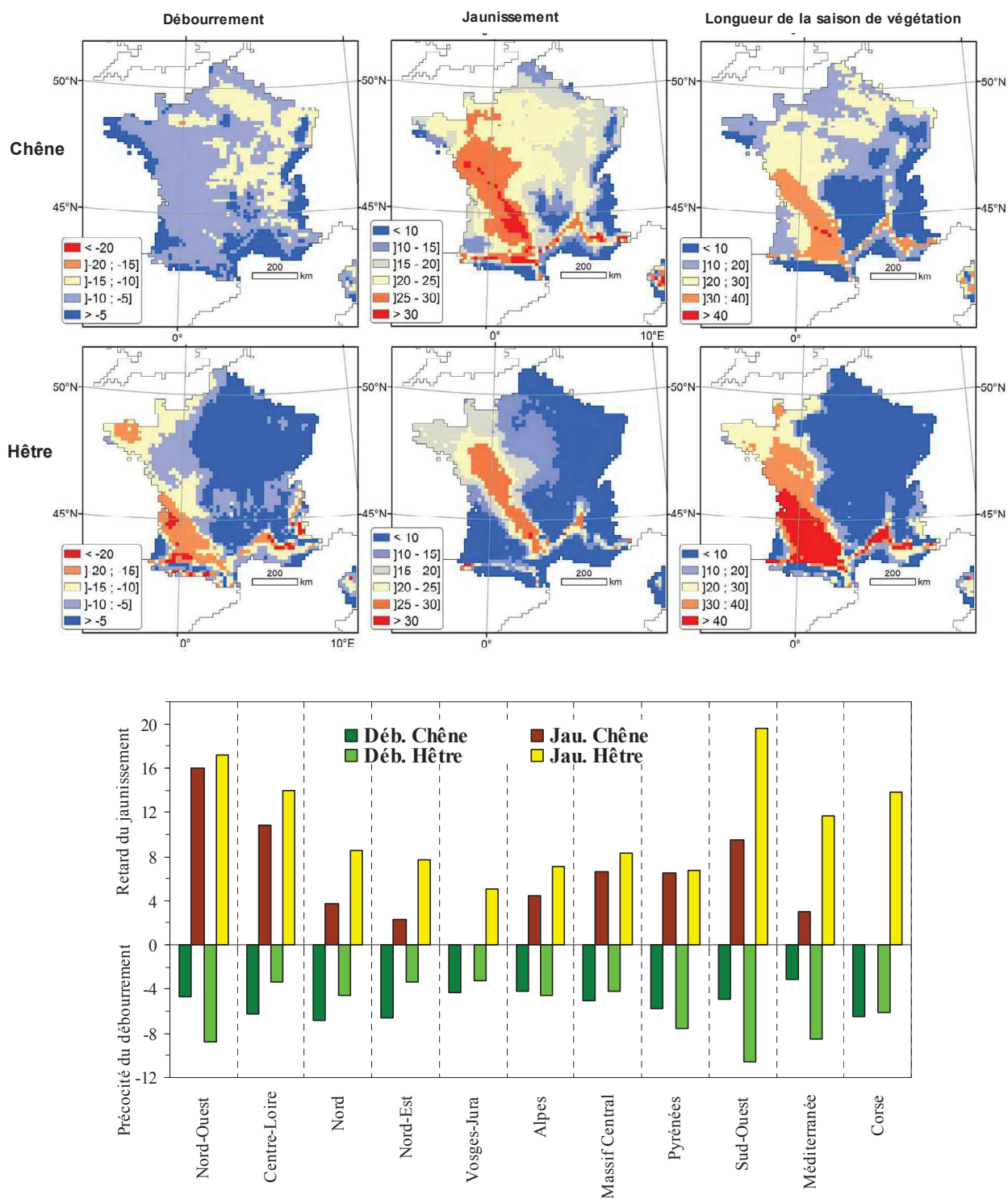
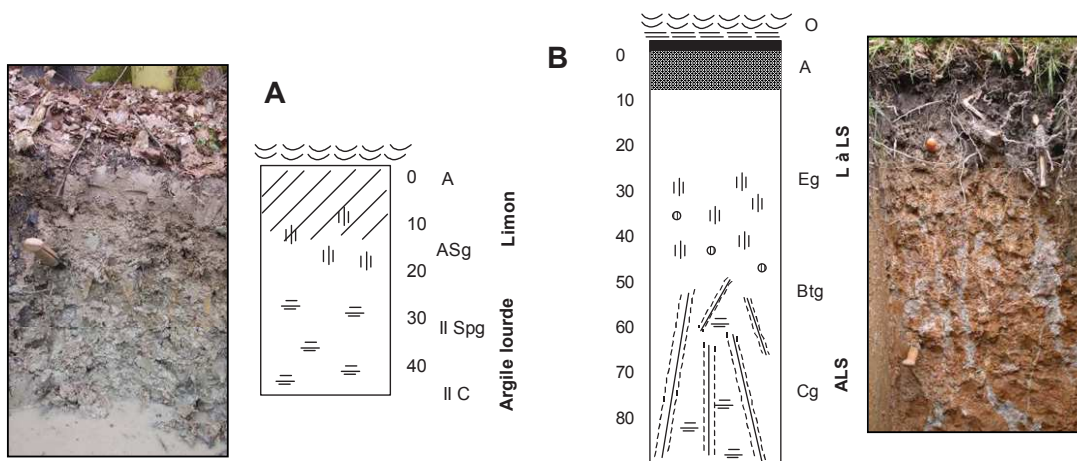


Figure 28. Variations prédites (en jours) à la fin du XXI^{ème} siècle (2071-2100) des dates de débournement (dd1), de jaunissement (jj9) et de la durée de la saison de végétation. Chaque carte correspond à la différence entre la date moyenne observée sur la période 1991-2000 et celle prédite selon l'hypothèse A2-HadCM3 pour la période 2071-2100. Pour dd1, une valeur négative correspond à une date plus précoce. Pour le jaunissement et la saison de végétation, des valeurs positives correspondent respectivement à un retard du jaunissement et à un allongement de la saison de végétation. Chêne = Chênes sessile et pédonculé.

7. Couplage phénologie foliaire et croissance secondaire : dispositif expérimental en Chênaie semi-continentale sur plateau lorrain [A14, B9, 10]

Que ce soit sur la croissance radiale ou la phénologie foliaire, les travaux que j'ai menés ont concerné des vastes échelles spatiales avec des approches corrélatives du déterminisme de ces deux facteurs de développement. Les analyses ont concerné l'échelle annuelle avec des déterminants climatiques généralement simples (température, précipitation) considérés au pas de temps mensuel. Or, on sait que les processus physiologiques de mise en place du cerne (Rathgeber *et al.*, 2011) ou des feuilles (Chuine, 2000) se déroulent à des échelles temporelles plus petites (par exemple la journée) et que la compréhension de ceux-ci nécessite souvent la prise en compte de facteurs climatiques plus complexes (*e.g. rayonnement, seuils thermiques, somme de température...*). Le couplage réseau d'observations et expérimentation est donc important à considérer pour affiner les observations faites à vaste échelle et aborder les déterminants plus fonctionnels des différents cycles de développement des arbres.

Pour mener à bien ces travaux, je me suis appuyé sur des expérimentations (plantations) mises en place dans les années 1970 par Gérard Lévy et Yves Lefèvre (Lévy et Lefèvre, 2001) pour quantifier les effets de contraintes édaphiques (*e.g. régime hydrique et engorgement*) sur la croissance arbres forestiers. Les mesures initiales ont porté sur des suivis de reprise des plants puis sur des mesures d'accroissement en hauteur de façon à quantifier précisément l'effet des conditions locales (Lefèvre *et al.*, 2006 ; Lévy, 1990 ; Lévy et Lefèvre, 2001 ; Lévy *et al.*, 1990). Je me suis intéressé spécifiquement à ces plantations de Chênes (mélange sessile et pédonculé (à 75 %)) d'une part, parce qu'elles n'avaient pas été affectées par la tempête de 1999 et, d'autre part, parce que ces deux espèces représentent les feuillus majeurs dans les écosystèmes tempérés français. En 2002, j'ai donc repris le suivi scientifique de trois plantations correspondant à deux situations écologiques contrastées représentatives des sols hydromorphes de la région naturelle des plateaux lorrains : sol de type *pélosol différencié* caractérisé par une mince couche de limons (20-25 cm) reposant sur une marne du Keuper (photo A) et *rédoxisol acide* formé sur les alluvions anciennes (pléistocènes) de la Moselle (photo B). Le premier intérêt de reprendre ces réseaux étaient que je pouvais mettre en place un suivi sur des arbres déjà « âgés » me permettant ainsi de garder une cohérence avec mes approches précédentes sur arbres adultes. Le deuxième avantage était que je connaissais tout l'historique de la mise en place des plantations, l'historique de croissance des arbres et que je disposais de toutes les données écologiques.

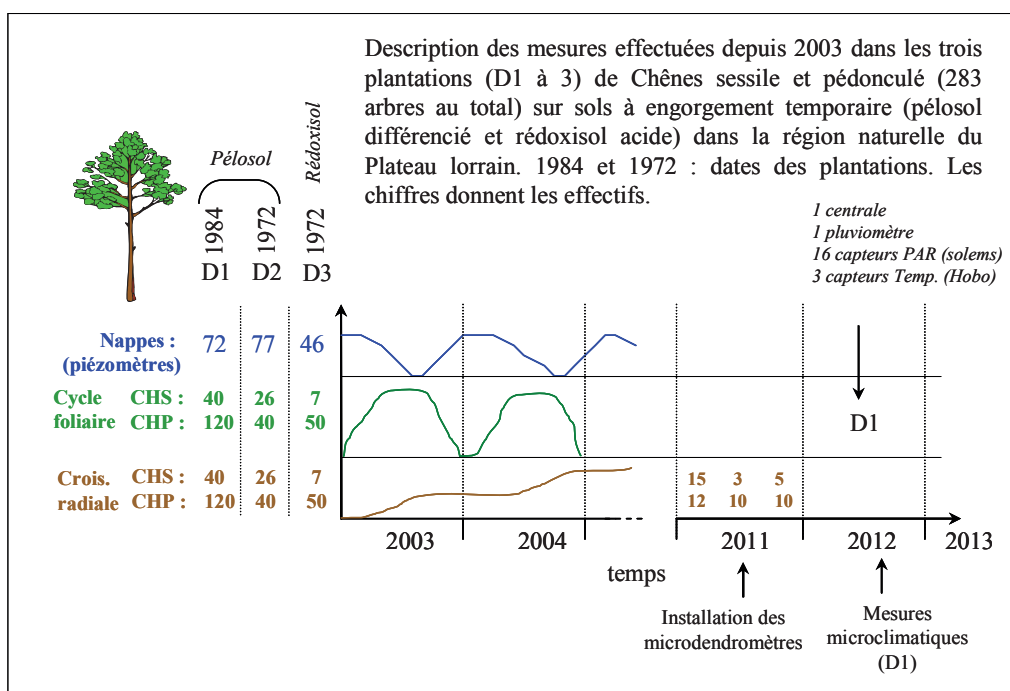


Photos et profils schématiques des deux types de sols. **A** : pélosol différencié ; **B** : Rédoxisol (photos F. Lebourgeois).

Depuis 2003, le suivi de ces trois dispositifs expérimentaux correspond aux suivis réguliers (**voir schéma**) :

- ⇒ des niveaux de nappe (195 piézomètres) essentiellement de fin mars à début mai. En avril 2014, des capteurs automatiques de suivis des nappes ont été installés ;
- ⇒ du débourrement (210 chênes pédonculés et 73 chênes sessiles) entre fin mars et début mai. Les 283 chênes sont observés individuellement à la jumelle et le stade phénologique est noté (échelle utilisée dans le réseau RENECOFOR, voir site internet pour plus de précision). Les observations sont réalisées au moins une fois par semaine en début de saison et jusqu'à 3 fois entre fin avril et début mai. En 2012, un des trois sites a été instrumenté de façon à mieux appréhender les conditions microclimatiques et à mettre en place des techniques alternatives d'observation de la phénologie (capteurs PAR) ;
- ⇒ de la croissance intra-annuelle. Les mesures de circonférence sont faites à 1,30 m à l'aide d'un mètre à ruban avec une précision du mm. En 2011, ces mesures manuelles au mètre à ruban ont été complétées par la pose de 55 microdendromètres (à lecture manuelle).

Pour ces dispositifs, le renforcement récent de notre équipe technique permet d'assurer le maintien de leur suivi régulier et de leur développement. L'objectif à moyen terme est d'analyser les données récoltées depuis maintenant 10 ans et de publier les résultats.



Photos des plantations de Chênes sessile et pédonculé en mars 2004 (Charmes 2 à gauche et Damas-a-Bois à droite).

La **Figure 29** présente les résultats de 9 années de suivi phénologique sur le dispositif D1 (plantation de 1984 sur pélosol, FC de Charmes, Vosges). Sur ces 9 ans, la date la plus précoce a été le 13 avril 2011 et la plus tardive le 10 mai 2006. Pour les autres années, la sortie des feuilles intervient la dernière semaine d'avril (entre le 26 avril et le 1 mai). Si l'on prend en compte le dernier stade (b5), les deux Chênes ne se distinguent pas clairement. En revanche, si on analyse la dynamique d'évolution foliaire on constate que le Chêne sessile est fréquemment « en avance » de 2 à 3 jours par rapport au Chêne pédonculé. La feuillaison apparaît être en étroite relation avec le régime thermique du mois d'avril qui explique à lui seul près de 75 % de la variation des dates (**Figure 30**).

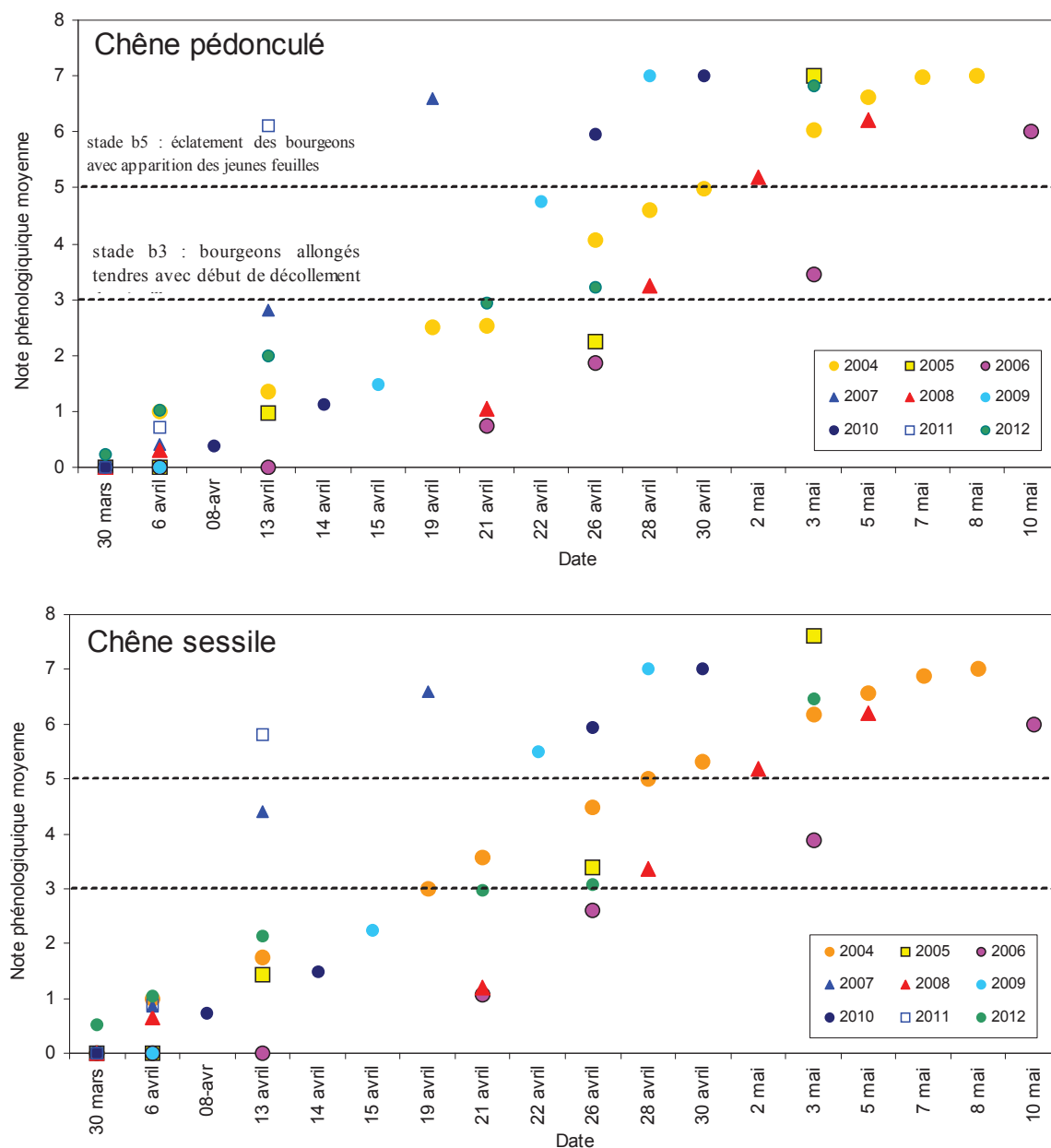


Figure 29. Evolution du développement foliaire entre 2004 et 2012 pour les Chênes sessile et pédonculé du dispositif D1 (Forêt communale de Charmes, Département des Vosges). Chaque point représente la moyenne de 40 observations pour le Chêne sessile et 120 pour le Chêne pédonculé.

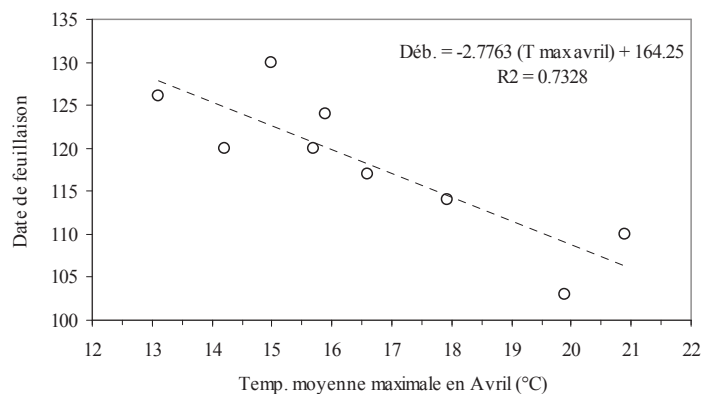


Figure 30. Relation entre la date moyenne de feuillaison (Déb, stade b5) sur la période 2004-2012 pour les Chênes pédonculé et sessile (n=120/40) du dispositif D1 (FC de Charmes, Vosges) et la température maximale du mois d’avril.

La **Figure 31** ci-dessous montre l’évolution au printemps 2012 de l’éclairement relatif sous le peuplement de Chênes dans le dispositif D1. Avant la sortie des feuilles, l’ER a été en moyenne de 58 %. Dès la sortie des feuilles, il a chuté rapidement pour se stabiliser à une valeur faible (6%) après extension globale des houppiers qui a duré 20 jours en 2012.

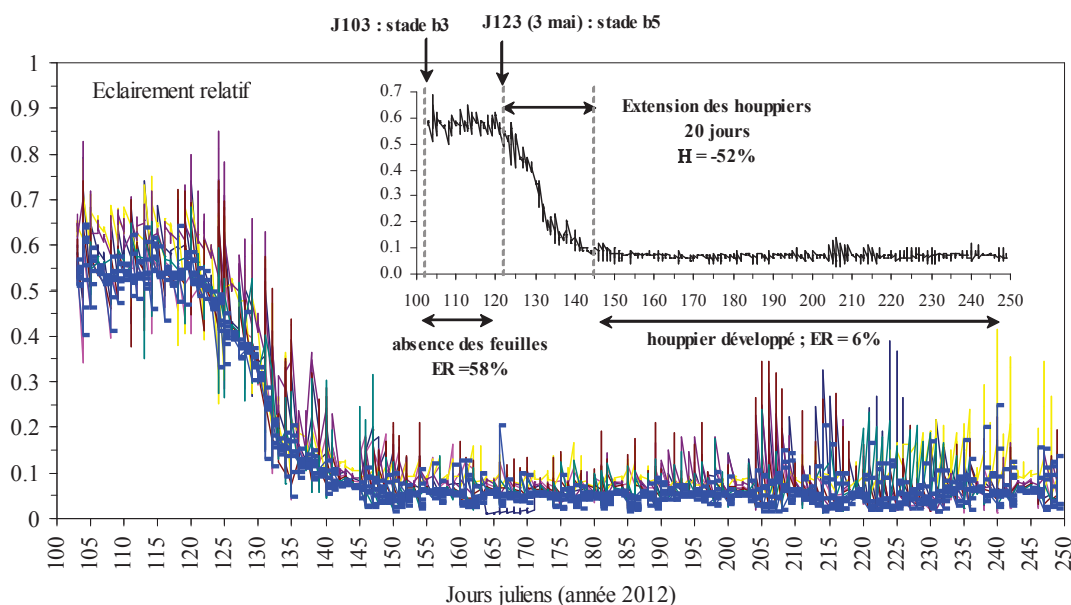


Figure 31. Evolution de l’éclairement relatif entre le 13 avril (jour julien 103) et le 6 septembre (249) 2012 pour le dispositif D1 (7 capteurs PAR sous les Chênes à 1,30 m du sol et 2 références en plein découvert ; période horaire prise en compte pour le graphique : 10 h à 14 h). La courbe en noire présente la moyenne des 7 capteurs. Les dates moyennes des stades phénologiques b3 (bourgeons allongés) et b5 (éclatement des bourgeons et sorties des nouvelles feuilles) observés à la jumelle sur les chênes sont présentés.

Concernant la croissance radiale, le Chêne sessile apparaît plus dynamique que le Chêne pédonculé avec, pour des arbres de mêmes âges et de mêmes circonférences en 2003 (diamètre > 7.5 cm ; circonférence moyenne = 270 mm), des différences de l'ordre de +25 % pour le Chêne sessile (+10 à +40% selon les années) (Figure 32). Le suivi intra-annuel montre que le maximum de la croissance se déroule en mai et juin pour les deux espèces. En moyenne, 74 % de la croissance est achevée fin juin pour le Chêne pédonculé et 67 % pour le Chêne sessile.

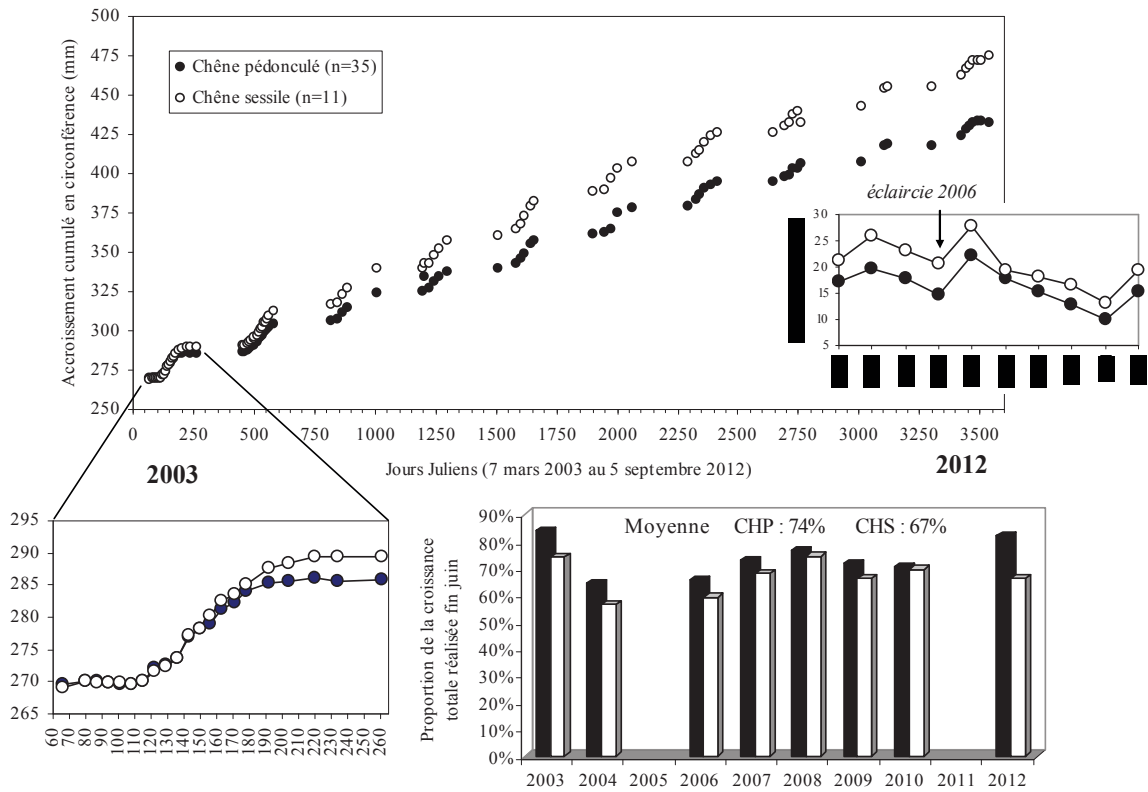


Figure 32. Caractéristiques de la croissance en circonférence entre 2003 et 2012 pour les Chênes pédonculé (symbole et histogramme noirs) et sessile dominants et codominants (Diamètres > 7,5 cm en 2003) du dispositif D1.

Perspectives des activités de recherches

Thème 1 : Gestion forestière et atténuation des effets des changements climatiques sur la croissance radiale des arbres forestiers tempérés.

1. Gestion forestière et sensibilité au climat des arbres forestiers tempérés : état de l'art et problématique

Comme déjà mentionné page 19, la question de l'atténuation des effets des changements climatiques sur la dynamique de croissance des arbres forestiers tempérés par la gestion forestière est apparue dans mes recherches à partir de 2010 et va constituer ***l'axe structurant majeur*** de mes travaux de recherche dans les prochaines années. Après le raisonnement « choix de la bonne essence sur la bonne station », la gestion forestière constitue un levier important donc dispose le praticien pour atténuer l'effet des contraintes environnementales sur les peuplements.

La première orientation possible est une modification de la densité du peuplement (*i.e. diminution de la surface terrière, éclaircies plus intenses...*) (Canellas *et al.*, 2004 ; D'Amato *et al.*, 2011 ; Fernandez *et al.*, 2012 ; Gea-Izquierdo *et al.*, 2009 ; Lafond *et al.*, 2014 ; Le Goff et Ottorini, 1999 ; Magruder *et al.*, 2013 ; Martin-Benito *et al.*, 2010 ; Martin-Benito *et al.*, 2011 ; Martinez-Vilalta *et al.*, 2012 ; Misson *et al.*, 2003 ; Pérez-de-Lis *et al.*, 2011 ; Pretzsch, 2005). Les effets de la surface terrière (G en m²/ha) sur la réponse des arbres au climat ont été généralement analysés en comparant la croissance des arbres dans des peuplements éclaircis à celle observé dans des peuplements témoins. Par exemple, Misson *et al.*, (2003) ont clairement mis en évidence des réductions de croissance pour l'épicéa commun d'autant plus fortes après des sécheresses intenses (*i.e.* 1976) que le peuplement était dense et poussant dans des situations sèches (témoin : 32 (en 1971) à 54 (en 1995) m²/ha ; densité la plus faible : 7,4 à 26 m²/ha). Sur la même espèce, (Kohler *et al.*, 2010) ont montré que la résilience (*e.g.* capacité à récupérer) après la sécheresse (*i.e.* 1992, 2003) était plus rapide pour les arbres poussant dans des conditions de faibles densités même plus de 10 ans après la dernière intervention (témoin : 38 (en 1974) à 71 (en 2006) m²/ha ; densité la plus faible : 40 à 25 m²/ha). En revanche, sur le Pin sylvestre en Europe de l'Est (Novak *et al.*, 2010) n'ont pas montré de différences significatives de sensibilité au climat selon l'ancienneté et l'intensité des éclaircies. D'un point de vue physiologique, les études fondées sur des approches fonctionnelles ont montré que la réduction de G permettait le maintien d'un niveau plus élevé de la disponibilité en eau du sol, du potentiel hydrique foliaire, du flux d'eau dans l'arbre et des activités transpiratoires et photosynthétiques. Dans toutes ces études, les auteurs concluent qu'une plus faible surface terrière stimule la croissance par une augmentation de la période d'activité photosynthétique résultant d'une forte limitation des contraintes hydriques printanières ou estivales (Aussenac, 2000 ; Aussenac et Granier, 1988 ; Bréda *et al.*, 1995 ; Granier *et al.*, 2000 ; Paluch et Gruba, 2012b) (**Figure 33**) (*voir partie 2.1, page 60*).

La seconde orientation est le maintien ou l'augmentation de la diversité arborée dans les peuplements forestiers. Cette diversité est un élément majeur de structuration verticale et horizontale des écosystèmes et gouverne également en grande partie la biodiversité des communautés, notamment herbacées (Barbier *et al.*, 2008 ; Cordonnier et Gosselin, 2009 ; Gosselin et Larroussinie, 2004 ; Zilliox et Gosselin, 2013). L'étude de cette diversité et des interactions entre les espèces la composant est d'autant plus importante que les peuplements plurispécifiques représentent 50% de la surface forestière française (Morneau *et al.*, 2008) et que le mélange des essences est une orientation de plus en plus forte des politiques publiques (Fabbio *et al.*, 2003 ; Landeau et Landmann, 2008 ; Legay *et al.*, 2008 ; Sardin *et al.*, 2008) par ailleurs déclinée régulièrement dans les résolutions des conférences de la MCPFE (*Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe*) au plan européen.

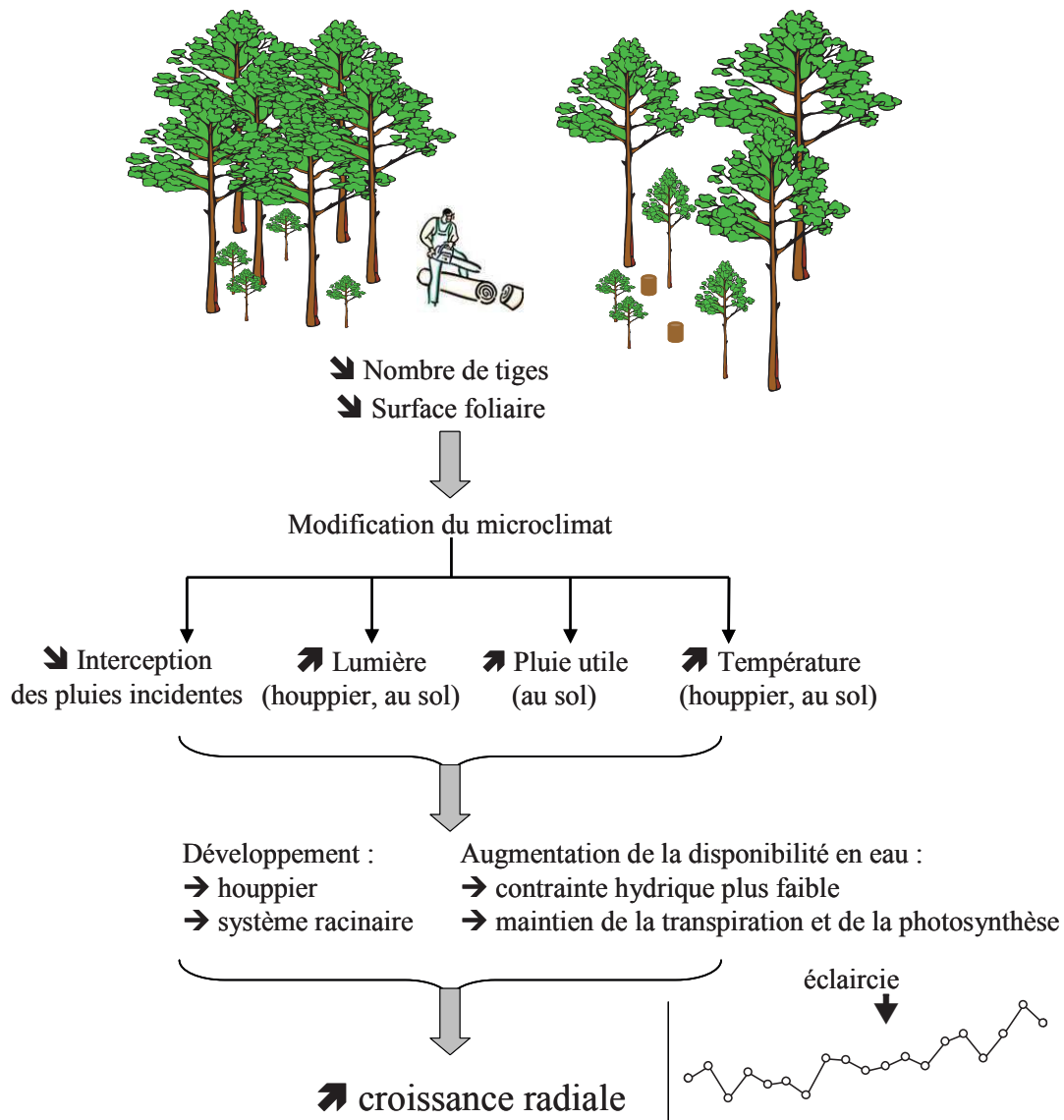


Figure 33. Modifications microclimatiques induites par une éclaircie et conséquences physiologiques sur le développement de l’arbre.

