

# DESCRIPTIF DU PROJET



## Sommaire

<b>1. JUSTIFICATIONS DU PROJET DE RECHERCHE .....</b>	<b>5</b>
1.1. POSITION PAR RAPPORT AUX TERMES DE L'APPEL À PROPOSITIONS .....	5
1.2. SITUATION ACTUELLE DU SUJET ET ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE COMMENTÉE.....	5
1.3. ARTICULATION AVEC LES PROGRAMMES RÉGIONAUX, NATIONAUX ET EUROPÉENS.....	7
1.4. AUTRES PROJETS OU COLLABORATIONS CONDUITS PAR LES PROPOSANTS SUR LE MÊME SUJET, NOTAMMENT DANS LE CONTEXTE EUROPÉEN .....	7
<b>2. PLAN DE RECHERCHE DÉTAILLÉ.....</b>	<b>8</b>
2.1. INTRODUCTION.....	8
2.1.1. <i>Identification du consortium fournisseur de la réponse.....</i>	8
2.1.2. <i>Acronymes et abréviations.....</i>	8
2.1.3. <i>Documents de référence.....</i>	8
2.2. OBJECTIF .....	8
2.3. PROGRAMME DE TRAVAIL .....	9
2.3.1. <i>Hypothèses.....</i>	9
2.3.2. <i>Approches et outils de modélisation .....</i>	9
2.3.3. <i>Calendrier prévisionnel .....</i>	10
2.4. COMPOSITION ET DESCRIPTIF DES TRAVAUX.....	10
2.4.1. <i>Lot 0 : Gestion du projet et coordination (INRA) .....</i>	10
2.4.2. <i>Lot 1 : Etat initial des systèmes (LSCE).....</i>	10
2.4.3. <i>Lot 2 : Définition des scénarios climatiques, sylvicoles et économiques (INRA) .....</i>	11
2.4.3.1. Lot 2.1 : Scénarios climatiques et scénarios météorologiques (LSCE, CNRM, et CERFACS).....	11
2.4.3.2. Lot 2.2 : Scénarios sylvicoles et économiques (INRA) .....	12
2.4.4. <i>Lot 3 : Modélisation : évaluation, analyse et développement des modèles (LSCE).....</i>	13
2.4.4.1. Lot 3.1 : Analyse et modélisation des effets abiotiques (sécheresse, température, ozone) (INRA Bordeaux, INRA Nancy, LSCE) .....	13
2.4.4.2. Lot 3.2 : Analyse et modélisation des ravageurs cibles (oïdium du chêne, <i>Diplodia pinea</i> , processionnaire du pin et tordeuse du mélèze) ; interactions biotiques – abiotiques (INRA Orléans et Bordeaux/Nancy) .....	14
2.4.5. <i>Lot 4 : Impacts régionalisés à l'échelle nationale (LSCE) .....</i>	15
2.4.5.1. Lot 4.1 : Changement de fonctionnement et de productivité des écosystèmes forestiers (LSCE, INRA Nancy).....	15
2.4.5.2. Lot 4.2 : Risques en interaction avec les aléas climatiques.....	16
2.4.6. <i>Lot 5 : Intégration et application pour l'opérationnel.....</i>	16
2.4.6.1. Lot 5.1 : Restitution aux acteurs .....	16
<b>3. ORGANISATION DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>17</b>
3.1.1. <i>Structure du projet.....</i>	17
3.1.2. <i>Consortium .....</i>	17
3.1.2.1. Partenaire 1 : Ecologie et Ecophysiologie Forestières, INRA – UHP, Nancy .....	17
3.1.2.2. Partenaire 2 : Unité EPHYSE, INRA Bordeaux .....	18
3.1.2.3. Partenaire 3 : Unité BIOGECO, INRA - Bordeaux .....	18
3.1.2.4. Partenaire 4 : Unité IAM, INRA - Nancy .....	18
3.1.2.5. Partenaire 5 : INFOSOL, INRA - Orléans .....	18
3.1.2.6. Partenaire 6 : Unité Zoologie Forestière, INRA - Orléans .....	19
3.1.2.7. Partenaire 7 : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-LSCE).....	19
3.1.2.8. Sous-traitance .....	19
3.1.2.8.1. Equipe CERFACS .....	19
3.1.2.8.2. Equipe CNRM.....	19
3.1.3. <i>Tableau récapitulatif de la responsabilité de chaque partenaire .....</i>	20
3.1.4. <i>Planification des travaux .....</i>	20
3.1.4.1. Démarrage des travaux .....	20
3.1.4.2. Durée .....	20
3.1.4.3. Planning .....	21
3.1.4.4. Réunions .....	21
3.1.5. <i>Fournitures .....</i>	21
<b>4. EXPÉRIENCE ET MOYENS DES ÉQUIPES DANS LE DOMAINE CONSIDÉRÉ.....</b>	<b>22</b>
4.1.1. <i>Référence de chaque équipe relative à l'étude .....</i>	22
4.1.1.1. Equipe INRA .....	22

4.1.1.2. Equipe LSCE .....	23
4.1.2. <i>Ressources proposées pour le projet</i> .....	25
4.1.2.1. Les ressources informatiques .....	25
4.1.2.2. Les moyens de mesures .....	25
<b>5. VALORISATION ENVISAGÉE.....</b>	<b>26</b>
<b>6. ANNEXE A : DESCRIPTIF DES MODÈLES UTILISÉS .....</b>	<b>27</b>
<b>7. ANNEXE B : RÉFÉRENCES CITÉES .....</b>	<b>29</b>
<b>8. ANNEXE C : PROJETS NATIONAUX ET EUROPÉENS COMPLÉMENTAIRES.....</b>	<b>32</b>

# 1. Justifications du projet de recherche

## 1.1. Position par rapport aux termes de l'appel à propositions

La présente proposition FAST vise à analyser les évolutions régionalisées possibles de la forêt métropolitaine eu égard aux aléas climatiques et biotiques résultants des scénarios régionalisés intégrés, c'est-à-dire couplant des modèles climatiques avec des **contraintes** et des modèles économiques correspondants, afin de proposer différentes stratégies **d'atténuation et d'adaptation**. En particulier, on quantifiera les conséquences d'hypothèses relatives à des options d'évolution de la filière et des stratégies d'atténuation : demande en bois, options de sylviculture bois-énergie (pellet etc.), fibre/-papier, caisserie, déroulage, sciage. Les modèles de fonctionnement biophysiques des écosystèmes forestiers développés aujourd'hui proposent une régionalisation à haute résolution (8 x 8 km), permettant des déclinaisons nouvelles des impacts possibles sur la forêt française, de plaine et de montagne.

Parallèlement, les recherches sur la **vulnérabilité des forêts** aux aléas climatiques et biotiques passés, actuels, ou simulant le futur, se développent dans le cadre des programmes ANR Vulnérabilité, milieux, climats (DRYADE, DROUGHT+, CLIMATOR). Il devient alors possible de proposer une **représentation spatialisée de certains risques** potentiels, résultats du **croisement entre aléas**, dont **l'occurrence et l'intensité** seront déclinés régionalement, et **vulnérabilité**. Les conséquences prévisibles des facteurs abiotiques y compris **extrêmes** (températures extrêmes, sécheresse, ozone, incendie ...) et des aléas biotiques (maladie, champignon, insectes ravageurs) seront analysées, et, à titre expérimental, les risques issus d'interaction entre aléas biotiques et abiotiques seront prospectés pour quelques cas « modèles ». Les **sources d'incertitudes** seront prises en compte, à la fois sur le forçage climatique, mais aussi sur la représentation des processus dans un modèle spatialisé et sur les vulnérabilités de chaque écosystème. Différents enjeux seront considérés, depuis la présence potentielle des espèces jusqu'au risque de dépérissement ou mortalité, avec un point central sur la productivité forestière. Dans l'analyse spatialisée des risques potentiels du changement climatique sur le secteur forestier qui est proposée, on croisera une **approche par milieux** (types de forêts, de sols) avec une adaptation **sectorielle** (type de gestion, contraintes économiques). En rendant possible l'intégration des connaissances biophysiques et des options de gestion sylvicole future, la proposition FAST répond pleinement aux termes de l'appel d'offre du GICC-2.

## 1.2. Situation actuelle du sujet et étude bibliographique commentée

Depuis 1990, le secteur forestier constitue un puits de carbone national en forte croissance, contribuant à équilibrer le bilan national de la France et à tenir ses engagements internationaux en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette évolution est surtout due à un effet direct du déséquilibre entre production et récolte. Celui-ci résulte pour une part d'un accroissement de la productivité primaire attribué au changement global, notamment à l'accroissement des dépôts azotés, à l'élévation de la teneur en CO<sub>2</sub> et au réchauffement (Spiecker 1999, Nellesmann et Thomsen 2001, Vries et al. 2006). L'ensemble de ces facteurs est amené à évoluer de façon rapide dans le futur. Caractérisée par des constantes de temps longues liées à la durée d'exploitation des forêts, la gestion de ce secteur est donc plus que d'autres redevable d'une approche prédictive pluridisciplinaire pour analyser et prédire les impacts potentiels des changements climatiques, économiques et écologiques.

Deux grandes voies de modélisation des forêts sont mises en œuvre pour prévoir la future trajectoire de la production et du fonctionnement des forêts, une voie empirique basée sur les données observées et projetant leur évolution dans le futur proche (Dhôte 2007, Nuutinen et al. 2006, Nabuurs et al. 2007) et une voie mécaniste basée sur les processus physiques et biologiques déterminant le fonctionnement, la production et la croissance des forêts suivant un forçage climatique explicite (Bergh et al. 2003, Garcia-Gonzalo et al. 2007, Loustau et al. 2005, Davi et al 2006). Dans la première voie, les effets de dérive climatique sont implicitement considérés comme constants et prolongés à l'identique dans le futur. La construction et l'analyse de scénarios du secteur forestier en France repose ici sur une hypothèse conservatrice tendancielle de l'évolution de la productivité forestière et des changements d'utilisation des terres (De Cara et Thomas, 2008). Ils se basent

sur l'évolution observée au cours des dernières décennies avec typiquement un accroissement de 1% de productivité annuelle et la conversion annuelle de plusieurs dizaines de milliers d'hectares en forêt. La trajectoire de l'évolution du milieu physique (climat, atmosphère, sols) et de son impact sur la productivité biologique des forêts n'est cependant pas linéaire. L'impact de l'augmentation de la fréquence d'évènements climatiques, les effets de seuil, la modification des biocénoses forestières avec l'irruption d'espèces nuisibles à forte mobilité (insectes, virus, bactéries, champignons) n'est pas prise en compte. Ces projections tendanciennes sont donc entachées d'une incertitude élevée liée à la difficulté de prédire la réponse du paysage forestier national à l'évolution climatique, au changement global et au scénario de demande et sa traduction en itinéraires techniques modifiant les composantes clés de la production des systèmes forestiers (structure d'âge, diversité spécifique, bilans minéraux,... )

La deuxième voie s'efforce de représenter ces effets en les décomposant entre les grands processus de fonctionnement (Davi et al 2006). Elle permet a priori de considérer des scénarios climatiques inédits, à long terme et, potentiellement, de représenter des effets de seuil et les ruptures de trajectoires. Les efforts de la communauté scientifique pour la prédiction de l'impact du changement climatique sur les forêts et leur fonction de puits de carbone ont permis de projeter et d'analyser les impacts potentiels de scénarios climatiques sur les grandes fonctions des écosystèmes forestiers (Loustau et al. 2005, 2007, Garcia-Gonzalo et al. 2007, Milne et Van Oijen, 2007). Mais, pour le territoire national, ces études ont été jusqu'à présent confinées à des scénarios particuliers comme le scénario SRES B2 qui est largement dépassé par les données récentes de concentrations atmosphériques (Canadell, 2007). Ces modélisations n'ont pas été accordées avec les scénarios de demande sylvicole d'une part et les scénarios de risques sanitaires (Robinet et al. 2007), de chablis ou d'incendie d'autre part, ce qui en restreint l'utilisation pour l'aide à la décision. Les effets des dépôts azotés (Magnani et al. 2007) ou d'ozone (Ollinger et al. 2002) ne sont pas pris en compte en dépit de leur importance potentielle. Ces limites sont liées d'une part à la nature et la disponibilité des données utilisées, notamment la résolution spatiale des scénarios climatiques (Gibelin et Déqué, 2003) et d'autre part aux limites des connaissances et des modèles disponibles. Une limite majeure des modèles biophysiques et biogéochimiques actuels réside ainsi dans la difficulté de représenter les processus déterminant les effets différés des évènements climatiques tels que sécheresse, canicule, stress ou dépôts d'ozone.

Ainsi, bien que l'on soit désormais capable de proposer des descriptions robustes du déplacement des aires géographiques potentielles des espèces forestières d'arbres, pathogènes et insectes en France en réponse à différents forçages climatiques (Bergot et al. 2004, Desprez-Loustau et al. 2007, Badeau et al. 2009, Battisti et al. 2005, Robinet et al. 2007), il n'existe pas d'approche proposant une intégration de ces différents effets dans les modèles de fonctionnement et de sylviculture.

Les connaissances et données disponibles aujourd'hui permettent de lever la plupart de ces restrictions. Plusieurs scénarios climatiques 2000-2100 dérivés des scénarios SRES sont aujourd'hui désagrégés et régionalisés sur le territoire métropolitain avec une résolution de 8 x 8 km, selon des approches complémentaires par le CNRM et le CERFACS. L'EFI et Alterra ont parallèlement développé des scénarios forestiers européens décrivant l'évolution à long terme de la demande en produits forestiers par grande région et type d'espèce (Nabuurs et al. 2007). Enfin, la série d'années 2002-2007 a connu plusieurs évènements extrêmes régionaux ou nationaux dont les impacts sur le fonctionnement des forêts ont pu être scrutés en temps réel et analysés de façon précise, tant dans leurs effets immédiats que dans leurs effets différés (Reichstein et al. 2006, Granier et al. 2007). Enfin, les premiers travaux développés sur les impacts du changement climatique sur les pathogènes et insectes ravageurs forestiers permettent aujourd'hui de passer à l'étape de la modélisation des dommages et risques spatialisés et de leur forçage climatique. Ceci permet d'envisager d'intégrer ces effets dans les modèles disponibles, et à terme, de simuler les impacts cumulatifs de la répétitivité de tels aléas climatiques et leurs interactions avec les risques sanitaires.

