

# PROJET EVAFORA

**EV**ALUATION DE L'EFFET D'**A**TTÉNUATION DES **FOR**ÊTS DE PRODUCTION **A**DAPTÉES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

# **RAPPORT FINAL**







## REMERCIEMENTS

Nous remercions les membres du comité de pilotage : Valentin Bellassen, Frédéric Branger, Miriam Buitrago, Claire Cornillier, Gérard Deroubaix, Isabelle Feix, Mathieu Fortin, Julia Grimault, Olivier de-Guibert, Joseph Lunet, Sebastiaan Luyssaert, Manuel Martin, Jérôme Mousset, Elisabeth Pagnac-Farbiaz, Jean-Luc Peyron, Gwenael Postec, Caroline Rantien, Marianne Rubio, Laurent Saint-André, Murielle Trouillet, Patrick Vallet, Aude Valade, Patrick Vallet, Estelle Vial, Lise Wlérick.

## **EQUIPE DE RECHERCHE**

Centre National de la Propriété Forestière, 47 rue de Chaillot, 75116 Paris Institut pour le Développement forestier: Simon Martel, Olivier Picard (coordination) CRPF Occitanie : Sébastien Drouineau, Magali Maviel, Andoni Mugica, Alexandre Petroff CRPF Nouvelle Aquitaine : Henri Husson, Cécile Maris, Lucie Rupil

**Institut National de la Recherche Agronomique**, UMR ISPA, CS20032, 33882 Villenave d'Ornon cedex Denis Loustau, David Achat, Christophe Moisy

**Parc Naturel Régional du Haut Languedoc**, BP 9, 34220 Saint-Pons-de-Thomières Xavier Beaussart

## CITATION DE CE RAPPORT

Martel Simon, Loustau Denis, Achat David, Picard Olivier, Moisy Christophe, Drouineau Sébastien, Maviel Magali, Mugica Andoni, Petroff Alexandre, Husson Henri, Maris Cécile, Beaussart Xavier. 2018. Evaluation de l'effet d'atténuation des forêts de production adaptées au changement climatique : projet EVAFORA. – Rapport Final. 53 p.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

## Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1360C0092

Projet coordonné par MARTEL Simon (CNPF), LOUSTAU Denis (INRA) et PICARD Olivier (CNPF) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Olivier Picard

Appel à projet de recherche : REACCTIF 2

Coordination technique - ADEME : BUITRAGO Miriam Direction/Service : Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

# Table des matières

R	ésumé		5
1	Obje	ectifs du projet	6
2	Les	modèles GO+ et CAT	6
	2.1	Description de GO+	6
	2.2	Données d'entrée et de sortie	7
	2.3	Analyse de sensibilité de GO+	8
	2.4	Évaluation de GO+ (Pin maritime et Douglas)	10
	2.4.1	Évaluation du modèle GO+ Pin maritime	10
	2.4.2	Évaluation du modèle GO+ Douglas	12
	2.5	Le modèle CAT	13
3	ltiné	raires techniques sylvicoles	13
	3.1	Pin maritime	14
	3.2	Douglas	15
4	Sim	ulations sous climat futur	17
	4.1	Les données et scénarios climatiques utilisés	17
	4.1.1	Scénarios climatiques	17
	4.1.2	Régionalisation des scénarios climatiques	17
	4.2	Evénements extrêmes	18
	4.3	Simulations Pin maritime sous climat futur	19
	4.3.1	Protocoles des expériences de simulation	19
	4.3.2	Résultats et discussion	23
	4.4	Simulations Douglas sous climat futur	27
	4.4.1	Protocole de simulation	27
	4.4.2	Données climatiques en Haut Languedoc	27
	4.4.3	Résultats et discussion	29
5	Cycl	les biogéochimiques des nutriments	35
	5.1	Objectifs	35
	5.2	Description du module « nutriments »	35
	5.3	Sites, scénarios climatiques et itinéraires simulés	36
	5.4	Principaux résultats	37
	5.4.1	Réalisme des simulations de GO+ vis-à-vis des besoins en N-P	37
	5.4.2	Evaluation du coût en nutriments (N, P, K, Ca & Mg)	37
6	Valo	risation des résultats	40
7	Con	clusion générale	42
8	Réfé	érences citées	44

## Résumé

Le projet EVAFORA vise à définir et évaluer l'effet d'atténuation de scénarios de gestion permettant l'adaptation de peuplements forestiers au changement climatique, dans une démarche de recherche participative.