Concernant le mélange des essences, même si ces dernières années différentes études ont été menées pour mieux appréhender la productivité des essences dans ces structures (Bartelink, 2000 ; Jacob *et al.*, 2010 ; Morin *et al.*, 2011 ; Ngo Bieng *et al.*, 2013 ; Perot *et al.*, 2013 ; Perot *et al.*, 2011 ; Pérot et Picard, 2012 ; Pinto *et al.*, 2007 ; Porté et Bartelink, 2002 ; Pretzsch et Biber, 2010 ; Pretzsch *et al.*, 2013a ; Pretzsch *et al.*, 2010 ; Pretzsch *et al.*, 2013b ; Vallet et Pérot, 2011) (**Tableau 3**) de très nombreuses questions restent en suspens concernant leur gestion (Becquey et Balandier, 2008 ; Goreaud, 2000) et la meilleure résistance/résilience ou non des espèces aux aléas climatiques dans les mélanges (Bonn, 2000 ; Linares *et al.*, 2010).

Tableau 3. Effet de la composition des mélanges sur la croissance et la productivité des espèces forestières tempérées.

Auteurs	Espèces	Contexte	Pays	Indicateur	Origine des données	Tendance	Effet
del Rio et Sterba, 2009	<i>Pinus sylvestris</i> (PS) <i>Quercus pyrenaica</i> (QP)	Méditerranéen	Espagne	Accroissement en volume (Acv en m3/ha/an)	Inventaire forestier	AcV supérieur de chaque espèce en mélange (+24% pour PS et +53% pour QP; +28% pour le peuplement)	+
de Rio et al., 2013	<i>Picea abies</i> (PA) <i>Quercus petraea</i> (QP) <i>Fagus sylvatica</i> (FS)	Continental	Allemagne	Accroissement en surface de cerne (BAI cm2/an)	Sites expérimentaux	QP : peu d'effet du mélange (avec FS) sur la variabilité du BAI FS : fort effet du mélange (avec FS ou PA) sur la variabilité du BAI Mélange FS-QP : année humide BAI FS > BAI QP	= +
Jacob et al., 2010	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Fraxinus excelsior</i> (FE) <i>Tilia sp</i> (T), <i>Acer sp</i> (A) <i>Carpinus betulus</i> (CB)	Continental	Allemagne	Biomasse aérienne (Mg/ha) Productivité (Mg/ha/an)	Parcelle forestière	Biomasse aérienne et productivité du hêtre diminuent avec la diversité spécifique	-
Lebourgeois et al., 2013	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Abies alba</i> (AA) <i>Picea abies</i> (PA)	Montagnard	France	Indice de croissance radiale	Parcelle forestière	La sensibilité du sapin à la sécheresse diminue quand il est en mélange (surtout avec le hêtre) et ceci d'autant plus que les conditions de croissance sont limitantes (situations sèches)	+
No Bieng et al., 2013	<i>Quercus petraea</i> (QP) <i>Pinus sylvestris</i> (PS)	Océanique	France	Croissance radiale	Parcelle forestière	Pour les 2 espèces, la croissance est supérieure dans la cas d'un mélange pied-à-pied par rapport à un mélange ou les espèces sont agrégées localement (différence de +11% pour PS et 14% pour QP)	+
Pérot et Picard, 2012	<i>Quercus petraea</i> (QP) <i>Pinus sylvestris</i> (PS)	Océanique	France	Accroissement (m ² /ha/an) (période 2000-2005)	Parcelle forestière	Le mélange favorise la productivité du peuplement Effet variable selon la proportion relative du chêne (optimum de 38 à 74% selon les peuplements)	+
Pinto et al., 2007	<i>Abies alba</i> (AA) <i>Picea abies</i> (PA)	Montagnard	France	Croissance radiale	Parcelle forestière	L'augmentation de la proportion d'épicéa dans le mélange diminue la croissance radiale du sapin	-
Pinto et al., 2008	<i>Abies alba</i> (AA) <i>Picea abies</i> (PA)	Montagnard	France	Hauteur dominante	Parcelle forestière	L'augmentation de la proportion d'épicéa dans le mélange augmente la hauteur dominante du sapin	+
Vallet et Pérot, 2011	<i>Abies alba</i> (AA) <i>Picea abies</i> (PA)	Montagnard	France	Accroissement (Ac en m2/ha/an)	Inventaire forestier	Effet favorable du mélange seulement pour le sapin Effet variable selon la proportion des espèces Si mélange 50-50, AC du sapin > de 14.5% par rapport au peupl. Pur	+
Pretzch et Schütze, 2009	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Picea abies</i> (PA)	Continental	Allemagne	Productivité (m3/ha/an)	Sites expérimentaux	Productivité du mélange > de 9% par rapport au peuplement pur L'effet est supérieur pour le hêtre (+37%) que pour l'épicéa (+21%)	+
Pretzch et al., 2010	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Picea abies</i> (PA)	Continental	Allemagne	Productivité (m3/ha/an)	Sites expérimentaux	Productivité du mélange > d'en moyenne 0.51 m3/ha/an Biomasse > de 8% (effet hêtre essentiellement) Mélange: croissance du hêtre stimulée sur les sites les plus fertiles Mélange: croissance de l'épicéa stimulée sur les sites les plus pauvres	+ ou -
Pretzsch et al., 2013	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Picea abies</i> (PA)	Continental	Allemagne	Productivité primaire nette (en t/ha/an 1999-2007)	Sites expérimentaux	Productivité du mélange > d'en moyenne 5.3 t/ha/an (+37%) Croissance davantage stimulée pour le hêtre Echelle peuplement : mélange pied-à-pied stimule davantage la productivi Echelle espèce : l'agrégation favorise l'épicéa et défavorise le hêtre	+
Pretzsch et al., 2013	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Picea abies</i> (PA) <i>Quercus petraea</i> (QP)	Continental	Allemagne	Résilience et résistance sécheresse de 1976 croissance radiale	Parcelle forestière	Peuplements purs : épicéa peu résistant mais très résilient Peuplements purs : chêne et hêtre résistant et peu résilient Mélange : épicéa et chêne même comportement Mélange : hêtre plus résistant et résilient	= ou +
Pretzsch et al., 2013	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Picea abies</i> (PA) <i>Quercus petraea</i> (QP)	Continental	Allemagne	Résilience et résistance sécheresse de 1976 croissance radiale	Parcelle forestière	Peuplements purs : épicéa peu résistant mais très résilient Peuplements purs : chêne et hêtre résistant et peu résilient Mélange : épicéa et chêne même comportement Mélange : hêtre plus résistant et résilient	= ou +
Pretzsch et al., 2013	<i>Fagus sylvatica</i> (FS) <i>Quercus robur</i> (QR) <i>Quercus petraea</i> (QP)	Continental	Allemagne	Productivité (m3/ha/an)	Sites expérimentaux	Effet favorable du mélange pour les 2 espèces FS et QP-QR Si mélange 50-50, la productivité du mélange > 30% à celle peupl pur Effet très favorable sur les sites les moins fertiles (Ho < 25 m à 100 ans) Effet défavorable sur les sites les plus fertiles (Ho < 35 m à 100 ans)	+ ou -

D'un point de vue plus théorique, l'analyse des effets de la gestion sur la réponse des peuplements forestiers aux contraintes environnementales fait appel à des concepts d'écologie fondamentale liés à la complémentarité des niches des espèces et des communautés (Hooper *et al.*, 2005 ; Loreau *et al.*, 2001 ; Tilman, 1999) et à la balance entre les processus de compétition (qui traduisent un effet négatif sur les performances individuelles des organismes qui la subissent) et de facilitation (*i.e. effet positif*) pour l'utilisation des ressources (Bertness et Callaway, 1994 ; Brooker *et al.*, 2008 ; Callaway, 1995, 1998). (**Figure 34**). Ainsi, dans toutes communautés d'organismes vivants s'instaurent des interactions complexes qui vont moduler l'utilisation des ressources pour ces organismes. Toute modification de la communauté (*e.g. surface terrière plus faible dans les peuplements forestiers ou mélange d'espèces*) aura donc pour conséquences une modification de ces interactions.

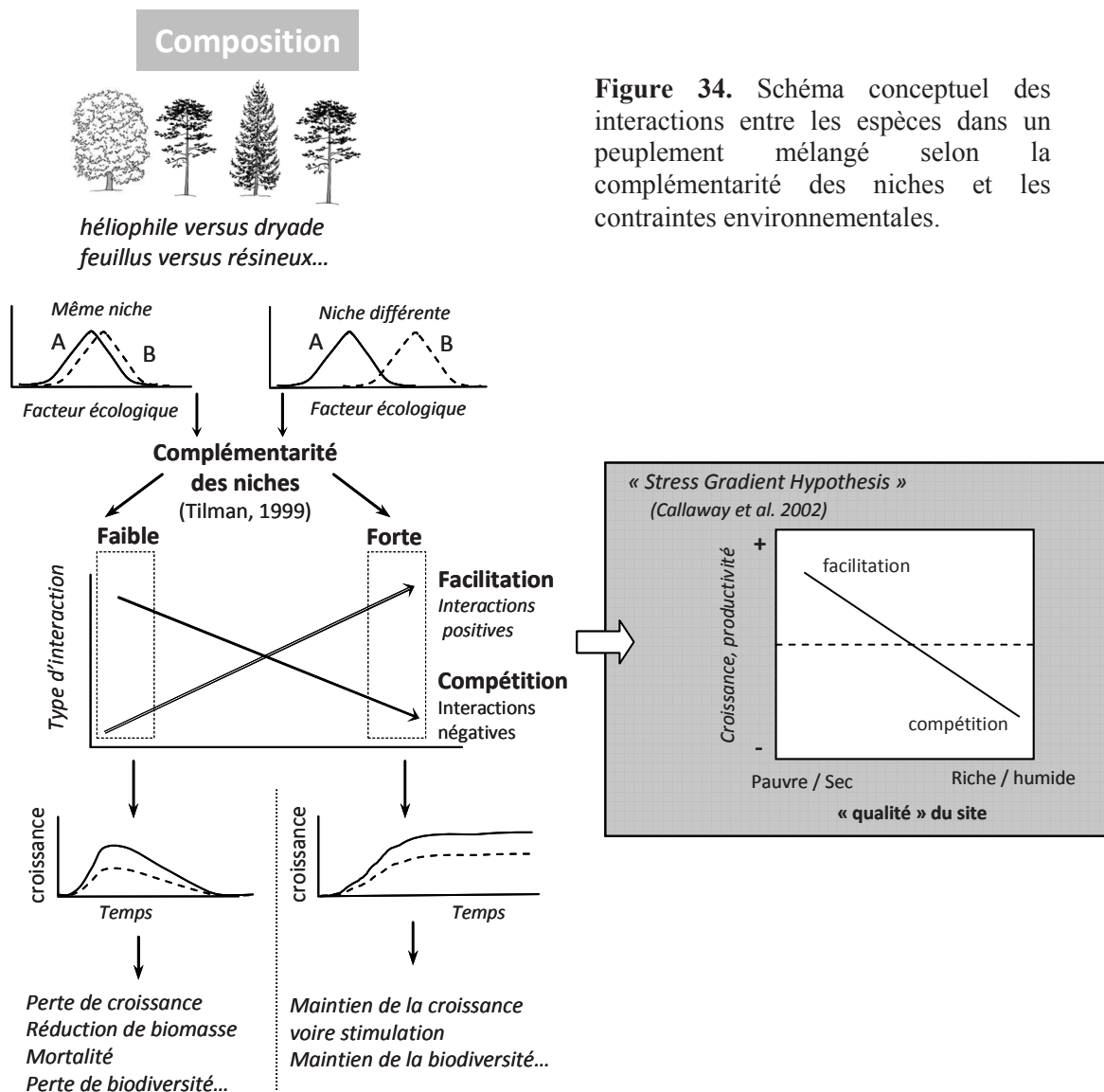


Figure 34. Schéma conceptuel des interactions entre les espèces dans un peuplement mélangé selon la complémentarité des niches et les contraintes environnementales.

Les études sur les communautés végétales ont également montré que l'importance relative de la compétition et de la facilitation pouvait également fortement varier selon l'importance des contraintes écologiques (Callaway *et al.*, 2002 ; Choler *et al.*, 2001 ; Maestre *et al.*, 2009). Ainsi, selon l'hypothèse des gradients de stress (*i.e. the stress gradient hypothesis*), la part de la facilitation en tant que processus d'organisation du fonctionnement de la communauté végétale augmente sous environnements contraints (*e.g. ressource en eau limitée*) tandis que celle de la compétition diminue

(Callaway, 1998 ; Cavard *et al.*, 2011 ; Kunstler *et al.*, 2011) (**Figure 34**). Si les interactions positives et négatives ont été beaucoup étudiées sur les communautés herbacées (Brooker et Callaghan, 1998 ; Brooker *et al.*, 2008 ; Callaway *et al.*, 2002 ; Choler *et al.*, 2001), la longue ontogénèse et durée de vie des arbres rend beaucoup plus complexes leur étude (Cavard *et al.*, 2011 ; Filipescu et Comeau, 2007 ; Kunstler *et al.*, 2011). Ainsi, tandis que des interactions positives ont été reportées entre des Sapins et des Pins poussant dans un environnement très contraint en haute altitude en Amérique du Nord (Callaway, 1998), aucune facilitation n'a été mise en évidence sur des *Nothofagus* en Nouvelle-Zélande le long d'un gradient altitudinal (Coomes et Allen, 2007). Plus récemment, pour 16 espèces forestières poussant dans le Jura et les Vosges, (Kunstler *et al.*, 2011) ont montré que la compétition jouait un rôle majeur dans les habitats les plus favorables (*i.e. faibles déficits hydriques et situations les plus chaudes*), particulièrement pour les espèces sciaphiles (comme le Sapin pectiné et le Hêtre). En revanche, pour ces auteurs aucun processus de facilitation n'apparaît selon les gradients écologiques. Concernant la complémentarité des niches, il est également souvent admis qu'une espèce dans un mélange avec plusieurs autres présentant différents traits fonctionnels ou stratégies pour l'utilisation des ressources n'aura pas la même réponse aux facteurs de milieu que celle qu'elle aurait en peuplements purs (Ishii et Asano, 2010 ; Kelty, 2006 ; Richards *et al.*, 2010). Pour les arbres forestiers, la complémentarité dans l'utilisation des ressources peut être considérée en deux dimensions : dans l'espace, à travers la complémentarité de l'architecture des houppiers ou des systèmes racinaires ou dans le temps, à travers des phasages temporels différents des processus vitaux (*e.g. développement foliaire, floraison*). Ainsi, plusieurs études récentes suggèrent que les processus de facilitation et la complémentarité des niches dans les peuplements mélangés permettent une production de biomasse, une croissance ou un stockage de carbone supérieurs par rapport aux peuplements purs (Cavard *et al.*, 2010 ; del Rio et Sterba, 2009 ; Pinto *et al.*, 2008 ; Piotta, 2008 ; Pretzsch *et al.*, 2010 ; Vallet et Pérot, 2011) (**voir partie 2.2, page 65**).

Analyser la réponse des forêts aux événements climatiques extrêmes passés et actuels donne une estimation de la vulnérabilité des écosystèmes sous l'hypothèse des changements climatiques et des modifications possibles de leur biodiversité (Bréda et Badeau, 2008 ; Bréda *et al.*, 2004 ; Landmann *et al.*, 2003 ; Lindner *et al.*, 2010). En écologie, la réponse d'un écosystème à une perturbation est souvent appréhendée à travers les notions complémentaires de résistance et de résilience (Lloret *et al.*, 2011 ; Seidl *et al.*, 2011). La résistance caractérise la capacité d'un système (communauté, espèce, etc.) à maintenir son fonctionnement « normal » lors d'une perturbation. La résilience est la capacité de ce système à retrouver un fonctionnement « normal » après avoir subi cette perturbation (**Figure 35**). La vulnérabilité des arbres des forêts tempérées ne peut être appréhendée qu'au travers de l'analyse de proxy intégrant l'effet immédiat et différé dans le temps des contraintes environnementales comme, par exemple, la croissance secondaire (*e.g. accroissement radial annuel*). Ainsi, ces notions de résistance et de résilience sont de plus en plus utilisées sur le proxy cerne pour appréhender la stabilité des écosystèmes forestiers face au changement climatique (Boden *et al.*, 2014 ; Chisholm et Filotas, 2009 ; Chisholm *et al.*, 2013 ; Churchill *et al.*, 2013 ; Lemaire, 2011 ; Magruder *et al.*, 2013 ; Pretzsch *et al.*, 2013b). Des seuils peuvent être ainsi définis à partir desquels les arbres ne peuvent plus récupérer suite à la perturbation entraînant une instabilité du peuplement. Cette difficulté à récupérer peut se traduire par une mortalité accrue (Allen *et al.*, 2010) qui peut, à plus ou moins long terme, influencer la biodiversité ligneuse et des communautés végétales herbacées (Gilliam, 2007 ; Gustafson et Sturtevant, 2013 ; Lloret *et al.*, 2012).

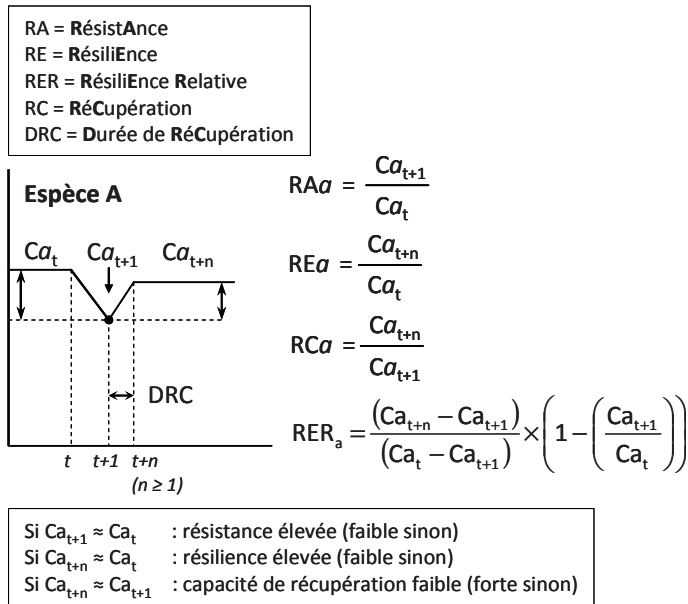
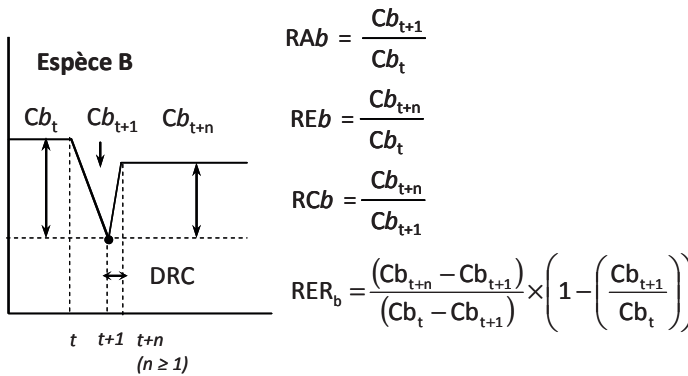


Figure 35. Evolution temporelle d'un indice (C) caractérisant la résistance et la résilience à une perturbation (sécheresse, froid, attaque de parasites...) pour deux systèmes à comportements distincts (ici espèce). Le système (A) est caractérisé par une résistance **RA** et une résilience **RE** élevées mais par une lente récupération (**DRC** élevée). Pour le système (B), **RA** et **RE** sont faibles mais la récupération est rapide (**DRC** faible).



L'espèce A est plus résistante mais moins résiliente que l'espèce B
 (modifié d'après Lloret et al. 2011)

2. Densité des peuplements et réponse au climat. Interaction avec le statut social des arbres

2.1. Cas du Sapin et du Hêtre dans le massif Vosgien (Projet RMT Aforce 2011-2012 ; publication acceptée FEM, 2014)

Nos travaux précédents (voir *paragraphe 5.4* et publications **A10** et **B1**) et la littérature récente ont montré que la réponse des arbres au climat pouvait être fortement modulée par leur taille ou leur statut social ; statut social reflétant la position de l'arbre dans le peuplement et traduisant la compétition subie au niveau individuel. Même si les travaux sont maintenant nombreux, il n'apparaît pas de tendance très nette aussi bien pour les feuillus que pour les résineux. Ainsi, une plus forte sensibilité à la sécheresse a été observée pour les arbres dominés sur l'Epicéa commun (Van Den Brakel et Visser, 1996), le Pin sylvestre (Pichler et Oberhuber, 2007 ; Zang *et al.*, 2012), le Douglas (Carnwath *et al.*, 2012) et le Hêtre (Piutti et Cescatti, 1997). En revanche, dans d'autres contextes, ce sont les Epicéas (Castagneri *et al.*, 2012 ; Zang *et al.*, 2012), les Pins sylvestres (Martinez-Vilalta *et al.*, 2012), les Sapins et les Hêtres (Mérian et Lebourgeois, 2011) dominants qui sont apparus les plus sensibles à la sécheresse. Enfin, certains auteurs ne mettent en évidence aucun effet de la taille sur des espèces comme l'Epicéa commun et le Chêne sessile (Mérian et Lebourgeois, 2011 ; Meyer et Bräker, 2001). Certaines études illustrent également que les différences de réponse entre statuts sociaux changent

selon les contraintes écologiques locales mais là encore sans consensus entre les auteurs (Fichtner *et al.*, 2013 ; Mérian et Lebourgeois, 2011 ; Pichler et Oberhuber, 2007 ; Zang *et al.*, 2012). Comme les arbres codominants ou dominés sont présents dans les peuplements et contribuent à la production en volume (Binkley, 2004), il apparaît important de mieux prendre en compte le statut social pour étudier les effets des facteurs environnementaux à l'échelle du peuplement pour donner aux gestionnaires des informations compatibles avec la gestion (Lindner *et al.*, 2010). Parallèlement à ces effets individuels, on sait que la densité du peuplement appréhendée à travers la surface terrière (G en m²/ha) ou le nombre de tiges peut moduler le comportement des arbres. Cependant, les interactions entre surface terrière (indicateur de niveau de compétition globale) et statut social (indicateur de compétition individuelle) dans la réponse des arbres au climat ont été très peu étudiées jusqu'à présent (Cescatti et Piutti, 1998 ; Van Der Maaten, 2013).

Afin d'apporter des éléments de réponse sur ces interactions (compétition individuelle versus compétition globale), j'ai utilisé une partie du jeu de données de croissance récoltées pour la thèse de (Seynave, 1999) dont un des objectifs était d'étudier la dynamique temporelle de la structure de peuplements forestiers (notamment de la Hêtraie-Sapinière dans l'étage montagnard dans la vallée de Munster, Vosges). L'objectif de cette nouvelle étude a été de comprendre en quoi des niveaux contrastés de surfaces terrières (3 niveaux : Faible : 32, Moyen : 41 et Fort : 49 m²/ha) modulaient la réponse au climat des Sapins et des Hêtres appartenant à trois statuts sociaux différents (Dominants, Codominants et dominés). Partant du principe que ces interactions pouvaient varier selon les conditions écologiques, j'ai également considéré deux expositions différentes (Nord et Sud) correspondant aux principales variations écologiques dans le contexte étudié. *In fine*, l'étude dendroécologique a porté sur 414 Sapins et 243 Hêtres répartis dans 30 modalités différentes (**Tableau 4**).

Exposition		Sud																	
G (m ² /ha)		Faible (32)						Moyenne (41)						Forte (49)					
Statut Social	Espèce	Abies alba			Fagus sylvatica			Abies alba			Fagus sylvatica			Abies alba			Fagus sylvatica		
		Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé
	Dia (cm)	36.7	28.4	18.7	20.5	17.5	39.5	30.3	20.9	34.4	25.2	15	44.8	32.8	19.1				17.4
	Ht (m)	21.6	20.2	16.2	20.5	16.2	23.6	21.7	18.5	24	22.7	17.1	24.9	22.6	16.3				17.7
	Ht/Dia	0.60	0.73	0.89	1.04	1.02	0.62	0.75	0.93	0.73	0.93	1.19	0.57	0.72	0.87				1.04
	Age	57	53	53	58	56	62	61	59	64	62	59	73	69	56				63
	LC (mm)	2.7	2.2	1.5	1.6	1.6	2.8	2.1	1.6	2.4	1.9	1.1	2.8	2.3	1.5				1.2
	MS	0.116	0.126	0.133	0.215	0.138	0.133	0.134	0.104	0.154	0.170	0.154	0.146	0.153	0.100				0.134
	AC	0.742	0.757	0.776	0.517	0.585	0.602	0.649	0.654	0.528	0.530	0.377	0.365	0.545	0.425				0.510
	R	0.271	0.450	0.281	0.426	0.149	0.255	0.248	0.176	0.431	0.410	0.114	0.156	0.179	0.061				0.105
	EPS	0.842	0.906	0.882	0.924	0.749	0.938	0.898	0.894	0.923	0.952	0.769	0.855	0.760	0.665				0.529
	Nb arbres	15	13	21	17	18	45	27	41	16	29	27	32	15	33				10

Exposition		Nord																		
G (m ² /ha)		Faible (32)						Moyenne (41)						Forte (49)						
Statut Social	Espèce	Abies alba			Fagus sylvatica			Abies alba			Fagus sylvatica			Abies alba			Fagus sylvatica			
		Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	Do	Co	dé	
	Dia (cm)	42.1	33.4	22.7	31.4	27.9	16.5	35.7	28.3	18.7		22.1	45.8	36.4	22.5				26.3	15.1
	Ht (m)	26.1	24.6	20	25.8	25.4	20	23.6	22.1	16.8		21.4	24.2	22.3	16.8				21.7	16.3
	Ht/Dia	0.65	0.76	0.89	0.84	0.92	1.23	0.69	0.81	0.92		1.02	0.54	0.63	0.79				0.88	1.17
	Age	59	61	56	64	66	62	56	54	51		55	69	69	59				67	55
	LC (mm)	3.2	2.4	1.8	2.4	2	1.3	2.9	2.3	1.7		1.8	3	2.3	1.6				1.8	1.3
	MS	0.116	0.125	0.126	0.156	0.182	0.155	0.132	0.123	0.092		0.168	0.156	0.142	0.138				0.161	0.101
	AC	0.711	0.696	0.807	0.406	0.382	0.232	0.726	0.744	0.556		0.499	0.598	0.519	0.524				0.593	0.350
	R	0.312	0.270	0.290	0.291	0.345	0.095	0.285	0.242	0.063		0.284	0.232	0.083	0.165				0.356	0.048
	EPS	0.937	0.858	0.852	0.898	0.904	0.799	0.908	0.842	0.500		0.815	0.863	0.499	0.705				0.892	0.481
	Nb arbres	34	17	15	22	18	39	26	18	17		12	21	11	13				15	20

Tableau 4. Caractéristiques des arbres selon l'exposition, la surface terrière du peuplement (G en m²/ha), l'espèce et le statut social. Dia = Diamètre à 1,30 m ; Ht = Hauteur totale en m ; LC = Largeur moyenne des cernes en mm ; MS = sensibilité moyenne ; AC = Auto-corrélation d'ordre 1 ; R = coefficient de corrélation entre les séries chronologiques ; EPS = Expressed Population Signal. Pour MS, AC, R et EPS, les valeurs ont été calculées sur les séries standardisées sur la période commune 1940-1996. Zone blanche : pas de données.

Les fonctions de corrélation établies sur la période 1940-1996 pour les 30 modalités (18 pour le Sapin et 12 pour le Hêtre) montrent que, dans le contexte montagnard humide et froid étudié (pluie et température annuelles : 2005 mm et 8,4°C ; moyenne 1961-1990), la température joue un rôle plus important que les précipitations pour expliquer les variations interannuelles de la croissance des 2 espèces (**Figure 36**). Cependant, les deux espèces présentent un comportement tranché avec une forte réponse positive aux conditions thermiques de fin d'été pour le Sapin tandis que la croissance du Hêtre dépend plus fortement des conditions de printemps (avril) et du début d'été (juin) ; des trop fortes chaleurs limitant la croissance pour cette espèce.

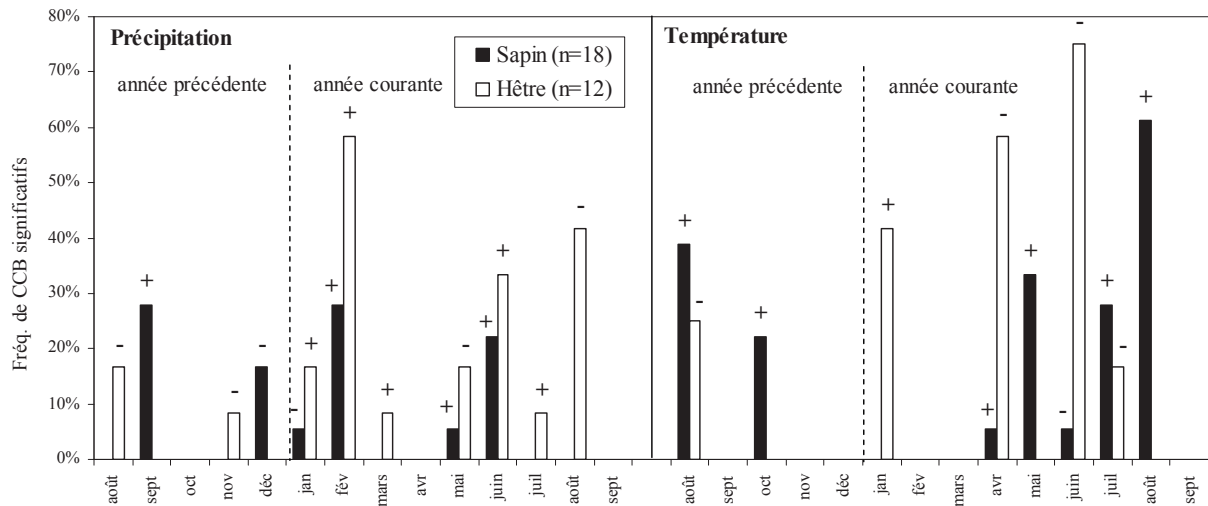


Figure 36. Fréquence de coefficients de corrélation bootstrappés (CCB) significatifs (au seuil de 5%) par espèce. Les calculs ont été réalisés sur la période commune 1940-1996 en intégrant les régresseurs climatiques précipitation et température moyenne du mois d'août de l'année précédente au mois de septembre de l'année en cours. N = 18 modalités pour le Sapin et 12 pour le Hêtre. Le signe + indique un effet stimulant des fortes valeurs du facteur climatique (effet limitant sinon). Par exemple, pour le Hêtre, la température moyenne du mois de juin limite la croissance dans 9 cas sur 12 (75% des cas).