Les acteurs de ce secteur économique expriment une attente fortement couplée au progrès de la recherche dans ce domaine (IDF 2007, Legay et Mortier 2007, Roman Amat 2007). Le principal gestionnaire national, l'Office National des Forêts, identifie plusieurs questions clés concernant directement la recherche avec notamment le besoin d'informations régionalisées sur le changement climatique, l'identification des stations à risques, l'élaboration de modèles prenant en compte explicitement les variables climatiques et édaphiques, et de modèles de sylvicultures économes vis à vis de la gestion de l'eau, l'amélioration des connaissances sur les conséquences des dépérissements et des bioagresseurs...(extraits choisis).

La proposition FAST est une évolution nouvelle de ces recherches allant au devant de ces préoccupations. Elle a pour objectif une approche à haute résolution basée sur des scénarios intégrés climat/atmosphère/économie d'une part et d'autre part sur le développement et l'implémentation de nouveaux sous-modèles décrivant les effets immédiats et différés d'aléas climatiques et de dommages de pathogènes et insectes sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

### 1.3. Articulation avec les programmes régionaux, nationaux et européens

Le contexte national et européen de recherche sur les effets du changement climatique sur les écosystèmes terrestres s'articule principalement autour des appels à projets de l'ANR (programme « Vulnérabilité ») et du 7<sup>e</sup> Programme Cadre européen. L'ANR a suscité des projets de recherche relativement fondamentaux et assez homogènes sur le plan disciplinaire. L'Europe incite à une structuration de l'espace européen centré par groupes de discipline et visant à une compréhension des grands processus pour le support des politiques de réduction et atténuation internationales de émissions de gaz à effet de serre. Quant aux incitations régionales sur cette thématique, elles sont disparates, avec parfois, l'existence d'appels d'offres structurés et de dispositif incitatif de type plan « climat » incluant un volet « Forêt ». Il existe cependant une demande forte émanant de l'ensemble du secteur forêt-bois national pour disposer d'outils de support de décision intégrés et à haute résolution (IDF, 2007, Legay et Mortier, 2007).

Allant des géosciences et sciences du climat à l'écologie fonctionnelle, l'écologie des communautés, la sylviculture et l'économie forestière, la proposition FAST permet de regrouper plusieurs disciplines rarement associées dans ces projets ANR ou Européen, sur le même objet thématique, le secteur forestier national. Elle permettra d'organiser des scénarios intégrés du secteur forestier et de modéliser le fonctionnement et la production des forêts nationales à une résolution compatible avec un support d'aide à décision. Les participants de FAST étant acteurs voire coordinateurs de projets nationaux ou européens (liste en annexe et dans le profil des participants), le projet FAST permettra de structurer autour d'une thématique d'intérêt national les résultats et connaissances drainés depuis différentes communautés de recherche.

Le projet « FAST » s'inscrit donc dans un contexte national et Européen favorable où plusieurs projets connexes sont en cours de réalisation (Climator, Dryade, QDiv, CarboFrance). Ces derniers abordent le fonctionnement des écosystèmes au sens large et certains aspects relatifs à l'impact du changement climatique sur leur fonctionnement et leurs dysfonctionnements possibles. Néanmoins, aucun ne considère l'ensemble des écosystèmes forestiers Français et leur sensibilité ou vulnérabilité au changement climatique futur.

### 1.4. Autres projets ou collaborations conduits par les proposant sur le même sujet, notamment dans le contexte européen

Les partenaires du projet « FAST » ont des collaborations suivies pour la spatialisation des flux de CO<sub>2</sub>, et l'étude par l'observation et la simulation des impacts de la variabilité du climat sur les échanges d'eau, de carbone et d'énergie des écosystèmes terrestres. L'utilisation conjointe de modèles d'écosystèmes comme GRAECO, ORCHIDEE et leur calibration / évaluation avec des mesures de flux et des mesures biométriques a été initiée par l'appel d'offre GICC-1 dans le projet CARBOFOR. Les équipes du LSCE et de l'INRA-Bordeaux et Nancy, participantes au programme Européen CARBOEUROPE, ont ensuite œuvré sur plusieurs publications communes: impact de la sécheresse de 2003, sensibilité des flux de CO<sub>2</sub> aux bilans hydriques,... Une partie de ces études « biophysiques » sera poursuivie dans le cadre d'un nouveau projet Européen CarboXtreme.

En revanche, il n'y a pas d'appel d'offre Européen spécifique en cours dans le 7<sup>ème</sup> PCRD sur la forêt. Au niveau national, la structuration de la communauté qui sépare « physiciens », « forestiers », et « sciences du sol » en différents organismes et laboratoires ne facilite pas non plus les recherches sur des thématiques multidisciplinaires, comme le couplage entre gestion forestière et adaptation au changement climatique. Pourtant, les modèles biophysiques ont beaucoup progressé pour décrire la dynamique de la biomasse et du carbone dans les sols. On est passé d'outils globaux construits pour estimer des flux à des simulateurs plus précis de la dynamique du carbone dans les écosystèmes. Il reste cependant beaucoup à faire pour améliorer les paramétrisations des dommages consécutifs aux extrêmes, de la mortalité, du cycle de l'azote et de la stabilité de la matière organique du sol. Le projet « FAST » utilisera essentiellement les acquis de projets ANR sur les processus de la vulnérabilité forestière au changement climatique : CLIMATOR, DRYADE et du projet GICC-1 CARBOFRANCE afin d'améliorer les modèles existants.

En résumé, « FAST » en faisant le lien entre vulnérabilité, spatialisation des flux et de la croissance forestière, et scénarios de gestion, a un rôle d'intégration et de valorisation des connaissances fondamentales acquises dans le cadre de projets Européens et ANR. La liste de ces projets et leur bref descriptif est donnée dans l'annexe C.

## 2. Plan de recherche détaillé

### 2.1. Introduction

#### 2.1.1. Identification du consortium fournisseur de la réponse

Le travail proposé sera mené essentiellement par les scientifiques de l'INRA et du LSCE. Les scientifiques de Météo-France du CERFACS et de l'IFN seront impliqués pour leur expertise dans l'étude proposée. Les équipes du CERFACS et de Météo-France (CNRM) seront sous-traitants de l'INRA. Les membres du consortium travailleront en collaboration étroite garantissant ainsi la qualité scientifique et technique du travail réalisé. Comme mentionné précédemment, le consortium de chercheurs mobilisés autour ce projet a une expertise commune reconnue dans le thème des flux et bilans mesurés et modélisés de carbone et d'eau, sous climats actuel et futurs. Ils ont également une grande habitude de collaboration dans des projets en passés et en cours.

#### 2.1.2. Acronymes et abréviations

CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
IFN	Inventaire Forestier National
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

#### 2.1.3. Documents de référence

Les références utilisées dans ce document sont présentées en Annexe B, page 29.

### 2.2. Objectif

**L'objectif général du projet est « d'analyser les évolutions régionalisées de la forêt métropolitaine face aux aléas climatiques et biotiques, avec des scénarios de gestion forestière d'atténuation et d'adaptation ».** Pour atteindre cet objectif, on traitera les questions suivantes, dans un ordre plus ou moins séquentiel:

- ◆ Question 1 : Quels scénarios futurs cohérents peut on définir en intégrant l'évolution du climat, de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, dépôts N et O<sub>3</sub>), de la demande économique du secteur et de la sylviculture, avec une résolution suffisante pour le support d'aide à la décision ?
- ◆ Question 2 : Quelle sera l'effet direct de ces scénarios sur la forêt?
- ◆ Question 3 : Quel sera l'effet indirect du changement climatique via une modification du régime des incendies, des attaques de pathogènes et de ravageurs ?

L'approche suivie pour traiter ces questions est fondée sur la modélisation spatialisée des processus et des flux à une résolution spatiale fine de 8 km, égale à celle des scénarios climatiques futurs disponibles sur la France. L'échelle de temps ira de l'heure (réponse des processus biophysiques rapides) à la décennie (croissance de la forêt, effets de la gestion). On s'appuiera sur une plateforme de modélisation intégrée basée sur les modèles GRAECO et BILJOU, Fagacées (INRA) et ORCHIDEE (LSCE). Celle-ci servira de base pour spatialiser des connaissances plus avancées sur les modes de gestion et les impacts écologiques à moyen terme.

Une première innovation du projet est de travailler à une résolution spatiale suffisamment fine pour prendre en compte la plupart des hétérogénéités régionales du climat. Une résolution spatiale fine est particulièrement

importante pour les régions de montagne, et pour les transitions entre régimes de climat, et pour simuler l'hétérogénéité des sols. Une telle résolution est aussi compatible avec un calcul spatialisé de l'état initial des stocks et de la productivité, essentiel pour la prédiction future.

La deuxième innovation est dans notre proposition d'intégrer les changements d'aire de distribution des essences, des attaques de ravageurs et de pathogènes, et les scénarios sylvicoles dans un modèle ou une chaîne de modèle cohérente et de les projeter à l'échelle du territoire métropolitain. Cette partie du projet est exploratoire, et les attendus sont plus d'ordre qualitatif avec une première projection des futures vulnérabilités associées. Cette approche permettra toutefois de guider la décision en l'éclairant sur ces risques futurs.

Enfin, l'innovation principale du projet est de coupler des scénarios climatiques et une modélisation spatialisée des écosystèmes forestiers avec des scénarios sylvicoles: scénarios d'exploitation économique (bois-énergie, fibres, bois d'œuvre, bois noble), modèles de fonctionnement forêt et les scénarios de gestion (éclaircies/coupes) correspondants. On se basera sur les scénarios d'usage des sols du modèle EU-FASOM développé par IIASA par l'équipe de M. Obersteiner, une collaboration étant déjà établie dans le cadre de GHG-Europe avec IIASA. Ce modèle a déjà produit différents scénarios d'usage des sols pour l'ensemble de l'Europe en prenant en compte l'offre et la demande de surfaces cultivées et de ressources bois. Ces scénarios servent de référence pour la DG-Environnement. Pour comparer ces projections Européennes avec l'étude nationale de De Cara et al. (2008) qui fait référence, on utilisera un scénario central et un scénario alternatif produits par De Cara. Enfin, une simulation de sensibilité sera faite pour un scénario TCR régionalisé avec des surfaces en TCR fonction de l'évolution des prélèvements et des besoins en bioénergie.

Les questions mises en avant structurent la proposition en trois grandes parties scientifiques (correspondant à des « Lots ») avec une première étape consistant à rassembler les données relatives au système à étudier (lot 1), une deuxième étape où l'on consolidera les outils de modélisation et réalisera les différentes études de sensibilité proposées (lot 2), et enfin une étape où l'on intégrera spatialement les processus explicités (lot 3).

## 2.3. Programme de travail

### 2.3.1. Hypothèses

Les **modèles d'écosystème** incluent d'une part les principaux processus d'échange du système sol-forêt-atmosphère validés sur des séries temporelles allant de la journée à la décennie et d'autre part des schémas d'allocation du carbone et de croissance simples basés sur les invariants allométriques des espèces considérées. Nous faisons l'hypothèse que **l'utilisation de modèles d'écosystèmes relativement génériques permettra de proposer des simulations crédibles et cohérentes** de scénarios intégrés sur le fonctionnement et la production des forêts métropolitaines avec une résolution spatiale de 8 x 8 km. Cette hypothèse de travail suppose que les effets des scénarios, climat, sylviculture, pathogènes et insectes, porteront au premier ordre sur la disponibilité et l'utilisation des ressources limitantes pour la production et la croissance des arbres et non sur l'ontogénie de chaque espèce qui est sous fort contrôle génétique. Elle se base sur le constat que la majorité des espèces forestières françaises d'intérêt présente des temps d'adaptation génétique d'un à deux ordres de grandeur supérieurs à celui du changement climatique, hormis le cas des espèces à croissance rapide et durée de révolution faible (Eucalyptus, Pin maritime, où des changements génétiques de schéma d'allocation et croissance seront au besoin explorés).

### 2.3.2. Approches et outils de modélisation

L'approche conduite comprendra trois étapes principales:

Lots 1 et 2. Définition de scénarios complets 2008-2100. Mise au point de scénarios intégrés et cohérents comprenant un volet climatique (tendances, extrêmes et aléas), un volet atmosphérique (CO<sub>2</sub>, N, O<sub>3</sub>) un volet économique (demande en produits bois régionalisée) et un volet de sylviculture. Ces scénarios seront spatialisés à haute résolution (8 x 8 km) et constitueront le forçage pour les modèles de fonctionnement.

Lot 3. Développement et évaluation du plateau de modélisation spatiale complet. Ce plateau sera centré sur une chaîne de modèles de croissance et de fonctionnement des forêts (Graeco, Biljou, Fagacées) et sur le modèle générique ORCHIDEE (Krinner et al. 2005) qui fournira le support d'intégration et de spatialisation à haute résolution sur le territoire métropolitain. Cette approche combinant différents modèles a été déjà utilisée et évaluée pour la simulation de la productivité forestière et sa sensibilité au climat (Davi et al. 2006, 2007) ou pour la spatialisation du fonctionnement des écosystèmes forestiers ou agricoles sous

différents forçages climatiques. Dans le projet FAST plusieurs modules supplémentaires seront développés par les équipes INRA et LSCE (forestiers, pathologistes, entomologistes et écophysiologistes) afin d'implémenter une description réaliste et autant que possible validée des impacts des effets climatiques (tendances et événements rares), des dommages dus au pathogènes et insectes, des effets atmosphériques (dépôts d'azote et ozone) et leurs interactions avec les scénarios de conduite sylvicole. Ce développement s'appuiera sur les modèles déjà développés par les équipes participantes, INRA, LSCE (cf. annexe A).