L'articulation entre travaux de recherche et transfert vers les acteurs de terrain est au cœur du projet sur deux zones d'étude : le massif de pin maritime des Landes de Gascogne et les douglasaies du Haut Languedoc. Après une introduction à la démarche de modélisation, les itinéraires techniques ont été co-construits au cours d'ateliers avec les sylviculteurs et ingénieurs forestiers. Ces options de gestion ont ensuite été implémentées dans la chaîne de modèles GO+ - CAT qui décrit le fonctionnement *in situ* et *ex situ* du continuum forêt-produits bois. Elle permet de calculer et comparer les impacts des itinéraires sélectionnés en termes de fonctions environnementales (climat, eau, carbone) et de production de bois. Afin de vérifier les équilibres en nutriments des options proposées, un module spécifique a été développé. Il calcule les quantités de nutriments (N et P) nécessaires pour satisfaire la production de biomasse prédite par le modèle et établit des bilans N-P entrées-sorties, les exportations en N-P-K-Ca-Mg, ainsi que les évolutions des stocks de C-N-P du sol. La chaîne GO+ - Nutriments - CAT a simulé la dynamique de fonctionnement 2006-2100 sous deux scénarios climatiques du GIEC : RCP 2.6 et RCP 8.5.

Les résultats des simulations montrent que les scénarios climatiques ne se contrastent fortement que dans la deuxième moitié du siècle. Cette différenciation des scénarios climatiques après 2050 se retrouve dans la réponse des écosystèmes forestiers, notamment sur les indicateurs de stress. Cependant, alors que l'augmentation du stress hydrique en scénario de réchauffement important (RCP8.5) ralentit fortement la croissance après 2050, l'augmentation du CO2 atmosphérique compense ces pertes en améliorant les performances photosynthétiques.

Concernant la gestion, les itinéraires techniques intensifs incluant un travail du sol ou un prélèvement accru de biomasse (rémanents et souches) entraînent une diminution sur le long terme des stocks de carbone et nutriments dans le sol et la biomasse sur pied. Tant pour le Douglas que pour le Pin maritime, nos conclusions montrent que les scénarios d'intensification testés (raccourcissement des révolutions et augmentation de la biomasse prélevée) ont un effet d'atténuation du changement climatique plus faible que la sylviculture standard d'une part et exigent une compensation en nutriments significative d'autre part.

# **Abstract**

The EVAFORA project evaluates the mitigation potential of forest management options, including adaptive strategies in relation to climate change. This project largely involves forest stakeholders during all its steps. Exchanges and transfer of knowledge between researchers and professionals took place in two case-study sites: the maritime Pine (*Pinus pinaster*) Landes forest massif and the douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) stands of the Haut-Languedoc regional nature park. Management scenarios were established during workshops with forest owners, forest technicians and forest managers. A process based model – the INRA model GO+ – was then used to simulate and compare the management options under the different climate RCP scenarios until 2100. The nutrient cost was also evaluated by quantifying several variables: nutrient outputs (N, P, K, Ca and Mg) resulting from harvesting, ecosystem N and P balances, and changes in organic C, N and P stocks in the soil.

Results showed that the regionalized climate scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5 mainly contrasted after 2050. The climatic differences caused contrasting responses of simulated forest tree stands, especially for stress index. The model results emphasized that while the water stress in the RCP 8.5 scenario reduces growth, it was offset by the photosynthetic performances amplified by the increased CO2 concentration. Intensive management scenarios that include tillage or residues harvest leads to carbon stocks -biomass and soil- decline. Rotation shortening and residues harvest have a lower mitigation effect than standard forestry and need a nutrient offsetting to remain sustainable.

# 1 Objectifs du projet

Le projet EVAFORA avait pour but « d'approfondir les connaissances sur les échanges de carbone entre les différents compartiments forestiers », « d'améliorer l'évaluation des bilans de GES des systèmes de production que sont les peuplements de Pin maritime et de Douglas » et « de comparer le bilan GES des différents scénarios de gestion (avec un objectif d'aide à la décision) ». Son application devait s'étendre à l'échelle d'un territoire et permettre d'apporter des outils d'aide à la décision aux politiques forestières. Son plan d'actions visait à se baser sur des sites de peuplements de Pin maritime et de Douglas sur lesquels les données existantes seraient réutilisées et valorisées. L'amélioration des connaissances sur les flux de carbone était en effet essentielle pour mieux cerner l'effet d'atténuation joué par la forêt et identifier les leviers d'action envisageables en gestion forestière. La dynamique d'évolution des stocks de carbone du sol devait être prise en compte et faire éventuellement l'objet de recommandations de gestion sur les pratiques à adopter lors des coupes ou sur les durées de cycles de production. Les résultats concernant les stocks de carbone des sols issus des modèles ne pouvaient pas être confrontés à des données mesurées sur les sites eux-mêmes en raison des coûts inhérents à de telles mesures. En revanche, les résultats devaient être confrontés aux données relevées sur les réseaux de placettes de recherche de type Renecofor par exemple.