La prise en compte des deux indicateurs de compétition montre que la surface terrière (compétition globale) discrimine plus nettement le comportement des arbres que leur statut social (compétition individuelle) et ceci particulièrement pour le Sapin (**Figures 37 et 38**). Dans le cas des surfaces terrières les plus faibles (32 et 41 m²/ha), les arbres d'une même espèce présentent la même réponse au climat quelque soit leur statut social au sein du peuplement. Par exemple, pour le Sapin, la température du mois d'août stimule la croissance dans 10 cas sur 12 pour les valeurs de G les plus faibles. En revanche, pour la surface terrière la plus forte (49 m²/ha), la réponse des arbres varie avec une sensibilité accrue aux pluies de début d'été (juin) et ceci d'autant plus que l'arbre est dominant. Pour le Hêtre, l'augmentation de G se traduit également par une réponse aux pluies de printemps mais, en raison de l'échantillonnage plus déséquilibré pour cette espèce (voir **Tableau 4**), la différence entre statut est moins évidente.

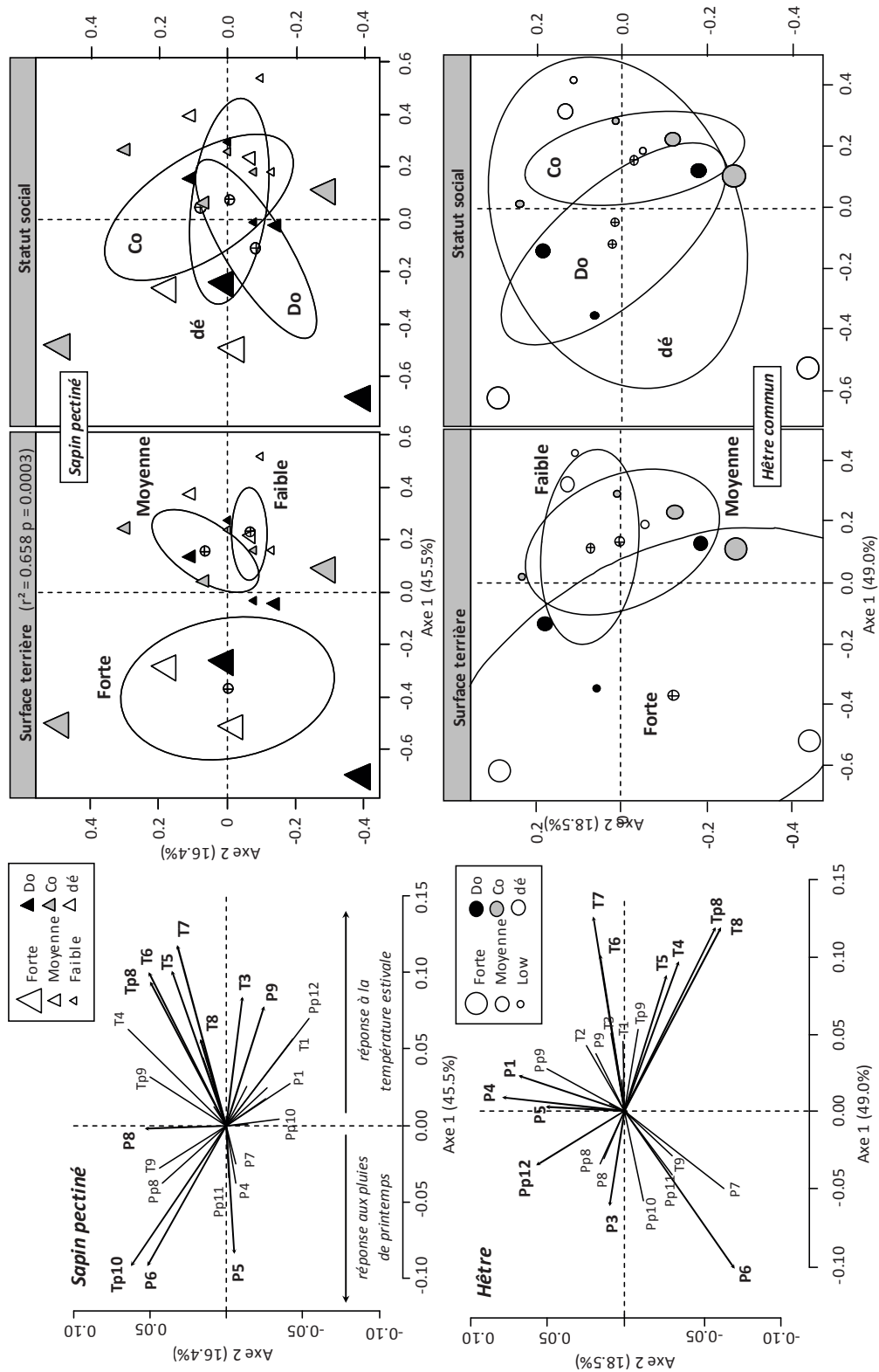


Figure 37. Plan factoriel de l'analyse en composantes principales (ACP, axes 1 et 2) réalisée sur les coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) calculés sur la période 1940-1996 pour le Sapin pectiné (triangles) et le Hêtre (ronds). T = température; P = précipitation; p = année précédente ; le numéro indique le mois de l'année. Pour améliorer la lisibilité de la figure, seules les variables climatiques les plus significatives sont présentées (flèches en gras variables contribuant le plus à l'explication des axes). Les ellipses de confiance (à 95%) pour les variables qualitatives supplémentaires sont présentées : surface terrière forte, moyenne et faible (taille décroissante des symboles); statut social Dominant, Codominant et dominé (couleur des symboles).

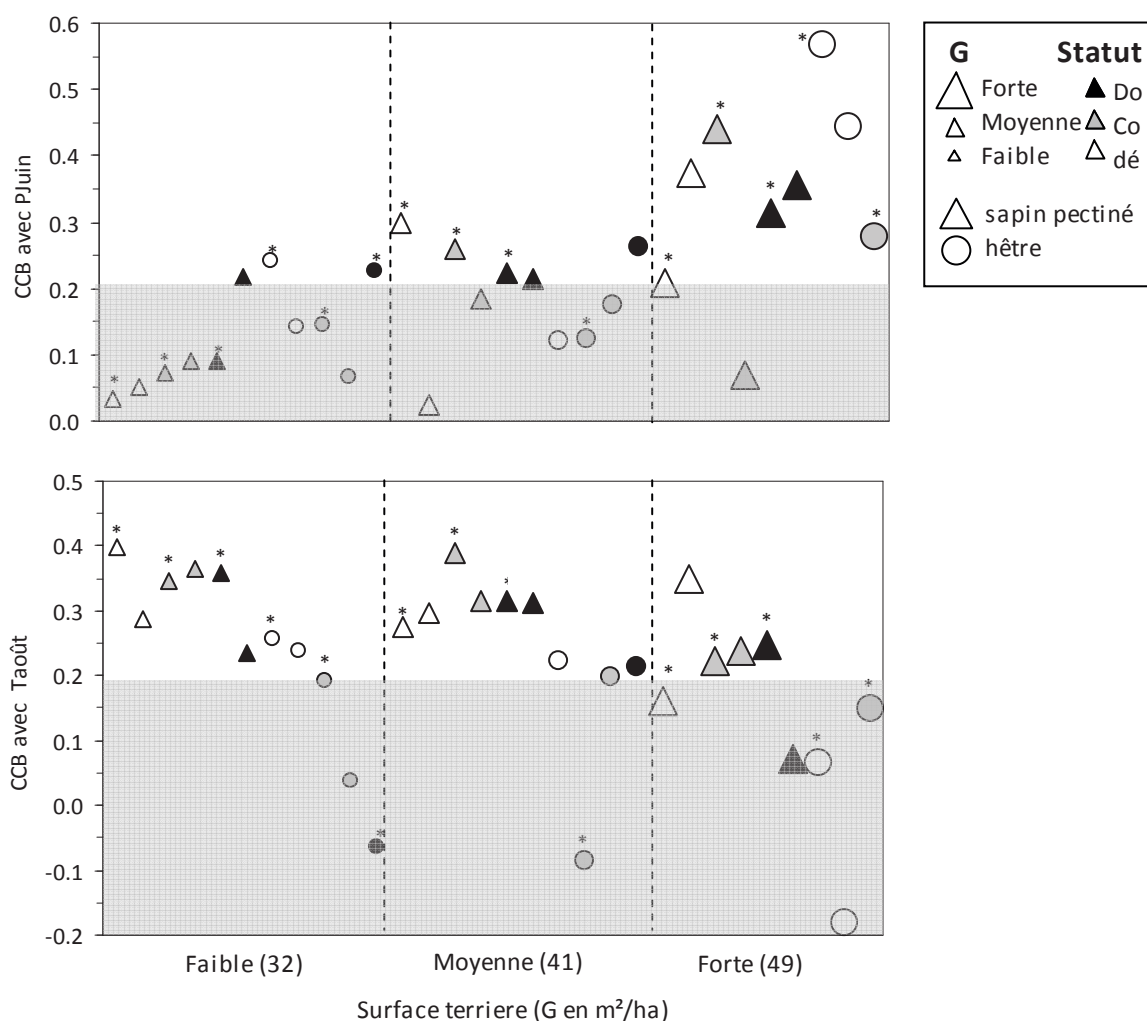


Figure 38. Evolution des coefficients de corrélation bootstrapped (CCB) pour les pluies de juin (Pjuin) et la température d'août (Taoût) selon la surface terrière (G en m²/ha) et le statut social (Do, Co, dé) pour le sapin pectiné et le hêtre. * = exposition Nord (Sud sinon). Le coefficient de détermination (r^2) de l'équation linéaire entre Pjuin et G est de 0,465 et de 0,216 entre Taoût et G. Zone grisée = CCB non significatifs au seuil de 5%.

Même dans un contexte climatique optimal de croissance pour le Sapin et le Hêtre, notre étude montre que les pratiques sylvicoles peuvent moduler la réponse des arbres au climat. Ainsi, dans les peuplements les moins denses, la sécheresse printanière n'est pas un facteur limitant et les températures élevées de fin d'été stimulent la croissance. L'augmentation de la surface terrière modifie le déterminisme de la croissance en exacerbant la compétition pour l'eau et rendant ainsi les arbres plus dépendants des conditions locales d'approvisionnement (ici le régime des pluies printanières). Ici nous avons étudié des arbres relativement jeunes (60 ans) en « croissance active » (entre 35 et 45 cm de diamètre). Le guide sylvicole pour le Sapin dans les Vosges recommande des valeurs de G autour de 30 m²/ha (25 à 35 m²/ha) pour une gestion optimale à la fois pour les peuplements purs et mélangés à base de Sapins. Les valeurs moyennes et élevées de G (41 et 49 m²/ha) ont été étudiées ici car elles représentent encore des cas très fréquents dans les forêts vosgiennes. D'un point de vue sylvicole, la « simple » application des recommandations semble être suffisante pour minimiser les contraintes liées à la sécheresse estivale (dans la gamme des niveaux et des fréquences observés sur la période étudiée). Différentes études ont montré que l'accumulation d'années sèches peut réduire la capacité de réponse

des arbres, induire des pertes de vitalité et à terme des mortalités (Allen *et al.*, 2010). Ainsi, maintenir des niveaux de G « raisonnables » peut permettre d'atténuer les effets de l'augmentation des sécheresses prévue dans les prochaines décennies. Même si des résultats récents ont montré que les changements climatiques ont déjà influencé la distribution (Lenoir *et al.*, 2008) et la croissance (Charru *et al.*, 2010) particulièrement en contexte montagnard en réduisant la contrainte thermique, il est raisonnable de penser que les peuplements poussant aux altitudes les plus élevées pourraient aussi souffrir dans un avenir proche de la sécheresse. Ainsi, même si les conditions actuelles restent dans la gamme des conditions que le sapin et le hêtre semblent pouvoir supporter, le gestionnaire peut dès à présent réduire ou maintenir des niveaux « faibles » de G dans les altitudes les plus élevées pour prévenir au mieux des changements futurs.

2.2. Adaptation des itinéraires sylvicoles au changement climatique chez le Chêne sessile et le Douglas (Thèse en cours de R. Trouvé, 2011-2014, première publication en cours)

Les prédictions de la croissance radiale des arbres forestiers sous différentes hypothèses de climat futur ont été beaucoup réalisées à partir d'approches dendroécologiques fondées sur l'analyse des largeurs des cernes. Cette approche est importante car elle permet une analyse rétrospective à l'échelle interannuelle (et donc une forte résolution interannuelle). Cependant, dans ses analyses, la dynamique du peuplement à travers des modifications du statut social des arbres, de densité, etc. sont rarement prises en compte faute d'inventaires répétés dans le temps. Ainsi, l'association d'approches dendrochronologiques et d'inventaires forestiers répétés (IFR) apparaît être une solution intéressante pour mieux appréhender les effets de la structure du peuplement sur la croissance radiale.

Si la diminution du niveau de compétition subie par les arbres au sein du peuplement est une orientation possible pour le gestionnaire elle sous-entend une modification des itinéraires sylvicoles aboutissant à la réduction plus ou moins rapide au cours de la révolution de la quantité de matériel sur pied (réduction des surfaces terrières). Pour le gestionnaire, la question est alors de savoir qu'elle est le mode et l'intensité de gestion qu'il faut appliquer pour maintenir un niveau d'accroissement vérifiant les conditions nécessaires aux objectifs de qualités technologiques recherchées pour le matériau bois, et augmenter la résistance/résilience aux modifications environnementales (essentiellement climatiques). Il apparaît également que les dimensions spatiales (effet de la station) sont généralement peu explorées alors que l'on sait que les conditions locales de croissance modulent fortement la réponse des espèces.

Pour ce travail de thèse, issue d'une collaboration entre les deux partenaires (LerfoB) et ONF (pôle R&D), les objectifs, qui se situent à deux niveaux d'intégration (peuplement et arbre), sont :

- Dans des structures régulières monospécifiques, rechercher comment des modifications du niveau de compétition modifient la réponse du peuplement aux événements climatiques d'intensités plus ou moins marquées. En d'autres termes, comment différents itinéraires sylvicoles modifient la résistance et la résilience des peuplements.
- Au sein d'un peuplement forestier, étudier comment se répartit la contrainte climatique. En d'autres termes, la réponse des arbres au climat varie-t-elle selon leur statut social ? Est-elle en faveur/défaveur des arbres d'avenir du peuplement ? Peut-on identifier des trade-offs ou des synergies dans la réponse aux stress thermiques et hydriques ?
 - Etudier comment le contexte écologique de croissance des peuplements (type de sols, domaine climatique...) peut modifier ces relations et dans quel sens.
 - Elaborer des formes génériques de réponse intégrée de la croissance des espèces au climat, incluant l'ensemble de ces déterminants (densité, statut social, âge...).
 - Etudier à quelles conditions sur les itinéraires techniques des sylvicultures adaptatives aux stress et aux changements climatiques tendanciels sont possibles, en mettant en œuvre une approche de simulation intégrant des scénarios de changement climatique.

Parmi les réseaux forestiers existants actuellement, le GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers (GIS Coop) représente le seul réseau d'expérimentation sylvicole d'envergure nationale permettant d'aborder ces problématiques. Il associe à la fois la variabilité des conditions écologiques (climat, sol) et la variabilité des situations sylvicoles, et tout particulièrement des densités. Depuis sa création en 1995, le GIS a défini des protocoles standardisés qui assurent l'homogénéité des données relevées et rend possible des analyses sur des vastes échelles.

Pour ce projet, les données issues du réseau « Douglas » et du réseau « Chênes » sont utilisées. Le choix s'est porté sur ces deux espèces : (i) en raison de leur importance économique, (ii) parce qu'elles sont à la base de systèmes sylvicoles conduits avec des intensités contrastées, et (iii) parce que ces deux réseaux couvrent les plus larges gradients climatiques et stationnels. Le réseau « Douglas » comprend 136 placettes et expérimente 9 traitements sylvicoles différents. Le réseau « Chênes » comprend 62 placettes (19 de Chêne pédonculé, 39 de Chêne sessile et 4 en mélange) et 6 traitements sylvicoles différents. Grâce au suivi mis en place depuis plus de 10 ans, il semble déjà possible de quantifier les effets des différentes actions de gestion sur la dynamique de ces peuplements et d'analyser les interactions avec les conditions écologiques. Par ailleurs, l'utilisation du réseau permanent INRA Chêne sessile a été également considérée, puisqu'il est un excellent moyen de compléter le réseau GIS s'agissant des gradients d'âge et climatiques.

Les travaux de R. Trouvé se termineront fin 2014 et une première publication est en cours.

3. Mélange des essences et réponse au climat

3.1. Etudes sur les peuplements mélangés à base de Sapin dans les Vosges.

a. Approche dendroécologique (Projet RMT Aforce 2011-2012 ; publication [A1])

Pour étudier l'effet du mélange sur la réponse des arbres au climat, j'ai utilisé les données issues des travaux de thèse de Mérian (2012) et Pinto (2006) récoltées dans les Vosges. L'effet de trois types de mélange (Sapin-Epicéa, Sapin-Hêtre, Sapin,-Epicéa-Hêtre) sur la réponse du Sapin a donc été étudié dans trois situations climatiques contrastées (n=456 arbres ; contextes sec, mésophile et humide) (Figure 39).

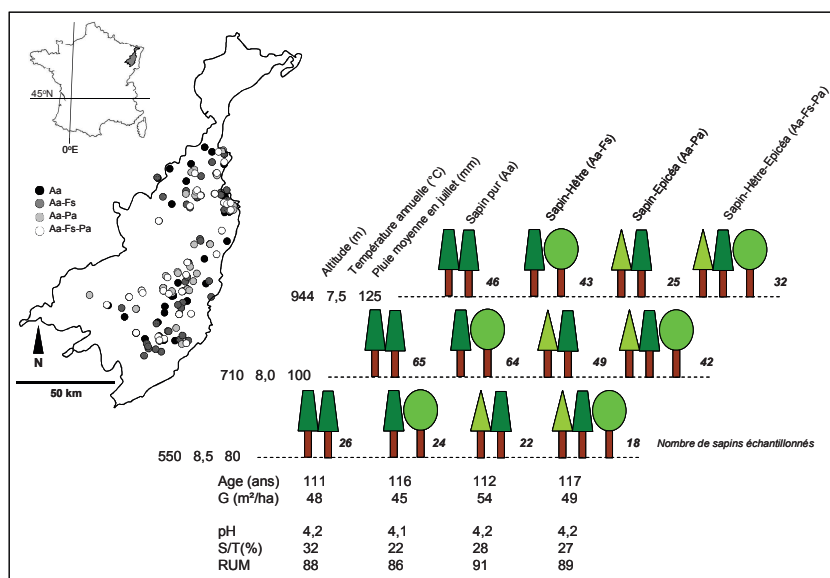


Figure 39. Localisation géographique et caractéristiques des 151 sapinières pures et mélangées étudiées (456 sapins). Pour le climat, les données correspondent à la moyenne 1961-1990. pH et taux de saturation (S/T en %) du premier horizon minéral. RUM = réserve maximale en eau du sol calculée sur 1 mètre (en mm). G = surface terrière du peuplement (en m²/ha).

Les analyses effectuées sur la période 1901-2000 montrent que le Sapin répond particulièrement aux conditions automnales de l'année précédente (à travers le mois de septembre) et aux conditions estivales (déficit hydrique), période pendant laquelle le mois d'août est une période clé (à travers la température essentiellement) (**Figures 40 et 41**). La sensibilité aux températures hivernales (janvier-février) apparaît également mais essentiellement dans les conditions les plus humides correspondant également aux sites d'altitude les plus élevées (> 900 m). Ces résultats sont tout à fait en accord avec la réponse généralement observée pour cette espèce (*voir partie 4.2 dans le chapitre résultats et partie 2.1.1 dans ce chapitre*) et avec son comportement physiologique qui reflète une espèce plutôt « thermophile » mais sensible à la sécheresse estivale (Aussenac, 2000 ; Guicherd, 1994 ; Peguero-Pina *et al.*, 2007).

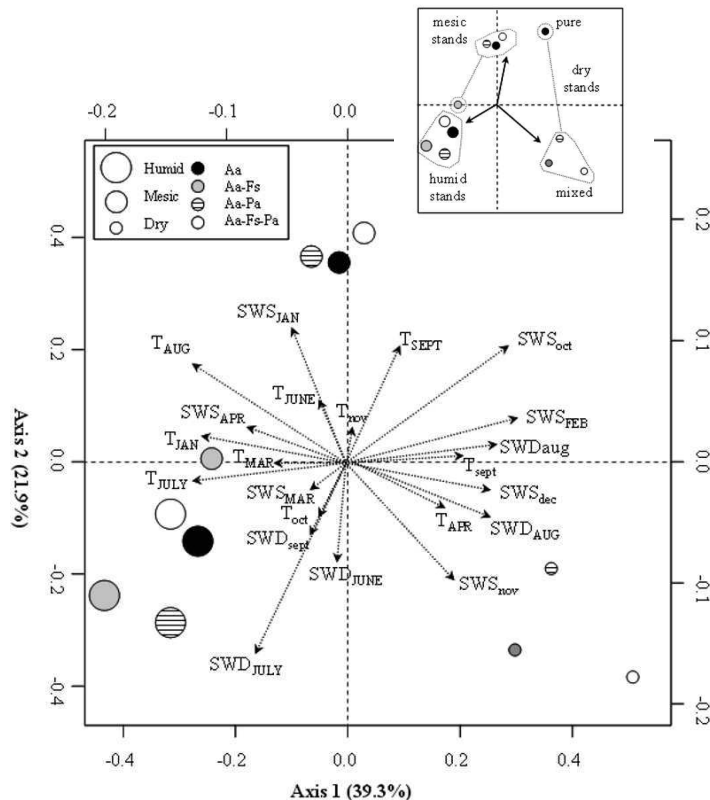


Figure 40. Plan factoriel (1x2) de l'analyse en composantes principales réalisée sur les coefficients de corrélation boosttrapped (CCB établis sur la période 1901-2000) sur les 12 chronologies de Sapin (4 types de peuplement et 3 conditions mésoclimatiques). Pour les paramètres climatiques, les lettres en capitales correspondent à l'année en cours (lettres en minuscule pour les mois de l'année précédente). T : température moyenne; SWS : surplus en eau du sol (Soil Water Surplus); SWD : déficit en eau du sol (Soil Water Deficit) (bilan hydrique calculé selon la méthode de Thornthwaite et Matter, 1955).

Le mélange du Sapin avec les autres espèces se traduit par une sensibilité réduite à la sécheresse estivale mais seulement dans les conditions chaudes et sèches des altitudes plus faibles (< 600 m). En revanche, dans les contextes frais et humides d'altitude (> 600 m), le bilan hydrique estival reste un facteur essentiel de modulation de la croissance du Sapin (**Figure 41**). Ces résultats suggèrent donc que la facilitation entre le Sapin et les autres espèces augmente quand les ressources sont limitées alors que la compétition (pour l'eau ici) reste un processus majeur dans les conditions potentiellement les moins contraignantes se traduisant par le maintien d'une forte sensibilité du Sapin à la sécheresse. Ce comportement apparaît également plus marqué quand le Sapin est en mélange avec le Hêtre et non avec l'Épicéa. Ceci est cohérent avec le concept qui dit que la facilitation joue un rôle d'autant plus important que le mélange est constitué d'espèces avec des traits physiologiques et des demandes écologiques contrastés (Cavard *et al.*, 2011).

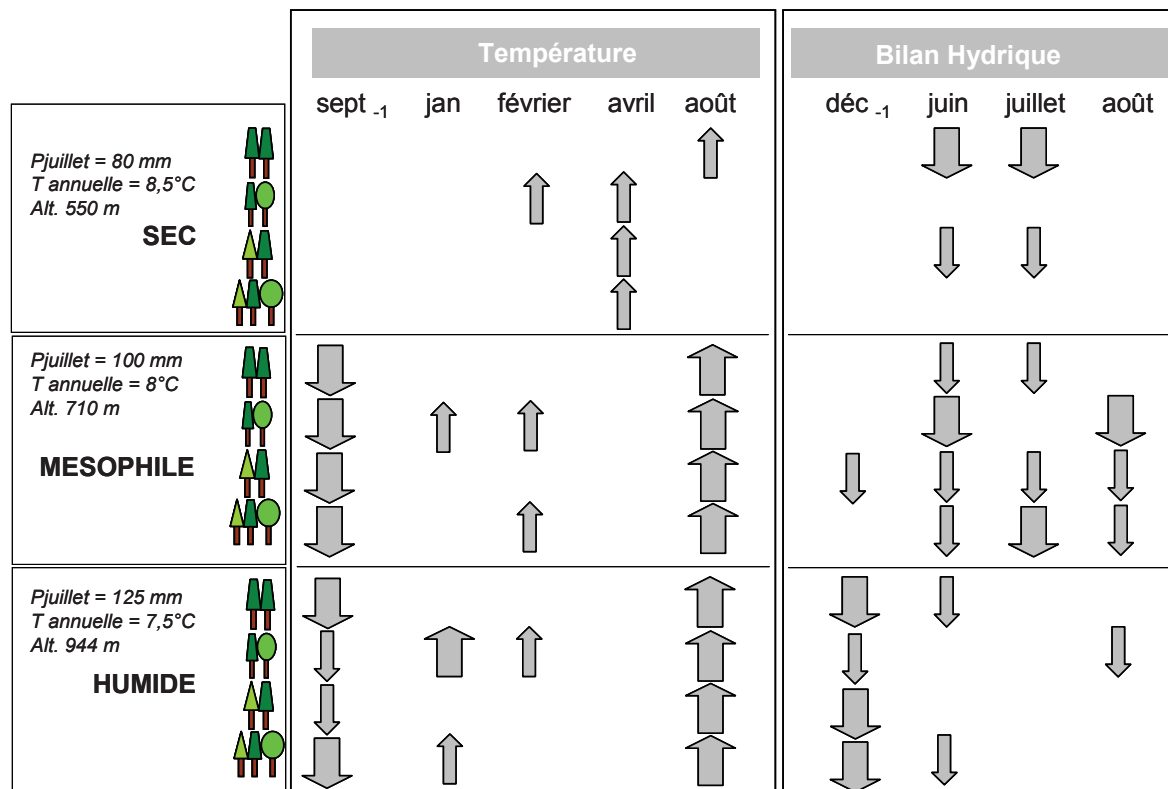


Figure 41. Synthèse des facteurs influençant la croissance radiale du sapin dans les Vosges selon le contexte (sec, mésophile et humide) et le mélange. -1 : année précédant la mise en place du cerne. Flèche large = CCB significatif au seuil de 5%. Flèche étroite = CCB significatif au seuil de 10%). Pour les températures, la flèche montante signifie un effet positif sur la croissance des valeurs élevées (effet limitant sinon). Pour le bilan hydrique de décembre₋₁, la flèche descendante indique un effet limitant de l'excès d'eau pendant ce mois. Pour les autres mois, la flèche descendante indique un effet limitant du déficit en eau (voir légende **Figure 39**).

Cette différence de comportement peut s'expliquer par différents processus (**Figure 42**). Certaines études ont montré que le système racinaire du Sapin colonisait le sol d'une façon plus profonde que celui du Hêtre et de l'Epicéa (Kazda *et al.*, 2004 ; Konôpka, 2009 ; Nicoll *et al.*, 2006 ; Schmid et Kazda, 2001). On sait par ailleurs qu'un enracinement profond permet d'assurer la continuité de l'approvisionnement en eau tout au long de la saison de végétation et donc de maintenir plus longtemps des activités physiologiques indispensables à la croissance et à la survie des arbres (Bréda *et al.*, 2006 ; Leuschner *et al.*, 2004). Cependant, en dépit du nombre croissant d'articles sur la physiologie des peuplements mélangés, les études sur l'effet du mélange sur la production et l'architecture des racines restent très rares particulièrement sur le Sapin. Des études récentes suggèrent que le Hêtre est plus résistant à la sécheresse quand il est en mélange avec le Douglas (Reyer *et al.*, 2010), l'Epicéa (Bolte et Villanueva, 2006 ; Schmid et Kazda, 2001 ; Schume *et al.*, 2004) ou encore le Chêne sessile (Jonard *et al.*, 2011) grâce à une modification de son enracinement profond et superficiel et de la répartition des pluies dans le peuplement. Dans un mélange à trois espèces, (Brassard *et al.*, 2011) ont montré que la production de racines fines était supérieure dans le mélange et que la prospection du sol en profondeur était plus forte également. Plus récemment, il a été montré que la présence de Hêtre dans un peuplement de Sapin se traduisait par le maintien d'une plus forte humidité du sol dans des horizons superficiels alors que la tendance inverse est observée avec de l'Epicéa (Paluch et Gruba, 2012a). Dans ce type de mélange, l'augmentation des apports d'eau due à la plus faible interception des pluies incidentes par le feuillage du Hêtre (Aussenac, 2000) ou au

ruissellement le long des branches et des troncs (Levia et Frost, 2003 ; Schume *et al.*, 2004) peuvent expliquer ces résultats.

Cette moindre sensibilité du Sapin en mélange dans les situations sèches pourrait avoir des répercussions dans l'aménagement forestier face aux prédictions d'une augmentation de la contrainte hydrique dans le futur (Planton *et al.*, 2008). On sait que l'accumulation de stress peut entraîner des pertes de vitalité des arbres puis à terme des dépérissements et de la mortalité (Allen *et al.*, 2010). Ainsi, réduire les contraintes hydriques par le mélange pourrait aider le gestionnaire à prévenir des mortalités futures. Même si nos résultats illustrent un fort effet du mélange seulement dans les situations les plus sèches, on peut imaginer que les peuplements poussant à des altitude plus élevées pourraient également souffrir de contraintes plus importantes dans le futur et donc favoriser également le mélange dans ces contextes actuellement encore très favorables au Sapin.