Lot 3. Spatialisation. Les modules développés seront implémentés par le plateau ORCHIDEE pour une spatialisation à haute résolution sur le territoire métropolitain. La quantification aux échelles régionales et nationales des effets des changements climatiques et atmosphériques et leurs interactions avec la sylviculture d'une part et les dommages biotiques d'autre part sera calculée par analyse de sensibilité en référence à un forçage constant. Cette analyse débouchera sur une représentation spatialisée des changements de productivité et de fonctionnement ainsi que des principaux risques en matière sanitaire, déclinée par famille de scénarios.

Données mobilisées :

Les bases de données utilisées seront celles de l'Inventaire Forestier National<sup>1</sup>, de l'INRA (Infosol) seront utilisées afin de caractériser l'état initial (2008). Par ailleurs, les observations organisées par le réseau d'observation Santé de Forêts (DSF) serviront de base de validation pour les modèles de réponse aux stress biotiques et abiotiques.

### 2.3.3. Calendrier prévisionnel

Le projet proposé s'étend sur trois années à partir du démarrage des travaux envisagé début 2010. Le détail du calendrier est présenté dans la section 3.1.4, intitulée Planification des travaux.

## 2.4. Composition et descriptif des travaux

### 2.4.1. Lot 0 : Gestion du projet et coordination (INRA)

**Objectifs : gestion de projet répartie sur toute la durée de l'étude, incluant les travaux de suivi du projet destinés à garantir la bonne avancée de l'étude tout au long de son déroulement.**

Ce lot comprend les tâches suivantes :

- ◆ liaison avec un comité de pilotage du GICC
- ◆ surveillance du planning ;
- ◆ gestion de la liste des documents ;
- ◆ contrôle et archivage des livrables du projet ;
- ◆ organisation des réunions techniques avec le client et les partenaires;

Cette activité consistera également à :

- ◆ s'assurer de la conformité des travaux réalisés avec les exigences présentes dans l'APR GICC 2008 (troisième appel à projet du programme GICC 2) ;
- ◆ enregistrer les choix techniques effectués durant l'étude, ainsi que les raisons de ces choix.

### 2.4.2. Lot 1 : Etat initial des systèmes (LSCE)

**Objectifs: Etablir des synthèses régionalisées selon la maille de 8 x 8 km de l'occupation actuelle des sols et de l'état actuel des peuplements forestiers (distribution des espèces, structure d'âge, production,...) afin d'initialiser les modélisations.**

Une synthèse des données régionalisées descriptives de l'état actuel des forêts métropolitaines de plaine sera réalisée à partir des données de l'IFN (achat de données par cartes agrégées à 8 km), portant en particulier sur la distribution des espèces, des volumes sur pied, les types de peuplements (taillis sous futaie vs. futaie),

---

<sup>1</sup> un budget est prévu à cet effet par le participant INRA-Nancy

leur productivité et leur âge (en futaie). Une approche par grand type de forêts (feuillus vs. résineux vs. sempervirents) sera menée. Parallèlement, un état initial sera également établi pour une gamme d'espèces représentatives aujourd'hui (pins sylvestre, noir et maritime, chêne sessile, chêne pédonculé, hêtre...) ou potentiellement appelées à se développer selon certains scénarios socio-économiques (peuplier, eucalyptus...).

Parallèlement, les sols seront caractérisés selon plusieurs voies de régionalisation. Les caractéristiques des sols nécessaires aux paramétrages des modèles de productivité forestière seront définies et recherchées avec les partenaires d'Infosol (INRA-Orléans) : réserve utile, hydromorphie, pH, épaisseur, densité, caractéristiques hydrodynamiques... Cela sera rendu possible par le travail en cours dans le cadre du projet de base de données INRA qui doit compléter la base Donesol de ces propriétés et l'enrichir en profils de sols forestiers.

L'ensemble des profils de sols forestiers disponibles dans les bases de l'INRA InfoSol, ainsi que ceux dérivés du réseau systématique 16x16 km, seront utilisés pour fournir des caractéristiques agrégées à la maille 8x8 km ainsi que des estimations de leur variabilité locale. Cette estimation de la variabilité sera rendue possible par le croisement de la maille 8x8 km avec les bases de données cartographiques décrivant la répartition spatiale des sols de France. Ce travail sera réalisé pour les forêts de plaine métropolitaines à partir de l'utilisation de la Base de Données Géographique des Sols de France au 1 : 1 000 000 et des données de relevés sols disponibles à l'INRA InfoSol et à l'IFN.

En ce qui concerne les stocks de carbone des horizons holorganiques et de la couche 0-30 cm du sol, les données seront issues du programme RMQS. Ces stocks mesurés ponctuellement seront mis en relation avec des paramètres externes régionalisables (données climatiques, espèces, caractéristiques intrinsèques des sols) par des techniques de modélisation mathématique (Multiple Additive Regression Trees) afin de pouvoir les prédire sur la maille 8x8km.

La sévérité régionalisée des parasites pour les 20 dernières années sera évaluée en utilisant les données du Département de la Santé des Forêts (DSF). Plusieurs types de données seront utilisés : base technique DSF de mention de problèmes sanitaires forestiers et données issues des réseaux européen de niveau 1 ou plus spécifique tel que le réseau processionnaire du pin. La disponibilité et la méthodologie d'utilisation de ces bases ont déjà été explorées au cours de précédents contrats (Carbofor, Forest Focus).

### **2.4.3. Lot 2 : Définition des scénarios climatiques, sylvicoles et économiques (INRA)**

**Objectifs : Définir 1) un ensemble de scénarios climatiques futurs basés sur différents modèles de climat et différents scénarios économiques (émission de gaz à effet de serre) et 2) un ensemble de scénarios sylvicoles liés à la demande en bois pour différentes filières (bois d'œuvre, énergie,...) en liaison avec les scénarios de développement socio-économique envisagés à l'échelle de l'Europe.**

#### **2.4.3.1. Lot 2.1 : Scénarios climatiques et scénarios météorologiques (LSCE, CNRM, et CERFACS)**

**Objectif : Sélectionner un ensemble restreint de scénarios climatiques futurs pour le territoire national à haute résolution (8 km x 8 km), à partir de travaux réalisés au CERFACS et au CNRM.**

Différents scénarios climatiques globaux (réalisés dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison de modèles couplés CMIP3), ainsi que régionaux (réalisés par le CERFACS et Météo-France) ont été désagrégés à petite échelle sur la France (8 km x 8 km) par le CERFACS. Cette désagrégation utilise les propriétés régionales observées pour définir des types de temps caractérisés par des variables à grande échelle et associés à des distributions spécifiques des variables locales (température, précipitation) (Boé et al., 2006, JGR 111, D23106). La classification en type de temps d'un scénario basse résolution permet alors d'associer des conditions à plus fine échelle observée et ainsi de reconstituer celles ci pour le climat simulé.

En suivant cette méthodologie, le CERFACS a désagrégé :

- 15 simulations globales réalisées dans le cadre de l'AR4 du GIEC avec le scénario d'émission A1B, ce qui offre un large éventail de modèles de climat.
- 4 simulations régionales du modèle ARPEGE V4 avec différents scénarios d'émissions (Ref, A1B, A2 et B1)

Si toutes les simulations du GIEC prédisent une augmentation des températures en 2050/2100 et une diminution des précipitations (notamment en été) sur la France, l'amplitude des changements reste très

variable selon les modèles et selon les scénarios d'émissions. Il est donc crucial de pouvoir considérer plusieurs scénarios climatiques afin de mieux appréhender les différentes sources d'incertitudes. Pour cela, deux experts du CERFACS et du CNRM (sous contractants du projet) nous aiderons à :

- définir un choix restreint de scénarios contrastés (2 – 4) permettant de rendre compte des incertitudes actuelles sur les projections climatiques futures.
- Caractériser les possibles biais et erreurs de chaque scénario.
- analyser les prédictions futures en identifiant tendance et extrêmes climatiques.
- mieux caractériser l'incertitude liée aux différentes variables climatiques utilisée pour forcer les modèles d'écosystème (précipitation, température, humidité relative, minimum et maximum journaliers, etc.).

#### 2.4.3.2. Lot 2.2 : Scénarios sylvicoles et économiques (INRA)

**Objectifs : Définir différents scénarios de demande économique (bois-énergie, fibres, panneaux, bois d'œuvre) et les scénarios de gestion (éclaircies/coupes) correspondants.**

Les engagements européens<sup>2</sup> et nationaux<sup>3</sup> en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'augmentation du prix des énergies fossiles et la crise financière récente concourent à une mobilisation accrue et durable des ressources forestières pour des utilisations énergétiques dans les décennies à venir. De ce contexte marqué par une forte imprévisibilité, il ressort cependant les « constantes » fortes suivantes :

- Une progression de la demande en Europe dans toutes les filières de transformation et utilisation ; papier, produits de recyclage et résidus, panneaux et particules, sciage (UNECE-FAO, 2005).
- Un accroissement de la récolte en bois est prévu : 48 Mm<sup>3</sup> (+30%) en 2012 et 56 Mm<sup>3</sup> (+55%) en 2020 (Assises de la Forêt, M.A.P. 2008).
- Une utilisation accrue des résidus de sciage et de transformation (ceux-ci sont même parfois déjà déficitaires, *e.g.* en région Aquitaine)
- La part des produits énergie (plaquettes, pellets, connexes de scierie etc.) est en augmentation rapide.
- Une tendance à une régionalisation des circuits de transformation et d'utilisation de bois-énergie imposée par les coûts écologiques et économiques du transport est perceptible.
- La biomasse et biocarburants sont supposés fournir 8 à 50% des carburants liquides nécessaires au transport (Conseil Général des Ponts et Chaussées, 2006).

Nous proposons dans le cadre de FAST de développer des scénarios régionalisés de demande en produits forestiers déclinés par espèces (ou types d'espèces conifères / feuillus) à partir des scénarios du modèle EFISCEN. Trois familles de scénarios seront considérées :

##### Scénario Intensif (I) :

Ce scénario correspond au scénario SRES A1, un prix du pétrole élevé, une forte demande économique, des augmentations rapides des concentrations en gaz à effet de serre et du réchauffement en dépit des mesures de limitation prises car les pays émergents en forte croissance comme la Chine, l'Inde, le Brésil annulent les efforts des pays « annexe A ». Ce scénario se décline en France par le couplage accru entre gestion des forêts et la demande économique en produits, avec par exemple, le développement des filières bois-énergie (+20 Mm<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> en 2020), croissance de la demande en bois d'œuvre (2% an<sup>-1</sup>, résineux, 0.7% feuillus). Il impacte le fonctionnement des écosystèmes avec un raccourcissement des âges d'exploitation, l'amélioration de la productivité physique et chimique des milieux, la mise en exploitation de ressources précédemment non rentables. Il est susceptible d'entraîner une décapitalisation et donc une perte nette en carbone tant dans la biomasse que dans le sol.

##### Scénario Standard (S) :

---

<sup>2</sup> le paquet 3 x 20 à l'échéance 2020 : réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, 20% d'énergies renouvelables dans le panel des énergies primaires et 20% d'accroissement de l'efficacité des systèmes énergétiques.

<sup>3</sup> Grenelle de l'Environnement avec notamment un fonds de 100 M€ dédié au développement du bois énergie et à la mobilisation des ressources forestières (ComOp 16). Division par quatre des émissions de GES nationales en 2020 (de Boissieu 2006).

Ce scénario serait cohérent avec la famille de scénarios A2 qui correspond le mieux à la trajectoire observée depuis 1990 (Canadell et al. 2007). Il se traduit par accroissement de la demande en sciage (surtout ciblée résineux et une stagnation pour les feuillus) et de la demande en fibres (1.2% an<sup>-1</sup> résineux), progression en bois-énergie atteignant une augmentation nette de + 13Mm<sup>3</sup> an<sup>-1</sup> en 2020. Il est cependant moins drastique en intensification que le précédent.

#### **2.4.4. Lot 3 : Modélisation : évaluation, analyse et développement des modèles (LSCE)**

##### **2.4.4.1. Lot 3.1 : Analyse et modélisation des effets abiotiques (sécheresse, température, ozone) (INRA Bordeaux, INRA Nancy, LSCE)**

**Objectifs : Développer un ensemble de sous modèles décrivant les effets de stress abiotiques sur le fonctionnement et la croissance des arbres par une voie d'approche hybride tirant profit des connaissances fines acquises sur certaines familles de processus et sur les invariants allométriques et dendrométriques connus des espèces considérées. On ciblera les stress hydrique, thermique, d'exposition à l'ozone et les interactions avec l'âge des arbres et leur statut nutritionnel, en recherchant à qualifier les effets immédiats et les arrière effets sur réserves et sur les composantes de la croissance primaire et secondaire.**

##### Approches de modélisation mécaniste

Les modèles utilisés jusqu'à présent pour l'analyse des effets biotiques de scénarios climatiques sur les forêts sont limités aux impacts directs immédiats sur les fonctions primaires du fonctionnement, l'assimilation de CO<sub>2</sub>, la respiration, le fonctionnement stomatique et le bilan hydrique, etc. qui sont à la fois les mieux compris et les plus documentés. Ces données ont permis d'établir des projections de tendances spatialisées à basse résolution suivant quelques scénarios aujourd'hui dépassés et pour les grandes fonctions primaires: production primaire brute et nette, respiration brute de l'écosystème, bilan de carbone (CO<sub>2</sub>), évapotranspiration. La croissance et la production en volume de bois commercial n'ont pu être abordés que dans quelques cas simples et bien documentés comme le Pin maritime, le hêtre et le chêne sessile (Loustau et al. 2005, 2007). Les recherches plus récentes confirment cependant l'importance des arrière effets et des effets indirects sur le fonctionnement des arbres forestiers tels qu'ils sont mis en évidence depuis plusieurs décennies par les études dendrochronologiques (Becker, 1988).