Deux essences à fort enjeu de production ont été ciblées au sein d'Evafora : le Pin maritime et le Douglas. Une interaction forte a été privilégiée avec les acteurs de deux territoires pilotes : le Haut Languedoc et les Landes de Gascogne. Les ateliers participatifs prévus ont été réalisés et ont permis de définir des scénarios de gestion et d'en estimer les impacts sous deux scénarios régionalisés de climat, puis de les soumettre à discussion.

S'appuyant sur un ensemble de données et dire d'experts des deux territoires concernés, le Haut-Languedoc pour le Douglas et les Landes de Gascogne pour le Pin maritime, le projet a donc comparé l'impact de choix sylvicoles sur l'effet d'atténuation évalué de manière intégrée sur la forêt et la filière bois au niveau local (parcelle) et au niveau du territoire pour le Pin maritime. L'utilisation du modèle GO+ basé sur des processus a permis de projeter le fonctionnement de l'écosystème forestier sous différents forçages climatiques de 2012 à 2100. La prise en compte du sol par ce modèle a effectivement permis d'intégrer le bilan carbone de ce compartiment et des flux qui en découlent. Le développement d'un module « nutriment » au modèle a permis d'évaluer le réalisme des simulations vis-à-vis des quantités de nutriments nécessaires pour satisfaire la production de biomasse prédite. Des exportations de nutriments ont été évaluées, permettant de faire progresser les connaissances vers un modèle couplant les cycles des éléments minéraux avec celui du carbone. Les résultats des modèles ont été confrontés à l'expérience de terrain des acteurs locaux, ce qui a permis d'orienter les problématiques de recherche au plus près des questionnements des praticiens et de répondre concrètement à une partie de ces derniers.

# 2 Les modèles GO+ et CAT

# 2.1 Description de GO+

Le modèle GO+ est un modèle de croissance, de production et de gestion forestière représentant les principaux processus biophysiques et biogéochimiques d'un écosystème forestier géré. GO+ appartient à la catégorie des modèles à base de processus. Il a été initié en 1999, et, par la suite, développé par l'INRA-ISPA jusqu'à aujourd'hui. Entre autres, les stages de master de F. Pluviaud et de E. Cloppet et les thèses de M. Guillot et de V. Moreaux ainsi que le projet national Carbofor (Loustau et al., 2010) documentent les principales étapes de développement du modèle. Ses versions plus récentes (v26.0 et suivantes) sont codées en langage Python. La version v26.0 a été déposée à l'Agence nationale pour la protection des programmes logiciels en Septembre 2015 (IDDN.FR.001.400033.000.RP2015.000.31235). Une description détaillée du modèle est réalisée dans l'article scientifique Loustau et al., (2018).

GO+ est principalement utilisé pour simuler les effets des scénarios climatiques et de la gestion forestière à l'échelle infrarégionale, régionale et nationale pour trois espèces forestières commerciales: Pinus pinaster, Fagus sylvatica et Eucalyptus globulus. La version Pseudotsuga menziesii a été développée au cours du projet Evafora. GO+ simule typiquement le fonctionnement d'une parcelle d'un hectare depuis la régénération jusqu'à la coupe finale et avec une résolution horaire, les simulations pouvant être étendues à autant de révolutions successives que nécessaire, sans limitation. Dans la version 26.14, GO+ simule des peuplements monospécifiques et réguliers. Les simulations peuvent être projetées sur un domaine couvrant des échelles spatiales de la parcelle à la France entière avec une résolution spatiale ajustable (50x50m à 8x8km). GO+ se prête aussi particulièrement bien à la simulation de fonctionnement d'écosystèmes forestiers gérés sous des scénarios climatiques tels que ceux proposés par le GIEC.

Le modèle est piloté par des variables climatiques et des opérations sylvicoles prescrites. Il modélise la végétation selon une approche en deux couches, la canopée des arbres et la végétation du sous-étage. Le modèle considère une unité spatiale correspondant à un patch homogène de végétation forestière, typiquement un hectare. Il fonctionne à un pas de temps horaire mais les variables principales d'intérêt sont intégrées sur les échelles journalières, mensuelles ou annuelles (voir paragraphe sur les variables d'entrée et de sortie).