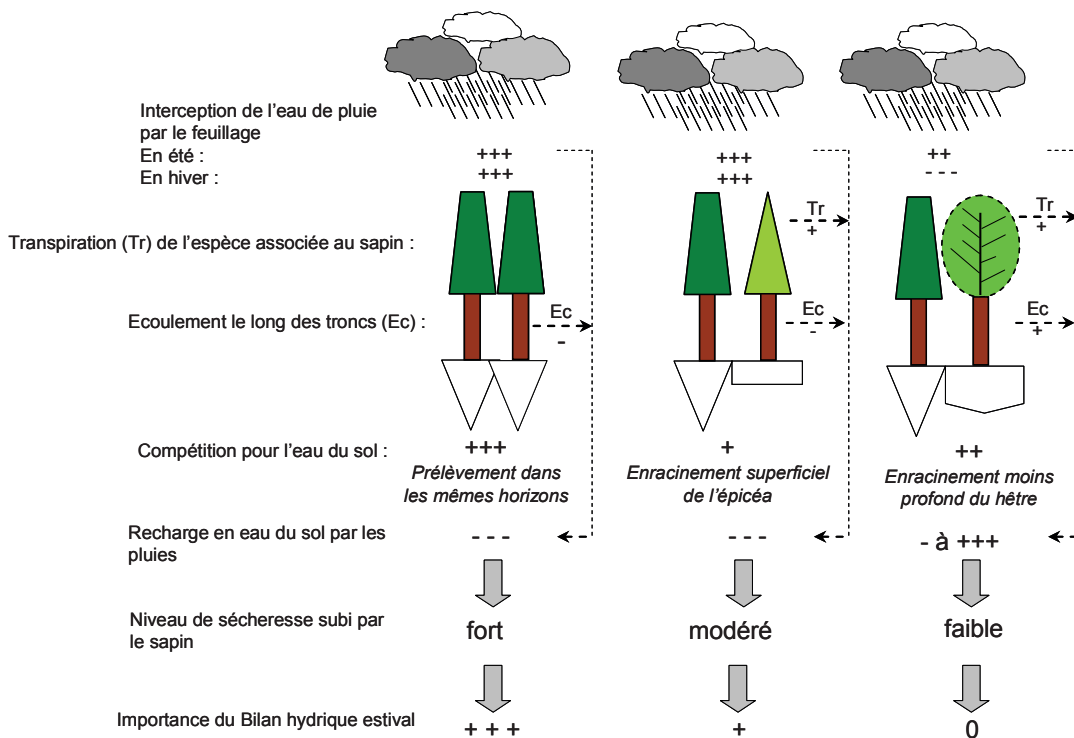


Figure 42. Essai de synthèse des interactions biologiques possibles dans les mélanges étudiés et conséquences sur le comportement du sapin.

b. Approche isotopique (Projet MIX-ABIES (Mixed stand effect on Abies alba functioning under drought) financé par le LABEX Arbre, fin du projet septembre 2015)

Ce projet, porté par Damien BONAL et Stéphane PONTON de l'UMR 1137 « Ecologie et Ecophysiologie Forestières », s'appuie sur les données récoltées pendant la thèse de Pinto (2006). L'objectif est d'étudier la réponse de la croissance et du fonctionnement hydrique et carboné du Sapin dans les Vosges à la compétition avec d'autres espèces (Hêtre et Epicéa commun) au cours de sécheresses extrêmes. Le fonctionnement sera étudié à travers les variations de la composition isotopique du carbone dans les cernes de Sapin durant deux épisodes de sécheresse (période 1975 à 1978 avec sécheresse de 1976 et 1988 à 1992 avec 1990-1991). La discrimination isotopique de cet élément est fortement sous contrôle des processus d'échanges gazeux foliaires eux-mêmes fortement sous contrôle des conditions environnementales comme la température et des précipitations (Barbour, 2007 ; Battipaglia *et al.*, 2013 ; Bert *et al.*, 1997 ; Francey et Farquhar, 1982). Pour une espèce donnée, mesurer cette discrimination selon les compositions des mélanges pour des années à fort contrôle climatique permet donc d'appréhender les différences éventuelles de régulation des pertes hydriques et de stratégie d'utilisation de l'eau pour celle-ci. Ces approches plus fonctionnelles sont donc importantes à mener pour conforter les résultats obtenus sur les seules analyses du proxy cerne.

3.2. Effet de la Biodiversité forestière Arborée sur la stabilité, la Résilience et la Résistance des écosystèmes forestiers dans un contexte de changement CLIMatique - Analyse multi-échelle de la croissance radiale et de la mortalité (Projet BARRCLIM (durée 3 ans) soumis dans le cadre de l'appel d'offre 2013 du Programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » ; collaboration LERFOB, IGN-Laboratoire de l'Inventaire Forestier (LIF), IRSTEA).

L'objectif de ce projet est d'analyser en quoi la biodiversité arborée module la résistance (*e.g. capacité d'un système à maintenir son fonctionnement « normal » lors d'une perturbation*) et la résilience (*e.g. capacité de ce système à retrouver un fonctionnement « normal » après avoir subi cette perturbation*) des écosystèmes forestiers tempérés aux contraintes environnementales et plus particulièrement climatiques. L'analyse sera menée sur ***l'ensemble du territoire français*** à partir des données ***d'accroissement radiaux*** et de ***mortalité*** récoltées lors des 9 dernières campagnes d'inventaire de l'inventaire forestier (2005 à 2013). Les 68 000 placettes, correspondant à plus de 100 000 arbres et 500 000 cernes, couvrent toute la variabilité des conditions écologiques ainsi que l'ensemble des espèces arborées et des structures forestières (peuplements pur et types de mélange variés) des écosystèmes français. L'analyse globale sera complétée par des données régionales (environ 120 placettes et 1000 arbres) issues de réseaux d'observations indépendants des données de l'inventaire de façon à valider localement les résultats nationaux. Pour chaque placette, les données dendrométriques sont complétées par un ensemble de données environnementales et climatiques relevées sur le terrain ou issues de modèles (bioindication par la flore, données climatiques spatialisées à haute résolution, etc.). Le projet s'articule autour de trois questions correspondant à trois niveaux d'analyses différents : espèce, composition et type de mélanges, contraintes abiotiques :

- **Question ❶** : La résistance, la résilience et la mortalité d'une espèce donnée changent-elles selon qu'elle pousse en peuplement pur ou mélangé ? En fonction du rôle respectif de la compétition intra- et interspécifique, on s'attend à des différences de réponse entre pur et mélange pour une espèce donnée.
- **Question ❷** : Les différences de réponse entre peuplements pur et mélangé dépendent-elles des caractéristiques du mélange c'est-à-dire de la nature des espèces, de leur nombre et de

leurs proportions ? On s'attend à ce que la différence entre pur et mélange, pour une essence donnée, soit d'autant plus marquée que les niches des espèces sont complémentaires.

- **Question ③:** En quoi le niveau de contraintes abiotiques modifie-t-il les réponses spécifiques et les réseaux d'interaction ? On s'attend à ce que l'expression de la complémentarité des niches sur la résistance et la résilience s'exprime d'autant plus que le niveau de contraintes abiotiques est élevé.

Sur le plan fondamental, le travail apportera des éclairages sur les phénomènes de compétition et de facilitation sur la résistance et la résilience des arbres des forêts poussant dans des conditions pédoclimatiques d'écosystèmes tempérés. La prise en compte d'espèces feuillues et résineuses aux comportements tranchés vis-à-vis de certains traits fonctionnels (espèces héliophile à dryade, hygrophile à xérophile, acidiphile à calcicole, etc.) devrait permettre d'obtenir des résultats à très large portée. D'un point de vue pratique, le travail permettra de juger de l'intérêt de la biodiversité forestière arborée pour la stabilité des écosystèmes forestiers et donc de guider le gestionnaire quant à ses choix de composition et de type de mélange pour s'adapter au mieux aux modifications climatiques à venir. Il permettra également de déterminer les conditions environnementales dans lesquelles les effets du changement climatique pourront être le plus atténuée par la gestion forestière.

 Thème 2 : Relation fructification, phénologie foliaire et croissance

La production annuelle de biomasse d'une forêt est déterminée par les caractéristiques pédologiques (disponibilité en éléments minéraux et en eau), la structure du peuplement (indice foliaire, biomasse sur pied) et les conditions climatiques caractéristiques de l'année en cours ou de(s) l'année(s) précédente(s) (p.ex. arrière-effets des sécheresses sur la production de réserves carbonées). Cette production de biomasse est répartie entre différents compartiments, dont les biomasses ligneuse, foliaire et racinaire, et la biomasse de fruits. Les proportions d'allocation de la biomasse entre les différents compartiments végétatifs commencent à être documentées (Genet *et al.*, 2010) même si les causes de leurs variations interannuelles ne sont pas complètement élucidées. Une meilleure connaissance de ces phénomènes est important car la probabilité de présence d'une espèce (et de son maintien dans le temps) dépend étroitement de sa capacité de survie et de son succès reproducteur (Morin et Chuine, 2005 ; Silva *et al.*, 2012). La phénologie foliaire est très souvent considérée comme un très bon indicateur de la capacité de survie étant donné son caractère très sélectif (*i.e. une espèce à débourrement précoce ne pourra pas survivre dans un environnement présentant une fréquence élevée de gelées tardives*). Le déterminisme de la phénologie foliaire a été beaucoup étudié pour un grand nombre d'espèces tandis que celui du succès reproducteur, qui intègre la capacité à fleurir et à produire des fruits (Barna, 2011 ; Sork et Bramble, 1993), reste mal compris et à préciser pour un grand nombre d'espèces forestières (Barna, 2011 ; Drobyshev *et al.*, 2010 ; Gruber, 2003 ; Hilton et Packham, 2003 ; Mund *et al.*, 2010). Par ailleurs, les modèles actuels de simulation de la croissance ligneuse (Davi *et al.*, 2006 ; Dufrêne *et al.*, 2005) ne tiennent pas compte de l'influence de la fructification, qui peut constituer un puits de carbone très important (Mund *et al.*, 2010).

Pour les arbres forestiers, les données concernant la fructification sont rares et, là encore, c'est dans le réseau RENECOFOR que l'on dispose de données fiables sur plusieurs années (1995-2004) pour les Chênes pédonculé (n=8 sites) et sessile (21) et le Hêtre (19). Un travail préliminaire de Hilaire Martin en 2009 avait permis de caractériser la fructification des peuplements (**Figure 43**) et d'aborder partiellement le déterminisme écologique (climat, sol) de celle-ci (Martin, 2009).

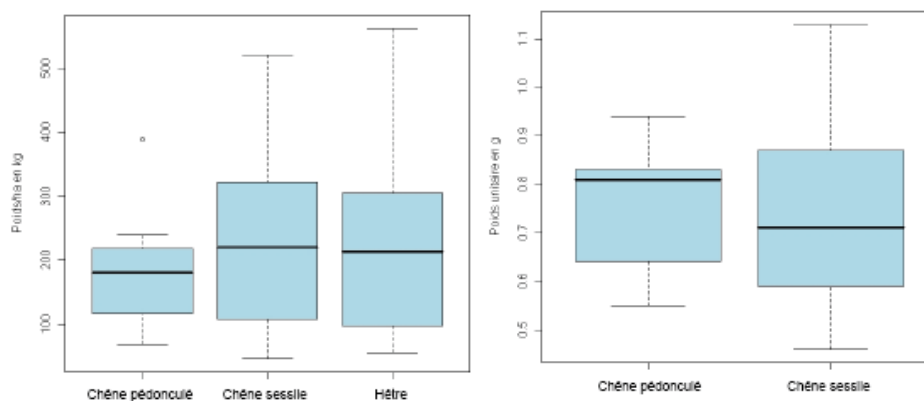


Figure 43. Poids moyen (en kg) de fruits par hectare (à gauche) et poids moyen unitaire (en g) (à droite) pour les Chênes et le Hêtre dans le RENECOFOR (période 1995-2004 ; d'après Martin, 2009).

Pour appréhender les relations entre les différents compartiments, 34 placettes du RENECOFOR (6 CHP, 21 CHS, 7 HET) ont été recarottées en 2009 de façon à compléter les séries chronologiques disponibles qui s'arrêtaient en 1997 et donc de disposer de données de croissance cohérentes avec les séries temporelles de phénologie et de fructification.

L'objectif de ce thème est donc d'avancer vers la compréhension de la variabilité spatiale et temporelle de la production de bois et de fruits des peuplements de Hêtre et de Chêne au moyen d'une analyse statistique de la base de données RENECOFOR. On cherchera ainsi à évaluer, d'une part, la dépendance statistique de la croissance aérienne ligneuse et de la fructification aux conditions météorologiques (températures, indices de stress hydrique notamment) et phénologiques (occurrence du débourrement, durée de la saison feuillée) et, d'autre part, l'existence d'un lien statistique entre les deux puits de carbone que sont la croissance aérienne ligneuse et la fructification.

Pour mener à bien ce projet, une collaboration a été établie avec Nicolas Delpierre de l'Université Paris-Sud 11 (Laboratoire Ecologie, Systématique, Évolution (ESE-UMR 8079), Département Ecophysiologie végétale, Équipe Bilan carboné et fonctionnement des écosystèmes). Un sujet M2 a été proposé dans le master FAGE (Nancy) et EBE (Orsay) mais n'a pas été choisi en 2014. Bien que la phénologie ne soit pas la thématique centrale de mes activités, il apparaît important de continuer dans cette voie. Ceci est par ailleurs cohérent avec les mesures en cours dans les dispositifs expérimentaux lorrains (paragraphe 7, page 46). Les résultats des deux approches devraient permettre de mieux cerner les relations entre cycle foliaire, croissance et fructification et d'apporter des éléments importants d'information quant aux stratégies d'allocation de carbone dans les différents compartiments selon les contraintes environnementales (Barna, 2011 ; Gruber, 2003 ; Mund *et al.*, 2010). Ces résultats pourraient servir de base à la formulation de représentations mécanistes de l'impact de la fructification sur le bilan et l'allocation du carbone dans les modèles mécanistes de fonctionnement des forêts comme le modèle CASTANEA développé au ESE (Davi *et al.*, 2006 ; Dufrêne *et al.*, 2005).

Sur la phénologie, une autre action en cours concerne la réalisation d'un ouvrage collectif aux éditions *Delachaux et Niestlé* présentant les stades phénologiques des principaux arbres forestiers tempérés français ainsi que quelques espèces herbacées. Ce projet de livre destiné à la fois aux chercheurs et au grand public s'inscrit dans la démarche de Sciences Participatives initié avec l'Observatoire des Saisons. L'observatoire des Saisons (ODS), créé en 2008 par *Isabelle Chuine* du CNRS-CEFE, est un programme scientifique et pédagogique qui fait appel tout au long de l'année aux citoyens pour suivre les rythmes saisonniers de la faune et la flore (la floraison des plantes, la coloration des feuilles à l'automne, l'arrivée des oiseaux migrateurs, ...). L'ODS compte actuellement plus de 2600 observateurs, dont 30 établissements scolaires. Concernant l'ouvrage, il fait intervenir des chercheurs de 6 organismes (CNRS, INRA, AgroParisTech, ONF, Tela Botanica, CREA) et sa sortie est prévue fin 2015-début 2016. Enfin, dans le cadre de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) (créé par la loi du 19 février 2001), des travaux sont en cours pour fournir des indicateurs phénologiques de changement climatique à partir de la base de données créée il y a maintenant plusieurs années (projet porté par *Isabelle Chuine*).

Thème 3 : Génétique des Chênes sessile et pédonculé et réponse au climat

Il s'agit d'une proposition d'ANR (H2Oak, dépôt mai 2014) portée par Oliver Brendel (INRA-Nancy, équipe EEF) dont l'objectif est de mieux cerner la variabilité et le déterminisme génétique du contrôle de la régulation de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les Chênes sessile et pédonculé. En effet, dans le cadre des changements climatiques, il apparaît important de bien cerner cette variabilité naturelle de façon à choisir les meilleures provenances répondant au mieux à ces changements. Ce projet s'appuie sur réseau de test de 117 provenances de Chêne sessile et 17 de Chêne pédonculé échantillonnées dans toute l'Europe et plantées (au début des années 1980) dans 3 sites couvrant le gradient climatique Est-Ouest français. Dans ce projet, une étude dendroclimatologique est proposée (responsable Didier Bert, INRA-Pierroton). Un sous-échantillon de 20 provenances représentatives des contextes climatiques des populations mères et de la croissance observée dans les tests a été réalisé. Pour chaque provenance, 50 arbres ont été abattus et des rondelles prélevées. Sur chaque rondelle, différentes mesures seront effectuées de façon à obtenir les accroissements annuels et différents paramètres de densité. L'analyse dendroclimatique sera effectuée sur ces 20 provenances de façon à identifier clairement des différences de réponse au climat entre les génotypes et les interactions avec les conditions locales de croissance (sol et climat). Les résultats de cette analyse compléteront l'approche génomique et écophysiological et permettront de faire le lien entre le génome et un trait phénotypique (ici proxy cerne). J'interviens dans ce projet en collaboration avec Didier Bert sur ces analyses dendroclimatiques.

Positionnement du projet au sein du LERFOB et de l'équipe Ecologie Forestière

Depuis sa création, le LERFoB développe des recherches sur les dynamiques des ressources forestières, en rassemblant différentes disciplines (l'écologie des espèces et des communautés végétales, puis la modélisation et la simulation de la croissance et de la production des peuplements forestiers, associées à la biomécanique du bois, à l'architecture végétale, et à l'analyse statistique). Le projet 2013-17 de notre UMR (voir *site internet du LERFOB*) est organisé en trois thèmes structurés par les échelles d'étude :

1. Observer, modéliser, prédire la distribution des espèces végétales et la croissance des essences forestières à large échelle spatiale et temporelle ;
2. Dynamiques de systèmes sylvicoles complexes, modélisées à différentes échelles spatiales ;
3. Fonctions et qualités des bois : comprendre la plasticité des propriétés du bois dans l'arbre et son impact sur l'utilisation du matériau.

Si le thème 1 a été le thème central de mes activités sur la période passée et restera un thème fort pour les prochaines années en relation avec les autres chercheurs de l'équipe écologie, mes principales perspectives me positionnent également dans le thème 2 dans lequel les questions de l'adaptation des systèmes sylvicoles aux changements environnementaux prennent place. Les principaux chercheurs associés du LERFOB dans cette thématique émergente de l'UMR sont : *Barbeito I., Colin F., Collet C., Fortin M., Longuetaud F., Ningre F., Rathgeber C., et Wernsdörfer H.*

Les différentes échelles analysées et approches mises en œuvre dans ce thème 2 sont :

- Développement de l'arbre dans un petit collectif avec analyse des processus élémentaires (régénération, croissance, mortalité) en relation avec l'utilisation des ressources (eau, éléments minéraux, lumière). A cette échelle, ce sont les effets de la compétition individuelle (intra- et interspécifique) généralement dans les premiers stades de développement qui sont analysés ;
- Dynamique des peuplements en relation avec la composition spécifique, la densité, la structure verticale et horizontale et les conditions écologiques. Dans ce sous-thème, différentes approches de modélisation sont mises en œuvre selon l'échelle étudiée : de la xylogénèse avec l'analyse des processus intra-annuels de formation du bois aux outils de simulation de croissance pour les peuplements réguliers (*Fagacées* pour le Chêne et le Hêtre ; *Abial* pour le Sapin ; *SimCop* pour le Douglas) ou les forêts hétérogènes (*SimCAP* pour le mélange Hêtre et Frêne) ;
- Analyse de la ressource à l'échelle régionale ou nationale. L'enjeu est d'évaluer des décisions sylvicoles prises à l'échelle de territoires complets, et de comparer les effets de ces décisions sur la dynamique de la ressource forestière.

Mes perspectives de recherche se positionnent clairement dans le sous-thème 2 avec une approche dendroécologique de la dynamique des peuplements en relation avec leur composition et leur structure. Les résultats obtenus par cette approche peuvent, par exemple, contribuer à l'amélioration des simulateurs de croissance dans le sens où les interactions entre croissance / facteurs du milieu (climat notamment) et structure du peuplement sont analysées explicitement. En effet, les effets des facteurs de l'environnement sont peu pris en compte dans les simulateurs actuels ainsi que leurs effets sur les processus de compétition entre différentes espèces. Ces approches dendroécologiques à large échelle spatiale et temporelle sont également à rapprocher des travaux sur la mise en place du cerne à l'échelle intra-annuelle. La confrontation des différentes approches permettra d'améliorer nos connaissances sur ces systèmes complexes et d'aider à l'élaboration des outils d'aide à la décision sylvicole (actions R&D du Lerfob). Cette nouvelle orientation m'a permis renforcer les collaborations au sein du LERFOB mais également d'en créer de nouvelles notamment avec l'IRSTEA ou le nouveau Laboratoire de l'Inventaire Forestier (LIF) de l'IGN.

Si la prise en compte de systèmes forestiers plus complexes est explicite dans mon projet, il n'en reste pas moins que « Observer, modéliser, prédire la croissance des essences forestières à large échelle spatiale et temporelle » reste une thématique forte et assure la cohésion avec l'Equipe Ecologie Forestière. Par exemple, mes travaux sur l'autécologie des essences, sur le déterminisme de la croissance radiale des arbres forestiers ou encore sur les changements de réponse au cours du temps sont à rapprocher des études sur le déterminisme environnemental de la productivité forestière et de son évolution temporelle ; travaux menés notamment par *Ingrid Seynave* et *Jean-Daniel Bontemps*. Mes travaux sur la bioclimatologie et plus particulièrement sur le bilan hydrique ont été intégrés aux études de *Christian Piedallu* sur la modélisation des flux d'eau dans les écosystèmes et aux travaux sur la niche des espèces arborées et herbacées sous la responsabilité de *Jean-Claude Gégout*. Ces collaborations au sein de l'équipe se traduisent par des publications communes dans les différents thèmes, le montage de projet, le co-encadrement d'étudiants ou d'ingénieurs contractuels (*voir partie publications et projets*). Comme pour le thème 2, il est important de maintenir les collaborations « historiques » avec des organismes comme l'ONF, l'IDF, les CRPF, l'INRA mais également de consolider les relations se mettant en place avec les projets récents comme, par exemple, avec l'Université de Liège (Campus de Gembloux AgroBiotech) ou celle de Paris-Sud Orsay.

Projets, collaborations, encadrements

G. PROJETS DE RECHERCHE ET COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

Les projets figurés en gras correspondent aux études ayant bénéficié d'un soutien financier supérieur à 10 000 euros. Les projets non financés spécifiquement sont figurés en police normale. Afin de faciliter la lecture, j'ai regroupé les projets par grande thématique et par ordre d'importance dans ma recherche. Dans chaque thématique, les projets ont été classés par date (des plus anciennes au plus récentes). Pour chaque projet, j'ai précisé :

- **mon niveau de responsabilité** : ® responsable avec une forte participation ; o participation importante mais non porteur du projet ; • participation faible.
- **ma production scientifique** entre crochets, en séparant les publications internationales référencées ISI (premier chiffre), les publications de transfert et de valorisation (deuxième chiffre) et les rapports scientifiques, actes de colloques, chapitres d'ouvrage ou documents à diffusion plus limitée (troisième chiffre) (voir Partie « Publications et communications » pour une présentation détaillée).

1. Dendroécologie et croissance des arbres forestiers

Cette thématique regroupe les projets essentiels dans mon activité de recherche qui est centrée sur l'analyse du déterminisme climatique de la croissance radiale des arbres forestiers en contexte tempéré européen.

- ® **Projet n° 9360FR0030 (Union Européenne, DG VI) (1995-1997)**. « Etude dendroécologique des 102 peuplements du REseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FOREstiers (RENECOFOR) ». Responsables : F. Lebourgeois et E. Ulrich. Collaborations : INRA Nancy et ONF. **Ce projet** a été mené avant mon recrutement en tant qu'EC à l'ENGREF (actuellement APT) mais **constitue le départ de toute mon activité dendroécologique depuis plus de 15 ans**. (Pour la production scientifique, voir projet suivant).
- ® **Projet n° 9760FR0030 (Union Européenne, DG VI) (1997-1999)**. « Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans le RENECOFOR ». Responsables : F. Lebourgeois et A. Granier. Collaborations : INRA Nancy et ONF. Projet mené avant mon recrutement en tant qu'EC à l'ENGREF et faisant suite au projet 9630. Production scientifique : [7, 12, 4].
- ® **Projet « Futaie des Clos » (2001)** : « Etude dendroécologique de la Futaie des Clos ». Responsables : F. Lebourgeois et Y. Ducos. Collaborations : ONF Centre - ENGREF. Production scientifique : [1, 1, 0].
- **Projet ECOFOR, Programme « Typologie des stations forestières » (2005-2007)**. « Estimation du potentiel stationnel en peuplement mélangé irrégulier. Effets combinés du milieu, de la compétition et de la sylviculture ». Responsable : P. Dreyfus. J'ai utilisé les données dendroécologiques récoltées dans ce projet pour analyser le déterminisme climatique de la croissance radiale de 5 espèces forestières en région PACA. Ce projet a été mené (sans financement particulier) en **2009-2010**. Collaborations : INRA Avignon-ONF-APT. Production scientifique : [1, 1, 0].

- **Projet Emergent – Région Lorraine et Thèse (2009-2013)** : « Influence des facteurs environnementaux sur la croissance et la formation du bois de trois espèces de conifères (Sapin, Epicéa et Pin sylvestre) dans le nord-est de la France ». Responsable : C. Rathgeber. Collaborations : INRA-APT. Montant : 88 000 euros. La thèse de Henri Cuny est en partie financée par ce projet. Ma participation dans ce projet consiste essentiellement au comité de pilotage de la thèse de H. Cuny. *Production scientifique* : [1, 0, 0].
- ® **Projet « Chênaie » (2009)** : « Dendroécologie du Chêne sessile dans la moitié Nord de la France ». Responsable : F. Lebourgeois. Collaborations : CEMAGREF-APT. *Production scientifique* : [1, 0, 0].
- ® **Projet « Châtaigneraie limousine » - CRPF-IDF (2009-2011)** : « Etude dendroclimatologique de la Châtaigneraie limousine ». Responsables : J.M. Righi, J. Lemaire et F. Lebourgeois. Collaborations : CRPF Limousin – IDF – APT. *Production scientifique* : [0, 1, 0].
- ® **Thèse de P. Mérian (2009-2012)** : « Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage ». Responsables : F. Lebourgeois et JC Gégout. Ce projet a été cofinancé par le Ministère de la Recherche et la région Lorraine (Bourse de thèse de 3 ans). *Production scientifique* : [4, 2, 0]. Montant : 100 k euros.
- ® **Projet ModelFor (2011), Thème 2 « Autécologie des essences et changement climatique », Action 2.1.** « Autécologie des essences ». Responsable : F. Lebourgeois. Montant : 5 000 euros. Collaborations : INRA-ONF-APT. *Production scientifique* : [0, 0, 1].
- ® **Projet RMT Aforce, Thème « Sylviculture » (2011-2012)** « Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ». Responsable : F. Lebourgeois. Montant : 10 000 euros. Collaborations : INRA-ONF-APT. *Production scientifique* : [2, 1, 1].
- **Projet « génétique des Chênes et réponse au climat »** (depuis 2011). Responsables : A. Ducouso et D. Bert. Collaborations : INRA Bordeaux-ONF-APT. Ce projet a pour objectifs de mettre en évidence des différences de réponse au climat (par une approche dendroécologique) des chênes sessiles selon leur région de provenance. Ce projet s'appuie sur un réseau national mis en place dans les années 1980 dont l'objectif est de comparer le potentiel de développement (phénologie, forme, croissance) de chênes sessiles provenant de toute l'Europe. J'interviens dans ce projet en appui à D. Bert (IR INRA-Bordeaux) pour l'analyse dendroclimatologique. **En 2014, un pré-projet ANR « H2Oak »** porté par Oliver Brendel de UMR Ecologie et Ecophysiologie Forestière de l'INRA - Centre de Nancy a été évalué positivement. La proposition finale est en cours de rédaction et sera évaluée dans les prochains mois.
- ® **Thèse de R. Trouvé (2011-2014)** : « Adaptation des itinéraires sylvicoles au changement climatique chez le Chêne sessile et le Douglas ». Responsables : F. Lebourgeois, C. Collet et I. Seynave. Collaborations : INRA-ONF-FCBA-IRSTEA-APT. Projet de thèse intégré dans les travaux menés par le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) « Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers » dirigé par I. Seynave. Montant : 120 k euros.
- Projets « Dendroécologie des essences forestières en Belgique ». Depuis 2012, des collaborations se sont mises en place avec :

- ❖ *l'Université catholique de Louvain* [Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale] avec Caroline Vincke et Tanguy Manise. Action 2.1.2b de l'accord cadre de recherche et de vulgarisation forestières 2009-2014 : « estimation du bilan hydrique et du risque de stress hydrique pour des peuplements d'avenir en région Wallonne ». Les espèces étudiées sont le Chêne sessile, le Hêtre, l'Épicéa et le Douglas. J'interviens sur les aspects analyses du signal climatique dans les séries chronologiques.
- ❖ *l'Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)* [Unité de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels, GRFMN] avec Hugues Claessens et Nicolas Latte. Le projet de recherche s'intitule « Etude dendroécologique du Hêtre en Wallonie ». Comme le précédent projet, j'interviens sur les analyses du signal climatique dans les séries chronologiques. (*voir aussi la thèse de Tanguy De Jaegere*). Des publications sont en cours.
- Projet MIX-ABIES “Mixed stand effect on Abies alba functioning under drought” financé par le LABEX Arbre, 2014-2015. Ce projet, porté par Damien BONAL de l'UMR 1137 « Écologie et Écophysologie Forestières », s'appuie sur les données récoltées pendant la thèse de Pinto (2006). L'objectif est d'étudier la réponse de la croissance et du fonctionnement hydrique et carboné du Sapin dans les Vosges à la compétition avec d'autres espèces (Hêtre et Épicéa commun) au cours de sécheresses extrêmes. Montant : 13 100 euros Ce projet fait écho au Projet RMT Aforce (2011-2012), Thème Sylviculture « Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ».
- ® ***Projet BARRCLIM, Effet de la Biodiversité forestière Arborée sur la stabilité, la Résilience et la Résistance des écosystèmes forestiers dans un contexte de changement CLIMatique - Analyse multi-échelle de la croissance radiale et de la mortalité.*** Projet d'une durée de 3 ans soumis dans le cadre de l'appel d'offre 2013 du Programme « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques » ; collaboration LERFOB, IGN-Laboratoire de l'Inventaire Forestier (LIF), IRSTEA). Responsables : F. Lebourgeois et P. Mérian. Montant : 100 000 euros.

2. Phénologie

Cette thématique représente le second axe de mes recherches. C'est au titre de mes travaux réalisés dans le cadre du réseau RENECOFOR que j'ai intégré en 2006 le Groupement de Recherches sur la phénologie (voir Partie « Administration de la Recherche »). Différents projets (non financés spécifiquement) font partie de cette thématique.

- Projet « Suivi et Indicateurs du Changement climatique en Forêt, SICFor ». Ce projet est porté par le GIP-ECOFOR et l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) et s'insère dans le cadre du premier plan national d'adaptation au changement climatique mis en place par la France en 2011. Il a débuté en mars 2013 et a pour objectifs de recenser et de fournir différents types d'indicateurs du changement climatique sur les écosystèmes forestiers.
- ® Projet « Déterminisme de la phénologie foliaire des espèces arborées forestières françaises » (depuis 2001). J'ai utilisé les données phénologiques récoltées dans le réseau depuis 1997 pour analyser le déterminisme climatique des principales essences forestières françaises. Les données étant encore récoltées actuellement, des analyses peuvent toujours être entreprises ce qui permet

le maintien à long terme de cet axe de recherche. Responsables du réseau RENECOFOR : M. Nicolas. Collaborations : ONF-APT. *Production scientifique* : [1, 7, 2].

- ⑧ Projet « Comparaison de la phénologie foliaire des chênes sessile et pédonculé : effet du climat et du sol » (depuis 2001). Ce projet s'appuie sur trois expérimentations mises en place dans les années 1970-1980 par des chercheurs de l'INRA-Nancy (G. Lévy et Y. Lefèvre). Il s'agit de plantations de chênes sessile et pédonculé sur sols hydromorphes en Lorraine dont l'objectif était de comparer la reprise et la croissance initiale des arbres selon le type d'assainissement (mécanique et biologique). J'ai repris la responsabilité de ces dispositifs au début des années 2000 en mettant en place un suivi régulier de la phénologie, de la croissance et des niveaux de nappe. Depuis 2012, un des trois dispositifs a été instrumenté de façon à mieux appréhender les conditions microclimatiques dans les peuplements (capteurs de rayonnement, température, pluviomètre). Responsable : F. Lebourgeois avec l'appui technique de S. Daviller et F. Spicher. Collaborations : ONF-APT. *Production scientifique* : [1, 3, 1].

3. Bioclimatologie forestière

Cette thématique regroupe les projets centrés sur la caractérisation des bilans en eau dans les écosystèmes forestiers et sur leurs effets (niches, croissance) sur les espèces (herbacées, arborées). Au sein de l'équipe, cette thématique est actuellement essentiellement portée par C. Piedallu (IR-Docteur).