Pour le projet FAST, il s'agira de dresser une synthèse des résultats observés par l'ORE FORET (réseau de sites instrumentés), le projet GICC « CARBOFRANCE » et des expérimentations développées dans le cadre du projet européen CARBO- EXTREME et des projets ANR comme VulNOz (impacts ozone) et CATS (allocation du carbone) pour développer un module simple de croissance primaire et secondaire et de gestion des réserves carbone à même de rendre compte des principaux arrière effets observés à la suite des épisodes de canicule de l'été 2003, l'automne 2005 (Ciais et al. 2005, Reichstein et al. 2006, Piao et al. 2008) et de sécheresses comme la série des années 2002 à 2006. Les résultats anciens mettant empiriquement en relation les données climatiques et la largeur de cernes annuels sur des séries temporelles remontant au 19<sup>e</sup> siècle seront aussi exploités pour caler ces modèles (Becker, 1988).

Cette activité sera organisée sous forme d'ateliers collectifs de travail d'une durée de trois à cinq jours où les principaux chercheurs et modélisateurs du projet seront réunis après que la synthèse des informations pertinentes ait été réalisée (mois 12 à 18). L'échange des chercheurs post doc opérateurs des modèles recrutés par FAST entre laboratoires participants sera également organisé et planifié dès leur recrutement. Dans ce lot, l'INRA Nancy sera plus particulièrement en charge de la modélisation des espèces feuillues et du stress sécheresse et l'INRA Bordeaux des espèces conifères et du stress ozone (Lamaud et al. 2002, Deckmyn et al. 2007).

##### Approche de modélisation de niche

De façon complémentaire aux approches mécanistes, une approche de modélisation, de type niche, sera appliquée à des groupes fonctionnels. Les modèles de niche établis jusqu'ici espèces par espèce ont des limites fortes dues au manque de connaissances sur l'écologie de chaque espèce. Des approches par groupes fonctionnels ont été développées récemment pour pallier ce déficit. Mais ces groupes étaient basés jusqu'à maintenant sur les seuls ligneux. Nous projetons dans le présent projet de construire des groupes de réponse climatique pour les 800 espèces de la flore du sous-bois des forêts françaises en prenant en compte la

contrainte sol. Cette approche phytogéographique devrait fournir des groupes d'espèces et un zonage du territoire particulièrement adéquats pour modéliser la réponse de la végétation aux variations climatiques. Dans un second temps, on extrapolera ces aires de distribution phytogéographique dans le cadre des scénarios climatiques futurs. La distribution des principales essences de la forêt française sera enfin rattachée aux groupes phytogéographiques.

#### **2.4.4.2. Lot 3.2 : Analyse et modélisation des ravageurs cibles (oïdium du chêne, *Diplodia pinea*, processionnaire du pin et tordeuse du mélèze) ; interactions biotiques – abiotiques (INRA Orléans et Bordeaux/Nancy)**

Dans un précédent projet (Carbofor), nous nous sommes attachés à modéliser l'enveloppe climatique d'un certain nombre d'espèces de champignons parasites forestiers, parmi les plus importants en France, en testant la sensibilité à un scénario de changement climatique (Desprez-Loustau et al 2007). Selon la disponibilité en données de distribution de ces espèces nous avons utilisé une approche statistique (modèles logistiques) ou le modèle générique Climex (Sutherst 1999) pour décrire l'impact direct du climat sur les agents pathogènes. Ces approches n'ont que marginalement abordées les interactions entre physiologie de l'hôte et agent pathogène. Dans le présent projet, nous proposons une approche différente : modéliser de façon mécaniste l'interaction entre hôtes et parasites en relation avec le climat pour inférer l'effet de scénarios de changement climatique sur la vulnérabilité des arbres aux parasites, et *in fine* sur l'impact de ces parasites sur le fonctionnement des peuplements. Cette approche permettrait de mieux rendre compte des effets de seuils et une extrapolation plus fiable dans un climat différent.

La modélisation mécaniste de l'interaction entre hôtes et parasites fongiques en relation avec le climat sera développée sur 2 maladies importantes affectant des essences forestières majeures et présentant des caractéristiques complémentaires : 1. L'oïdium du chêne est un parasite foliaire biotrophe dont l'impact est conditionné par la concordance phénologique avec son hôte ; 2. *Diplodia pinea* est un parasite des pins dont la sévérité est fortement conditionnée par la physiologie de l'hôte, et en particulier par son statut hydrique. La sévérité de l'oïdium du chêne est généralement limitée par la faible disponibilité de l'inoculum durant le débourrement des chênes. Cette disponibilité est sous la forte dépendance de la synchronisation entre débourrement de l'hôte et production d'inoculum par l'agent pathogène. Des données sur la phénologie de la production printanière d'inoculum d'ascospores sont en cours d'acquisition dans le cadre du projet Dryade. Nous proposons de développer un modèle sur la phénologie de l'agent pathogène et de le coupler à un modèle de phénologie du débourrement des chênes (données Renecofor, modèles déjà décrits dans la littérature, cf Shaber and Badeck 2003, Chuine et al 2008), la synchronisation hôte-parasite fournissant un indice de risque d'épidémie sévère.

Les dépérissements des pins à *Diplodia pinea* sont fortement conditionnés par l'occurrence de sécheresses. Nous proposons d'utiliser les sorties du modèle BILJOU développée dans l'unité EEF de l'INRA-Nancy pour estimer les déficits hydriques subis par les pins noirs et pins sylvestres dans la période 1989-06 en utilisant des données météorologiques et sols régionalisées. Cette modélisation sera réalisée sur les zones exposées déjà identifiées par les signalements de la base du département de la Santé des Forêts.

Pour les deux maladies, l'objectif est un modèle de vulnérabilité des peuplements (chênes/pins) basée sur l'interaction hôte-parasite, avec des sorties spatialisables sur la France. Les sorties de ces modèles seront confrontées aux données sur la sévérité des épidémies d'oïdium et de *D. pinea* acquises précédemment (lot1). Elles permettront pour le modèle *D. pinea* /Pins de déterminer les seuils de déficits hydriques subis par les pins qui déclenchent le dépérissement. Dans le cas de l'oïdium, la relation entre sévérité et synchronisation hôte-parasite sera établie.

Une troisième étape, après la définition des enveloppes climatiques des parasites et les cartes de vulnérabilité aux maladies serait l'établissement de modèles de fonctionnement des peuplements intégrant les effets des parasites en interaction avec le climat. Les parasites foliaires, comme l'oïdium, sont ceux pour lesquels ces effets sont les mieux définis, avec schématiquement (1) une perte de surface foliaire photosynthétiquement active, (2) une exportation de composés carbonés et azotés par les spores. A titre exploratoire nous entreprendrons une réflexion entre écophysiologistes et pathologistes afin de développer une fonction de dommage décrivant les effets de l'oïdium (plus généralement parasites foliaires) et intégrable dans un modèle de fonctionnement des peuplements, de type Graeco. Des dispositifs expérimentaux de suivi de l'oïdium des chênes pourront fournir un certain nombre de données de validation.

Les autres organismes ravageurs seront considérés au-travers des modèles processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) et tordeuse du mélèze (*Zeiraphera diniana*). La processionnaire du pin est un

des plus importants ravageurs forestiers actuels, avec un caractère urticant additionnel qui en fait un sérieux problème de santé publique en France, tandis que la tordeuse affecte de manière cyclique l'ensemble des peuplements de mélèze sur l'arc alpin avec un rôle déterminant des relations phénologiques arbre-insecte, fournissant ainsi un bon exemple comparatif à l'oïdium.

Nous avons montré que la hausse des températures hivernales depuis les années 1970 avait induit une expansion de la processionnaire vers le Nord et en altitude (Battisti et al. 2005, Robinet et al. 2007). Cette avancée a d'ailleurs été retenue par l'ONERC comme indicateur du changement climatique. De premiers modèles d'expansion, de type réaction- diffusion, ont été développés pour le Sud du Bassin Parisien, basés sur les capacités de dispersion naturelle des adultes de processionnaires, la distribution des arbres- hôtes dans et hors forêts, et les capacités de survie hivernale sous différents scénarios climatiques (Robinet 2006). Cependant, de tels modèles ne prennent en compte ni l'effet du changement climatique sur la vulnérabilité des arbres-hôtes et sur la cyclicité des dégâts, ni la possibilité de transport à longue distance par l'activité humaine, qui s'avère nettement plus importante que prévue pour l'apport de populations additionnelles et la colonisation de nouvelles forêts (eg un foyer découvert en 2008 en Alsace à 200 km du front le plus proche), et ni les changements possibles d'hôtes (passage de plus en plus important sur Sapin de Douglas) . Nous nous proposons donc d'intégrer ces éléments dans un nouveau modèle, plus général, d'expansion et de pullulations de la processionnaire, à l'échelle de la France métropolitaine, avec des scénarios et cartes de risque régionalisés Il importera en particulier de prendre en compte, outre l'évolution saisonnière moyenne du climat sur le long terme, la fréquence des événements extrêmes, susceptible d'avoir des effets contrastés selon les régions, ou autrement dit selon les stades phénologiques de l'insecte, comme la canicule de 2003 qui a conduit à un effondrement des populations dans le Bassin parisien mais à une expansion historique dans les Alpes (Battisti et al., 2006). Ce travail sera adossé à un autre projet financé par l'ANR, URTICLIM 2008-2001, qui entend modéliser l'expansion de l'insecte vers les zones urbaines.

Dans le second modèle de ravageur, le développement de l'insecte est phénologiquement dépendant de celui de l'arbre-hôte, les jeunes larves de tordeuses devant éclore en même temps que le nouveau feuillage de mélèze apparaît. Cette coïncidence n'était jusqu'alors effective qu'à une certaine altitude (1850m), où les pullulations de l'insecte étaient optimales et affectaient les peuplements tous les 8-10 ans (Dormont et al., 2006). De premiers décalages dans les pullulations dans l'espace et/ou le temps suggèrent un déplacement en altitude de cette synchronie, l'insecte et l'arbre répondant différemment au réchauffement. L'insecte pourrait ainsi tendre à affecter des forêts relativement indemnes précédemment avec des conséquences sanitaires importantes. En parallèle à ce qui est proposé pour les pathogènes, nous nous proposons donc de développer un modèle sur la phénologie de l'insecte et de le coupler à un modèle de phénologie du débourrement des mélèzes à différentes altitudes, la synchronisation hôte- insecte fournissant là aussi un indice de risque sévère de dégâts.

#### **2.4.5. Lot 4 : Impacts régionalisés à l'échelle nationale (LSCE)**

**Objectifs : Estimer l'impact du changement climatique sur la productivité des écosystèmes forestiers et leur bilan de carbone, à l'échelle nationale, en combinant sensibilité aux facteurs biotiques et abiotiques (analysée dans le lot 3) et scénarios climatiques futurs. Pour les principales espèces considérées, nous produirons des cartes de sensibilité à l'horizon 2050 et 2100 à ces différents facteurs afin d'apporter des éléments de réponse concrets pour une estimation de l'évolution des potentiels de production des forêts de plaine selon les régions et de vulnérabilité de certaines espèces. Une analyse d'incertitudes sera conduite grâce à l'utilisation des différents scénarios climatiques. Ces résultats seront autant d'éléments pour une adaptation des pratiques sylvicoles futures au changement climatique.**

##### **2.4.5.1. Lot 4.1 : Changement de fonctionnement et de productivité des écosystèmes forestiers (LSCE, INRA)**

**L'objectif général est d'étendre les différentes modélisation et développements conceptuels définies dans le Lot 3 à l'ensemble de la France en utilisant toute l'information spatiale des scénarios climatiques.**

On appliquera le modèle ORCHIDEE forcé par des champs climatiques issus des scénarios régionalisés (Lot-2.1). L'état initial des stocks de C dans le sol et la biomasse (qui sera décrite en classes d'âges) sera prescrit dans chaque région avec les données actuelles, dont la synthèse est faite dans le Lot-1, et ensuite distribué sur une grille à 8 km avec des règles simples. Des simulations factorielles seront effectuées pour séparer l'effet du climat, du CO<sub>2</sub> et de la gestion. On estimera pour chaque région et différentes périodes (2010 ;

2020 ; 2050 ; 2100) les effets du climat et du CO2 sur la productivité et les stocks. En particulier, on étudiera si les effets de gestion et ceux du climat+CO2 sont simplement additifs, ou s'ils sont corrélés avec des rétroactions dont le signe et l'amplitude seront estimées pour chaque région. Les résultats de ces simulations seront aussi interprétés en terme d'adaptation et de sensibilité de la production régionale à l'interaction gestion – changement climatique.

#### **2.4.5.2. Lot 4.2 : Risques en interaction avec les aléas climatiques**

**Objectifs : spatialiser les risques potentiels de pathogènes et insectes modèles, leur interaction avec l'état physiologique des peuplements et proposer une quantification régionalisée des pertes potentielles de production.**

De façon comparable au lot précédent on implémentera les modèles d'interaction fonctionnement – ravageurs mis au point et analysés dans le lot 3.2 sur la France entière à partir des scénarios climatiques et sylvicoles développés. Dans un premier temps, on utilisera notamment les descripteurs de l'état des peuplements (anomalie du cycle phénologique, indice de stress hydrique, structure d'âge et densité) pour affiner les enveloppes d'extension spatiale des espèces pathogènes et insectes modèles et leur pullulation.

On développera dans une deuxième étape la modélisation des dommages potentiels en termes de cycle du carbone et de production commerciale. Cette étape ambitieuse constituera un des aboutissements les plus originaux du projet en même temps qu'elle apportera un élément de réponse important aux préoccupations des gestionnaires. Par souci de réalisme, elle est proposée dans le projet FAST à titre exploratoire, puisqu'elle suppose un accomplissement sans faille et sans retard de l'ensemble des autres étapes dans un calendrier de travail assez contraint. Elle sera traduite à son terme en cartes de vulnérabilité à haute résolution permettant de bien identifier l'extension spatiale future de zones à risque.