GO+ décrit les principaux échanges de masse et d'énergie dans le système sol-végétation-atmosphère, soit le bilan d'énergie, les cycles du carbone et de l'eau ainsi que les processus impliqués (transferts turbulents, flux de chaleur, évapotranspiration, diffusion du CO<sub>2</sub> entre l'air et le feuillage, photosynthèse, respiration, répartition du carbone, croissance, phénologie, mortalité liée à une carence en carbone et minéralisation du carbone dans le sol) (Fig.1). Le projet Evafora a permis de développer d'une part la versatilité des itinéraires techniques simulables par GO+, d'autre part un module « nutriments » permettant le calcul des concentrations en nutriments majeurs ( N, P, K, Ca, Mg) dans les différents compartiments de l'écosystème et les parties récoltées.

Le modèle GO+ est un outil de recherche en évolution continue et s'enrichit régulièrement afin de permettre des simulations réalistes des effets interactifs des changements environnementaux et de la gestion forestière sur les écosystèmes forestiers gérés. Les futures améliorations cibleront l'intégration des cycles de l'azote et du phosphore et les effets de l'ozone sur la végétation. Pour une description détaillée du modèle, voir Loustau et al., 2018.

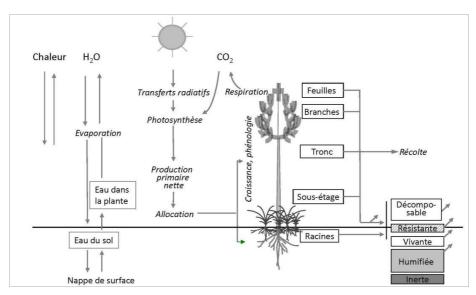


Figure 1. Principaux processus décrits dans le modèle GO+

## 2.2 Données d'entrée et de sortie

Les données d'entrée du modèle sont:

- des variables d'état initiales caractérisant le peuplement et le sol: biomasse des arbres et du sous étage, teneur en eau et en carbone des compartiments du sol.
- des séries chronologiques horaires de variables climatiques ou atmosphériques (température, vitesse du vent, rayonnement grande et courte longueur d'onde, déficit de vapeur d'eau saturée dans l'air, précipitations, concentration en CO<sub>2</sub>).

- les pratiques sylvicoles appliquées au peuplement décrites sous forme d'opérations (nature, intensité) déclenchées par un seuil d'une variable d'état (âge ou diamètre moyen ou dominant du peuplement par exemple).

#### Les paramètres du modèle sont :

- des paramètres physiques dépendants du couvert ou du sol considérés ;
- des paramètres écophysiologiques propres aux espèces simulées et relatifs à la phénologie, aux transferts radiatifs, au métabolisme, au fonctionnement hydraulique et stomatique, à la croissance;

Les principales **variables de sortie** sont des séries chronologiques horaires (environ 150 variables) décrivant le fonctionnement de l'écosystème:

- les composantes du bilan énergétique de l'ensemble de l'écosystème (rayonnement net, les composantes des grande et courte longueurs d'onde, flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente) et les échanges gazeux nets de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O.
- pour chaque couche de végétation, l'évolution quotidienne de l'indice de surface foliaire, la croissance des arbres, la biomasse sur pied, les échanges gazeux (l'assimilation, la respiration, la transpiration) et la production de parties récoltables:
- pour le compartiment du sol, notamment la teneur en eau, le drainage, la teneur en carbone et la respiration hétérotrophe.

L'ensemble des équations du modèle, le code en langage Python et le manuel d'utilisation sont en « *Supplementary material* de l'article soumis à *Geoscientific Model Development*, mars 2018 par Loustau et co auteurs.