- ⑧ **Projet ECOFOR, Programme « Typologie des stations forestières ». Conventions de recherche 2005.18 et 2005.19 (2005-2007).** « Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques ». Responsables : F. Lebourgeois et C. Cluzeau. Montant : 88 000 euros. Collaborations : INRA-Nancy, IFN, APT-ENGREF. *Production scientifique* : [0, 1, 1].
- **Projet RMT Aforce, Thème « Stations forestières » (2009-2011) Convention de recherche IDF-ECOFOR 2010.22.** « Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et guides de stations forestières ». Responsable : C. Piedallu. Montant : 20 000 euros. Collaborations : CRPF-ONF-APT. *Production scientifique* : [1, 0, 1].

4. Autécologie et niches des espèces forestières

- **ANR Oracle (2010-2014) : Opportunités et Risques pour les Agro-écosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatiqueE, socio-économique et politique en France (et en Europe).** Montant du projet : 1495 K euros. Durée : 2010-2014. Le projet est articulé autour de 4 axes et fait intervenir 9 partenaires (équipes INRA, CNRS, LSCE, LERFOB-APT). L'équipe Ecologie Forestière est insérée dans l'axe 2 et le porteur est J.D Bontemps. La tâche assignée est de développer les outils qui permettent de rendre le modèle de dynamique de la ressource forestière dépendant des facteurs environnementaux. Ma participation dans ce projet se traduit par des réunions de travail et des discussions sur les aspects variables environnementales à prendre en compte.
- **Projet TRAITAUT (2011-2012), ANR SOFORA (2013) et DESCIDE (2014).** Soutenu par le GIP ECOFOR et le Réseau Mixte Technologique AFORCE, le projet TRAITAUT (TRAITs fonctionnels et AUTécologie des essences) a été centré sur l'autécologie des essences forestières françaises dans un contexte de changement climatique. Les objectifs étaient 1) de clarifier les définitions et les contours de l'autécologie (synécologie, compétition, 2) de

constituer une nouvelle méthode quantitative et généralisable pour décrire l'autécologie des essences forestières et 3) de constituer une base de bibliographique partagée. Ce projet a fait intervenir 12 partenaires public et privés. Les porteurs étaient : M. Legay (ONF), G. Landmann (GIP ECOFOR), S. Gachet (IMBE, Paul Cézanne). La suite de ce projet a constitué en un dépôt de 2 projets ANR : SOFORA en 2013 (decision Support tOol **FOR** Adaptation of forests to global change, Budget env. 800 000 euros) et DESCIDE (From science to decision making and conversely for forest adaptation to climate change) en 2014. Dans ces deux propositions, j'intervenais en tant qu'expert sur les aspects autécologie des essences forestières et co-responsable d'un WorkPackage avec C. Piedallu (Niche et croissance des espèces forestières, 140 000 euros). In fine, aucune des deux propositions n'a été retenue.

5. Enracinements des arbres forestiers (thématique abandonnée)

Cette thématique a été largement développée suite aux deux tempêtes de décembre 1999, mais ne représente plus à l'heure actuelle un axe de mes travaux. Les deux projets avaient pour objectifs d'améliorer nos connaissances sur l'enracinement et l'autécologie des espèces forestières arborées et de relier ces observations à la stabilité des peuplements.

- ® **Projets ECOFOR n° 2000-42 et FORBOIS-1420A (2000 à 2002)** : « Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles ». Responsables : F. Lebourgeois et F. Colin. Montant du projet FORBOIS : 60 000 euros. Collaborations : INRA Nancy et ENGREF. *Production scientifique* : [0, 3, 5].
- ® **Projet Parc du Pourtales (2003)** : « Caractérisation de l'enracinement de différentes essences dans un contexte de parcs urbains. Effets sur la sensibilité au vent ». Coordinatrice : Claire Atger (Bureau Pousse Conseil, Montpellier). Montant : 10 000 euros. Collaborations : Bureau d'études, INRA, ENGREF. *Production scientifique* : [0, 0, 1].
- ® **Projet « régénération et tassement du sol » (2005)** : « Etude de l'effet du tassement du sol sur la croissance aérienne et racinaire de semis naturels de Hêtre et de Chêne sessile en Forêt Domaniale de Sainte-Hélène (Croix du Soldat) (Vosges) ». Responsables : F. Lebourgeois, B. Jabiol. Collaborations : ENGREF-INRA. *Production scientifique* : [0, 0, 0].

H. ENCADREMENTS DE MASTERS ET CODIRECTION DE THESE

Outre l'encadrement de stages d'élèves ingénieur et de BTS (voir Annexe 1), j'ai encadré 6 stages de Master et codirigé 2 thèses. J'ai participé au comité de pilotage de 5 thèses.

Encadrement de Master :

- GrandPierre P., 1999. Etude dendroécologique du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill.) dans les Vosges. Maîtrise en Biologie Forestière, Université de Nancy I, 25 pages.
- Humbert L., 2002. Analyse du comportement des chênes sessile et pédonculé sur station à hydromorphie temporaire. Effet de l'assainissement sur la distribution du système racinaire du chêne pédonculé. Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes, Université Henri-Poincaré, 25 pages.
- Godfroy P., 2004. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR. DEA de Biologie Forestière, Université Henri-Poincaré, 43 pages.
- Mérian P., 2008. Dendroécologie du Chêne sessile dans la moitié Nord de la France. Master FAGE II, Forêt, Agronomie, Génie de l'environnement. Option Agronomie, Forêt, écosystèmes, environnement, 46 pages.
- Aussenac R., 2011. Etude dendroclimatologique de la Châtaigneraie Limousine. Master I STV, Environnement et Gestion de la Biodiversité, Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), 51 pages.
- Gomez N., 2011. Etude spatio-temporelle de la sensibilité au climat du Chêne sessile, du Hêtre commun, de l'Epicéa commun et du Sapin pectiné dans le massif vosgien en peuplements purs et mélangés. Master FAGE II, Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement. Spécialité Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes, 49 pages.

Encadrement de Doctorat :

- Mérian P., 2012. Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage. Doctorat ParisTech, Thèse délivrée par l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Spécialité Sciences Forestières et du Bois, 456 pages + 6 articles. J'ai totalement encadré cette thèse (responsable administratif : Jean-Claude Gégout).
- Trouvé R., Adaptation des itinéraires sylvicoles au changement climatique chez le Chêne sessile et le Douglas. Thèse en cours (oct. 2011-oct. 2014). Je co-encadre cette thèse avec Catherine Collet (responsable officiel), Ingrid Seynave et Jean-Daniel Bontemps.

Participation à des comités de thèse :

- De Jaegere T., Potentiel de redéveloppement des essences rares dans le cadre de l'adaptation des forêts aux changements globaux par la modélisation autécologique appliquée au tilleul à petites feuilles. Financement : Université de Liège – Gembloux, AgroBioTech (début en 2013, pour 4 ans). Responsable : Hugues Claessens.
- Latte N., Dendroécologie du Hêtre en Wallonie. Financement : Université de Liège – Gembloux, AgroBioTech (début en 2012, pour 4 ans). Responsable : Hugues Claessens.
- Baudry O., Réactivité à l'ombrage de deux espèces ligneuses forestières (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus petraea* Liebl.). Effet de la taille, de l'importance du houppier et du statut social. *Thèse soutenue en 2012*. Université Catholique de Louvain. Responsable : Quentin Ponette.

- Cuny H., Dynamique intra-annuelle de la formation du bois des conifères dans le nord-est de la France. *Thèse soutenue en 2013*. Université de Lorraine. Responsable : Mériem Fournier ; Coresponsable : Cyrille Rathgeber.
- Nardin M., Ajustement biologique du mélèze aux variations environnementales le long d'un gradient altitudinal : approche microdensitométrique de la réponse au climat. *Thèse en cours depuis 2009*. INRA Orléans. Responsable : Philippe Rozenberg ; Coresponsable : Luc Pâques. *Thèse soutenue en 2013*.
- Piedallu C., Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique. Doctorat ParisTech, Thèse délivrée par l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Spécialité Sciences Forestières et du Bois, 281 pages. *Thèse soutenue en 2012*.

I. PARTICIPATION A DES JURYS

Depuis mon recrutement en tant qu'EC, j'ai participé à de nombreux jurys d'étudiants forestiers dans le cadre des soutenances de stages de deuxième et troisième années, de travaux bibliographiques.

En 2010 et 2011, j'ai également participé au Jury de Master FAGE, Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement. Spécialité Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes (une dizaine de candidats chaque année).

En 2012, j'ai été examinateur de la thèse de Mélanie Saulnier intitulé « Histoire et dynamique de la forêt subalpine dans les Alpes du Sud (Briançonnais, Queyras) : Approches pédoanthracologique et dendrochronologique ». Cette thèse de l'Université d'Aix-Marseille a été dirigée par Jean-Louis Edouard et Brigitte Talon.

En juin 2013, j'ai été examinateur de la thèse d'Olivier Baudry intitulé « Impacts de la refermeture du couvert forestier sur la régénération naturelle du chêne sessile et du hêtre commun ». cette thèse de l'Université Catholique de Louvain a été dirigée par Quentin Ponette.

Le 22 mai 2014, je participerai au Jury de Thèse à Bordeaux de Cécile Dantec intitulée « Diversité phénologique du Chêne : rôle des pressions de sélection liée au froid et à l'oïdium ». La thèse est co-encadrée par Marie-Laure Desprez-Loustau et Sylvain Delzon.

J. RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

J'expertise régulièrement des articles dans une dizaine de revues internationales, notamment Forest Ecology and Management, Trees, Annals of Forest Science Dendrochronologia, Global Change Biology, International Journal of Biometeorology, etc. Je relis également régulièrement des articles pour la Revue Forestière Française.

Je suis intervenu en tant qu'expert dans le cadre de différents projets :

- Évaluation scientifique et technique du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) (mai à juillet 2006).
- Évaluation pour le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, NSERC) (juin 2007, 1 projet).
- Évaluation pour le programme Blanc de l'Agence Nationale de la Recherche (février 2009, 1 projet).

- Évaluation pour le programme Établissement de nouveaux chercheurs universitaires du Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (décembre 2012, 1 projet).
- Évaluation scientifique et technique du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) (août 2013).

K. ACTIVITES D'ADMINISTRATION, DE VALORISATION ET DE TRANSFERT

1. Administration de la recherche

Au sein de notre UMR Lerfob :

- Responsable de l'organisation des séminaires internes de recherches entre 1999 et 2007.

- Responsable « Comité Scientifique Unité » de l'équipe Ecologie Forestière entre 2005 et 2009. Le CSU constituait une interface entre l'équipe technique « Installation Expérimentale Croissance » et les équipes de recherche. Actuellement, en collaboration avec Ingrid Seynave (IR INRA responsable de la Coopérative de Données), je coordonne les activités de l'équipe technique de notre équipe (2 permanents).

J'ai fait et je fais encore partie de différents comités de pilotage d'actions de recherche et de développement :

Actions terminées :

- Membre du Comité de pilotage du projet IFN SER (Sylvoécorégions) entre 2007 et 2010.
- Membre du comité de pilotage du projet CRPF région Centre sur « Le guide de reconnaissance et de gestion pour la région Centre : Valorisation des stations et des habitats forestiers » (J.B. Reboul et E. Sevrin). Dans ce projet, je suis particulièrement intervenu comme expert pour la dynamique des essences forestières selon les stations (2009-2011).
- Guide de sylviculture « Chênaies continentales » (rédacteur Thierry Sardin, 2008, ONF). Dans ce guide, je suis sur particulièrement intervenu sur les aspects dynamique et comportement écologique des chênes.

Actions en cours :

- Membre du comité scientifique ONF Alsace (CORST) depuis 2005.
- Membre du comité de pilotage du GDR 2968 (Système d'information phénologique pour la gestion et l'étude des changements climatiques) depuis 2006. Ce GDR sous la direction d'Isabelle Chuine (CEFE, UMR CNRS 5175, Montpellier). Depuis 2011, je fais également du bureau exécutif (répartition des budgets d'environ 30 000 euros) (<http://www.gdr2968.cnrs.fr/>).
- Membre du comité rédactionnel de la Revue Forestière Française depuis 2009 (<http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/4752>).
- Membre du groupe de travail 1 (GT1) « Diagnostic stationnel et choix des essences » mis en place en 2012 par le réseau mixte technologique (RMT) Aforce créée en 2008 (Adaptation des FORêts au Changement climatique) <http://www.gip-ecofor.org/?q=node/642>.
- Membre du Comité de pilotage du projet CRPF Lorraine-Alsace « guide d'identification des stations forestières et du choix des essences sur le plateau lorrain » depuis 2009 (A. Madesclaire).

2. Valorisation et Transfert

Mes actions de valorisation et de transfert s'articulent autour de différents pôles :

○ La publication de mes travaux de recherches dans les revues de transfert comme la Revue Forestière Française (en moyenne 1 article par an ; 19 articles publiés entre 1993 et 2012), les Rendez-Vous Techniques (8 articles) et Forêt-Entreprise (9 articles).

○ La réalisation, la maintenance et la mise à jour régulière d'un site internet qui contient différentes informations :

➔ Les différents documents liés à la production scientifique

➔ Les documents de cours

➔ Deux didacticiels :

■ 3 pages sur *la phénologie* présentant les principes d'observations phénologiques des arbres forestiers et des données sur les écosystèmes forestiers français. Concernant la phénologie, mes travaux effectués dans le cadre du réseau RENECOFOR sont intégrés dans l'outil de modélisation de bilan hydrique « Biljou » mis à disposition par l'INRA <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=forets&c=lai>

■ 5 pages sur *la dendrochronologie* présentant les principes et les méthodes de cette discipline scientifique à la base de mes principaux travaux de recherche. De nombreux liens avec des sites similaires nationaux et internationaux sont donnés.

L'adresse du site est : <http://www6.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Le-personnel/Fiches-profil/Scientifiques/LEBOURGEOIS-Francois>

○ J'interviens également dans deux formations permanentes de l'ONF et de l'INFOMA ce qui me permet de transférer de connaissances auprès des gestionnaires et des praticiens. Dans ces formations, j'interviens sur des aspects d'écologie des essences (principalement chênes sessile et pédonculé) et de bioclimatologie et d'écophysiologie (stratégies de régulation des pertes en eau des essences forestières et relation avec la gestion forestière).

○ Participation régulière avec Bernard Jabiol aux activités « Chercheurs en herbe » organisées par la sous-direction de la Culture Scientifique et Technique, direction de la Vie Universitaire et de la Culture, Université de Lorraine (responsable : Audrey Laurain). Animation d'une sortie en forêt destinée au grand public et ayant pour objectifs de faire comprendre comment s'organisent les différents compartiments d'un écosystème forestier.

○ Participation aux Sciences sur la place à Nancy (dans le cadre du Livre sur la place) (2012)

○ Participation aux Journées de la Science (mai 2011)

○ J'ai également participé à l'ouvrage collectif intitulé « Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés ». Coordinateurs : Y. Bastien et C. Gauberville, IDF 2011

○ Depuis décembre 2012 ; je participe au groupe de travail pour l'écriture d'un livre sur la phénologie des arbres et arbustes. La sortie de cet ouvrage de vulgarisation est prévue au printemps 2015 (Frédéric Jean, INRA Avignon ; Isabelle Chuine, CEFÉ-CNRS Montpellier ; Catherine Ducatillon, INRA ; Jennifer Carré, Tela-Botanica ; Fabrice Bonne, INRA Nancy, Alexis Ducouso, INRA Bordeaux).

Publications et communications

I. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

A. ARTICLES A COMITE DE LECTURE ET REFERENCES ISI

Soumis ou accepté (avril 2014)

LATTE, N., **LEBOURGEOIS F.**, LEJEUNE, Ph., CLAESSENS, H. *Increasing tree growth synchronization of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-western Europe in response to global change. Climatic Change (submitted).*

LEBOURGEOIS F., EBERLE P., MERIAN P., SEYNAVE, I. *Social status-mediated tree-ring responses to climate of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* shift in importance with increasing stand basal area. Forest Ecology and Management (accepted)*

1. **LEBOURGEOIS F.**, GOMEZ N., PINTO, P. MERIAN P. 2013. Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *Forest Ecology and Management*, 303, 9, 61-71
2. MÉRIAN P., **LEBOURGEOIS F.** 2013. Quantifying the risk of mis-estimating correlation significance of climate-tree growth relationships. *Trees Structure and Functions*, 27, 5, 1467-1476.
3. MÉRIAN P., BERT GD, **LEBOURGEOIS F.**, 2013. An approach for quantifying and correcting sample-size-related bias in population estimates of climate-tree growth relationships. *Forest Science*, 59, 4, 444-452.
4. PIEDALLU C., GEGOUT J.C., PEREZ V., **LEBOURGEOIS F.**, 2012. Soil water balance improves determination of the distribution patterns of hygrophilous and xerophilous tree species. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 470-482.
5. MÉRIAN P., PIERRAT JC, **LEBOURGEOIS F.**, 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia*, 31, 1, 58-67.
6. CUNY H., RATHGEBER C., **LEBOURGEOIS F.**, FORTIN M., FOURNIER M. 2012. Functional convergence in the wood formation of three conifer species presenting contrasting life strategies. *Tree Physiology*, 32, 612-625, DOI: 10.1093, 1-14.
7. **LEBOURGEOIS F.**, MERIAN P., COURDIER F., LADIER J., DREYFUS P., 2011. Instability of climate in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees*, 26, 3, 715-729.
8. MÉRIAN P., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Consequences of decreasing number of cored trees per plot on chronology statistics and climate-growth relationships: a multi-species analysis in a temperate climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 2413-2422.
9. MÉRIAN P., BERGÈS L., BONTEMPS JD., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Temporal instability in climate sensitivity of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl) under temperate conditions. *Plant Ecology*, 212, 11, 1855-1871.
10. MÉRIAN P., **LEBOURGEOIS F.** 2011. Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-species approach. *Forest Ecology and Management*, 261, 1382-1391.
11. **LEBOURGEOIS F.**, RATHGEBER C., ULRICH E. 2010. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*, 21, 2, 364-376.

12. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT J.C., PEREZ V., PIEDALLU C., CECCHINI S., ULRICH E. 2010. Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four driving GCMs. *International Journal of Biometeorology*, 54, 5, 563-581.
13. MORIN X., AMÉGLIO T., AHAS R., BESSON C., LANTA V., **LEBOURGEOIS F.**, MIGLIETTA F., CHUINE I., 2007, Variation of cold hardiness and carbohydrate content from dormancy induction to budburst among provenances of three European oak. *Tree Physiology*, 27, 817-825.
14. **LEBOURGEOIS F.**, 2007. Climatic signal in annual growth variation of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) and Spruce (*Picea abies* Karst) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Annals of Forest Science*, 64, 333-343.
15. **LEBOURGEOIS F.**, BRÉDA N., ULRICH E., GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19, 4, 385-401.
16. **LEBOURGEOIS F.**, COUSSEAU G., DUCOS Y., 2004. Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill stand in the Forest of Bercé (« Futaie des Clos », Sarthe, France). *Annals of Forest Science*, 61, 361-372.
17. **LEBOURGEOIS F.**, GRANIER A., BREDA N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. *Annals of Forest Science*, 58, 733-754.
18. **LEBOURGEOIS F.**, 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, 57, 2, 155-164.
19. **LEBOURGEOIS F.**, BECKER M., CHEVALIER R., DUPOUEY J.L., GILBERT J.M., 2000. Height and radial growth trends of Corsican pine in western France. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 712-724.
20. **LEBOURGEOIS F.**, LÉVY G., AUSSÉNAC G., CLERC B., WILLM F., 1998. Influence of soil drying on leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance and growth in two black pine varieties. *Annales des Sciences Forestières*, 55, 3, 287-299.
21. **LEBOURGEOIS F.**, LEVY G., BECKER M., LEFEVRE Y., 1997. Rôle de la nutrition minérale et de l'approvisionnement en eau sur la croissance du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. *Annales des Sciences Forestières*, 54, 3, 279-300.
22. **LEBOURGEOIS F.**, BECKER M., 1996. Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Evolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. *Annales des Sciences Forestières*, 53, 5, 931-946.

B. ARTICLES A COMITE DE LECTURE NON REFERENCEES ISI

1. MERIAN P., **LEBOURGEOIS F.** 2013. Le statut social d'un arbre influence-t-il sa réponse au climat ? Étude dendroécologique sur le Sapin, l'Epicéa, le Pin sylvestre, le Hêtre et le Chêne sessile. *Revue Forestière Française*, 65, 1 (sous presse).
2. **LEBOURGEOIS F.**, AUSSÉNAC R., LEMAIRE J., NEQUIER T., RIGHI J.M. 2012. Croissance de la Châtaigneraie limousine et climat. Réflexion sur la place du Châtaignier dans les prochaines décennies. *Revue Forestière Française*, 64, 6, (sous presse).
3. **LEBOURGEOIS F.**, MERIAN P., COURDIER F., LADIER J., DREYFUS P., 2012. Réponse au climat et à ses variations au cours du XX^{ième} siècle du Sapin pectiné, du Hêtre, des Pins noir, sylvestre et à crochets en contexte méditerranéen montagnard. *Revue Forestière Française*, 64, 2, 107-123.
4. **LEBOURGEOIS F.**, MERIAN P. 2011. La sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XX^{ième} siècle. *Revue Forestière Française*, 63, 1, 17-32.

5. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT JC., PEREZ V., PIEDALLU C., CECCHINI S., ULRICH E. 2010. Changement des dates de débourrement et de jaunissement des chênaies et des hêtraies françaises au cours du XXI^e siècle. *Revue Forestière Française*, 62, 6, 607-624.
6. **LEBOURGEOIS F.**, RATHGEBER C., ULRICH E. 2010. Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance de *Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. *Revue Forestière Française*, 62, 1, 7-23.
7. PIEDALLU C., PEREZ V., GEGOUT JC., **LEBOURGEOIS F.**, BERTRAND R. 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, 61, 6, 567-594.
8. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT J.C., PEREZ V., PIEDALLU C., CECCHINI S., ULRICH E., 2008. Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises. Etude sur les peuplements du RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 60, 3, 323-343.
9. **LEBOURGEOIS F.**, SPICKER F., LEFEVRE Y., 2008. Relations croissance et climat du chêne pédonculé sur deux types de sol à nappe temporaire en Lorraine (Rédoxisol acide et pèlosol différencié). *Revue Forestière Française*, 60, 4, 411-424.
10. LEFEVRE Y., **LEBOURGEOIS F.**, BREDAS, N. 2006. Comportement des essences sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 53, 4, 295-304.
11. **LEBOURGEOIS F.**, 2006. Sensibilité au climat des chênes sessile (*Q. petraea*) et pédonculé (*Q. robur*) dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 53, 1, 29-44.
12. **LEBOURGEOIS F.**, 2006. Réponse au climat du sapin (*Abies alba* Mill.) et de l'épicéa (*Picea abies* Karst) dans le réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 53, 6, 419-432.
13. **LEBOURGEOIS F.**, PIEDALLU C. 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française*, 57, 4, 331-356.
14. **LEBOURGEOIS F.**, 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue Forestière Française*, 57, 1, 33-50.
15. **LEBOURGEOIS F.**, COUSSAU G., DUCOS Y., 2003. Etude d'une chênaie sessiliflore exceptionnelle : la futaie des Clos (Sarthe- 72). *Revue Forestière Française*, 55, 4, 333-346.
16. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., 2002. Enracinements comparés des chênes (sessile et pédonculé) et du hêtre sur différents matériaux. *Réflexions sur l'autécologie des essences*. *Revue Forestière Française*, 54, 1, 17-42.
17. **LEBOURGEOIS F.**, DIFFERT J., GRANIER A., BREDAS N., ULRICH E., 2002. Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR). *Revue Forestière Française*, 54, 5, 407-418.
18. **LEBOURGEOIS F.**, 1999. Les chênes sessile et pédonculé (*Quercus petraea* Liebl. et *Quercus robur* L.) dans le réseau RENECOFOR : rythme de croissance radiale, anatomie du bois, de l'aubier et de l'écorce. *Revue Forestière Française*, 51, 4, 522-536.
19. **LEBOURGEOIS F.**, ULRICH E., PONCE R., 1998. Réactivité d'arbres âgés à l'ouverture du peuplement. Quelques exemples livrés par l'étude des placettes du réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 50, 2, 139-148.
20. **LEBOURGEOIS F.**, BECKER M., BONNEAU M., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. *Revue Forestière Française*, 45, 6, 639-650.

C. ARTICLES DANS LES REVUES SANS COMITE DE LECTURE

Soumis ou accepté (avril 2014)

LEBOURGEOIS F., GOMEZ N., PINTO, P. DAVILLER, S., SPICHER, F., MERIAN P. 2014. Le Sapin en peuplement mélangé est moins sensible à la sécheresse qu'en peuplement pur. Une étude dans le massif Vosgien. Forêt-Entreprise (sous presse)

1. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT J.C., PEREZ V., CECCHINI S., ULRICH E., 2011. Rallongement de la saison de végétation des Hêtraies et des Chênaies françaises dans les prochaines décennies. Conséquences possibles sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Rendez-Vous Techniques, n°33-34, été-automne, 39-46.
2. LANDMANN G., DUPOUEY J.L., BADEAU V., LEFEVRE Y., BREDA N., NAGELEISEN L.M., CHUINE I, **LEBOURGEOIS F.**, 2008. Le hêtre face aux changements climatiques. I. le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ? Forêt-Entreprise, n°180, 2008, 28-33.
3. LANDMANN G., DUPOUEY J.L., BADEAU V., LEFEVRE Y., BREDA N., NAGELEISEN L.M., CHUINE I, **LEBOURGEOIS F.**, 2008. Le hêtre face aux changements climatiques. II. Connaître les points faibles du hêtre pour les surmonter ? Forêt-Entreprise, n°182, 2008, 30-34.
4. **LEBOURGEOIS F.** 2008. Interprétation climatique et bioclimatique des variations interannuelles de croissance des arbres. Rendez-Vous Techniques, hors-série n°4, 115-119.
5. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT J.C., GODFROY P., CECCHINI S., LANIER M., ULRICH E. 2008. Relation entre les stades phénologiques et les variables climatiques. Rendez-Vous Techniques, hors-série n°4, 127-130.
6. LEGAY M., LANDMANN G., DHOTE J.F., **LEBOURGEOIS, F.** 2008. Synthèse des ateliers. Positionnement du réseau Renecofor vis-à-vis de quelques questions et approches émergentes : observation des changements globaux, bioindication et modélisation. Rendez-Vous Techniques, hors-série n°4, 151-153.
7. **LEBOURGEOIS F.** 2007. Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat : ce que nous ont appris les peuplements du RENECOFOR. Rendez-Vous Techniques, 15, 64-68.
8. LANDMANN G., DUPOUEY J.L., BADEAU V., LEFEVRE Y., BREDA N., NAGELEISEN L.M., CHUINE I, **LEBOURGEOIS F.**, 2007. Le hêtre face aux changements climatiques. Rendez-Vous Techniques, hors-série n°2, 2007, 29-38.
9. **LEBOURGEOIS F.**, CECCHINI S., CHUINE I., DIFFERT J., LANIER M., ULRICH E. 2006. Observations phénologiques des arbres forestiers : concepts, intérêts et problématiques actuelles. Rendez-Vous Techniques, n°13, 19-22.
10. **LEBOURGEOIS F.**, CECCHINI S., GODFROY P., LANIER M., PIERRAT, J.C., ULRICH E. 2006. Phénologie des peuplements du Renecofor : Variabilité entre espèces et dans l'espace, et déterminisme climatique. Rendez-Vous Techniques, n°13, 23-26.
11. **LEBOURGEOIS F.**, 2005. Augmentation de la productivité des forêts françaises: bilan actuel et conséquences prévisibles. Forêt-Entreprise, 162, dossier spécial « changements climatiques », 162, avril, 30-34.
12. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., ARCHEVEQUE G., BRUCIAMACCHIE M., DREXHAGE M., COLIN F., 2004. Ancrage et stabilité du chêne et du hêtre en Lorraine. Forêt-Entreprise, 156, 2, 28-33.
13. **LEBOURGEOIS F.**, GRANIER A., BREDA N., 2001. Variations climatiques en France : + 1,2°C depuis 40 ans.... Forêt-Entreprise, 139, 3, 53-57.
14. DREXHAGE M., **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., BRUCIAMACCHIE M., 2001. Tempête et racines. Forêt-Entreprise, 139, 3, 46-49.

15. **LEBOURGEOIS F.**, GRANIER A., BREDA N., 1999. Une nette tendance à l'augmentation des températures en France depuis les années 1950. Les Cahiers du DSF, 1-1999 (La santé des Forêts [France] en 1998). Min. Agri., Pêche (DERF), Paris, pp. 74-77.
16. **LEBOURGEOIS F.**, 1998. Pin laricio de Corse. Effet du climat sur la croissance radiale dans l'Ouest de la France. Forêt-Entreprise, n°124, 61-64.
17. **LEBOURGEOIS F.**, 1998. Influence d'une sécheresse prolongée sur le comportement des plants de pin laricio (Corse et Calabre). Forêt-Entreprise, n°121, 60-64.
18. **LEBOURGEOIS F.**, 1997. Le pin laricio dans la région Pays de la Loire : étude dendroécologique. Forêt-Entreprise, n°113, 55-59.

D. ACTES DE COLLOQUE

1. LAMBERT G., BERNARD V., DUPOUEY J.L., FRAITURE P., GASSMANN P., GIRARD CLOS O., **LEBOURGEOIS F.**, LEDIGOL Y., PERRAULT C., TEGEL W. 2010. Dendrochronologie et dendroclimatologie du chêne en France. Questions posées par le transfert de données de bois historiques vers la dendroclimatologie. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009, Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°11, 197-208.
2. MÉRIAN P., BERGÈS L., BONTEMPS J.D., **LEBOURGEOIS F.**, 2010. Déterminisme climatique des années de croissance extrême chez le chêne sessile dans la moitié Nord de la France. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009, Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°11, 37-44.
3. **LEBOURGEOIS F.**, RATHGEBER C., MERIAN P., ULRICH E. 2010. Sensibilité des écosystèmes forestiers tempérés français à la variabilité climatique et aux événements extrêmes. Exemple du réseau RENECOFOR. Actes du colloque "Panorama de la dendrochronologie en France". 8 au 10 Octobre 2009, Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°11, 19-26.
4. PICARD J.F., BECKER M., **LEBOURGEOIS F.**, 1994. Modifications de la flore et de l'humus induites par un apport de calcium dans différents écosystèmes forestiers du Nord-Est de la France. *Forêt et Amendements calcaires*. Edition INRA - CRF. 156 p., 61-73.

E. CHAPITRE D'OUVRAGES ET OUVRAGES

1. VILHAR U., BEUKER E., MIZUNUMA T., SKUDNIK M., **LEBOURGEOIS F.**, SOUDANI K., WILKINSON M. 2013. Measurement methods for above-ground vegetation: Tree Phenology. In "Forest Monitoring Scientific methods for the terrestrial monitoring of temperate and boreal forests". (eds) Marco Ferriti & Richard Fischer, Development in Environmental Science, 12, 169-182.
2. BASTIEN Y., GAUBERVILLE C. (coordinateurs) 2011. Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés. Ouvrage Collectif, Institut Développement Forestier, 608 pages.
3. **LEBOURGEOIS F.**, ULRICH E., 2010. Forest tree phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor, ICP Forest Network). In « Forests, Carbon Cycle and Climate Change » Eds Loustau Denis. Editions Quae. Collection Update Sciences and Technologies, March 2010, 158-171, 328 pages.
4. DANJON F., DRENOU C., DUPUY L., **LEBOURGEOIS F.**, 2009. Racines, sol et mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité (Chapitre 12). In « La forêt face aux tempêtes » Eds Birot Y., Landmann, G. Bonhême I. Editions Quae (Série Synthèses) 433 pages, 155-176.
5. BADEAU, V., BECKER, M., BERT, G.D., DUPOUEY, J.L., **LEBOURGEOIS, F.**, PICARD, J.F., 1996. Long term growth trends of trees : ten years of dendrochronological studies in France.