#### **2.4.6. Lot 5 : Intégration et application pour l'opérationnel**

##### **2.4.6.1. Lot 5.1 : Restitution aux acteurs**

**Objectifs : Communiquer les résultats scientifiques principaux de « FAST » aux divers acteurs nationaux impliqués dans la gestion et l'exploitation des ressources forestières.**

Cette tâche se composera essentiellement de l'organisation d'un colloque final de restitution aux acteurs dont l'organisation devra être prise en charge en dehors du projet FAST. Une manifestation de type colloque international organisé avec le GIP ECOFOR et le GICC sera proposée avec un éventuel élargissement à une audience internationale sur le modèle de la journée « Forêts et changement global » organisée par le GIP Ecofor pour présenter les résultats du projet CARBOFOR et de projets connexes le 16 décembre 2006.

### 3. Organisation de l'étude

#### 3.1.1. Structure du projet

L'organisation du projet est représentée sur la figure ci-dessous.

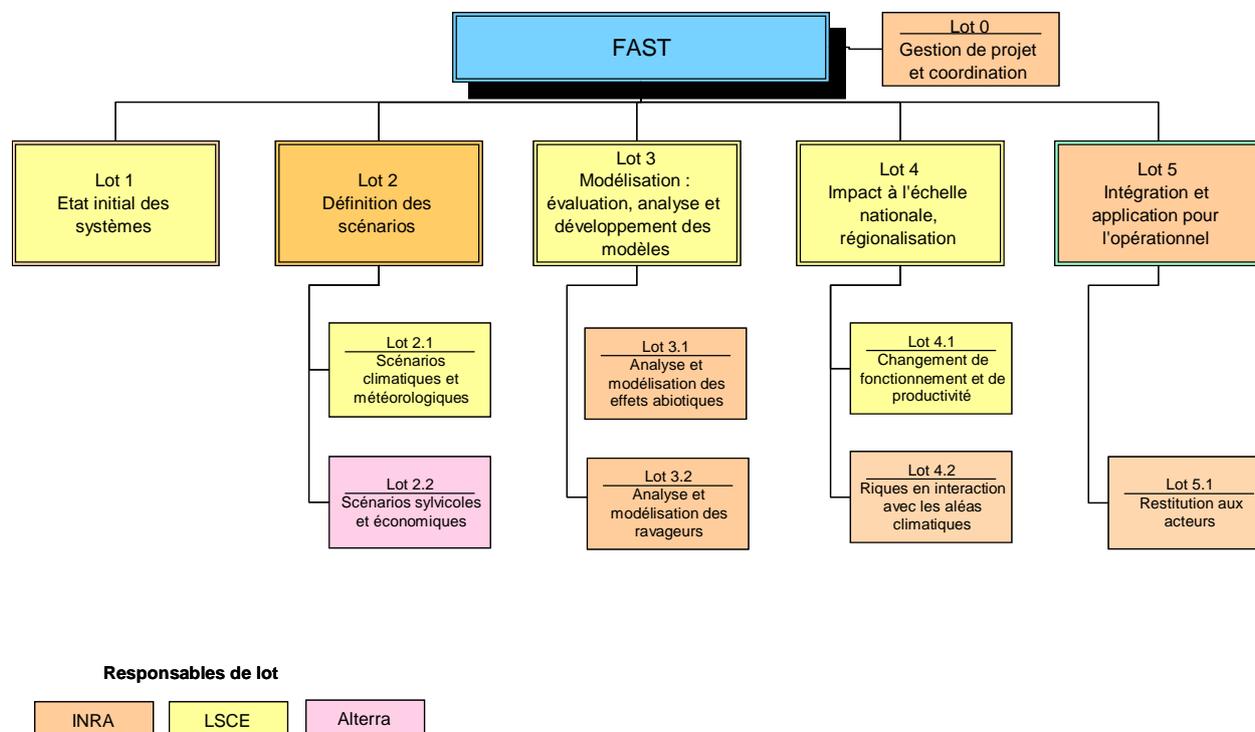


Figure 1 : Organisation de l'étude

#### 3.1.2. Consortium

Le consortium mobilisé autour de cette étude est composé des experts scientifiques du LSCE, de l'INRA et du CNRM/Météo-France.

Responsable du projet :

André Granier (INRA)

adjoint : Denis Loustau (INRA)

##### 3.1.2.1. Partenaire 1 : Ecologie et Ecophysiologie Forestières, INRA – UHP, Nancy

**André GRANIER**, Directeur de Recherche et Directeur de l'unité Ecologie et Ecophysiologie Forestières, UMR 1137, INRA – UHP Ecophysiologiste, spécialiste des bilans hydrique et de carbone, est impliqué dans des projets nationaux et internationaux (ANR Dryade, GICC-CarboFrance, AIP Ecoger, Carboeurope-IP). Il a mis en route et développé le site-atelier de Hesse, l'un des plus anciens dans le monde. Il a réalisé des travaux récents sur les conséquences des sécheresses sur le fonctionnement des forêts européennes, sur la variabilité interannuelle des bilans de carbone et de la croissance des arbres. Auteur de 122 articles publiés dans des revues de rang A.

**Nathalie BREDA**, Directrice de Recherches au sein de l'équipe Phytoécologie, elle est à la fois forestière et ecophysiologiste, spécialisée dans les dysfonctionnements forestiers. Elle coordonne le programme Dryade et anime le thème Vulnérabilité du RMT « Forêt face au changement climatique ». Elle est impliquée dans l'analyse de dépérissements forestiers d'origine climatiques et biotiques, en couplant des approches rétrospectives (dendrochronologiques) et mécanistes. Elle anime également un axe de recherche sur le rôle de la gestion du carbone dans les effets différés des contraintes de type sécheresse et – ou défoliation.

**Jean Luc DUPOUEY**, Directeur de recherches et responsable de l'Equipe Phytoécologie Forestière. Il est impliqué dans divers projets ANR (QDiv, Dryade, Recover) et plus particulièrement dans les projets « Biodiversité et gestion forestière » du GIP Ecofor. A ce titre, il coordonne le projet *Corylus* sur l'étude des relations biodiversité-structures paysagères.

### 3.1.2.2. Partenaire 2 : Unité EPHYSE, INRA Bordeaux

**Denis LOUSTAU**, Directeur de Recherches, Directeur de l'unité EPHYSE, BP81, F-33883 Villenave d'Ornon, cedex, France, tel 33+5 57 12 24 15. D. Loustau, écophysiole, est impliqué dans plusieurs projets européens, ANR et GICC sur l'impact du climat sur le cycle du carbone en forêt, il fait partie du RMT « Forêt face au changement climatique »

**Eric LAMAUD**, Chargé de Recherches, micrométéorologiste, est notamment impliqué dans le projet ANR VulnOZ sur la vulnérabilité de couverts végétaux à l'exposition à l'ozone.

**Alexandre BOSCH**, ingénieur de Recherches, ingénieur forestier, est impliqué dans plusieurs projets européens, ANR et GICC sur l'impact du climat sur le cycle du carbone en forêt, il est le principal développeur du modèle GRAECO actuellement.

**Jean-Michel CARNUS**, Ingénieur GREF, est vice président du pôle de compétitivité « Pin maritime » de la Région Aquitaine. Il participera au projet pour l'expertise de scénarios de sylviculture du pin maritime.

**Marie GUILLOT**, Doctorante, développe le couplage d'un modèle SVAT forestier et d'un modèle hydrologique distribué, MODFLOW et son application à la modélisation de bassins versants forestiers du Sud Ouest.

**Virginie MOREAUX**, Doctorante, développe une approche de modélisation des échanges de couvert forestier à croissance rapide basée sur les modèles GRAECO et MEAESTRA dans le cadre d'un projet de la fondation TUCK 'ENERBIO 2008'. Elle est encadrée en cotutelle par D Loustau, A. Bosch et B. Medlyn, développeur du modèle MAESTRA, université McQuarie, Sydney.

### 3.1.2.3. Partenaire 3 : Unité BIOGECO, INRA - Bordeaux

**Marie-Laure DESPREZ-LOUSTAU** est directrice de recherche à l'INRA, spécialiste de l'épidémiologie des maladies d'arbres forestiers. Son programme depuis plusieurs années concerne les effets attendus du changement global, principalement invasions biologiques et changement climatique, sur ces maladies, avec participation à de nombreux projets : projet GICC 2003 Carbofor (coordination du volet maladies), ANR Dryade (en cours), projets européens DAISIE 2004-2008 (coordination du volet champignons invasifs), ForThreat 2007-2008 et Pratique 2008-2011, ANR Emerfundis 2008-2010 (coordination du WP Base de données).

### 3.1.2.4. Partenaire 4 : Unité IAM, INRA - Nancy

**Benoit MARCAIS**, dirige l'équipe de pathologie forestière de l'UMR1136 IaM (Interaction Arbre Microorganismes) qui étudie l'émergence de nouvelles maladies affectant les arbres en milieu naturel, avec un programme en particulier sur l'impact du changement climatique. Il participe à différents programmes européens sur émergence de maladie et changements globaux (Forthereat, Baccara).

### 3.1.2.5. Partenaire 5 : INFOSOL, INRA - Orléans

**Dominique ARROUAYS** est ingénieur de recherches (IRHC) à l'INRA depuis 1983. Il dirige l'Unité InfoSol. Ses recherches portent sur la distribution spatiale et l'évolution de la qualité des sols, en particulier du carbone organique. Il est impliqué dans plusieurs programmes européens portant sur la cartographie et la surveillance des sols.

**Manuel MARTIN** est ingénieur de recherches (IR2) à l'Unité InfoSol depuis 2005. Ses recherches portent sur la modélisation spatialisée des sols et de paramètres d'intérêt particulier (carbone, propriétés physiques).

**Claudy JOLIVET** est ingénieur de recherches (IR2) à l'INRA InfoSol depuis 2001. Il est le responsable des programmes français de surveillance de la qualité des sols.

**Nicolas SABY** est ingénieur d'étude (IE2) à l'INRA InfoSol depuis 2002. Il est chargé du programme national « Base de Données d'Analyses de Terre » et mène des recherches en analyse spatiale et temporelle de la qualité des sols.

### 3.1.2.6. Partenaire 6 : Unité Zoologie Forestière, INRA - Orléans

**Alain ROQUES**, est Directeur de Recherche à l'INRA et directeur de l'Unité de Zoologie Forestière. Entomologiste de formation, il a participé à plusieurs projets européens concernant les relations entre insectes et changements climatiques (PROMOTH- 2000-2003; ALARM- 2004-2009 ; FORTHREATS- 2007-2008 et PRATIQUE 2008-2011). Il coordonne en ce moment le projet ANR « URTICLIM » 2008-2011 consacré à l'expansion de la processionnaire du pin dans les zones urbaines avec le changement climatique. Il a dirigé les sessions « Invasions Biologiques et changement climatique » lors du récent congrès mondial d'Entomologie à Durban (Juillet 2008) et du Congrès Européen d'Ecologie à Leipzig (Septembre 2008)

**Christelle ROBINET-MAKDOUD** est Chargée de Recherches INRA. Mathématicienne, elle a obtenu un doctorat de l'EHESS Paris spécialité « Mathématiques et Applications aux Sciences de l'Homme » avec comme sujet « Modélisation mathématique des phénomènes d'invasion en écologie : exemple de la chenille processionnaire du pin ». Elle a réalisé plusieurs postdocs aux USA notamment dans les laboratoires de Andrew Liebhold et Ottar Björnstadt, spécialisés dans la modélisation mathématique des populations d'insectes en réaction au changement climatique.

### 3.1.2.7. Partenaire 7 : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-LSCE)

**Philippe CIAIS**, ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique (CEA-LSCE) interviendra en tant qu'expert de renommée internationale sur le fonctionnement des écosystèmes continentaux. Il est coresponsable de nombreux projets Européens dont CarboEurope, CarboExtreme, et ICOS.

**Philippe PEYLIN**, chercheur au CNRS, possède une expertise dans la modélisation du cycle du carbone pour les écosystèmes terrestres. Il coordonne un projet en cours du GICC, CarboFrance.

**Nicolas VIOVY**, ingénieur au Commissariat à l'énergie atomique (CEA-LSCE) sera responsable des développements du modèle ORCHIDEE pour ce projet.

**Valentin BELLASSEM**, thésard au LSCE, travaille sur l'amélioration du modèle ORCHIDEE pour les écosystèmes forestiers avec l'inclusion de pratiques sylvicoles ainsi que d'une structure en classes d'âges.

### 3.1.2.8. Sous-traitance

#### 3.1.2.8.1 Equipe CERFACS

**Laurent TERREY**, chercheur au CERFACS, fournira l'expertise scientifique nécessaire à l'utilisation des scénarios climatiques futurs, désagrégés par le CERFACS à une échelle de 8 Km pour la France.

#### 3.1.2.8.2 Equipe CNRM

**Michel DEQUE**, chercheur au CNRM, interviendra en qualité d'expertise scientifique sur l'utilisation des prévisions climatiques et de leurs incertitudes à l'échelle de la France, en partenariat avec L. Terray du CERFACS.

### 3.1.3. Tableau récapitulatif de la responsabilité de chaque partenaire

Lot de travaux	Responsable	participants
Lot 0	INRA Bordeaux	
Lot 1	LSCE	3,5,7
Lot 2	7	
<i>Lot 2.1</i>	7	Cnrm, Cerfacs
<i>Lot 2.2</i>	2	2,7
Lot 3	7	
<i>Lot 3.1</i>	7	5,1,2
<i>Lot 3.2</i>	2	1,7
Lot 4	LSCE	
<i>Lot 4.1</i>	LSCE	2,5
<i>Lot 4.2</i>	INRA Bordeaux	tous
Lot 5	INRA Bordeaux	
<i>Lot 5.1</i>	INRA Bordeaux	tous

### 3.1.4. Planification des travaux

#### 3.1.4.1. Démarrage des travaux

La date de démarrage des travaux est fixée au 4 janvier 2010.

#### 3.1.4.2. Durée

La prestation s'étend sur trois années à partir du démarrage des travaux.