## 2.3 Analyse de sensibilité de GO+

Une analyse de sensibilité a été menée sur la version Pin maritime de GO+. Une première analyse a permis de déterminer les 28 paramètres les plus influents sur les résultats du modèle. L'analyse menée permet d'évaluer le comportement du modèle par rapport à une variation des valeurs individuelles de ces paramètres. Ces derniers sont supposés indépendants, c'est à dire que leurs effets sur les variables de sortie sont considérés comme additifs. Les paramètres observés concernent les principaux processus couverts par le modèle et peuvent être regroupés en 6 catégories : structure et allométrie, phénologie, transferts radiatifs, paramètres du sol, paramètres physiologiques des arbres et paramètres physiologiques du sous étage. On effectue des simulations successives en faisant varier chaque paramètre k de  $\pm$  10 % par rapport à la valeur par défaut calibrée pour le pin maritime, la valeur des autres paramètres étant laissée par défaut. Un indice de sensibilité  $l_k$  est calculé pour chaque variable d'intérêt V:

$$I_k = \frac{V_{k+10\%} - V_{k-10\%}}{2}$$

Cet indice donne en valeur absolue l'écart provoqué par une variation de 10% d'un paramètre centrée sur sa valeur la plus probable. L'analyse a été menée avec les données de forçage du site d'observation à long terme du Bray (33) sur différents pas de temps : annuel, journalier et pour une révolution entière (période 1970-2010). Seuls les résultats de l'analyse sur la révolution entière sont présentés ici (**Tableau 1**). Selon les variables, l'indice  $I_k$  est calculé sur la valeur moyenne sur toute la période 1970-2010 (flux) ou sur la valeur finale au 31 décembre 2010 (variables liées au stock de biomasse).

On constate que les paramètres les plus sensibles sont le rapport masse/surface des feuilles de la canopée des arbres, SLA, et les paramètres définissant la réserve utile du sol, sa capacité de rétention en eau du sol,  $\mathbb{Z}_{FC}$ , ou son point de flétrissement,  $\mathbb{Z}_{WP}$  et la profondeur d'enracinement,  $z_{root}$ . A fortiori, le bilan carbone, NEE, et la croissance en biomasse du tronc des arbres,  $W_{stem}$ , très liés au bilan hydrique, sont aussi fortement sensibles aux paramètres de capacité de rétention en eau du sol. On notera qu'il s'agit de paramètres site-dépendant, ce qui montre bien l'enjeu de réduire l'incertitude autour des caractéristiques pédologiques. En second ordre, le bilan carbone et la croissance sont également sensibles aux paramètres d'allométrie et au *root:shoot* ratio,  $k_{wn1}$  et  $k_{m1}$  respectivement et de capacité de photosynthèse ( $Vc_{max}$ ). On se reportera pour plus de détails sur la méthode utilisée et les résultats sur les années humide (1994) et sèche (2005) à Loustau et al., 2018.

**Tableau 1.** Valeurs de l'indice de sensibilité & pour 21 variables de sortie du modèle GO+ et sur la période 1970-2010. Le peuplement simulé est une plantation de Pin maritime en Lande humide au site du Bray. Les variables sont regroupées par famille de processus. Les valeurs en gras sont les valeurs du quantile supérieur. Les valeurs encadrées sont les maximales par variable : elles indiquent le paramètre auquel la variable est la plus sensible.