European Forest Institute Research Report No. 5. Growth trends in European Forests. Edited by H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl and J.P. Skovsgaard. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 372p, 167-181 [avec comité de lecture].

F. RAPPORTS SCIENTIFIQUES ET DOCUMENTS A DIFFUSION RESTREINTE

1. PIEDALLU, C., RICHARD J.B., PEREZ V., VILLIERS T., BONTEMPS J.D., JABIOL B., DAVILLER S., GEGOUT J.C., **LEBOURGEOIS F.**, RIOFRIO G., SEYNAVE I., SPICHER F., THIRION E., ULRICH E., NICOLAS M., 2014. Cartographie de l'évolution du stock d'eau disponible pour la végétation des sols forestiers lorrains dans un contexte de changement climatique. Rapport Scientifique final, Convention 2011-2014 région lorraine n° 2011-2810. Convention 2011-2014 DRAAF n° ETU-201-8, 55 pages
2. **LEBOURGEOIS F.**, EBERLE, P., GOMEZ, N., MERIAN P., SEYNAVE I. 2012. Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas. Une étude dendroécologique multi-espèces en contextes collinéen et montagnard. Rapport Scientifique Final, AFORCE, RMT Adaptation des forêts au changement climatique, LERFOB, AgroParisTech-Centre de Nancy, 106 pages.
3. **LEBOURGEOIS F.**, MERIAN P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie, LERFOB, AgroParisTech, Centre de Nancy, 85 pages.
4. PIEDALLU C., RICHARD JB., VILLIERS T., GAUDIN S., **LEBOURGEOIS F.**, LEGAY M., PEREZ V., DAVILLER S., THIRION E., RIOFRIO-DILLON G., NICOLAS M., KOCHERT T., CAZET M., CARNNOT-MILARD L., MADESCLAIRE A., HODAPP R., 2011. Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et guides des stations forestières. Rapport scientifique final, Convention de recherche 2010.22. GIP Ecofor, 60 pages.
5. ULRICH E., CECCHINI S., **LEBOURGEOIS F.**, BREDA N., DUPOUEY J.-L., NAGELEISEN L.-M., 2009 : RENECOFOR - Manuel de référence n° 12 pour les observations phénologiques, 2ème version, Editeur : Office National des Forêts, Direction Technique et Commerciale Bois, Département Recherche, 27 pages.
6. PIEDALLU C., **LEBOURGEOIS F.**, GEGOUT JC, SEYNAVE I, VEPIERRE R, CLUZEAU C., NEDELTCHEVA T., BRUNO E, BADEAU V., 2007. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. Rapport scientifique final, Conventions de recherche 2005.18 et 2005.19. GIP Ecofor, 85 pages + deux articles.
7. **LEBOURGEOIS F.**, PIEDALLU C., CLUZEAU C., NEDELTCHEVA T., BADEAU V., 2006. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. Rapport scientifique novembre 2006, Conventions de recherche 2005.18 et 2005.19. GIP Ecofor, 18 pages + annexes.
8. **LEBOURGEOIS F.**, GODFROY P., 2006. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Rapport Scientifique Final, UMR LERBOB, ENGREF, Septembre 2005, 43 pages.
9. **LEBOURGEOIS F.**, GODFROY P., HUMBERT L., BREDA N., LEFEVRE Y., 2004. Etude de l'effet de différents types d'assainissement sur la croissance aérienne et souterraine de chênes sessile et pédonculé adultes sur deux types de sol à nappe temporaire dans le plateau lorrain. Rapport Scientifique Final, UMR LERBOB, ENGREF, Septembre 2004, 74 pages + annexes.
10. **LEBOURGEOIS F.**, 2004. Note sur la croissance radiale de l'alisier torminal en FC du Mas d'Agenais – Rapport scientifique, janvier 2004, 6 pages.
11. JABIOL B., **LEBOURGEOIS F.**, 2003. Etude du déracinement des arbres, parc de Pourtalès, ville de Strasbourg ; étude pédologique. Strasbourg, Marché 2141V, Etude du risque de déracinement des arbres dans cinq parcs de la ville de Strasbourg. Rapport final, 28 pages.

12. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B. 2003. Observations des systèmes racinaires d'arbres chablis en FD de la Roberstau. Compte-Rendu de la tournée du 21 novembre 2003 (Projet "Racines Strasbourg") – Nancy – Novembre 2003, 12 pages.
13. **LEBOURGEOIS F.**, 2003. Observations phénologiques et croissance intra-annuelle des chênes sessile et pédonculé dans le dispositif de Charmes 2 (Vosges). Compte-Rendu de la saison 2003. Rapport scientifique interne EFDP – ENGREF – Nancy, Novembre, 50 pages.
14. **LEBOURGEOIS F.**, ARCHEVEQUE G., BRUCIAMACCHIE M., COLIN F., DREXHAGE M., JABIOL B. 2002. Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Rapport Scientifique Final, Projet FORBOIS 1420 A. –Nancy : ENGREF-LERFOB, juin 2002, 72 pages.
15. DREXHAGE M., BRUCIAMACCHIE M., **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., COLIN F., 2000. Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Application à l'évaluation de la stabilité et aux bilans carbonés. Projet ECOFOR n° 2000-42, Rapport Scientifique Intermédiaire, décembre 2000, 17 pages.
16. **LEBOURGEOIS F.**, 1999. Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans le RENECOFOR, Rapport scientifique final, Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, INRA –CEE – Unité d'Ecophysiologie Forestière, 72 pages.
17. **LEBOURGEOIS F.**, 1999. Normales climatiques des 68 stations de réseau météorologique national utilisées pour l'étude du bilan hydrique et de la croissance des peuplements du RENECOFOR. Analyse des dérives climatiques à moyen terme. Rapport scientifique final, Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, INRA –CEE – Unité d'Ecophysiologie Forestière.
18. **LEBOURGEOIS F.**, 1997. RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. Editeur : Office National de Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 075 - 5, 307 pages.
19. **LEBOURGEOIS F.**, 1996. Années caractéristiques. Synthèse de 21 études dendroécologiques. Document interne INRA – Unité d'Ecophysiologie Forestière (remis à jour en 1999).

G. ARTICLE DE PRESSE

« Phénologie Auprès de mon arbre », article paru dans Le Point, 17 mai 2007, n° 1809, page 30 sur la présentation des résultats sur la phénologie des arbres forestiers lors du colloque de Beaune sur les 15 ans du réseau RENECOFOR.

H. ARTICLES DIFFUSES GRATUITEMENT SUR INTERNET

Résumé d'une page publié dans la revue électronique gratuite « Forêt-Mail » réalisée et distribuée par asbl Forêt-Wallonne (info@foretwallonne.be).

- Climat et largeur de cerne chez l'épicéa. *Forêt-Mail*, n° 31, avril 2007, article 418.
- Croissance du chêne pédonculé sur sols à nappe temporaire. *Forêt-Mail*, n° 51, février 2009, article 675.
- L'effet des conditions extrêmes sur la croissance des résineux. *Forêt-Mail*, n°69, octobre 2010, article 906.

I. MEMOIRES DIPLOMANTS, THESES DE DOCTORAT

LEBOURGEOIS F., 1995. Etude dendroécologique et écophysiologique du pin laricio de Corse (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio* Poirlet var. *corsicana*) en région Pays de la Loire. *Thèse de l'Université de Paris-Sud Orsay en Sciences de la Vie*, 209 p + annexes

LEBOURGEOIS F., 1991. Modifications observées à la suite d'une fertilisation dans diverses sapinières dépérissantes des Vosges. Etude phytoécologique et dendrochronologique. Mémoire de

DEA en Ecologie Générale et Production Végétale., Université de Paris XI Orsay., 47 pages + annexes.

II. Participation à des colloques et séminaires

A. COLLOQUES NATIONAUX ET INTERNATIONAUX

A.1. Présentation

1. **LEBOURGEOIS F.**, Consommation en eau des arbres et stratégies de régulations des pertes hydriques. Colloque Forêts et Changements Climatiques. Quelles conséquences pour les forêts meusiennes et notre sylviculture. EPL-Agro, Bar-le-Duc, 15 novembre 2013.
2. **LEBOURGEOIS F.**, MERIAN P., GOMEZ N., PINTO P., EBERLE P., SEYNAVE I. 2012. Quelles essences favoriser dans les peuplements mélangés réguliers pour augmenter la résistance et la résilience des arbres au climat et à ses aléas ? Colloque de restitution des projets du réseau mixte technologique AFORCE, 12 décembre 2012, FCBA, Paris.
3. MANUEL N., **LEBOURGEOIS F.**, 2012. Monitoring tree phenology to predict climate change impacts. Analysing data from French level II network (RENECOFOR Network), ICP Forest scientific workshop, Warsaw 2012.
4. PIEDALLU C., **LEBOURGEOIS F.**, et al. 2012. Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et guides de stations forestières. Colloque de restitution des projets du réseau mixte technologique AFORCE, 12 décembre 2012, FCBA, Paris.
5. PIEDALLU C., GEGOUT J.C., BRUAND A., SEYNAVE S., **LEBOURGEOIS F.**, 2012. Spatialisation du bilan en eau des sols forestiers de France : Utilisation des données écologiques de l'inventaire forestier, Journée de la Recherche 2012, IGN, 9 mars 2012, Paris.
6. AUSSENAC R., LEMAIRE J., NÉQUIER T., RIGHI J.M., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Etude dendroclimatologique de la châtaigneraie limousine. Rencontres techniques internationales « Le châtaignier : des racines vers le futur » 25 et 26 mai 2011, Le Châlus, France.
7. LEMAIRE J., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Comparaison de deux modèles spatialisés de données météorologiques. Colloque sur « Les conséquences du changement climatique sur les chênaies en Midi-Pyrénées », 12 et 13 décembre 2011, Toulouse.
8. **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Réponse des écosystèmes forestiers aux changements climatiques. Les apports du réseau RENECOFOR. Journées d'information du réseau 30 et 31 mars 2011, Goersdorf – Alsace.
9. **LEBOURGEOIS F.**, CHUINE I., VENNETIER M. 2011. Impacts du changement climatique sur la phénologie des arbres forestiers et leurs conséquences sur leur survie et fonctionnement. Journée Scientifique « Les multiples facettes du changement climatique » organisée dans le cadre de la journée météorologique mondiale. Ecole Normale Supérieure, Paris, 23 mars 2011.
10. MERIAN P., BONTEMPS JD, BERGES L., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Temporal instability in climate sensitivity of sessile oak (*Quercus petraea*) under temperate conditions. International Meeting Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology (TRACE 2011), 11-14 May 2011, Orléans, France.
11. MÉRIAN P., GOMEZ N., BONTEMPS J.D., BERGÈS L., FRANCESCHINI T., SEYNAVE I., PINTO P., GÉGOUT J.C., LEBAN J.M., **LEBOURGEOIS F.**, 2011. Effect of stand composition on sensitivity to climate: A multi-species analysis, Eurodendro 2011, September 19-23, WSL, Suisse.
12. **LEBOURGEOIS F.**, 2010. Evolution récente de l'organisation de l'enseignement supérieur (et la recherche) forestier dans le cadre de la problématique des changements climatiques. Le cas d'AgroParisTech – Engref – Nancy. Atelier Réseau Mixte Technologique sur le rôle du RMT comme interface entre l'enseignement Technique et Supérieur forestier. 25 septembre 2010, Paris.

13. **PIEDALLU C., LEBOURGEOIS F., PEREZ V., et al.** 2010. Cartographie de la contrainte hydrique des sols forestiers et exemple d'utilisation dans le cadre des stations forestières (plateaux calcaires Nord-Est). Atelier du réseau « AFORCE » : Adaptation des forêts au changement climatique, Réseau Mixte Technologique, 29 septembre 2010, Paris.
14. **PIEDALLU C., LEBOURGEOIS F., PEREZ V., GÉGOUT J.C.** 2010. Méthodes analytiques d'analyse du milieu : indices cartographiques de bilan hydrique, Atelier du réseau « AFORCE » : Adaptation des forêts au changement climatique, Réseau Mixte Technologique, 9 mars 2010, Paris.
15. **BERNARD V., DUPOUEY J.L., FRAITURE P., GASSMANN P., GIRARDCLOS O., LAMBERT G., LEBOURGEOIS F., LEDIGOM Y., PERRAULT C., TEGEL W.** 2009. Dendrochronologie et dendroclimatologie du chêne en France. Questions posées par le transfert de données historiques vers la dendroclimatologie. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009, Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°11, 205-2016.
16. **LAMBERT G., BERNARD V., DUPOUEY J.L., FRAITURE P., GASSMANN P., GIRARDCLOS O., LEBOURGEOIS F., LEDIGOM Y., PERRAULT C., TEGEL W.** 2009. Dendrochronologie et dendroclimatologie du chêne en France. Questions posées par le transfert de données de bois historiques vers la dendroclimatologie. Actes du colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8 au 10 Octobre 2009, Collection EDYTEM, Cahiers de Géographie n°11, 197-208.
17. **LEBOURGEOIS F.,** 2009. Sensibilité des écosystèmes forestiers au climat : ce que nous ont appris les peuplements du réseau RENECOFOR. Colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8-10 Octobre 2009. Digne-les-Bains, France
18. **MÉRIAN P., LEBOURGEOIS F., BONTEMPS J.D., BERGÈS L.** 2009. Évolution spatiale et temporelle de la sensibilité du chêne sessile aux événements climatiques extrêmes en France. Colloque « Panorama de la dendrochronologie en France », 8-10 Octobre 2009. Digne-les-Bains, France.
19. **LEBOURGEOIS F.,** 2008. Déterminisme de la phénologie des forêts françaises. Exemple des peuplements du réseau Renecofor, 2-4 avril 2008, Journées d'Ecologie Fonctionnelle, La Grande-Motte, France.
20. **LEBOURGEOIS F., BADEAU V., DHOTE J.F.,** 2007. Animateurs de l'atelier « Modélisation ». Colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers : Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR », 9-11 mai 2007, Palais des Congrès de Beaune (Présentation + résumé)
21. **LEBOURGEOIS F.,** 2007. Interprétation climatique et bioclimatique des variations interannuelles de croissance des arbres. Colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers : Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR », 9-11 mai 2007, Palais des Congrès de Beaune.
22. **LEBOURGEOIS F., PIERRAT J.C., CECCHINI S.** 2007. Relations entre les stades phénologiques et les variables climatiques. Colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers : Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR », 9-11 mai 2007, Palais des Congrès de Beaune.
23. **LEBOURGEOIS F., PIEDALLU C., CLUZEAU C., NEDELTCHEVA T., BADEAU V.,** 2006. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. Colloque ECOFOR « Typologie des stations forestières : blocages et avancées ». 21 et 22 Novembre 2006 – Paris – MAP-DGFAR – GIP Ecofor – IFN.
24. **LEBOURGEOIS F.,** 2006. Sensibilité au climat des hêtraies et des chênaies du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Communication dans le cadre de la 15ième réunion du réseau CATANEAT, Anglet, Pyrénées-Atlantiques, 27-29 mars 2006.
25. **LEBOURGEOIS F., et al.** Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du Réseau National de Suivi à Long Terme des

- Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Communication dans le cadre de la 15^{ème} réunion du réseau CATANEAT, Anglet, Pyrénées-Atlantiques, 27-29 mars 2006.
26. LEFEVRE Y., **LEBOURGEOIS F.**, BRÉDA N. 2005. Comportement des essences sur sol à nappe temporaire. Journées Scientifiques et Techniques, 15 au 17 juin 2005, INRA Centre de Nancy.
 27. ATGER C., AVERSENQ P., BRUNET Y., CARAGLIO Y., CHAZELLE C., DUPONT S., FOURCAUD T., JABIOL B., **LEBOURGEOIS F.**, STOKES A., VOCORET M. Tempête et déracinement des arbres en parcs urbains : une étude de cas. Colloque « conséquences prévisibles et constatées du changement climatique sur les végétaux », Société Nationale d'Horticulture, 11 Mai 2005, Paris.
 28. CHUINE I., SÉGUIN B., **LEBOURGEOIS F.**, 2005. Un réseau d'Observations Phénologiques pour la gestion du changement climatique. De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt. Colloque organisé par le GIP ECOFOR. 2 et 3 février 2005. Paris, France
 29. BADEAU V., BRÉDA N., DUPOUEY J.L., PICARD J.F., **LEBOURGEOIS F.**, 2004. Tree radial growth response to climate: a synthetic study of pointer years in French forests. International Meeting "Impacts of the Drought and Heat in 2003 on Forests", 17-19 November 2004, Freiburg, Germany.
 30. BOCK, J. et al. Stabilité au vent des hêtraies, les enseignements de la tempête de 1999. Le hêtre, 20 ans après. Journées Scientifiques et Techniques, 17, 18 et 19 juin 2003, INRA Centre de Nancy.
 31. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur différents matériaux. Poster présenté aux 7^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, Orléans (France) 22-24 Octobre 2002.
 32. **LEBOURGEOIS F.**, 2002. Tendances climatiques en France (période 1956-1997) et phénologie des essences forestières (exemple du RENECOFOR). 11^{ème} réunion CATAENAT du Réseau Renecofor. 22-23 janvier 2002, Mont-Aigoual (Cévennes).
 33. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., BRUCIAMACCHIE M., ARCHEVÈQUE G., COLIN F., DREXHAGE M., 2002. Enracinement comparé du hêtre et des chênes dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Réflexion sur l'autécologie des essences et application à l'évaluation de la stabilité. Séminaire Forêt, Vent et Risques, ENGREF (Paris-France), 5-6 décembre 2002.
 34. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., BRUCIAMACCHIE M., COLIN F., DREXHAGE M., 2001. Analyse des systèmes racinaires d'essences feuillues et résineuses dans différentes situations sylvicoles et stationnelles. Réflexions sur l'autécologie des essences et application à l'évaluation de la stabilité des arbres Journée Thématique FORBOIS. Les recherches sur la forêt lorraine deux ans après la tempête. 13 décembre 2001, Faculté des Sciences de Nancy I.

A.2. Poster

1. CUNY H., RATHGEBER C., **LEBOURGEOIS F.**, FOURNIER M. 2010. Intra-Annual dynamics of cambial activity: comparison of three conifer species (Norway spruce, Scots pine and silver fir) in north-east France. World Dendro 2010 Meeting, Finland, June 2010.
2. MERIAN P., **LEBOURGEOIS F.**, GEGOUT J.C., 2010. Influence des changements climatiques sur la croissance radiale des principales essences forestières dans le Massif Vosgien. Journée des Doctorants, Ecole doctorale RP2E, janvier 2010, Nancy.
3. **LEBOURGEOIS F.**, CECCHINI S., 2007. Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR. Variabilité entre les espèces et entre les zones bioclimatiques. Colloque « 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers : Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR », 9-11 mai 2007, Palais des Congrès de Beaune.
4. **LEBOURGEOIS F.**, DIFFERT J., GRANIER A., BREDA N., ULRICH E., 2004. Premières observations phénologiques des peuplements de chêne et de hêtre dans le RENECOFOR (réseau

national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers). *Poster réalisée dans le cadre d'un module de la formation des élèves ingénieurs (Huet B, Mulot PE, Saint-Jean N).*

5. **LEBOURGEOIS F., JABIOL B.** 2002. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur différents matériaux. Poster présenté aux 7èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols, Orléans (France) 22-24 Octobre 2002.

A.3. Participation (sans présentation)

1. « Réunion annuelle CAQSI », 8-10 avril 2014, l'Université de Liège, Campus de Gembloux, Belgique.
2. « Connaissances et cartographie des forêts anciennes », Jeudi 1 décembre 2011, FCBA, Paris.
3. « La phytosociologie face aux défis de la connaissance et de la gestion durable des espaces naturels ». Colloque organisé par AgroParisTech – Engref, Campus ONF de Velaine-en-Haye, 12 au 14 novembre 2008.
4. « Reconstitution après tempête ». Colloque organisé par LERFOB, ONF, IDF, 5-6 mars 2008, ENGREF, Nancy.
5. « Face aux changements environnementaux, sociétaux, économiques, quelle gestion, quelle recherche pour la forêt de demain ? » Ecoforum organisé par le GIP ECOFOR, 5 et 6 décembre 2006, MEDD, Paris.
6. « Quels sols demain ? » Journée thématiques GIS Sol, AFES, 20 novembre 2006, MEDD, Paris.
7. « La forêt face aux changements climatiques – La sécheresse et la canicule 2003 – Pluies acides, 20 ans après ». Colloque organisé par le GIP ECOFOR. 13, 14 et 15 décembre 2005. Paris, France.
8. « De l'observation des écosystèmes forestiers à l'information sur la forêt ». Colloque organisé par le GIP ECOFOR. 2 et 3 février 2005. Paris, France (modérateur de la session du 3 février).
9. « Forêt, Archéologie et Environnement ». Nancy, 14-16 Décembre 2004, CNFF-Nancy (54), France.
10. « Biodiversité et Gestion Forestière ». Colloque organisé par le GIP ECOFOR. 2 et 3 décembre 2004. Paris, France.
11. « Forêts Hétérogènes ». Réunion finale du programme GIP ECOFOR. 22 au 24 juin 2004. ENGREF-Nancy (54), France (Comité d'organisation).
12. « Rencontre sur les Régénérations forestières ». Journées organisées par l'UMR Lerfob. 4 et 5 Novembre 2003. ENGREF-Nancy (54), France.
13. « Le hêtre, 20 ans après ». Journées Scientifiques et Techniques, 17, 18 et 19 juin 2003, INRA Centre de Nancy.
14. « 5^{ème} Journées d'Ecologie Fonctionnelle ». Nancy, 12-14 Mars 2003, CNFF-Nancy (54), France.
15. « 4^{ème} Rencontre Forestière – Ecologie, Economie ». Colloque organisé par l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts. 30 et 31 janvier 2003. ENGREF-Nancy (54), France.
16. « Forêts et eau ». Colloque organisé par la Société Hydrotechnique de France. 26 et 27 septembre 2001. Vandoeuvre les Nancy (54), France.
17. « Séminaire des 40 ans de l'Inventaire Forestier national ». Collecte et utilisation des données forestières. 13 et 14 avril 2000. Engref-Nancy.
18. « Journée Science du sol – pédologie ». Séminaire sur la lisibilité des sciences du sol en Lorraine. Centre INRA-Nancy, 3 février 2000.
19. « Sylviculture en futaie irrégulière ». Les typologies de peuplements. Table d'hôte organisée par l'ENGREF, 23-24 novembre 1999, Centre National de Formation Forestière. Velaine en Haye (54), France.
20. « Causes and Consequences of accelerating tree growth in Europe ». International Seminar. 17-19 May 1998, Nancy, France. IUFRO In cooperation with IUFRO Group 4.01.08. Effects of environmental changes on forest growth.

- 21.« Analyses des fonctionnements hydro-chimique et carboné des arbres et des écosystèmes forestiers ». Journées Scientifiques et Techniques, 17-18 juin 1997, INRA Centre de Nancy.
- 22.« Assessment of Ground Vegetation». International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. ICP/EU Expert Meeting, Nancy, France, 10-11 March 1997.
- 23.« Réunion annuelle des gestionnaires du réseau RENECOFOR ». Présentation des résultats de l'étude dendrochronologique des 102. 10, 14, 15, 17, 24, 25 Octobre et 6-7 Novembre 1996.
- 24.« Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois ». Journées Scientifiques et Techniques, 20-21 juin 1995, INRA Centre de Nancy.
- 25.« Méthodes et Référentiels en dendrochronologie ». Université de Franche-Comté (Besançon) 1995.
- 26.« Environmental constraints and oaks: Ecological and physiological aspects ». INRA - IUFRO - EUROSILVA. Centre National de Formation Forestière. Velaine en Haye (54), France. 1994.
- 27.« Les dépérissements d'arbres forestiers – causes connues et inconnues ». Journées Scientifiques et Techniques, 29-30 juin 1993, INRA Centre de Nancy.
- 28.« Réunion annuelle du Programme Ecophysiologie des arbres et des peuplements forestiers », 24 et 25 novembre 1993, Nancy.
- 29.« Protection des milieux naturels en Lorraine ». Conservatoire des Sites Lorrains. 1994.
- 30.« Réunion annuelle du Programme Ecophysiologie des arbres et des peuplements forestiers », 30 septembre au 2 octobre 1992, Angers.

B. SEMINAIRES INTERNES ET REUNIONS (PRESENTATION)

1. CHUINE I., VENNETIER M., **LEBOURGEOIS F.**, HENDRICK D., CHERET V., PARGADE J., 2013. Les indicateurs phénologiques ? Réunion finale du projet « Suivi et Indicateurs du changement climatique en forêt, SICFor ». Projet du GIP-ECOFOR, 14 novembre 2013, FCBA, Paris
2. **LEBOURGEOIS F.**, 2013. Quelques exemples d'indicateurs d'impact sur les écosystèmes forestiers ? Réunion de lancement du projet « Suivi et Indicateurs du changement climatique en forêt, SICFor ». Projet du GIP-ECOFOR, 25 mars 2013, FCBA, Paris
3. **LEBOURGEOIS F.**, PIERRAT J.C., PEREZ V. 2009. Prédiction de la phénologie des forêts tempérées françaises selon différents scénarios de changement climatique, Séminaire LERFOB, Nancy, INRA-Centre de Champenoux, 30 janvier 2009.
2. **LEBOURGEOIS F.**, 2008. Journée Réflexion sur l'Aménagement forestier au sein d'AgroParisTech- Aménagement forestier et autécologie des essences forestières, Journée organisée par l'ENGREF-Nancy, 24 juin 2008, AgroParisTech, Paris.
3. **LEBOURGEOIS F.**, 2008. Journée Changement Climatique « L'enseignement en écologie forestière dans le cadre des changements climatiques », Journée organisée par ENGREF-NANCY, 12 mars 2008, ENGREF-Nancy.
4. **LEBOURGEOIS F.**, 2006. Modèles écologiques et spatiaux de la croissance en diamètre des essences. Atelier LERFOB sur la variabilité spatiale de la croissance et de la distribution – 7 novembre 2006 – INRA – Champenoux.
5. **LEBOURGEOIS F.**, et al. 2005. Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du Réseau National de Suivi à Long Terme des Ecosystèmes Forestiers (RENECOFOR). Communication dans le cadre des séminaires de recherches LERFOB, 8 décembre 2005, ENGREF-Nancy.
6. **LEBOURGEOIS F.**, JABIOL B., 2001. « Après tempête... premières comparaisons de l'enracinement du chêne et du hêtre sur 5 stations de Nancy à Rambervillers. Réflexions sur l'autécologie des essences ». Communication dans le cadre des séminaires de recherches LERFOB, 23 novembre 2001, ENGREF-Nancy.

7. **LEBOURGEOIS F.**, 2000. Analyse des variations climatiques en France depuis 1950. Intérêt du bilan hydrique pour étudier l'intensité des stress en eau et la réponse des arbres au climat. Exposé dans le cadre des séminaires de recherches LERFOB, 6 janvier 2000, ENGREF-Nancy.

III. Documents d'enseignement et supports pédagogiques

A. FORMATION DES INGENIEURS AGROPARISTECH (APT) (DEPUIS LA RENTREE 2010-2011)

A.1. Première année

1. Michelin J., Jabiol B., **Lebourgeois F.**, Montagne D., Henry, JP, P. Jauzein, P., 2010. Analyse d'un paysage agricole et forestier. Tournée, UE « accueil et ouverture », AgroParisTech 1ère année, 11 pages
2. **Lebourgeois F.**, Ferry B, Voreux C., 2012. Le cerne du bois, marqueur de l'environnement. Travaux Dirigés, Séquence SVM, UE « Écosystèmes continentaux et cycles biogéochimiques », AgroParisTech 1ère année, 9 pages.
3. Roger-Estrade J., **Lebourgeois F.**, Jabiol B., Loyce C., 2010. Conduite des peuplements végétaux (Introduction). Cours magistral, Séquence SPT, UE « Conduite des peuplements végétaux dans différents milieux », AgroParisTech 1ère année, 47 pages.
4. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., Roger-Estrade J., Loyce C., 2010. Gestion de l'eau dans les agro-écosystèmes et adaptation à la sécheresse. Cours magistral, Séquence SPT, UE « Conduite des peuplements végétaux dans différents milieux », AgroParisTech 1ère année, 33 pages.
5. **Lebourgeois F.**, 2010. Effet des conditions écologiques et de la nature du couvert sur la contrainte hydrique. Travaux Dirigés, Séquence SPT, UE « Conduite des peuplements végétaux dans différents milieux », AgroParisTech 1ère année, 22 pages.
6. **Lebourgeois F.**, 2012. Clé de détermination simplifiée des stations forestières de la Côte et Arrière Côte Dijonaise (Côte d'Or) et choix des essences. Séquence Module Intégratif, UE « Diversité écologique des espaces naturels et forestiers», Projet Forêt d'exception Val-Suzon, AgroParisTech 1ère année, 5 pages.
7. **Lebourgeois F.**, 2012. Clé de détermination simplifiée des stations forestières pour les plateaux calcaires de l'ouest de la Bourgogne et choix des essences. Séquence Module Intégratif, UE « Diversité écologique des espaces naturels et forestiers», Projet Forêt d'exception Val-Suzon, AgroParisTech 1ère année, 5 pages.

A.2. Deuxième année – Nancy – Domaines 1 et 3

1. **Lebourgeois F.**, 2012. Comment reconnaître les arbres forestiers ? Méthodes d'observation. Travaux Dirigés, Socle Commun D1 et D3 Nancy, AgroParisTech 2ième année, 5 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2012. Clés de reconnaissance par les écorces et les feuilles des principales espèces forestières feuillues et résineuses françaises. Travaux Dirigés, Socle Commun D1 et D3 Nancy, AgroParisTech 2ième année, 28 pages.
3. **Lebourgeois F.**, 2012. Bioclimatologie à l'usage des forestiers et des écologues Cours magistral, Socle Commun D1 et D3 Nancy, UE « Diagnostics et potentialités des écosystèmes forestiers » (D1) et UE « Potentialités des écosystèmes et écologie des essences » (D3), AgroParisTech 2ième année, 31 pages.
4. **Lebourgeois F.**, 2012. Réponse des essences forestières aux facteurs du milieu. Cours magistral, Socle Commun D1 et D3 Nancy, UE « Diagnostics et potentialités des écosystèmes forestiers » (D1) et UE « Potentialités des écosystèmes et écologie des essences » (D3), AgroParisTech 2ième année, 56 pages.
5. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2012. Comportement des essences sur sols hydromorphes. Travaux Dirigés, Socle Commun D1 et D3 Nancy, UE « Diagnostics et potentialités des écosystèmes

- forestiers » (D1) et UE « Potentialités des écosystèmes et écologie des essences » (D3), AgroParisTech 2^{ème} année, 23 pages.
6. **Lebourgeois F.**, 2012. Clé de détermination des stations forestières des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne et choix des essences. Travaux Dirigés (Tournée Haute-Marne), Socle Commun D1 Nancy, UE « Écologie et gestion forestière», AgroParisTech 2^{ème} année, 5 pages.
 7. **Lebourgeois F.**, 2012. Conséquences des pollutions atmosphériques sur les écosystèmes forestiers. Cours magistral, Séquence socle commun D3 Nancy, UE « Bases scientifiques et techniques de l'ingénierie écologique, BSIE », AgroParisTech 2^{ème} année, 28 pages.