### 3.1.4.3. Planning

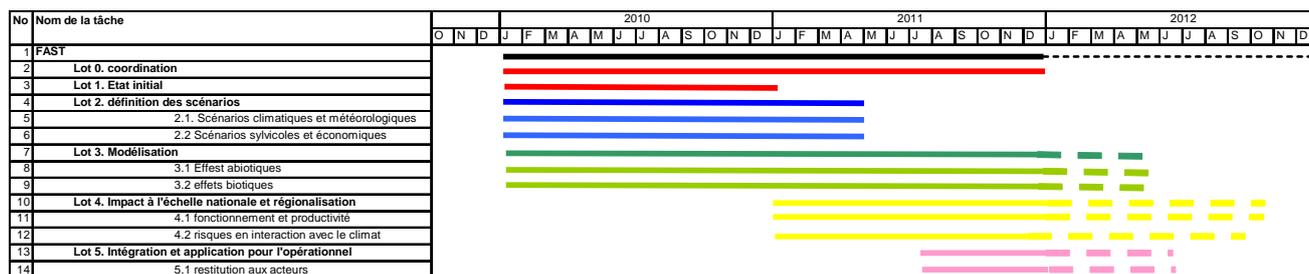


Figure 2 : Planification de l'étude.

### 3.1.4.4. Réunions

Les réunions prévues au cours de l'étude sont :

une réunion de démarrage, fixée au 4 janvier 2010 ;

deux réunions annuelles d'avancement (10 janvier 2011 et 9 janvier 2012) ;

une réunion finale (17 décembre 2012).

Chaque réunion s'effectuera en présence de tous les partenaires ainsi qu'une personne invitée du MEEDDAT. Les supports de la réunion seront distribués en début de séance ; le compte rendu pris en séance sera validé et signé par les responsables puis distribués par voie électronique aux participants et destinataires supplémentaires. En cas de besoin spécifique, des réunions d'opportunité pourront être organisées afin de discuter de points particuliers entre partie ou ensemble des partenaires. Les réunions seront autant que possible organisées par voie électronique (vidéo conférence). Un atelier de travail opérationnel réunissant les participants impliqués dans la construction des modèles sera organisé au cours de la première année afin de permettre aux chercheurs permanents et au recrutés sur contrat pour le projet une appropriation commune des différents algorithmes, la conceptualisation des nouveaux processus intégrés dans les modèles et la définition du programme de travail opérationnel et des publications communes sur ce domaine du projet.

### 3.1.5. Fournitures

Le projet fournira les documents suivants :

A l'issue de chaque réunion du projet :

- Les supports de présentation et les compte rendus de chacune des quatre réunions du projet

A la fin du projet :

- Un rapport final décrivant les travaux effectués et les résultats de l'étude
- Des résumés pour décideurs

## 4. Expérience et moyens des équipes dans le domaine considéré

---

### 4.1.1. Référence de chaque équipe relative à l'étude

#### 4.1.1.1. Equipe INRA

L'équipe de l'INRA est présentée dans le §3.1.2. Ci-dessous se trouve une sélection de publications récentes en lien avec le sujet.

- Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2008, Climate change and french tree species biogeography, CARBOFOR Project, final report. ouvrage sous presse.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A. & Larsson S. 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6), 2084–2096.
- Bergot M, Cloppet E, Pérarnaud V, Deque M, Marçais B, Desprez-Loustau ML. 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology* 10 : 1-14.
- Bergot M, Cloppet E, Pérarnaud V, Déqué M, Marçais B, Desprez-Loustau ML. 2004. Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology* 10: 1539-1552.
- Bréda N., Badeau V. 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: towards a selection according to hazards tolerance ? *C. R. Geoscience* (2008), doi:10.1016/j.crte.2008.08.003
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, LVI, 2, 109-131
- Bréda N., Granier A., Huc R., Dreyer E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Sciences*, 63, 6, 625-644.
- Desprez-Loustau ML, Marçais B, Nageleisen LM, Piou D, Vannini A. 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Science* 63 : 597-612.
- Desprez-Loustau ML, Robin C, Buée M, Courtecuisse R, Garbaye J, Suffert F, Sache I, Rizzo D. 2007. The fungal dimension of biological invasions. *Trends Ecol Evol* 22:472-480.
- Desprez-Loustau ML, Robin C, Renaud G, Déqué M, Badeau V, Piou D, Husson C and Marçais B. 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. *Can. J. Plant Pathol.* 29: 101-120.
- Dexter AR, Richard G, Arrouays D, Czyz EA, Jolivet C, Duval O. 2008. Complexed organic matter controls physical soil properties. *Geoderma*, 144, 620-627.
- Dormont L., Baltensweiler W., Choquet R. & Roques A. 2006. Larch- and pine-feeding host races of the larch bud moth (*Zeiraphera diniana*) have cyclic and synchronous population fluctuations. *Oikos*, 115: 299-307.
- Dupouey J.L., Pignard G., Hamza N., Dhôte J.F., 2008, Estimating carbon stocks and fluxes in french forest biomass, based on national inventory data, CARBOFOR Project, final report. ouvrage sous presse.
- Granier A, Bréda N, Longdoz B, Gross P, Ngao J. 2008. Ten years of fluxes and stand growth in a young beech forest at Hesse, North-eastern France. *Annals of Forest Science*, 64, 704-717.
- Granier A, Reichstein M, Bréda N, Janssens I, Falge E, Ciais P, Grünwald T, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Facini O, Grassi G, Heinesch B, Ilvesniemi H, Keronen P, Knohl A, Köstner B, Lagergren F, Lindroth A, Longdoz B, Loustau D, Mateus J, Montagnani L, Nys C, Moors E, Papale D, Peiffer M, Pilegaard K, Pita G, Pumpanen J, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Seufert G, Tenhunen J, Vesala T, Wang Q. 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 123-145.
- Granier A., Bréda N. 2007. Synthèse écophysiological et fonctionnement des écosystèmes. *Rendez-vous techniques, Hors série spécial « changements climatiques »*, Office National des Forêts, 13, 81-88
- Grinand C, Arrouays D, Laroche B, Martin MP. 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma*, 143, 180-190.
- Heuzé P., Dupouey J.L., Schnitzler A., 2008, Radial growth response of *Hedera helix* to hydrological changes and climatic variability in the Rhine floodplain, *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/rra.
- Jolivet C, Angers DA, Chantigny MH, Andreux F, Arrouays D. 2006. Carbohydrate dynamics in particle-size fractions of sandy spodosols following forest conversion to maize cropping. *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 2834-2842.
- Landmann G., Bréda N., Houllier F., Dreyer E., Flot J. L. 2003. Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? *Revue Forestière Française*, 55, 299-308

- Landmann G., Dupouey J. L., Badeau V., Lefèvre Y., Bréda 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, 180, 28-33.
- Landmann G., Landeau S., Bréda N., Desprez-Loustau, M.L., Marçais, B. ... et al. 2006. Expertise collective scientifique et technique : effets de la sécheresse et de la canicule 2003 sur les forêts. Rapport final DGFAR/Ecofor no.61.45.80.11/04, Guy Landmann Editeur, MAP, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, GIP ECOFOR, Paris (FRA), 115 p.
- Loustau D, Bosc A, Colin A, Davi H, François C, Dufréne E, Déqué M, Cloppet E, Arrouays D, Le Bas C, Saby N, Pignard G, Hamza N, Granier A, Viovy N, Ogée J, Delage J. 2005. Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree physiology*, 25, 813-823.
- Marçais B., Bréda N., 2006. Role of an opportunistic pathogen in the decline of stressed oak trees. *Journal of Ecology*, 94, 1214-1223.
- Marçais, B.; Bergot, M.; Pérarnaud, V.; Levy, A.; Desprez-Loustau M.L. 2004. Prediction and mapping of the impact of winter temperatures on the development of *P. cinnamomi* induced cankers on red and pedunculate oak. *Phytopathology* 94: 826-831
- Martin MP, Cordier S, Balesdent J, Arrouays D. 2007. Periodic solutions for soil carbon dynamics equilibriums with time-varying forcing variables. *Ecological Modelling*, 204, 523-530.
- Martin MP, Lo Seen D, Boulonne L, Jolivet C, Nair KM, Bourgeon G, Arrouays D. (2XXX). Optimization of Pedotransfer Functions for estimating bulk density of Northern France Soils using MART method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* accepté.
- Morvan X.P.P. Saby N.P.A. Arrouays D. Le Bas C. Jones R.J.A. Verheijen F.G.A. Bellamy P.H. Stephens M. Kibblewhite M.G. 2008. Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Sci. Tot. Env.*, 391, 1-12.
- Mougou A, Dutech C, Desprez-Loustau ML. 2008. New insights into the identity and origin of the causal agent of oak powdery mildew in Europe. *Forest Pathology* 38:275-287.
- Robinet C, Lance Dr, Thorpe Kw, Onufrieva Ks, Tobin Pc & Liebhold Am. 2008. Dispersion in time and space affect mating success and Allee effects in invading gypsy moth populations. *Journal of Animal Ecology*, 77:966-973.
- Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J., Schopf A., Roques A. 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep.,Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography*, 16 : 460-471
- Roques L., Roques A., Berestycki H., Krestchmar A. 2008. A population facing climate change: joint influences of Allee effects and environmental boundary geometry. *Population Ecology* 50:215-225
- Saby NPA, Arrouays D, Antoni V, Foucaud-Iemercier B, Follain S, Walter C, Schwartz C. 2008. Changes in soil organic carbon content in a French mountainous region, 1990-2004. *Soil Use and Management*, 24, 254-262.
- Saby NPA, Bellamy PH, Morvan X, Arrouays D, Jones RJA, Verheijen FGA, Kibblewhite MG, Verdoodt A, Berényi Üveges J, Freudenschuss A, Simota C. 2008. Will European soil monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biology*, (2008) 14, 2432-2442.
- Seguin B, Arrouays D, Balesdent J, Soussana JF, Bondeau A, Smith P, Zaehle S, de Noblet N, Viovy N. 2007. Moderating the impact of agriculture on climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142, 278-287.
- Thoirain, B., Husson:C., Marçais, B. 2007. Risk factors for the the *Phytophthora*-induced decline of alder in northeastern France. *Phytopathology*, 97: 99-105

#### 4.1.1.2. Equipe LSCE

Le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) est un leader de renommée internationale dans la modélisation des cycles biogéochimiques et du climat. Le LSCE est très impliqué dans l'IPCC et coordonne un grand nombre de projets nationaux et internationaux. Le LSCE et le LMD ont développé un modèle global des surfaces continentales, ORCHIDEE, qui est maintenant utilisé par de nombreux autres groupes à l'échelle internationale. ORCHIDEE a été impliqué dans de nombreuses études incluant le fonctionnement des écosystèmes forestiers, tant à l'échelle locale que globale, ce qui a permis ou soutenu plus de 20 articles scientifiques dans des journaux internationaux, incluant les revues *Nature* et *Science*. Le LSCE possède aussi une grande expertise dans l'assimilation des données de surface ou de télédétection pour l'amélioration des modèles du système terre.

#### Philippe PEYLIN

Chargé de Recherche (CR1) au CNRS depuis 2001 ; 40 ans

Tel. : 01 69 08 77 18

Courriel : [peylin@lsce.ipsl.fr](mailto:peylin@lsce.ipsl.fr)

*Formation :*

01-08 : **Recruté au CNRS (CR1)** en 2001 et affecté au Laboratoire de Biogéochimie et écologie des milieux continentaux (BIOEMCO) à Grignon.

99-00 : **Post doctorat** au LSCE.

95-98 : **Doctorat** au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE).

91-92 : **D.E.A. "Océanologie, Météorologie et Environnement "**, Université Pierre et Marie Curie.

90-92 : **Diplôme d'Ingénieur** de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF).

*Axes de recherche :*

Mes activités de recherche concernent la quantification des flux de carbone biosphérique (flux net ainsi que flux bruts de photosynthèse et de respiration) aux échelles régionales et continentales grâce à une modélisation des interactions biosphère-atmosphère pour le CO<sub>2</sub>, l'eau et leurs isotopes stables ainsi qu'à l'utilisation de méthodes inverses. Mon approche vise en particulier à assimiler un ensemble de mesures relatives au cycle du carbone (concentrations atmosphérique, mesures de flux, mesures spatiales,...) dans des modèles mécanistes du fonctionnement de la biosphère.

Coordinateur de plusieurs projets Nationaux ou Européens dont CarboFrance et Camelia.

38 Publications de rang A.

**CV de Philippe CIAIS :**

**Directeur de Recherche au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA)**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/IPSL, UMR1572).

Tél : 01 69 08 95 06

Courriel : [philippe.ciais@lsce.ipsl.fr](mailto:philippe.ciais@lsce.ipsl.fr)

<http://www.lsce.ipsl.fr/Pisp/25/philippe.ciais.html>

**FORMATION**

**1989-1991: doctorat de l'Université Paris VII** au Laboratoire de Géochimie Isotopique avec la mention très honorable et les félicitations du jury.

Sujet : Etude du climat des 15,000 dernières années en Antarctique à l'aide de données isotopiques.

**1986-1989 : élève de l'Ecole Normale Supérieure de St Cloud.**

**1988 : lauréat de l'agrégation de physique (rang 18<sup>ème</sup>).**

**RECHERCHE**

**Depuis 1994: Chercheur au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE)**

Thème de recherche : Cycle du carbone

Directeur adjoint du laboratoire

Coordinateur de plusieurs projets Européens (AEROCARB, TACOS dans FP-5, CARBOEUROPE-atmospheric component et GEOMON-IP dans FP-6, ICOS-Phase Préparatoire dans FP-7)

**Nb total de publications :** 145 publications de Rang A, dont 19 dans Nature ou Science. 16 en premier auteur

Bousquet, P., P. Peylin, P. Ciais, C. Lequere, P. Friedlingstein, et P.Tans, Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980, *Science*, 290, 1342-1346, 2000.