				lan d'énergi	énergie Bilan hydrique			Bilan carbone							Canopée des arbres			Sous-étage					
			Rnet	Н	<b>A</b> E	E	E <sub>dry, T</sub> 387	<b>€</b> 115	D	NEE	GPP	Reco	R <sub>a</sub>	NPP	$R_{_{\rm h}}$	W	C <sub>sail</sub>	H <sub>c</sub>	D <sub>130</sub>	LAI	W <sub>stem</sub>	LAI	I
			2047	697	1350	728	387	115	275	482	2463	1981	1314	1149	667	8504	9150	25.3	37.7	2.8	10	2.2	I <sub>stress</sub> <b>0.6</b>
				MJ.m <sup>2</sup> .y <sup>1</sup>		mm.y-	mm.y.	mm	mm.y-			gC.	<b>m</b> -².y-¹			gC		m	cm		kg dm . m²	<b>m</b> <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>	
	parameter for DBH - Wa eq.	$k_{_{\mathrm{D130,1}}}$	15	7	8	3	5	4	4	29	37	10	8	43	13	444	553	1.2	1.2	0.10	1.6		0.011
	parameter for Height - Wa eq.	$k_{_{\mathrm{Hc},1}}$																2.1					
trie	parameter of Leaf current cohort to aboveground	l bio $k_{\scriptscriptstyle  m wal}$	30	12	20	8	8	6	10	26	64	38	24	40	14	238	624	0.9	1.3	0.20	1.3	0.09	0.025
A llom étrie	parameter of stem to aboveground biomass	$k_{\scriptscriptstyle \mathrm{Wsl}}$								5					5		286				1.0		
A I	Root -shoot allocation coefficient	$k_{u}$	12	5	8	3	3	3	4	15	26	12	11	16		151	92	0.9	1.4	0.08	1.2	0.03	0.010
	Tree SLA	$LMA_{\scriptscriptstyle \mathrm{T}}$	36	15	24	10	10	7	12	33	75	42	29	46	13	334	704	1.3	1.9	0.23	1.8	0.11	0.031
	Understorey SLA	$LMA_{_{\mathrm{U}}}$	_	4							24	25	29		4	74		0.2	0.3	0.02	0.3	0.30	
.5	Heat sum for tree foliage bud burst	BB																					0.005
Phénologie	Growth duration of understorey foliage	$GD_{v,r}$	4								24	23	23			89						0.07	
P h é	Mx. Foliage biomass of undertorey	$W_{_{\mathrm{max},\mathrm{f}}}$		4							24	24	22		2			0.2	0.3	0.02	0.3	0.29	0.003
	Soil albedo	a	19	18									8										
Fran sferts radiatifs	Direct beam extinction coefficient	$k_{_{ m b,T}}$	4	5																			
rans	Diffuse light extinction coefficient	$k_{\scriptscriptstyle d,T}$	19	16			4	2	2	11	25	14	9	16	5	150	211	0.5	0.7	0.04	0.6		0.005
	Leaf reflectance	$\rho_{r,f}$																					
	Rooting Depth	$Z_{\rm root}$	14	16	29	12	10	6	13	13	74	61	49	25	12	292	106	0.5	0.7	0.04	0.6	0.08	0.008
	Max. drainage rate	$D_{ ext{max}}$	5	5	10	4	4	7	5		29	27	20	9	7	73						0.05	
S o 1	Van Genuchten - α	$a_{\rm rg}$																					
Š	Van Genuchten m	$m_{_{ m VG}}$	_																				
	Water content at field capacity	$\theta_{_{\mathrm{FC}}}$	9	43	53	22	4	11	22	10	29	20	16	13	3	138	185	0.4	0.5	0.03	0.4	0.03	0.004
	Water content at wilting point	$\boldsymbol{\theta}_{ ext{wp}}$	28	6	26	11	19	6	10	39	135	97	76	59	20	626	571	1.6	2.4	0.14	2.1		0.020
	Quantum efficiency	$a_{\scriptscriptstyle \mathrm{T}}$	8				2	2	3	15	38	23	17	21	6	236	268	0.6	0.9	0.05	0.8		0.006
90	Foliage mitochondrial respiration at 25 °C	$R_{_{ m d25,U}}$																					
arbres	Max. carboxylation rate Vcmax	$V_{_{ m cmax,U}}$	15	7	9	4	4	3	5	20	55	35	24	31	11	245	367	0.7	1.1	0.09	1.1	0.04	0.012
des	Canopy water storage capacity	$S_{_{\mathrm{w,T}}}$																					
pé e	Max. stomatal conductance	$\boldsymbol{g}_{\text{smax},T}$		9	7	3	5		3		15	13	11			72						0.04	
Canopée	Stomatal conductance responce to leaf water por	entik <sub>e</sub>																					
1 5	Root-to-leaf hydraulic resistance	$k_{x_1}$																					
	Respiration multiplier for a 10°C increase	$Q_{10}$	_																				
9	Quantum efficiency	<b>a</b> <sub>v</sub>																					
étag e	Foliage mitochondrial respiration at 25 °C	$R_{\scriptscriptstyle d25,U}$										14	14										
Sous	Max. carboxylation rate Vcmax	$V_{_{\mathrm{cmax,T}}}$																					
S	Max. stomatal conductance	$g_{\text{smax},U}$																					

# 2.4 Évaluation de GO+ (Pin maritime et Douglas)

Deux types de données ont été utilisés pour évaluer le modèle :

- des données de sites instrumentés pour le suivi des flux d'énergie et de carbone à haute fréquence temporelle sur de longues périodes et appartenant au réseau FluxNet, GHG-Europe ou ICOS. De tels sites n'ont pas une représentativité géographique mais permettent d'évaluer et paramétrer les processus à haute fréquence.
- des données de suivi de la phénologie ou de la croissance de placettes forestières comme les inventaires avec des mesures régulières (fréquence de 1 à 5 ans) des hauteurs et diamètres des peuplements (réseaux ICP-Forest, SOERE, GIS Coop de données). Ces données qui couvrent l'ensemble de l'aire de répartition des essences en France permettent d'évaluer la faculté de GO+ à reproduire la phénologie et la croissance d'une essence sur le territoire français.