B. FORMATION DES INGENIEURS FORESTIERS (FIF) (AVANT 2010)

(Classement par date de réalisation)

1. **Lebourgeois F.**, 2000. Autécologie de quelques essences feuillues. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, avril 2000, 142 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2000. Autécologie de quelques essences résineuses. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, avril 2000, 131 pages.
3. **Lebourgeois F.**, 2001. Autécologie des essences. Partie I. Relations station-production et démarche autécologique. Partie II. Dendrochronologie. (Recueil d'articles). Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 2, février 2001, 102 pages.
4. **Lebourgeois F.**, 2002. Cours de bioclimatologie. Partie I. Les indices bioclimatiques. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 4, octobre 2002, 97 pages.
5. **Lebourgeois F.**, 2002. Cours de bioclimatologie. Partie II. Topoclimats. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 4, octobre 2002, 60 pages.
6. **Lebourgeois F.**, 2002. Cours de bioclimatologie. Partie III. Rôle du couvert forestier. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 4, octobre 2002, 86 pages.
7. **Lebourgeois F.**, 2002. Fonctionnement hydrique des arbres forestiers. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, novembre 2002, 42 pages + articles.
8. **Lebourgeois F.**, 2003. Système racinaire. Morphologie et réponses aux contraintes. Autécologie des essences sur sols à nappes temporaires. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 3, janvier 2003, 144 pages.
9. **Lebourgeois F.**, 2003. Conditions bioclimatiques en montagne et choix des essences en reboisement de haute altitude. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 2^{ème} année, Version 1, novembre 2003, 17 pages.
10. **Lebourgeois F.**, 2006. Critères de reconnaissance des principaux feuillus forestiers, version 1, octobre 2006, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, 25 pages.
11. **Lebourgeois F.**, 2006. Critères de reconnaissance des principaux résineux forestiers, version 1, octobre 2006, FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, 25 pages.
12. **Lebourgeois F.**, 2006. Critères de reconnaissance de 42 feuillus par les feuilles. FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, 57 pages.
13. **Lebourgeois F.**, 2006. Critères de reconnaissance de 24 feuillus par les écorces. FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, 36 pages.
14. **Lebourgeois F.**, 2006. Les bourgeons des principales essences forestières. FIF-ENGREF 1^{ère} année, version 1, 21 pages.
15. **Lebourgeois F.**, 2006. Aperçu du contexte écologique et de la dynamique de la végétation dans les Alpes. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 3^{ème} année, version 1, septembre 2006, 62 pages.
16. **Lebourgeois F.**, 2007. Aperçu du contexte écologique et de la dynamique de la végétation dans le bassin méditerranéen français. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 3^{ème} année, version 1, novembre 2007, 70 pages.

17. **Lebourgeois F.**, 2007. Autécologie des principales essences forestières françaises. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 1ère année, version 1, avril 2007, 182 pages.
18. **Lebourgeois F.**, 2007. Autécologie des essences dans le quart Nord-Est de la France. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 2ième année, version 1, oct. 2007, 30 pages.
19. **Lebourgeois F.**, 2007. Autécologie des essences en région Centre et Pays de Loire. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 2ième année, version 1, oct. 2007, 30 pages.
20. **Lebourgeois F.**, 2007. Autécologie des essences dans le Jura. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 2ième année, version 1, oct. 2007, 31 pages
21. **Lebourgeois F.**, 2007. Autécologie des essences dans le Morvan et le Massif Central. Formation des Ingénieurs Forestiers, FIF-ENGREF 2ième année, version 1, oct. 2007, 34 pages.

C. MODULE D'INITIATION FORET (GREF 1^{ERE} ANNEE) ET MASTERE FORET, NATURE ET SOCIETE

1. **Lebourgeois F.**, 2000. Éléments d'autécologie des essences forestières. Module d'Initiation Forêt – GREF, juin 2000, 13 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2004. Autécologie des essences. Relation station-production et démarche autécologique. Module d'Initiation Forêt – GREF, juin 2004, 31 pages.
3. **Lebourgeois F.**, 2005. Typologie des stations. Un outil pour les études autécologiques. Module d'Initiation Forêt – GREF, juin 2005, 8 pages.
4. **Lebourgeois F.**, 2006. Introduction à la bioclimatologie. VA Nature, Forêt, Société, janvier 2006, version 1, 36 pages.
5. **Lebourgeois F.**, 2006. Autécologie des essences. VA Nature, Forêt, Société, janvier 2006, version 1, 60 pages.
6. **Lebourgeois F.**, 2008. Autécologie du hêtre et des chênes (sessile et pédonculé). Comparaison de la dynamique en contexte calcaire et sur sols hydromorphes, juin 2008, 19 pages.

D. MASTER STVE

1. **Lebourgeois F.**, 2002. La dendrochronologie. DEA de Biologie Forestière, Université Henri Poincaré – Nancy I, version 2, novembre 2002, 26 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2005. Analyse des cernes. Partie I : Principes et méthodes de la dendrochronologie – Partie II : Notices d'utilisation des programmes inter, cofecha, arstan et ppphalos. Version 1, septembre 2005, 40 pages.
3. **Lebourgeois F.**, 2007. Standardisation et modélisation climatique. UE 50, Master FAGE, Version 1, 41 pages.
4. **Lebourgeois F.**, 2012. Introduction à la dendrochronologie, Standardisation et modélisation climatique. UE 50, Master STVE, Version 2, 51 pages.
5. **Lebourgeois F.**, Mérian, P. 2012. Principes et Méthodes de la dendrochronologie, 85 pages.

E. DOCUMENTS POUR LES FORMATIONS CONTINUES

1. **Lebourgeois F.**, 2001. Système racinaire – Morphologie et réponses aux contraintes. Formation Potentialités des Stations Forestières. Les Barres, 26-30 novembre 2001. Version 1, novembre 2001, 74 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2001. Fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres. Formation Potentialités des Stations Forestières. Les Barres, 26-30 novembre 2001. Version 1, novembre 2001, 25 pages.

3. **Lebourgeois F.**, 2008. Fonctionnement hydrique et hydraulique des arbres forestiers. Formation Office National des Forêts sur « les changements globaux et leurs conséquences sur les écosystèmes forestiers », 14 octobre 2008, Inra-Champenoux, 36 pages.
6. **Lebourgeois F.**, 2009. Introduction à l'autécologie des principales essences forestières françaises, Formation des techniciens du ministère de l'agriculture (INFOMA), 24 avril 2009, Infoma, Nancy, 39 pages.
7. **Lebourgeois F.**, 2011. Gestion de l'eau dans les écosystèmes forestiers et adaptation à la sécheresse, Formation des techniciens du ministère de l'agriculture (INFOMA), Octobre 2011 Infoma, Nancy, 39 pages.
8. **Lebourgeois F.**, 2012. Critères de reconnaissance des chênes sessile et pédonculé. Formation Office National des Forêts sur la reconnaissance des chênes, Inra-Champenoux, 33 pages (première version 2008).
9. **Lebourgeois F.**, 2012. Autécologie des chênes sessile et pédonculé. Formation Office National des Forêts sur la reconnaissance des chênes, Inra-Champenoux, 37 pages (première version 2008).

F. MINI-GUIDES FLORISTIQUES

1. **Lebourgeois F.**, 2000. Guide illustré pour la reconnaissance de 35 mousses et 17 fougères forestières. D'après la Flore Forestière Française, Maîtrise et Mastères en Science Forestière, septembre 2000, 10 pages.
2. **Lebourgeois F.**, 2000. Guide illustré pour la reconnaissance de quelques espèces méditerranéennes (FIF – 2ème année – projet d'aménagement de la forêt de Sorbollano – Corse du Sud, mai 2000, 14 pages).
3. **Lebourgeois F.**, 2000. Guide illustré pour la reconnaissance des principaux résineux forestiers (d'après la Flore Forestière Française et les Résineux Tome 1 connaissance et reconnaissance (IDF), FIF-1ère année, septembre 2000, 15 pages).
4. **Lebourgeois F.**, 2002. Guide illustré pour la reconnaissance de quelques espèces méditerranéennes (FIF – 2ème année – projet d'aménagement de la forêt de Sougraigne – Aude, mai 2002, 7 pages).
5. **Lebourgeois F.**, 2003. Guide illustré pour la reconnaissance de quelques espèces méditerranéennes (FIF – 2ème année – projet d'aménagement de la forêt Territoriale de Sant'Antone – Corse du Sud , mai 2003, 15 pages).

G. MINI-POSTERS (A3)

1. **Lebourgeois F.**, 2003. Critères de reconnaissance des chênes sessile et pédonculé.
2. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2003. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur redoxisol albique à hydromoder (Forêt domaniale de Vitrimont).
3. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2003. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur brunisol mésosaturé de limon sur marne.
4. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2003. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur néoluvisol fragique de limon.
5. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2003. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur néoluvisol issu de limons et argile de décarbonatation.
6. **Lebourgeois F.**, Jabiol B., 2003. Enracinements comparés du chêne et du hêtre sur calcisols de calcaire récifal.
7. **Lebourgeois F.**, Lefèvre Y., 2003. Effet du drainage, du désherbage et de la fertilisation sur la croissance radiale et la régénération de chênes pédonculé et sessile (Forêt Domaniale de Mondon). Poster 1.

8. **Lebourgeois F.**, Lefèvre Y., 2003. Effet du drainage, du désherbage et de la fertilisation sur la croissance radiale et la régénération de chênes pédonculé et sessile (Forêt Domaniale de Mondon). Poster 2.
9. **Lebourgeois F.**, 2004. Les écosystèmes forestiers de la Forêt Territoriale de Sant'Atone (Corse du Sud).

H. CREATIONS INFORMATIQUES ET AUDIO-VISUELLES

1. **Lebourgeois F.**, 2000. Tournée région méditerranéenne et montagne (Pyrénées orientales - Ariège - Aude), 18 au 27 Octobre 2000, ENGREF-FIF2 (diaporama Powerpoint).
2. **Lebourgeois F.**, 2001. Tournée région méditerranéenne et montagne (Haute-Savoie et Vaucluse), 17 au 26 Octobre 2001, ENGREF-FIF2 (diaporama Powerpoint).
3. **Lebourgeois F.**, 2001. Restitution du Module d 'Initiation Forêt (Doubs) (Première année des Ingénieur du GREF). 9 au 13 juillet 2001 (Diaporama Powerpoint).
4. **Lebourgeois F.**, 2002. Tournée région méditerranéenne et montagne (Pyrénées), 16 au 25 Octobre 2002, ENGREF-FIF2 (diaporama MediaShow).
5. **Lebourgeois F.**, 2003. Tournée région méditerranéenne et montagne (Hautes-Alpes et Alpes de Haute Provence), 15 au 24 Octobre 2003, ENGREF-FIF2 (diaporama MediaShow).
6. **Lebourgeois F.**, 2003. Tournée Aménagement (Ain), 28 au 30 Avril 2003.
7. **Lebourgeois F.**, 2005. Projet Phytoécologie (Quyeras), 16 au 20 mai 2005.
8. **Lebourgeois F.**, 2005. Tournée région méditerranéenne et montagne (Var, Alpes de Haute Provence, Isère), 12 au 21 Octobre 2005, ENGREF-FIF2 (diaporama MediaShow).

Annexe 1 : Organigramme du LERFOB

Les équipes				
<input type="checkbox"/> Ecologie Forestière <input type="checkbox"/> Croissance, Production, Qualité des Bois <input type="checkbox"/> Sylviculture et Reboisement <input type="checkbox"/> Mission Gestion de la Végétation en Forêt <input type="checkbox"/> Installation Expérimentale Croissance <input type="checkbox"/> Cellule technique GIS Coopérative <input type="checkbox"/> Plateforme Xylosciences				
<h2>Organisation du LERFoB</h2> <p>Janvier 2014</p>				
Fonctions transversales				
Directrice	Meriem Fournier (IC PEF)			
Directeur Adjoint	François Ningre (IR2)			
Gestion	Hélène Hurpeau (TREX), Nathalie Morel (TRN), Sophie Barthélémy (TRN), Virginie Friley (TR contractuelle)			
Communication	Corinne Martin (SA)			
Informatique	Christian Herbé (TRN)			
Équipes	Ecologie forestière	Croissance, Production, Qualité des Bois	Sylviculture et Reboisement	Mission Gestion de la Végétation en Forêt
Type	Recherche	Recherche	Enseignement et Expertise	Recherche et Développement
Acronyme	EF	CPQB	SR	MGVF
Chercheurs et Enseignants- Chercheurs	Jean-Claude Gégout (PR) Bruno Ferry (MC) Bernard Jabiol (MC) François Lebourgeois (MC) Linde Van Couwenbergh (MC)	Ignacio Barbeito (CR2) Francis Colin (CR1) Catherine Collet (CR1) Thierry Constant (CR1) Jana Dlouha (CR2) Fleur Longuetaud (CR1) Frédéric Mothe (CR1) Cyrille Rathgeber (CR1) Holger Wernsdörfer (MC) Noël Le Goff (mission) Gérard Nepveu (mission) Jean-Marc Ottorini (mission)	Holger Wernsdörfer (MC)	Catherine Collet (CR1)
Ingénieurs	Jean-Daniel Bontemps (IPEF) Marie-Reine Fleisch (IAE) Christian Piedallu (IR2) Jean-Claude Pierrat (IR1)	Meriem Fournier (IC PEF) Mathieu Fortin (IR) Philippe Jacquin (IE) François Ningre (IR2)	Philippe Durand (IDAE) Yves Ehrhart (IDAE) Mathieu Fortin (IR) Eric Lacombe (IDAE)	
Assistants Ingénieurs et Techniciens	Sylvie Lehmann (AI) Vincent Perez (TRN) Fabien Spicher (TRN)	Michel Pitsch (TREX)		Responsable adjoint : Léon Wehrlien (AI)
Doctorants	Raphaël Trouvé Emilien Kuhn Annabelle Sueur	Nicolas Bilot Vivien Bonnesoeur Julie Bossu Félix Hartmann Zineb Kebbi Benkeder Estelle Noyer Masoumeh Saderi Jialin Song		
Contractuels (longue durée)	Mathilde Duverger (TR) Ian David Ondo (IR) Paulina Pinto (poste d'interface) David Thiébaud (TR)	Marin Chaumet (IE Apprenti) Henry Cuny (Post-Doc) Ruben Manso Post-Doc) Minna Pulkkinen (Post-Doc)		Mathieu Dassot (IR) Fabien Duez (IE) Ervin Thirion (AI)
Équipes	Installation Expérimentale Croissance	Cellule Technique Coopérative Modélisation	Plateforme Xylosciences	
Acronyme	IEC	CT-Coop		
Chercheurs et Enseignants- Chercheurs				
Ingénieurs		Ingrid Seynave (IR2)	Julien Ruelle (IR) Philippe Jacquin (IE)	
Assistants Ingénieurs et Techniciens	Daniel Rittié (AI) Frédéric Bordat (ATP2) Loïc Dailly (AT) Guy Maréchal (TRN) Florian Vast (TRN)	Responsable adjoint : Sébastien Daviller (TRN)	Responsable adjoint : Etienne Farré (AI) Emmanuel Cornu (ATP2) Charline Freyburger (TRN) Pierre Gelhaye (TREX) Maryline Harroué (TRSUP) Alain Mercanti (TRN)	
Contractuels (longue durée)				
NB : en gras = responsable de l'équipe				

Annexe 2 : Liste des encadrements

2013

- **Ricodeau N.**, Appui aux communes sur leurs attentes en matière de gestion des forêts. Le cas du pin d'alep dans les Bouches du Rhône. Stage 3^{ème} année, AgroParisTech. Mars à septembre 2013. (Correspond APT – Maitre de stage ONF).
- **Blais S.**, Indentification des Forêts à Haute Valeur Environnementale du Parc Naturel Régional du Pilat. Elaboration d'un plan d'échantillonnage. Stage 3^{ème} année, AgroParisTech. Mars à août 2013. (Correspond APT – Maitre de stage ONF).
- **Denardou-Tisserand A.**, Analyses des facteurs climatiques influençant la mortalité des arbres forestiers dans les Alpes Françaises. Stage 2^{ème} année, AgroParisTech. Juin à août 2013. (Correspond APT)
- **Duc Anne-Pernelle.**, Stage 2^{ème} année, AgroParisTech. Juin à août 2013. (Correspond APT)
- première année
- **Référent** pour la CEI pour l'année scolaire 2012-2013 :
 - ⇒ **Chevillotte J.**
 - ⇒ **De Guisa M.**
 - ⇒ **Gauthier P.**
 - ⇒ **Delannoy J.**

2012

- **Ribereau-Gayon A.**, Etude des enjeux eau, forêt et biodiversité sur les espaces naturels sensibles Lagune du Gat Mort, Landes du rech et domaine d'Hostens (33). Correspondant APT, Stage court 2A.
- **Prieur-Bley M.**, Inventaire de la ressource Forestière dans la montagne Bourbonnaise (Allier). Correspondant APT, Stage court 2A.
- **Carosco Y.**, Ecologie de l'alimentation des goélands nicheurs dans la mer des Wadden allemande, Correspondant APT, Stage court 2A à l'étranger.
- **Chevillotte J.**, Participation au projet "Tick control". Suivi des populations de tiques (*Ixode ricinus*) sur les lagopèdes d'Écosse (*lagopus lagopus scoticus*) en vue de comprendre et diminuer leur impact sur les populations de volatiles. Suivi parallèle des populations de tiques véhiculées par les hôtes que sont les mammifères (ongulés, lièvres, ovins). Game and Wildlife Conservation Trust, Hampshire, Royaume-Uni. Correspondant APT, Stage court 2A à l'étranger.
- **Gouin V.**, Étude des effets de différentes fluctuations environnementales sur le cycle sexuel et la répartition entre les cycles sexuels et végétatifs pour des essences forestières finlandaises. METLA, Finnish Forest Research Institute, Vantaa, Finlande, Correspondant APT, Stage court 2A à l'étranger.
- **De Guisa M.**, Etude de la possibilité de mise en place d'un système pastoral dans certaines zones boisées. CRPF Rhône-Alpes, Correspondant APT, Stage court 2A.
- **Lebecque M.**, Caractériser la fréquentation du site du Col de Porte/Charmant. ONF Grenoble, Correspondant APT, Stage court 2A.
- **Chaigne T.**, Étude des territoires de chasse des Barbastelles d'Europe (*Barbastella barbastellus*) en forêt domaniale de l'Aigoual et prise en considération de sa conservation dans la gestion forestière du site. Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2012. (Correspond APT – Maitre de stage ONF, Olivier Vinet).
- **Rebel C.**, Construction d'un système d'évaluation de la gestion d'un espace naturel. Application au cas de la réserve naturelle régionale – Forêt d'Exception du Val Suzon dans le cadre d'une

démarche participative. Stage 3^{ème} année, AgroParisTech. Janvier à juillet 2012. 76 pages. Co-encadrement avec Lacombe Eric, Maitre de stage ONF, Rogier Leysen.

- **Eberlé P.**, Effet du statut social des arbres sur la réponse du Hêtre et du Sapin au climat et à ses aléas, en peuplements mélangés dans le contexte du massif Vosgien ». MASTER II FAGE Biologie et Écologie pour la Forêt, l’Agronomie et l’Environnement. Spécialité : Fonctionnement et Gestion des écosystèmes, 40 pages. •

2011

- **Aussenac R.**, Etude dendroclimatologique de la Châtaigneraie Limousine. Stage Master 1 de l’Ecole Pratique des Hautes Etudes (EPHE), 51 pages.
- **Gomez N.**, Etude spatio-temporelle de la sensibilité au climat du Chêne sessile, du Hêtre commun, de l’Epicéa commun et du Sapin pectiné dans le massif vosgien en peuplements purs et mélangés. MASTER II FAGE Biologie et Écologie pour la Forêt, l’Agronomie et l’Environnement. Spécialité : Fonctionnement et Gestion des écosystèmes, 32 pages. • **Amodei T.**, Relations croissance radiale-climat chez le pin de Salzmann (*Pinus nigra Salzmanni*) dans le sud de la France. Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2011 (Correspond APT – Maitre de Stages, Frédéric Guibal et Bruno Fady).
- **Pierangelo A.**, Impact comparatif des accidents climatiques sur la croissance du Hêtre et du Sapin dans le Bugey selon les stations forestières Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2011 (Correspond APT – Maitre de stage ONF, Christian Demolis).
- **De Bois-Geslin G.**, Diversification des peuplements de pin d’Alep par installation de feuillus : caractérisation des interactions biotiques et abiotiques. Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2011 (Correspond APT – Maitre de stage Cemagref, Bernard Prévosto).
- **Foch T.**, PN Pyrénées, Diagnostic de la présence et de la dynamique des essences forestières non autochtones et détermination des orientations de gestion du PNP. Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2011. (Correspond APT – Maitre de stage ONF, Mélina Roth).
- **Villiers T.**, Elaboration des DRA/SRA (Directive Régionale Aménagement/schéma régional d’Aménagement) des forêts publiques des plaines et collines du sud-ouest. Stage 3^{ème} année – AgroParisTech – Engref. Janvier à juillet 2011. (Correspond APT – Maitre de stage ONF, Jacques Mirault).
- **Lenne C.**, Correspondant APT - Année Optionnelle (2011-2012), University of Northern British Columbia, Canada
- **Delannoy J.**, Correspondant APT - Année Optionnelle (2011-2012), International Birding and Research Center Eilat, Israël
- **Ricodeau N.**, Correspondant APT - Année Optionnelle (2011-2012), Faculté de Foresterie, Géomatique et de géographie, Canada

2010

- **Guy L.**, Protection et gestion des populations de grands tétras et tétras lyre. Correspondant APT, Année optionnelle au sein de « The game and wildlife conservation trust » (Organisme accueil).

2009

- **Martin H.**, Déterminisme écologique de la fructification des hêtraies et des chênaies dans le réseau RENECOFOR. Participation à l’encadrement (2007-2009) du Certificat de Recherche de l’EPHE

- **Girard Q.**, Impact des événements climatiques extrêmes sur les forêts : analyses des conséquences de la sécheresse 2003 sur la croissance des arbres à partir des données de l'IFN (Correspondant ENGREF).
- **Beucher A.**, Etude des potentialités du robinier dans le quart Nord-Est de la France (Correspondant ENGREF).
- **Rodrigues A.**, Chêne pédonculé et changement climatique : conséquences pour la gestion actuelle en Lorraine. Stage troisième année FIF, co-encadrement Lerfob-ONF (maître de stage Eric Lacombe).
- **Banchi, M.** (Correspondant ENGREF).
- **Reboul J.B.**, Synthèse des catalogues de stations forestières en région Centre : mise en place d'une méthodologie à partir des habitats pour réaliser un guide simplifié de choix des essences 74 pages + annexes (Correspondant ENGREF).
- **Cavalheri E.K.**, Modélisation à haute résolution spatiale et temporelle du climat en France métropolitaine. Stage troisième année FIF, encadrement : C. Piedallu et F. Lebourgeois.
- Recherche bibliographique (FIF2) de septembre 2008 à janvier 2009 (12 étudiants) :
 - ⇒ Dis moi combien tu transpires et je te dirai qui tu es ?
 - ⇒ Effet de la gestion sylvicole sur l'économie de la ressource en eau
 - ⇒ Effet de la gestion sylvicole sur la diversité génétique des peuplements forestiers

2008

- **Mérian P.**, Dendroécologie du chêne sessile dans la moitié Nord de la France. Master II, Forêt, Agronomie, Génie de l'environnement. Option Agronomie, Forêt, écosystèmes, environnement, 46 pages.
- **Benezec L.**, (janvier à septembre 2008) (Correspondant ENGREF).
- **Salgue D.**, Evaluation du risque d'introduction du cèdre de l'Atlas dans les Monts de Lacaune et la Montagne Noire (janvier à septembre 2008) (Correspondant ENGREF).
- Recherche bibliographique (FIF2) de novembre 2007 à mars 2008 (8 étudiants)
 - ⇒ Synthèse sur les connaissances de la sensibilité au climat des pins obtenus par des approches dendroécologiques ;
 - ⇒ Synthèse sur l'autécologie des essences secondaires. Sensibilité à la sécheresse.

2007

- **Cabaret J.P.**, Site Natura 2000 des Monts du Forez FR 8301030 : Elaboration de nouvelles propositions d'action dans le cadre de la révision du document d'objectifs (Correspondant ENGREF – Stage fin d'étude VAMS).
- **Spicher F.**, Etude de la croissance des Chênes sessile et pédonculé sur sols à nappe temporaire. BTS Gestion Forestière, Mesnières-en-Bray, 30 pages

2006

- **Laborde E.**, Elaboration du document d'objectifs sur le massif de la Rhune et de Choldocogagna (Natura 2000). Gestion du Massif, janvier à septembre 2006 (Correspondant ENGREF).
- **Housset J.**, Préparation du plan de gestion concertée de la Réserve Biologique du Bois des Ayes, Hautes-Alpes, janvier à septembre 2006 (Correspondant ENGREF).
- **Cousseau G.**, Quels sont les effets des éclaircies sur le risque de roulure du Châtaignier, janvier à septembre 2006 (Correspondant ENGREF).
- **Lombrosini S.**, Analyse des potentialités et des facteurs de qualité des feuillus précieux en Champagne-Ardenne, janvier à septembre 2006 (Correspondant ENGREF).
- **Noémie G.**, Analyse de l'effet de la sécheresse de 2003 sur la croissance des Hêtres et des Epicéas dans le réseau renecofor, Stage de 2 mois en collaboration avec le WSL.

2005

- **Godfroy P.**, Analyse de la variabilité spatiale et temporelle et du déterminisme climatique de la phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR. DEA de Biologie Forestière, Université Henri-Poincaré, 43 pages.
- **Di-Cintio F.**, Etude de l'effet du tassement du sol sur la croissance aérienne et racinaire de semis naturels de Hêtre et de Chêne en Forêt Domaniale de Sainte-Hélène (Croix du Soldat) (Vosges). Stage de BTS Production Forestière, 2005-2006, 30 pages.

2004

- **Godfroy P.**, Analyse du comportement des chênes sessile et pédonculé sur station à hydromorphie temporaire. Effet de l'assainissement sur la distribution du système racinaire du Chêne pédonculé. Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes, janvier-août 2004.

2002

- **Humbert L.**, Analyse du comportement des chênes sessile et pédonculé sur station à hydromorphie temporaire. Effet de l'assainissement sur la distribution du système racinaire du chêne pédonculé. Maîtrise de Biologie des Populations et des Ecosystèmes, janvier-juillet 2002, 30 pages.
- **Grégoire G.**, Analyse de la régénération du Pin d'Alep après incendie. Stage de 3^{ème} année de la Formation des Ingénieurs Forestiers, janvier à septembre 2002.

2001

- **Differt J.**, Phénologie des arbres forestiers et Climat. Analyse bibliographique. Stage post-Maîtrise – Novembre 2000 à Mai 2001, 224 pages.
- **Cousseau G.**, Etude dendroécologique de la futaie des Clos. Stage de BTS Production Forestière, novembre 2001, 30 pages
- **Archevêque G.**, Effet du milieu et de la sylviculture sur le système racinaire du hêtre et du chêne. Stage court Option MQGF – 3^{ème} année FIF, novembre-décembre 2001

1999

- **GrandPierre P.**, Etude dendroécologique du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill.) dans les Vosges. Maîtrise en Biologie Forestière, Université de Nancy I.

Références citées dans le document

- AITKEN S.N., YEAMAN S., HOLLIDAY J.A., WANG T.L., CURTIS-MCLANE S. - Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. - *Evolutionary Applications*, vol. 1, n° 1, 2008, pp. 95-111.
- ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D., HOGG E.H., GONZALEZ P., FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A., COBB N. - A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 660-684.
- ARANDA I., GIL L., PARDOS J.A. - Seasonal changes in apparent hydraulic conductance and their implications for water use of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak *Quercus petraea* (Matt.) Liebl in South Europe. - *Plant Ecology*, vol. 179, n° 2, 2005, pp. 155-167.
- AUSSENAC G. - Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. - *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 2000, pp. 287-301.
- AUSSENAC G., GRANIER A. - Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 18, n° 1988, pp. 100-105.
- BARBAROUX C., BRÉDA N. - Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. - *Tree Physiology*, vol. 22, n° 2002, pp. 1201-1210.
- BARBIER S., GOSSELIN F., BALANDIER P. - Le mélange d'essences est-il favorable à la diversité végétale en forêt ? - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 159-167.
- BARBOUR M.M. - Stable oxygen isotope composition of plant tissue: a review. - *Functional Plant Biology*, vol. 34, n° 2, 2007, pp. 83-94.
- BARNA M. - Natural regeneration of *Fagus sylvatica* L.: a Review. - *Austrian Journal of Forest Science*, vol. 128, n° 2, 2011, pp. 71-91.
- BARTELINK H.H. - A growth model for mixed forest stands. - *Forest Ecology and Management*, vol. 134, n° 01-mars, 2000, pp. 29-43.
- BATTIPAGLIA G., SAURER M., CHERUBINI P., CALFAPIETRA C., MCCARTHY H.R., NORBY R.J., COTRUFO M.F. - Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. - *New Phytologist*, vol. 197, n° 2, 2013, pp. 544-554.
- BECKER M. - The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, n° 1989, pp. 1110-1117.
- BECQUEY J., BALANDIER P. - Quelle sylviculture des peuplements mélangés ? - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 265-267.
- BERT D. - Impact of ecological factors climatic stresses and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* Mill) in the Jura mountains : an ecological and dendrochronological study. - *Acta Oecologica*, vol. 14, n° 2, 1993, pp. 229-246.
- BERT D., LEAVITT S.W., DUPOUEY J.L. - Variations of wood delta C-13 and water-use efficiency of *Abies alba* during the last century. - *Ecology*, vol. 78, n° 5, 1997, pp. 1588-1596.
- BERTNESS M.D., CALLAWAY R. - Positive interactions in communities. - *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 9, n° 5, 1994, pp. 191-193.
- BINKLEY D. - A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. - *Forest Ecology and Management*, vol. 190, n° 2-3, 2004, pp. 265-271.
- BIONDI F., WAIKUL K. - Dendroclim2002: a c++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. - *Computers and Geosciences*, vol. 30, n° 3, 2004, pp. 303-311.
- BODEN S., KAHLE H.P., WILPERT K.V., SPIECKER H. - Resilience of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany. - *Forest Ecology and Management*, vol. 315, n° 3, 2014, pp. 12-21.
- BOLTE A., VILLANUEVA I. - Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). - *European Journal of Forest Research*, vol. 125, n° 1, 2006, pp. 15-26.
- BONN S. - Competition dynamics in mixed beech-oak stands and its modifications expected due to climate changes. - *Allgemeine Forst Und Jagdzeitung*, vol. 171, n° 5-6, 2000, pp. 81-88.
- BONTEMPS J.D., ESPER J. - Statistical modelling and RCS detrending methods provide similar estimates of long-term trend in radial growth of common beech in north-eastern France. - *Dendrochronologia*, vol. 29, n° 2, 2011, pp. 99-107.
- BRASSARD B.W., CHEN H.Y.H., BERGERON Y., PARE D. - Differences in fine root productivity between mixed- and single-species stands. - *Functional Ecology*, vol. 25, n° 1, 2011, pp. 238-246.