Bousquet, P; Ciais, P; Miller, JB; Dlugokencky, EJ; Hauglustaine, DA; Prigent, C; Van der Werf, GR; Peylin, P; Brunke, EG; Carouge, C; Langenfelds, RL; Lathiere, J; Papa, F; Ramonet, M; Schmidt, M; Steele, LP; Tyler, SC; White, J Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability, *Nature*, 0028-0836 443 7110, 439-443 ISI:000240798800042, 2006

Canadell P., Raupach, M. ; Field C. ; Buitenhuis E.T. ; Ciais P. ; Conway T.J. ; Gillet N. and Marland G. Contribution to accelerating CO2 growth from economic activity, carbon intensity and efficiency of natural sinks . PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA oct 2007

- Ciais, P; Reichstein, M; Viovy, N; Granier, A; Ogee, J; Allard, V; Aubinet, M; Buchmann, N; Bernhofer, C; Carrara, A; Chevallier, F; De Noblet, N; Friend, AD; Friedlingstein, P; Grunwald, T; Heinesch, B; Keronen, P; Knohl, A; Krinner, G; Loustau, D; Manca, G; Matteucci, G; Miglietta, F; Ourcival, JM; Papale, D; Pilegaard, K; Rambal, S; Seufert, G; Soussana, JF; Sanz, MJ; Schulze, ED; Vesala, T; Valentini, R" Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 (2005), European-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 0028-0836, 4377058, 529-533, ISI:000232004800045, 2005
- Ogé J., Peylin P., Bariac T., Ciais P., Cuntz M., et Berbigier P, Inferring assimilation and total ecosystem respiration from a combination of process-based modelling and 13C isotopic measurements, *Global Bio. Cycle*, 17(2), 1070, DOI:10.1029/2002GB001995, 2003.
- Peylin P., P. Bousquet, S. Stith, C. Lequere, P. Friedlingstein, P.Ciais, et P.Tans, Multiple constraints on regional CO2 flux variations over land and oceans, *Global Bio. Cycle*, 19, GB1011 FEB 10, 2005.
- Peylin P., P. Rayner, P. Bousquet, C. Carouge, F. Hourdin, P. Heinrich, P. Ciais, and AEROCARB contributors, Daily CO2 flux over Europe from continuous atmospheric measurements: 1, inverse methodology, *Atmos. Chem. and Phys.*, 5, 3173-3186, ISI:000233610300001, 2005.
- Piao, S., P. Ciais, P. Friedlingstein, P. Peylin, M. Reichstein, S. Luysaert, H. Margolis, J. Fang, A. Barr, A. Chen, A. Grelle, D. Hollinger, T. Laurila, A. Lindroth, A. D. Richardson & T. Vesala Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming", *Nature*, 2008
- Piao, SL; Friedlingstein, P; Ciais, P; de Noblet-Ducoudre, N; Labat, D; Zaehle, S Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO2 on global river runoff trends PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA 0027-8424 104 39 15242 15247 ISI:000249806900015, 2007
- Raupach, MR; Marland, G; Ciais, P; Le Quere, C; Canadell, JG; Klepper, G; Field, CB Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA 0027-8424 104 24 10288 10293 ISI:000247363000066, 2007
- Santaren D., Philippe Peylin, Nicolas Viovy, and Philippe Ciais, Optimizing a Process based Ecosystem Model with Eddy-Covariance Flux Measurements: Part 1. A Pine Forest in Southern France, *Global Biogeochemical cycle*, 21 (2), 2007.

#### 4.1.2. Ressources proposées pour le projet

##### 4.1.2.1. Les ressources informatiques

Le LSCE possède un ensemble de ressources informatiques qui permettront de réaliser toutes les simulations proposées dans le cadre du projet FAST. Ces ressources s'appuient sur différents moyens propres au laboratoire ou à d'autres instituts et incluent :

- Un ensemble de machines de calcul, de type optéron, multiprocesseurs.
- Un accès direct au centre de calcul du CCRT et de l'IDRIS pour les simulations demandant une ressource importante (i.e., simulations spatialisées sur 100 ans)
- Un espace de stockage quasi illimité (moyens du CCRT) pour la sauvegarde des simulations.
- Un ensemble de logiciels adaptés au post-traitement des simulations pour la production de carte de risque ou de vulnérabilité,.

##### 4.1.2.2. Les moyens de mesures

Non pertinent pour ce projet.

## 5. Valorisation envisagée

---

La valorisation de l'étude fait partie intégrante du projet et est proposée à travers le lot 5. Ce lot permettra la diffusion des résultats de simulations à la fois vers le grand public et la presse (lot 5.1) ainsi que vers les acteurs du domaine (lot 5.2). Des supports spécifiques seront élaborés afin de mettre en valeur les résultats obtenus.

Nous proposons en particulier de coordonner la réalisation d'un dossier de presse « FAST » qui sera soumis au GICC / GIP Ecofor et après validation utilisé pour organiser une communication cohérente vers les médias, l'enseignement et le grand public. Un site web sera également développé ; il illustrera l'impact des scénarios climatiques sur l'évolution des espaces forestiers.

D'autre part, nous organiserons la Dissémination des résultats scientifiques principaux de « FAST » aux divers acteurs nationaux impliqués dans la gestion et l'exploitation des ressources forestières, au travers de l'organisation de colloques de restitution aux acteurs et d'un séminaire final de restitution.

Enfin, il est attendu du projet FAST un ensemble de résultats proches de l'aide à la décision avec des analyses de scénarios à haute résolution sur le territoire métropolitain et pour des trajectoires initialisées sur les données actuelles observées. La communication destinée aux décideurs et acteurs opérationnels sera donc importante. Elle sera organisée et coordonnée avec les réseaux existants : actions de communication coordonnées vers les décideurs; dossiers de communication FAST plus opérationnels et ciblés ; articles de communication de synthèse du projet FAST vers les gestionnaires et conseillers en sylviculture et aménagement pour une revue technique forestière, préparés à partir des résumés pour décideurs pour une publication dès l'année suivant la fin du projet.

## 6. Annexe A : Descriptif des modèles utilisés

### **BILJOU** (Granier et al. 1999, 2000a)

Il s'agit d'un modèle simple monodimensionnel de simulation des flux d'eau dans des peuplements feuillus ou résineux. Des indicateurs de contrainte hydrique, précocité, durée, intensité, sont calculés. Il fonctionne au pas de temps journalier avec des données météorologiques standards (pluviométrie et évapotranspiration potentielle) ; un de ses avantages est de ne nécessiter que peu de paramètres : réserve utile du sol, distribution d'enracinement, indice foliaire, dates de débourrement et de chute des feuilles. Ce modèle a été validé sur une large gamme d'espèces et de conditions climatiques. BILJOU est couramment utilisé sur de longues séries climatiques dans les analyses rétrospectives de la croissance radiale, et de la composition isotopique des cernes de diverses espèces feuillues. Il a été appliqué sur des scénarios de climat modifié pour évaluer les effets en termes de contraintes hydriques, de croissance et de mortalité des arbres (programmes REGCLIM, CARBOFOR, CLIMATOR).

**GRAECO** (Loustau et al., 2001, Porté et Loustau, 2001, Loustau et al. 2005). Dans ce modèle, le couvert végétal est décrit comme un ensemble de trois couches (ou strates), les arbres, le sous bois et le sol. L'évolution annuelle de la surface foliaire de chaque strate couche est calculée à partir du gain en carbone des strates végétales et d'un modèle phénologique. Chaque strate est caractérisée par ses propriétés radiatives et diffusives. Les processus rapides d'échange - végétation atmosphère sont décrits soit à partir d'une description fine en trois dimensions du couvert, le modèle MAESTRA (Medlyn et al., qui est dégradée suivant une analogie « Grosse Feuille » pour les calculs à long terme soit d'emblée au niveau « Grosse feuille ». GRAECO représente les processus lents comme la croissance individuelle des arbres d'un peuplement et le bilan de carbone du sol en contraignant l'allocation du carbone à partir des modèles allométriques des espèces considérées et en intégrant un effet générique des stress suivant l'approche proposée par Landsberg et Waring (1997). GRAECO a été utilisé et éprouvé à l'échelle de la parcelle sur des données de flux de CO<sub>2</sub> et de vapeur, des données individuelles de croissance pour des simulations à long terme spatialisées sur de petites unités territoriales (10 à 10<sup>4</sup> ha). Le modèle a été évalué pour les principaux processus que sont l'évapotranspiration, l'absorption du rayonnement, le flux de CO<sub>2</sub>, la croissance des arbres et l'allocation du carbone. Il est actuellement développé dans le cadre de deux thèses de doctorat (M. Guillot 2008-2010 et V. Moreaux 2009- 2011) à l'unité EPHYSE.

**ORCHIDEE** (Krinner et al. 2003) est un modèle de surface décrivant les bilans d'eau de carbone et d'énergie (stocks et flux associés) avec l'atmosphère. Il est dit « générique » en ce sens qu'il s'applique à tous les écosystèmes, avec des paramètres ou des sous-modules spécifiques pour chacun. Le modèle a été développé pour des études globales et utilise 12 types de plantes fonctionnels (PFTs) pour décrire la végétation du globe. Cependant, il fonctionne en modélisant une plante moyenne et peut donc être aussi utilisé pour des validations locales. De même, le nombre de PFT n'est pas fixe et peut être augmenté pour les besoins d'une étude. Ainsi actuellement l'ensemble des arbres tempérées est représenté à l'aide de 3 PFTs: feuillus décidus, feuillus sempervirents et conifères. Mais dans le cadre du projet nous utiliserons une définition plus précise qui permettra de prendre en compte la spécificité des espèces sélectionnées pour le projet.

La photosynthèse est décrite par les formulations de Farquhar *et al.* (1980) et Collatz *et al.* (1991) intégrées dans le couvert. Son calcul est couplé à celui des bilans radiatif et hydrique *via* le code SECHIBA (Ducoudré *et al.*, 1993; Polcher *et al.*, 1995). L'allocation du carbone est fonction des ressources limitantes (Friedlingstein, 1997) et le début de cycle phénologique des différents PFTs est estimé selon Botta *et al.* (2000). Le cycle du carbone dans la litière et le sol est décrit par des équations similaires à celles du modèle CENTURY (Parton *et al.*, 1992). La dynamique des PFTs est décrite par le modèle LPJ (Sitch, 2000) : la compétition entre les arbres est prise en compte *via* la production primaire et les herbacées restent confinées à l'espace laissé par les arbres. L'impact des incendies est décrit de manière stochastique en fonction de l'humidité de la litière. Afin de pouvoir décrire de façon satisfaisante la croissance des forêts gérées, un module de gestion forestière a été développé dans ORCHIDEE. Ce dernier permet à partir de la productivité simulée dans ORCHIDEE de décrire l'évolution de la structure de la forêt (en termes de classe de diamètres, de densité ou de hauteur des arbres). Grâce à cette représentation il est possible de simuler à partir de scénarios sylvicoles les paramètres de

gestion comme les périodicités d'éclaircies, la biomasse prélevée en fonction de chaque classe d'arbre, les durées de rotation etc... L'avantage de cette approche est de pouvoir calculer ces paramètres en fonction de la productivité calculée (qui dépend des conditions climatiques). On peut ainsi évaluer l'évolution de paramètres de gestion avec le changement climatique. ORCHIDEE ne permet de représenter qu'une forêt équienne, cependant il sera possible de représenter plusieurs classes d'âges par un ensemble de simulations successives.

Le modèle ORCHIDEE peut être utilisé avec des forçages météorologiques simples (température et humidité de l'air, précipitation, rayonnement et vitesse de vent). Cette simplicité des forçages en fait un outil adapté à l'extrapolation temporelle et à des calculs régionaux à partir de forçages issus de modèles climatiques. La résolution temporelle est de 6 minutes à 1 heure pour la photosynthèse et les processus de surface, 1 jour pour la phénologie, l'allocation et le cycle du carbone dans le sol, et 1 an pour la compétition entre PFTs. La résolution spatiale dépend du forçage météorologique utilisé.

## 7. Annexe B : Références citées

- Bergh, J., M. Freeman, B. Sigurdsson, S. Kellomäki, K. Laitinen, S. Niinistö, H. Peltola and S. Linder 2003. Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology and Management* 183(1-3): 327-340.
- Canadell, J. G., C. I. Quere, M. R. Raupach, C. B. Field, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton and G. Marland (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(47): 18866-18870.
- Chuine I, Cambon G, Comtois P . 2000 Scaling phenology from the local to the regional level: advances from species-specific phenological models . *Global Change Biology* 943-952
- Ciais, P; Reichstein, M; Viovy, N; Granier, A; Ogee, J; Allard, V; Aubinet, M; Buchmann, N; Bernhofer, C; Carrara, A; Chevallier, F; De Noblet, N; Friend, AD; Friedlingstein, P; Grunwald, T; Heinesch, B; Keronen, P; Knohl, A; Krinner, G; Loustau, D; Manca, G; Matteucci, G; Miglietta, F; Ourcival, JM; Papale, D; Pilegaard, K; Rambal, S; Seufert, G; Soussana, JF; Sanz, MJ; Schulze, ED; Vesala, T; Valentini, R" Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 (2005), Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 0028-0836, 4377058, 529-533, ISI:000232004800045, 2005
- Conseil Général des Ponts et Chaussées, 2006. Démarche prospective transports 2050. Eléments de réflexion. Rapport du CGPC 2006-0036-01, Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, Paris, France, 55p.
- Davi, H., E. Dufrene, A. Granier, V. Le Dantec, C. Barbaroux, C. Francois and N. Breda 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest Part II: Validation of the main processes from organ to stand scale. *Ecological Modelling* 185(2-4): 387-405.
- Davi, H., E. Dufrene, C. Francois, G. I. Maire, D. Loustau, A. Bosc, S. Rambal, A. Granier and E. Moors, 2006. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 141(1): 35-56.
- De Boissieu 2006, Rapport du groupe de travail « division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 ». La Documentation française, Paris, 144p.
- DeCara S. et Thomas A. 2008. Projections d'émissions/ absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020. Rapport Final de la convention INRA-MAP, INRA, 197p.
- Deckmyn, G., M. O. de Beeck, M. Low, C. Then, H. Verbeeck, P. Wipfler and R. Ceulemans (2007). Modelling ozone effects on adult beech trees through simulation of defence, damage, and repair costs: implementation of the CASIROZ ozone model in the ANAFORE forest model. *Plant Biology* 9(2): 320-330.
- Desprez-Loustau ML, Robin C, Reynaud G, Déqué M, Badeau V, Piou D, Husson C, Marçais B. 2007. Simulating the effects of a climate change scenario on geographical range and activity of forest pathogenic fungi. *Can J Plant Pathol* 29(2): 101-120
- Dhôte J.-F. 2008. Scénarios pour le volet forestier. dans « Projections d'émissions/ absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020. Rapport Final de la convention INRA-MAP, INRA, p 33-41.
- Dhôte J.-F. and J.-C. Hervé, 2000. Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. *Annals of Forest Science* 57 (7) 651-680.
- effects of climate on plants and animals, 90 pp.
- Garcia-Gonzalo, J., H. Peltola, A. Z. Gerendai and S. Kellomaki, 2007. Impacts of forest landscape structure and management on timber production and carbon stocks in the boreal forest ecosystem under changing climate. *Forest Ecology and Management* 241(1-3): 243-257.