## 2.4.1 Évaluation du modèle GO+ Pin maritime

Cette évaluation avec des données flux d'énergie, vapeur d'eau et CO<sub>2</sub> ainsi qu'avec des données de croissance est détaillée dans l'article source du modèle (Loustau et al. 2018) dont nous extrayons ici deux des figures en montrant les résultats sur les données de croissance annuelle en surface terrière, circonférence moyenne, indice foliaire et humidité du sol pour trois sites (Figure & 3). Cette évaluation montre que le modèle GO+ est capable de reproduire sans biais significatif les trajectoires de croissance sur 20 à 30 ans de peuplements de pins maritimes conduits avec différents régimes d'éclaircies et sur différents types de sol et de climat. Le modèle capture assez bien les impacts des variations climatiques interannuelles sur la croissance.

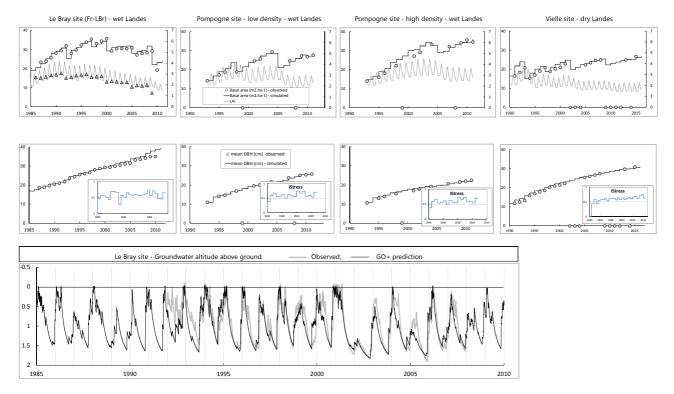
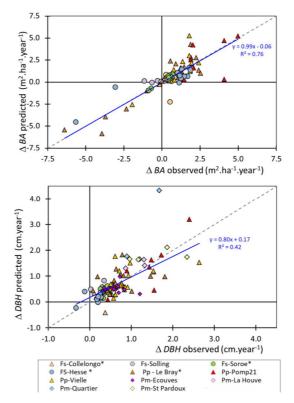


Figure 2. Comparaison des prédictions du modèle GO+ avec différents jeux de données observées sur Pin maritime.

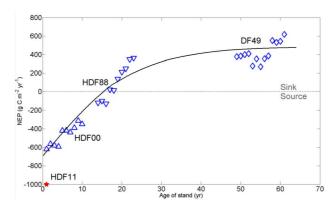


**Figure 3.** Comparaison des valeurs de croissance annuelle en surface terrière (DBA) et diamètre moyen (DBH) prédites par le modèle et observées sur différents sites de Pin maritime, Douglas et Hêtre. Source des données : GIS Coop de données Pin maritime et Douglas, SOERE F-ORE-T, Base de données du COST *Profound\_ ISI-MIP* 

## 2.4.2 Évaluation du modèle GO+ Douglas

#### Données utilisées

Aucun site instrumenté en micrométéorologie sur Douglas n'existe en Europe en dehors du site de Vielsam en Belgique. Il est composé de 2 peuplements juxtaposés de Hêtre et Douglas et les interprétations des flux de ce site sont donc délicates. L'évaluation s'effectue donc à partir des données d'une chronoséquence de peuplements dans un site de Colombie Britannique (île de Vancouver) où les flux ont été mesurés pendant plusieurs années sur 3 peuplements de Douglas d'âges variés : une série de 12 ans de mesures sur un peuplement d'une quarantaine d'années (HDF49), une série de 8 années de flux sur une plantation de 14 ans (HDF88) et une série de 10 ans de mesures sur une plantation (HDF00), (Figure Paul-Limoges et al., 2015).



**Figure 4**. Productivité primaire nette des peuplements de trois sites de Douglas en Colombie britannique en fonction de l'âge des peuplements

Le modèle est initialisé et paramétré (paramètres locaux) grâce aux données caractérisant chacun des sites. Le forçage climatique utilisé est celui de chacun des 3 stations météorologiques présentes sur les sites.

#### Évaluation sur les données de flux horaires

Pour le douglas, les valeurs issues de simulations GO+ et des observations sont comparées pour les sommes journalières des variables rayonnement net (Rn), flux de chaleur latente (LE), flux de chaleur sensible (H), photosynthèse (GPP) et échanges nets de carbone avec l'atmosphère (NEE) ainsi que les moyennes journalières d'humidité du sol jusqu'à 30 cm de profondeur (SoilMoisture).