- BRÉDA N., BADEAU V. - Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? - *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 340, n° 9-10, 2008, pp. 651-662.
- BRÉDA N., GRANIER A., AUSSÉNAC G. - Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) - *Tree Physiology*, vol. 15, n° 5, 1995, pp. 295-306.
- BRÉDA N., GRANIER A., AUSSÉNAC G. - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. - *Revue Forestière Française*, vol. 51, n° 2, 2004, pp. 109-131.
- BRÉDA N., HUC R., GRANIER A., DREYER E. - Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. - *Annals of Forest Science*, vol. 63, n° 6, 2006, pp. 625-644.
- BRIFFA K.R., JONES P.D. - Basic chronology statistics and assessment. - In: Cook ER, Kairiukstis LA (eds) *Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic, Dordrecht, vol. n° 1990, pp. 137-152.
- BROOKER R.W., CALLAGHAN T.V. - The balance between positive and negative plant interactions and its relationship to environmental gradients: a model. - *Oikos*, vol. 81, n° 1, 1998, pp. 196-207.
- BROOKER R.W., MAESTRE F.T., CALLAWAY R.M., LORTIE C.L., CAVIERES L.A., KUNSTLER G., LIANCOURT P., TIELBORGER K., TRAVIS J.M.J., ANTHELME F., ARMAS C., COLL L., CORCKET E., DELZON S., FOREY E., KIKVIDZE Z., OLOFSSON J., PUGNAIRE F., QUIROZ C.L., SACCONI P., SCHIFFERS K., SEIFAN M., TOUZARD B., MICHALET R. - Facilitation in plant communities: the past, the present, and the future. - *Journal of Ecology*, vol. 96, n° 1, 2008, pp. 18-34.
- BUNN A.G. - A dendrochronology program library in R (dplR). - *Dendrochronologia*, vol. 26, n° 2, 2008, pp. 115-124.
- BUNN A.G. - Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. - *Dendrochronologia*, vol. 28, n° 4, 2010, pp. 251-258.
- CALLAWAY R.M. - Positive interactions among plants. - *Botanical Review*, vol. 61, n° 4, 1995, pp. 306-349.
- CALLAWAY R.M. - Competition and facilitation on elevation gradients in subalpine forests of the northern Rocky Mountains, USA. - *Oikos*, vol. 82, n° 3, 1998, pp. 561-573.
- CALLAWAY R.M., BROOKER R.W., CHOLER P., KIKVIDZE Z., LORTIE C.J., MICHALET R., PAOLINI L., PUGNAIRE F.I., NEWINGHAM B., ASCHEHOUG E.T., ARMAS C., KIKODZE D., COOK B.J. - Positive interactions among alpine plants increase with stress. - *Nature*, vol. 417, n° 6891, 2002, pp. 844-848.
- CANELLAS I., DEL RIO M., ROIG S., MONTERO G. - Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. - *Annals of Forest Science*, vol. 61, n° 3, 2004, pp. 243-250.
- CARNWATH G.C., PETERSON D.W., NELSON C.R. - Effect of crown class and habitat type on climate-growth relationships of ponderosa pine and Douglas-fir. - *Forest Ecology and Management*, vol. 285, n° 2012, pp. 44-52.
- CASTAGNERI D., NOLA P., CHERUBINI P., MOTTA R. - Temporal variability of size-growth relationships in a Norway spruce forest: the influences of stand structure, logging, and climate. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 42, n° 3, 2012, pp. 550-560.
- CAVARD X., BERGERON Y., CHEN H.Y.H., PARE D. - Mixed-species effect on tree aboveground carbon pools in the east-central boreal forests. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 40, n° 1, 2010, pp. 37-47.
- CAVARD X., BERGERON Y., CHEN H.Y.H., PARÉ D., LAGANIÈRE J., BRASSARD B. - Competition and facilitation between tree species change with stand development. - *Oikos*, vol. doi: 10.1111/j.1600-0706.2011.19294, n° 2011, pp. 1-13.
- CESCATTI A., PIUTTI E. - Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. - *Forest Ecology and Management*, vol. 102, n° 2-3, 1998, pp. 213-223.
- CHARRU M. - La productivité forestière dans un environnement changeant. Caractérisation multi-échelle de ses variations récentes à partir des données de l'inventaire forestier national et interprétation environnementale. - *Thèse AgroParisTech (Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement)*, vol. n° 2012, pp. 417 pages.
- CHARRU M., SEYNAVE I., MORNEAU F., BONTEMPS J.D. - Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. - *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n° 5, 2010, pp. 864-874.
- CHISHOLM R.A., FILOTAS E. - Critical slowing down as an indicator of transitions in two-species models. - *Journal of Theoretical Biology*, vol. 257, n° 1, 2009, pp. 142-149.
- CHISHOLM R.A., AL. E. - Scale-dependent relationships between tree species richness and ecosystem function in forests. - *Journal of Ecology*, vol. 101, n° 5, 2013, pp. 1214-1224.

- CHOLER P., MICHALET R., CALLAWAY R.M. - Facilitation and competition on gradients in alpine plant communities. - *Ecology*, vol. 82, n° 12, 2001, pp. 3295-3308.
- CHUINE I. - A unified model for budburst of trees. - *Journal of Theoretical Biology*, vol. 207, n° 3, 2000, pp. 337-347.
- CHURCHILL D.J., LARSON A.J., DAHLGREEN M.C., FRANKLIN J.F., HESSBURG P.F., LUTZ J.A. - Restoring forest resilience: From reference spatial patterns to silvicultural prescriptions and monitoring. - *Forest Ecology and Management*, vol. 291, n° 2013, pp. 442-457.
- CHURKINA G., RUNNING S.W. - Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. - *Ecosystems*, vol. 1, n° 2, 1998, pp. 206-215.
- COOMES D.A., ALLEN R.B. - Effects of size, competition and altitude on tree growth. - *Journal of Ecology*, vol. 95, n° 5, 2007, pp. 1084-1097.
- CORDONNIER T., GOSSELIN F. - La gestion forestière adaptative : intégrer l'acquisition de connaissances parmi les objectifs de gestion. - *Revue Forestière Française*, vol. 61, n° 2, 2009, pp. 131-144.
- CRUZIAT P., COCHARD H., AMÉGLIO T. - Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. - *Annals of Forest Science*, vol. 59, n° 2002, pp. 723-752.
- D'AMATO A.W., BRADFORD J.B., FRAVER S., PALIK B.J. - Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. - *Forest Ecology and Management*, vol. 262, n° 5, 2011, pp. 803-816.
- D'ARRIGO R., WILSON R., LIEPERT B., CHERUBINI P. - On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. - *Global and Planetary Change*, vol. 60, n° 3-4, 2008, pp. 289-305.
- DAVI H., DUFRÈNE E., FRANÇOIS C., LE MAIRE G., LOUSTAU D., BOSC A., RAMBAL S., GRANIER A., MOORS E. - Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. - *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 141, n° 1, 2006, pp. 35-56.
- DEL RIO M., STERBA H. - Comparing volume growth in pure and mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Quercus pyrenaica*. - *Annals of Forest Science*, vol. 66, n° 5, 2009, pp. article 502.
- DESPLANQUE C., ROLLAND C., SCHWEINGRUBER F.H. - Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation: *Picea abies* and *Abies alba* in Tarentaise and Maurienne (French Alps). - *Trees*, vol. 13, n° 4, 1999, pp. 218-227.
- DHÔTE J.F. - Composition, structure et résistance des peuplements. - In *"Les écosystèmes forestiers dans les tempêtes"* (eds). *ECOFOR J.C. Bergonzini et O. Laroussinie*, 133 pages, vol. n° 2000, pp. 101-116.
- DIAZ S., CABIDO M. - Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. - *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 16, n° 11, 2001, pp. 646-655.
- DROBYSHEV I., OVERGAARD R., SAYGIN I., NIKLASSON M., HICKLER T., KARLSSON M., SYKES M.T. - Mast seeding behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 11, 2010, pp. 2160-2171.
- DUFRÈNE E., DAVI H., FRANÇOIS C., LE MAIRE G., LE DANTEC V., GRANIER A. - Modelling carbon and water cycles in a beech forest Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. - *Ecological Modelling*, vol. 185, n° 2005, pp. 407-436.
- FABBIO G., MERLO M., TOSI V. - Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - the Mediterranean region. - *Journal of Environmental Management*, vol. 67, n° 1, 2003, pp. 67-76.
- FERNANDEZ M.E., GYENGE J.E., DE URQUIZA M.M., VARELA S. - Adaptability to climate change in forestry species: drought effects on growth and wood anatomy of ponderosa pines growing at different competition levels. - *Forest Systems*, vol. 21, n° 1, 2012, pp. 162-173.
- FICHTNER A., STURM K., RICKERT C., VON OHEIMB G., HARDTLE W. - Crown size-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) are driven by the interplay of disturbance intensity and inter-specific competition. - *Forest Ecology and Management*, vol. 302, n° 2013, pp. 178-184.
- FILIPESCU C.N., COMEAU P.G. - Competitive interactions between aspen and white spruce vary with stand age in boreal mixedwoods. - *Forest Ecology and Management*, vol. 247, n° 1-3, 2007, pp. 175-184.
- FRANCEY R.J., FARQUHAR G.D. - An explanation of C12/C13 variations in tree rings. - *Nature*, vol. 297, n° 5861, 1982, pp. 28-31.
- FRITTS H.C. - Tree-ring and climate. - *New York, Academic Press*, vol. n° 1976, pp. 576.
- GEA-IZQUIERDO G., MARTIN-BENITO D., CHERUBINI P., CANELLAS I. - Climate-growth variability in *Quercus ilex* L. west Iberian open woodlands of different stand density. - *Annals of Forest Science*, vol. 66, n° 8, 2009, pp. 802.
- GENET H., BRÉDA N., DUFRÈNE E. - Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) using a chronosequence approach. - *Tree Physiology*, vol. 30, n° 2, 2010, pp. 177-192.

- GILLIAM F.S. - The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems. - *Bioscience*, vol. 57, n° 10, 2007, pp. 845-858.
- GOREAUD F. - Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et à la modélisation des peuplements complexes. - *Thèse en Sciences de l'Environnement de l'ENGREF-Nancy*, vol. n° 2000, pp. 523 pages.
- GOSSELIN M., LARROUSSINIE O. - Biodiversité et gestion forestière : connaître pour préserver - synthèse bibliographique. - *Collection Etudes du Cemagref - Série gestion des territoires n°20 - Coédition GIP Ecofor*, vol. n° 2004, pp.
- GRANIER A., LOUSTAU D., BREDA N. - A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. - *Annals of Forest Science*, vol. 57, n° 8, 2000, pp. 755-765.
- GRANIER A., BRÉDA N., BIRON P., VILLETTE S. - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. - *Ecological Modelling*, vol. n° 116, 1999, pp. 269-283.
- GRIME J.P. - Evidence for the Existence of Three Primary Strategies in Plants and Its Relevance to Ecological and Evolutionary Theory. - *The American Naturalist*, vol. 111, n° 982, 1977, pp. 1169-1194.
- GRUBER F. - Control and Forecasting of the fructification on beech (*Fagus sylvatica* L.) by climatic factors. - *These*, vol. n° 2003, pp.
- GUICHERD P. - Water relations of European silver fir (*Abies alba* Mill.) in 2 natural stands in the French Alps subject to constrating climatic conditions. - *Annales Des Sciences Forestieres*, vol. 51, n° 6, 1994, pp. 599-611.
- GUIOT J. - The bootstrapped response function. - *Tree-ring bulletin*, vol. 51, n° 1991, pp. 39-41.
- GUSTAFSON E.J., STURTEVANT B.R. - Modeling Forest Mortality Caused by Drought Stress: Implications for Climate Change. - *Ecosystems*, vol. 16, n° 1, 2013, pp. 60-74.
- HEINIMANN H.R. - A concept in adaptive ecosystem management-An engineering perspective. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 848-856.
- HILTON G.M., PACKHAM J.R. - Variation in the masting of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in northern Europe over two centuries (1800-2001). - *Forestry*, vol. 76, n° 3, 2003, pp. 319-328.
- HOOPER D.U., CHAPIN F.S., EWEL J.J., HECTOR A., INCHAUSTI P., LAVOREL S., LAWTON J.H., LODGE D.M., LOREAU M., NAEEM S., SCHMID B., SETALA H., SYMSTAD A.J., VANDERMEER J., WARDLE D.A. - Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. - *Ecological Monographs*, vol. 75, n° 1, 2005, pp. 3-35.
- ISHII H., ASANO S. - The role of crown architecture, leaf phenology and photosynthetic activity in promoting complementary use of light among coexisting species in temperate forests. - *Ecological Research*, vol. 25, n° 4, 2010, pp. 715-722.
- JACOB M., LEUSCHNER M., THOMAS F.M. - Productivity of temperate broad-leaved forest stands differing in tree species diversity. - *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 2010, pp. 503.
- JONARD F., ANDRE F., PONETTE Q., VINCKE C., JONARD M. - Sap flux density and stomatal conductance of European beech and common oak trees in pure and mixed stands during the summer drought of 2003. - *Journal of Hydrology*, vol. 409, n° 1-2, 2011, pp. 371-381.
- KAZDA M., SALZERL J., SCHMID I., VON WRANGELL P. - Importance of mineral nutrition for photosynthesis and growth of *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* planted under Norway spruce canopy. - *Plant and Soil*, vol. 264, n° 1-2, 2004, pp. 25-34.
- KELTY M.J. - The role of species mixtures in plantation forestry. - *Forest Ecology and Management*, vol. 233, n° 2-3, 2006, pp. 195-204.
- KING G., GUGGERLI F., FONTI P., FRANK D. - Tree growth response along an elevational gradient: climate or genetics ? - *Oecologia*, vol. 10.1007/s00442-013-2696-6, n° 2013, pp.
- KOHLER M., SOHN J., NAGELE G., BAUHUS J. - Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? - *European Journal of Forest Research*, vol. 129, n° 6, 2010, pp. 1109-1118.
- KONÔPKA B. - Differences in fine root traits between Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) – A case study in the Kysucké Beskydy Mts. - *Journal of Forest Science*, vol. 55, n° 12, 2009, pp. 556-566.
- KUNSTLER G., ALBERT C.H., COURBAUD B., LAVERGNE S., THUILLER W., VIEILLEDENT G., ZIMMERMANN N.E., COOMES D.A. - Effects of competition on tree radial-growth vary in importance but not in intensity along climatic gradients. - *Journal of Ecology*, vol. 99, n° 1, 2011, pp. 300-312.
- LAFOND V., LAGARRIGUES G., CORDONNIER T., COURBAUD B. - Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity. - *Annals of Forest Science*, vol. 71, n° 2, 2014, pp. 173-186.
- LANDEAU S., LANDMANN G. - Les peuplements forestiers mélangés. Introduction aux ateliers. Recherche et Gestion forestière (Regefor) 2007. - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 99-105.

- LANDMANN G., BRÉDA N., HOULLER F., DREYER E., FLOT J. - Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises. - *Revue Forestière Française*, vol. 50, n° 4, 2003, pp. 299-306.
- LE GOFF N., OTTORINI J.M. - Effets des éclaircies sur la croissance du hêtre. Interaction avec les facteurs climatiques. - *Revue Forestière Française*, vol. 51, n° 2, 1999, pp. 355-364.
- LEBOURGEOIS F., MÉRIAN P. - La sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XXIème siècle ? - *Revue Forestière Française*, vol. 63, n° 1, 2011, pp. 17-32.
- LEFÈVRE Y., LEBOURGEOIS F., BRÉDA N. - Comportement des essences sur sol à nappe temporaire. - *Revue Forestière Française*, vol. 53, n° 4, 2006, pp. 295-304.
- LEGAY M., CORDONNIER T., DHÔTE J.F. - Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 181-190.
- LEGAY M., MORTIER F., MENGIN-LECREUX P., CORDONNIER T. - La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière. - *Compte rendu de l'académie d'agriculture de France*, vol. séance du 30 mai 2007, n° 2007, pp. 1-11.
- LEMAIRE J. - Fiche autécologique du Chêne pédonculé. - *Forêt-Entreprise*, vol. 201, n° 11, 2011, pp. 9-12.
- LENOIR J., GÉGOUT J.C., MARQUET P.A., DE RUFFRAY P., BRISSE H. - A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. - *Science*, vol. 320, n° 5884, 2008, pp. 1768-1771.
- LEUSCHNER C., CONERS H., ICKE R. - In situ measurement of water absorption by fine roots of three temperate trees: species differences and differential activity of superficial and deep roots. - *Tree Physiology*, vol. 24, n° 12, 2004, pp. 1359-1367.
- LEVIA D.F., FROST E.E. - A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. - *Journal of Hydrology*, vol. 274, n° 1-4, 2003, pp. 1-29.
- LÉVY G. - Incidences possibles d'une coupe à blanc sur la remontée des nappes et la stabilité structurale des sols à hydromorphie temporaire. - *Revue Forestière Française*, vol. 42, n° 5, 1990, pp. 517-522.
- LÉVY G., LEFÈVRE Y. - La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire. - *Editeur : ENGREF*, vol. n° 2001, pp. 223 p.
- LÉVY G., FROCHOT H., BECKER M. - Installation des peuplements de chêne et facteurs du milieu. - *Revue Forestière Française*, vol. 42, n° 2, 1990, pp. 240-245.
- LINARES J.C., CAMARERO J.J., CARREIRA J.A. - Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. - *Journal of Ecology*, vol. 98, n° 3, 2010, pp. 592-603.
- LINDNER M., MAROSCHEK M., NETHERER S., KREMER A., BARBATI A., GARCIA-GONZALO J., SEIDL R., DELZON S., CORONA P., KOLSTROM M., LEXER M.J., MARCHETTI M. - Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 698-709.
- LLORET F., KEELING E.G., SALA A. - Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. - *Oikos*, vol. 120, n° 12, 2011, pp. 1909-1920.
- LLORET F., ESCUDERO A., IRIONDO J.M., MARTINEZ-VILALTA J., VALLADARES F. - Extreme climatic events and vegetation: the role of stabilizing processes. - *Global Change Biology*, vol. 18, n° 3, 2012, pp. 797-805.
- LOREAU M., NAEEM S., INCHAUSTI P., BENGTSSON J., GRIME J.P., HECTOR A., HOOPER D.U., HUSTON M.A., RAFFAELLI D., SCHMID B., TILMAN D., WARDLE D.A. - Ecology - Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. - *Science*, vol. 294, n° 5543, 2001, pp. 804-808.
- MAESTRE F.T., CALLAWAY R.M., VALLADARES F., LORTIE C.J. - Refining the stress-gradient hypothesis for competition and facilitation in plant communities. - *Journal of Ecology*, vol. 97, n° 2, 2009, pp. 199-205.
- MAGRUDER M., CHHIN S., PALIK B., BRADFORD J.B. - Thinning increases climatic resilience of red pine. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 43, n° 9, 2013, pp. 878-889.
- MÄKINEN H., VANNINEN P. - Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. - *Forest Ecology and Management*, vol. 113, n° 1, 1999, pp. 83-89.
- MARTIN-BENITO D., DEL RIO M., HEINRICH I., HELLE G., CANELLAS I. - Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. - *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 5, 2010, pp. 967-975.
- MARTIN-BENITO D., KINT V., DEL RIO M., MUYS B., CANELLAS I. - Growth responses of West-Mediterranean *Pinus nigra* to climate change are modulated by competition and productivity: Past trends and future perspectives. - *Forest Ecology and Management*, vol. 262, n° 6, 2011, pp. 1030-1040.
- MARTIN H. - Caractérisation des fructifications des chênaies et hêtraies du réseau renecofor. - *Mémoire de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes*, vol. n° 2009, pp. 138 pages.

- MARTINEZ-VILALTA J., LOPEZ B.C., LOEPFE L., LLORET F. - Stand- and tree-level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. - *Oecologia*, vol. 168, n° 3, 2012, pp. 877-888.
- MENZEL A., SPARKS T.H., ESTRELLA N., KOCH E., AASA A., AHA R., ALM-KUBLER K., BISSOLLI P., BRASLAVSKA O., BRIEDE A., CHMIELEWSKI F.M., CREPINSEK Z., CURNEL Y., DAHL A., DEFILA C., DONNELLY A., FILELLA Y., JATCZA K., MAGE F., MESTRE A., NORDLI O., PENUELAS J., PIRINEN P., REMISOVA V., SCHEIFINGER H., STRIZ M., SUSNIK A., VAN VLIET A.J.H., WIELGOLASKI F.E., ZACH S., ZUST A. - European phenological response to climate change matches the warming pattern. - *Global Change Biology*, vol. 12, n° 10, 2006, pp. 1969-1976.
- MÉRIAN P. - Conseils pour l'échantillonnage des arbres en peuplements purs et réguliers en vue de l'estimation de leur sensibilité au climat par analyse dendroécologique. - *Revue Forestière Française*, vol. 65, n° 1, 2013, pp. 21-36.
- MÉRIAN P., LEBOURGEOIS F. - Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis. - *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n° 8, 2011, pp. 1382-1391.
- MEYER F.D., BRÄKER O.U. - Climate response in dominant and suppressed spruce trees, *Picea abies* (L.) Karst., on a subalpine and lower montane site in Switzerland. - *Ecoscience*, vol. 8, n° 1, 2001, pp. 105-114.
- MICHELOT A., SIMARD S., RATHGEBER C., DUFRENE E., DAMESIN C. - Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. - *Tree Physiology*, vol. 32, n° 8, 2012, pp. 1033-1045.
- MISSON L., NICAULT A., GUIOT J. - Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). - *Forest Ecology and Management*, vol. 183, n° 1-3, 2003, pp. 47-60.
- MORIN X., CHUINE I. - Sensitivity analysis of the tree distribution model PHENOFIT to climatic input characteristics: implications for climate impact assessment. - *Global Change Biology*, vol. 11, n° 9, 2005, pp. 1493-1503.
- MORIN X., FAHSE L., SCHERER-LORENZEN M., BUGMANN H. - Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. - *Ecology Letters*, vol. 14, n° 12, 2011, pp. 1211-1219.
- MORNEAU F., DUPREZ C., HERVÉ J.C. - Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire forestier national. - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 107-120.
- MUND M., KUTSCH W.L., WIRTH C., KAHL T., KNOHL A., SKOMARKOVA M.V., SCHULZE E.D. - The influence of climate and fructification on the inter-annual variability of stem growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest. - *Tree Physiology*, vol. 30, n° 6, 2010, pp. 689-704.
- NEUWIRTH B., ESPER J., SCHWEINGRUBER F.H., WINIGER M. - Site ecological differences to the climatic forcing of spruce pointer years from the Lotschental, Switzerland. - *Dendrochronologia*, vol. 21, n° 2, 2004, pp. 69-78.
- NGO BIENG M.A.N., PÉROT T., DE COLIGNY F., GOREAUD F. - Spatial pattern of trees influences species productivity in a mature oak-pine mixed forest. - *European Journal of Forest Research*, vol. 132, n° 5-6, 2013, pp. 841-850.
- NICOLL B.C., GARDINER B.A., RAYNER B., PEACE A.J. - Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 36, n° 7, 2006, pp. 1871-1883.
- NOVAK J., SLODIČÁK M., KACÁLEK D., DUŠEK D. - The effect of different stand density on diameter growth response in Scots pine stands in relation to climate situations. - *Journal of Forest Science*, vol. 56, n° 10, 2010, pp. 461-473.
- OBERHUBER W., KOFLER W. - Topographic influences on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at small spatial scales. - *Plant Ecology*, vol. 146, n° 2000, pp. 231-240.
- PALUCH J.G., GRUBA P. - Effect of local species composition on topsoil properties in mixed stands with silver fir (*Abies alba* Mill.). - *Forestry*, vol. 85, n° 3, 2012a, pp. 413-425.
- PALUCH J.G., GRUBA P. - Inter-crown versus under-crown area: contribution of local configuration of trees to variation in topsoil morphology, pH and moisture in *Abies alba* Mill. forests. - *European Journal of Forest Research*, vol. 131, n° 3, 2012b, pp. 857-870.
- PARMESAN C. - Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. - *Global Change Biology*, vol. 13, n° 9, 2007, pp. 1860-1872.
- PEGUERO-PINA J.J., CAMARERO J.J., ABADIA A., MARTIN E., GONZALEZ-CASCON R., MORALES F., GIL-PELEGRIN E. - Physiological performance of silver-fir (*Abies alba* Mill.) populations under contrasting climates near the south-western distribution limit of the species. - *Flora*, vol. 202, n° 3, 2007, pp. 226-236.

- PÉREZ-DE-LIS G., GARCIA-GONZALEZ I., ROZAS V., AREVALO J.R. - Effects of thinning intensity on radial growth patterns and temperature sensitivity in *Pinus canariensis* afforestations on Tenerife Island, Spain. - *Annals of Forest Science*, vol. 68, n° 6, 2011, pp. 1093-1104.
- PEROT T., VALLET P., ARCHAUX F. - Growth compensation in an oak-pine mixed forest following an outbreak of pine sawfly (*Diprion pini*). - *Forest Ecology and Management*, vol. 295, n° 2013, pp. 155-161.
- PEROT T., DELEUZE C., JARRET P., MORNEAU F. - Mélanges d'essences et productivité : application au mélange chêne sessile - pin sylvestre en forêt domaniale d'Orléans. - *Rendez-Vous Techniques*, vol. 33-34, n° 2-3, 2011, pp. 11-17.
- PÉROT T., PICARD N. - Mixture enhances productivity in a two-species forest: evidence from a modeling approach. - *Ecological Research*, vol. 27, n° 1, 2012, pp. 83-94.
- PICHLER P., OBERHUBER W. - Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. - *Forest Ecology and Management*, vol. 242, n° 2-3, 2007, pp. 688-699.
- PINTO P., GÉGOUT J.C., HERVÉ J.C., DHÔTE J.F. - Changes in environmental controls on the growth of *Abies alba* Mill. in the Vosges Mountains, north-eastern France, during the 20th century. - *Global Ecology and Biogeography*, vol. 16, n° 2007, pp. 472-484.
- PINTO P.E., GEGOUT J.C., HERVE J.C., DHOTE J.F. - Respective importance of ecological conditions and stand composition on *Abies alba* Mill. dominant height growth. - *Forest Ecology and Management*, vol. 255, n° 3-4, 2008, pp. 619-629.
- PIOTTO D. - A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. - *Forest Ecology and Management*, vol. 255, n° 3-4, 2008, pp. 781-786.
- PIUTTI E., CESCATTI A. - A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, n° 3, 1997, pp. 277-284.
- PLANTON S., DÉQUÉ M., CHAUVIN F., TERRAY L. - Expected impacts of climate change on extreme climate events. - *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 340, n° 9-10, 2008, pp. 564-574.
- PORTÉ A., BARTELINK H.H. - Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. - *Ecological Modelling*, vol. 150, n° 1-2, 2002, pp. 141-188.
- PRETZSCH H. - Stand density and growth of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence from long-term experimental plots. - *European Journal of Forest Research*, vol. 124, n° 3, 2005, pp. 193-205.
- PRETZSCH H., BIBER P. - Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 40, n° 2, 2010, pp. 370-384.
- PRETZSCH H., SCHUTZE G., UHL E. - Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. - *Plant Biology*, vol. 15, n° 3, 2013a, pp. 483-495.
- PRETZSCH H., BLOCK J., DIELER J., DONG P.H., KOHNLE U., NAGEL K., SPELLMANN S., ZINGG A. - Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. - *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 7, 2010, pp. 712-724.
- PRETZSCH H., BIELAK K., BLOCK J., BRUCHWALD A., DIELER J., EHRHART H.P., KOHNLE U., NAGEL J., SPELLMANN H., ZASADA M., ZINGG A. - Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. - *European Journal of Forest Research*, vol. 132, n° 2, 2013b, pp. 263-280.
- RAFFALLI-DELERCE G., MASSON-DELMOTTE V., DUPOUEY J., STIEVENARD M., BRED A N., MOISSELIN J. - Reconstruction of summer droughts using tree-ring cellulose isotopes: a calibration study with living oaks from Brittany (western France). - *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, vol. 56, n° 2, 2004, pp. 160-174.
- RATHGEBER C.B.K., LONGUETAUD F., MOTHE F., CUNY H., LE MOGUEDEC G. - Phenology of wood formation: Data processing, analysis and visualisation using R (package CAVIAR). - *Dendrochronologia*, vol. 29, n° 3, 2011, pp. 139-149.
- REYER C., LASCH P., MOHREN G.M.J., STERCK F.J. - Inter-specific competition in mixed forests of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and common beech (*Fagus sylvatica*) under climate change - a model-based analysis. - *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 8, 2010, pp.
- RICHARDS A.E., FORRESTER D.I., BAUHUS J., SCHERER-LORENZEN M. - The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. - *Tree Physiology*, vol. 30, n° 9, 2010, pp. 1192-1208.
- SARDIN T., BOCK J., BECQUEY J. - Les peuplements mélangés : enjeux et interrogations des gestionnaires. - *Revue Forestière Française*, vol. 60, n° 2, 2008, pp. 121-128.
- SCHMID I., KAZDA M. - Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 31, n° 3, 2001, pp. 539-548.

- SCHUME H., JOST G., HAGER H. - Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. - *Journal of Hydrology*, vol. 289, n° 1-4, 2004, pp. 258-274.
- SEIDL R., FERNANDES P.M., FONSECA T.F., GILLET F., JONSSON A.M., MERGANICOVA K., NETHERER S., ARPACI A., BONTEMPS J.D., BUGMANN H., GONZALEZ-OLABARRIA J.R., LASCH P., MEREDIEU C., MOREIRA F., SCHELHAAS M.J., MOHREN F. - Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. - *Ecological Modelling*, vol. 222, n° 4, 2011, pp. 903-924.
- SEYNAVE I. - Analyse de la structure de deux peuplements mélangés équiennes : la sapinière-hêtraie et la chênaie-hêtraie dans le Nord-Est de la France. Analyse de la dynamique de la structure de la sapinière-hêtraie. - *Thèse en Sciences Forestières et du bois de l'ENGREF-Nancy*, vol. n° 1999, pp. 199 pages + annexes.
- SILVA D.E., MAZZELLA P.R., LEGAY M., CORCKET E., DUPOUEY J.L. - Does natural regeneration determine the limit of European beech distribution under climatic stress? - *Forest Ecology and Management*, vol. 266, n° 2012, pp. 263-272.
- SORK V., BRAMBLE J. - Prediction of acorn crops in three species of North American oaks: *Quercus alba*, *Q. rubra* and *Q. velutina*. - *Annales Des Sciences Forestières*, vol. 50, n° 6s, 1993, pp. 128s-136s.
- TILMAN D. - The ecological consequences of changes in biodiversity: A search for general principles. - *Ecology*, vol. 80, n° 5, 1999, pp. 1455-1474.
- ULRICH E. - Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. - *Revue Forestière Française*, vol. 47, n° 2, 1995, pp. 107-124.
- VALLET P., PÉROT T. - Silver fir stand productivity is enhanced when mixed with Norway spruce: evidence based on large-scale inventory data and a generic modelling approach. - *Journal of Vegetation Science*, vol. 22, n° 2011, pp. 932-942.
- VAN DEN BRAKEL J.A., VISSER H. - The influence of Environmental Conditions on tree-ring series of Norway spruce for different canopy and vitality classes. - *Forest Science*, vol. 42, n° 2, 1996, pp. 206-219.
- VAN DER MAATEN E. - Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. - *Trees-Structure and Function*, vol. 26, n° 3, 2012, pp. 777-788.
- VAN DER MAATEN E. - Thinning prolongs growth duration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) across a valley in southwestern Germany. - *Forest Ecology and Management*, vol. 306, n° 10, 2013, pp. 135-141.
- VIOLLE C., NAVAS M.L., VILE D., KAZAKOU E., FORTUNEL C., HUMMEL I., GARNIER E. - Let the concept of trait be functional! - *Oikos*, vol. 116, n° 5, 2007, pp. 882-892.
- WIGLEY T.M., BRIFFA K.R., JONES M.D. - On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. - *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 23, n° 2, 1984, pp. 201-213.
- WILSON R., D'ARRIGO R., BUCKLEY B., BÜNTGEN U., ESPER J., FRANK D., LUCKMAN B., PAYETTE S., VOSE R., YOUNGBLUT D. - A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. - *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 112, n° D17103, 2007, pp. doi:10.1029/2006JD008318.
- ZANG C., BIONDI F. - Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. - *Dendrochronologia*, vol. Doi: 10.1016/j.dendro.2012.08.001, n° 2012, pp.
- ZANG C., PRETZSCH H., ROTHE A. - Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. - *Trees-Structure and Function*, vol. 26, n° 2, 2012, pp. 557-569.
- ZILLIOX C., GOSSELIN F. - Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space. - *Forest Ecology and Management*, vol. doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.049, n° 2013, pp.