- Gibelin A.L., Déqué M. 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20: 327-339.
- Goussard F., Saintonge F.X., Géri C., Auger-Rozenberg M.A., Pasquier-Barre F. & Rousselet J., 1999. Accroissement des risques de dégats de la processionnaire du pin, *Thaumetopoea pityocampa* Denis & Schiff. (Lepidoptera : Thaumetopoeidae) en région centre, dû au réchauffement climatique. *Ann. Soc. Entomol. Fr.*, 35 suppl, 341-343
- Granier A, Bréda N, Biron P, Villette S (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.
- Granier A, Bréda N, Longdoz B, Gross P, Ngao J (2008) Ten years of fluxes and stand growth in a young beech forest at Hesse, North-eastern France. *Annals of Forest Science*, 64, 704-717.
- Granier A, Ceschia E, Damesin C, Dufrêne E, Epron D, Gross P, Lebaube S, Le Dantec V, Le Goff N, Lemoine D, Lucot E, Ottorini JM, Pontailier JY, Saugier B (2000b) The carbon balance of a young beech forest. *Functional ecology*, 14, 312-325.
- Granier A, Loustau D, Bréda N (2000a) A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57, 755-765.
- Granier A, Reichstein M, Bréda N, Janssens I, Falge E, Ciais P, Grünwald T, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Facini O, Grassi G, Heinesch B, Ilvesniemi H, Keronen P, Knohl A, Köstner B, Lagergren F, Lindroth A, Longdoz B, Loustau D, Mateus J, Montagnani L, Nys C, Moors E, Papale D, Peiffer M, Pilegaard K, Pita G, Pumpanen J, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Seufert G, Tenhunen J, Vesala T, Wang Q 2007 Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 123-145.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudre, J. Ogee, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch and I. C. Prentice, 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1).
- Lamaud, E., A. Carrara, Y. Brunet, A. Lopez and A. Druilhet 2002. Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. *Atmospheric Environment* 36(1): 77-88.
- Landsberg, J. J. and R. H. Waring 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95: 209-228.
- Legay M. et F. Mortier, 2007. - La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière. ONF - Les dossiers forestiers - n°16, p 7-8
- Lieutier F., 2000, Relations arbres insectes : mécanismes de résistance des arbres aux attaques. XIIIème Colloque Biotechnocentre, Seillac, 9-10 Novembre.
- Loustau D et coll. 2004. Rapports de première année, de deuxième année et rapport final du projet CARBOFOR. MEDD, MAP-Gip ECOFOR, (140p)
- Loustau D. (éditeur) 2009. Response of temperate and Mediterranean forests to climate change: effects on carbon cycling, productivity and vulnerability. Ouvrage collectif issu du projet CARBOFOR, Editions QUAE, Versailles, à paraître.
- Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogée, H. Davi, C. Francois, E. Dufrêne, M. DequeDéqué, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Bréda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage (2005). Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology* 25(7): 813-823.
- Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogée, H. Davi, C. Francois, E. Dufrêne, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Bréda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology* 25(7): 813-823.
- Loustau, D., F. Pluviaud, A. Bosc, A. Porté, P. Berbigier, M. Déqué and V. Pérarnaud (2001). Impact of a regional 2xCO<sub>2</sub> climate scenario on the water balance, carbon balance and primary production of maritime Pine in Southwestern France. *Models for the Sustainable Management of Plantation Forests*, Bordeaux, European Cultivated Forest Institute (EFI sub division) EFI Proceedings numéro 41D.
- Loustau, D., J. Ogée, E. Dufrêne, M. Déqué, J.-L. Dupouey, N. Viovy, M.-L. Desprez-Loustau, A. Roques, I. Chuine and F. Mouillot (2007). Impacts of climate change on extensively managed and unmanaged

- temperate forests. *Forestry and climate change* P. H. Freer-Smith, M. S. J. Broadmeadow and J. M. Lynch. Wallingford, OECD, Forest Research, : 143-151.
- Magnani F., Mencuccini M., Marco Borghetti M., Paul Berbigier P., Berninger F., Delzon S., Grelle A., Hari P., Jarvis P. G., Kolari P., Kowalski A. S., Harry Lankreijer H., Law B. E., Lindroth A., Loustau D., Manca G., Moncrieff J. B., Rayment M., Tedeschi V., Valentini R. & Grace J. 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature* 447, 849-851 (14 June 2007) | doi:10.1038/nature05847
- Nabuurs G.J., Thürig E., Heidema N., Armolaitis K. Biber P., Cienciala E. Kaufmann E., Mäkipää R., Nilsen P., Petritsch R., Pristova T., Rock J., Schelhaas M. J. Sievanen R., Somogyi Z., Vallet P. (2008) The hotspots of the European forests carbon cycle. *Forest Ecology and Management*, in press.
- Nellemann, C. and M.G. Thomsen, 2001. Long-term changes in forest growth: Potential effects of nitrogen deposition and acidification. *Water Air Soil Pollut.* 128:197-205.
- Nuutinen T., Matala J., Hirvelä H., Härkönen K., Peltola H., Väisänen H., Kellomäki S. 2006. Regionally optimized forest management under changing climate. *Climatic Change*, 79: 315-333.
- Ollinger, S. V., Aber, J. D., Reich, P. B. and Freuder, R. J., 2002. Interactive effects of nitrogen deposition, tropospheric ozone, elevated CO<sub>2</sub> and land use history on the carbon dynamics of northern hardwood forests. *Glob. Change Biol.* 8(6), 545–562.
- Piao, S., P. Ciais, P. Friedlingstein, P. Peylin, M. Reichstein, S. Luyssaert, H. Margolis, J. Fang, A. Barr, A. P. Chen, A. Grelle, D. Y. Hollinger, T. Laurila, A. Lindroth, A. D. Richardson and T. Vesala (2008). Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature (London)* 451(7174): 49-52.
- Piovesan, G., F. Biondi, A. Di Filippo, A. Alessandrini and M. Maugeri, 2008. Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology* 14(6): 1265-1281.
- Reichstein M, Papale D, Valentini R, Aubinet M, Bernhofer C, Knohl A, Laurila T, Lindroth A, Moors E, Pilegaard K, Seufert G. 2006. Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites. *Geophysical Research Letters* 34(1): Art. No. L01402.
- Roman-Amat B. 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport aux Ministères de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables, 125 p.
- Schaber J, Badeck FW. 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology*: 193-201.
- Scholze M., Kaminsky T., Rayner P., 2007, Propagating uncertainties through carbon cycle prognostic assimilation data system simulations, *Journal of Geophysical Research part D-Atmosphere*, 112, 17.
- Spiecker H. 1999. Overview of recent growth trends in European forests. *Water Air and Soil Pollution* 116: 33-46.
- Sutherst RW, Maywald GF, Yonow T & Stevens PM. 1999. CLIMEX. Predicting the effects of climate on plants and animals, 90 pp.
- Sutton M.A., Simpson D., Peter E. Levy P.E., Smith R. I., Reis S., Van Oijen M., Vries W. 2008. Uncertainties in the relationship between atmospheric nitrogen deposition and forest carbon sequestration. *Global Change Biology*, 14, 2057-2063
- UNECE-FAO, 2005. European forest sector outlook study, 1960-2000-2020. Main report. Geneva Timber and Forest Study paper 20, United Nations Economic Commission for Europe – Food and Agriculture Organization of the UN, 265 p.
- Vries, W. d., G. J. Reinds, P. Gundersen and H. Sterba (2006). The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Global Change Biology* 12(7): 1151-1173.
- Zaehle, S., Bondeau, A., Carter, T., Cramer, W., Erhard, M., Prentice, I.C., Reginster, I., Rounsevell, M.D.A., Sitch, S., Smith, B., Smith, P.C., Sykes, M., 2007. Projected changes in terrestrial carbon storage in Europe under climate and land-use change, 1990-2100, *Ecosystems*, 10 (3), 380-401.

## 8. Annexe C : Projets nationaux et Européens complémentaires

---

### *Projets Nationaux :*

**Climator** (Responsable : N. Brisson, participants forêt métropolitaine : V. Badeau, N. Bréda, D. Loustau, A. Bosc) : Projet de l'ANR « Vulnérabilité : milieux et climat » ayant débuté en 2007 et devant d'achever fin 2009) ; évaluation des impacts du climat futur sur les bilans hydriques et la productivité de divers agrosystèmes et types forestiers. Pour la forêt, cinq profils de sols forestiers issus de la base de données Donesol (INRA, Orléans) sont croisés avec deux types de peuplements (feuillus et résineux), huit modèles climatiques et trois scénarios d'émissions sur la période 1970-2100 en 12 localités représentatives des grandes zones climatiques françaises. Les bilans hydriques sont calculés par le modèle Biljou et les bilans de productivité par Graeco. L'originalité du projet repose sur l'utilisation de plusieurs modes de désagrégation pour des représentations régionalisées des climats futurs possibles. Ce projet ne prévoit cependant pas de régionalisation des impacts (approche par station). C'est en outre ce que propose le présent projet.

**Dryade** (Responsable : N. Bréda) Projet de l'ANR « Vulnérabilité : milieux et climat » ayant débuté en 2007 et devant d'achever fin 2010. Le projet vise (1) à étudier à différentes échelles les facteurs de vulnérabilité aux changements climatiques de cinq essences forestières françaises majeures (chênes sessile & pédonculé, hêtre, sapin et douglas) à partir d'analyse de cas (dépérissements en cours ou récents) et (2) à modéliser la vulnérabilité aux dépérissements. L'aléa climatique principalement considéré est la sécheresse. Les modélisations cherchent à intégrer de manière explicite les interactions avec les ravageurs et champignons, soit en tant que facteurs primaires augmentant la vulnérabilité des arbres aux accidents climatiques, soit comme facteurs aggravant leur réponse après contrainte climatique. Il s'agira au final de proposer des cartes de vulnérabilité au dépérissement des espèces considérées par le programme.

**CarboFrance** (Responsable P. Peylin): Projet du GICC-2 ayant débuté au début de l'année 2008 et finissant fin 2009. L'objectif général est d'étudier l'impact des événements climatiques extrêmes sur le fonctionnement des écosystèmes et leur bilan de carbone à l'échelle de la France, en combinant observations sur sites ateliers (12 sites) et modélisation (sur sites et régionale). Ce projet fournira une première validation des modèles utilisés dans FAST et notamment d'ORCHIDEE, tant sur sites (6 sites forestiers) qu'à l'échelle nationale avec le forçage SAFRAN. Il permettra une meilleure compréhension des impacts directs ou différés des sécheresses et canicules sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers.

### *Projets Européens :*

**Eforwood** : projet intégré européen (FP6) impliquant entre autres INRA-Bordeaux, Alterra et l'European Forest Institute (EFI) pour préparer, orienter et accompagner les scénarios de gestion durable de filières complètes forêt - bois à travers i) des cas régionaux bien documentés et ii) une intégration européenne. Le projet doit fournir des scénarios économiques et sylvicoles compatibles avec les scénarios SRES et compatibles avec les politiques d'atténuation, notamment le développement du bois énergie et des nouvelles espèces (robinier, peuplier, saule, aulne, eucalyptus) et itinéraires techniques (taillis à courte rotation : TCR, taillis à très courte rotation : TTCR).

**CarboEurope** : Projet Européen en fin de réalisation (fin 2008) sur les bilans de carbone Européen. Il constitue une base d'acquisition d'information à l'échelle de parcelles forestières pour la paramétrisation et la validation de modèles couplés de flux de carbone et d'eau. Les mesures conjointes et continues de flux de CO<sub>2</sub>, énergie et vapeur d'eau sur 50 écosystèmes forestiers en Europe, dont la plupart sont représentatifs de la forêt Française, apportent des données cruciales pour calibrer la réponse future dans les modèles. En particulier, les effets des événements extrêmes et du stress hydrique sur la photosynthèse et la productivité pourront être analysés avec le jeu de données CARBOEUROPE.

**CarboXtreme** (Responsable : M. Reichstein) : projet européen récemment accepté pour financement dans l'appel d'offre conjoint ERA-net BiodivERsA. Le projet se focalisera sur l'analyse des effets directs et différés des aléas climatiques extrêmes récents sur les flux couplés eau-carbone des grands types d'écosystèmes forestiers européens. Il s'agira également de reproduire expérimentalement par manipulation d'écosystèmes

l'impact des sécheresses sur le fonctionnement hydrique et carboné des arbres, jusqu'à des extrêmes de dysfonctionnement susceptibles d'induire des mortalités. Ce projet vise à une analyse des processus ; certains sous modules de modélisations proposés dans FAST pourront s'appuyer sur ce jeu de données unique.