Les figures A1, A2, et A3 en annexe 2 montrent les résultats de ces comparaisons avec valeurs observées en abscisse et valeurs simulées en ordonnée. Pour les peuplements adulte et jeune (HDF49 et HDF88), le rayonnement net et les flux de chaleur latente et sensibles sont bien reproduites par le modèle (R² > 0.69). Les performances du modèle sont moindres pour les variables comme NEE dont les valeurs mesurées tout comme les valeurs simulées par GO+ sont le résultat de calculs faisant intervenir plusieurs niveaux de variables incertaines. Mais l'ensemble des performances reste au niveau des autres modèles de ce type.

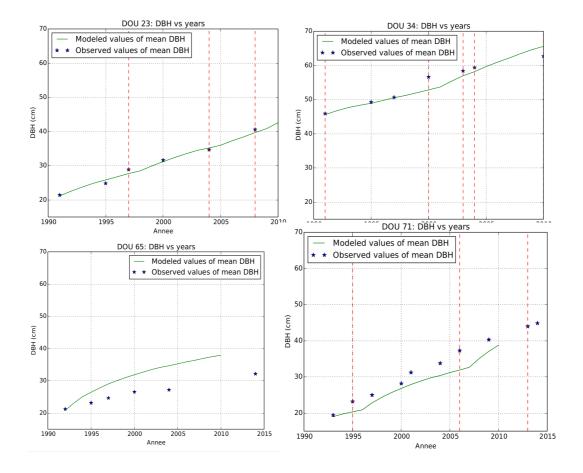
Une moins bonne corrélation entre valeurs observées et simulées est trouvée pour la jeune plantation de douglas (HDF00). Les flux de ce site sont en majorité dus à un important recru ligneux, lequel n'est pas représenté de manière suffisamment documentée par le modèle.

#### Évaluation à partir des données de croissance

Différentes sources ont été mobilisées, sur le territoire français :

- réseau Renecofor (Ulrich, 1997)
- réseau GIS « Coop de données » (Bédénaux et al., 2001)

Les données du GIS Coop comportent plusieurs modalités d'éclaircies par site, permettant une comparaison des sylvicultures et de leur simulation par le modèle. Les résultats des simulations correspondent de manière variable aux observations suivant les sites (**Fig.5**). Le fait que des données météorologiques utilisées pour le forçage du modèle proviennent de données Safran exogènes explique une part de ces divergences en contexte de montagne. La hiérarchisation des modalités de croissance en fonction des régimes d'éclaircies est respectée, ce qui valide l'utilisation du modèle pour comparer des itinéraires techniques.



**Figure 5.** Comparaison de la croissance en diamètre moyen (DBH) simulée par le modèle avec les observations de 4 sites Renecofor (les lignes verticales rouges représentent les éclaircies), 1990-2015.

## 2.5 Le modèle CAT

Le modèle CAT (Fortin et al. 2012, Ningre et Fortin, 2013, Pichancourt et al., 2018) a été adjoint au modèle GO+ pour les deux essences, Pin maritime et Douglas. Son paramétrage pour le Douglas a été réalisé sur la base de données « France entière » au cours du projet GESFOR et celui du pin maritime à partir de données Aquitaine au cours du projet FOReVER. CAT est amplement décrit dans le rapport d'étude GESFOR (Vial et al., 2017) et nous ne le détaillons pas ici.

# 3 Itinéraires techniques sylvicoles

L'objectif d'EVAFORA était d'impliquer les acteurs des territoires concernés tout au long du déroulement du projet. L'organisation de la co-construction du projet avec les ingénieurs CRPF et les acteurs est résumée dans le diagramme ci-dessous. Les ateliers pléniers ont été organisés en 2 temps sur chacun des territoires (**Fig. 6**).

Le premier atelier a permis de présenter la démarche, d'expliciter l'intérêt du modèle utilisé et ses limites par des exemples. Au cours de cet atelier, une discussion a été organisée avec les sylviculteurs et, à partir de questionnaires préétablis, ces derniers ont pu définir individuellement des scénarios de gestion jugés pertinents et opérables en termes d'adaptation aux changements climatiques. Ces scénarios sont décrits sous forme d'itinéraires techniques à l'échelle de la parcelle. Une synthèse a ensuite été effectuée pour sélectionner les itinéraires techniques qui pouvaient être testés et simulés par GO+. Après qu'ils aient été effectivement simulés pour les deux territoires concernés selon les protocoles expérimentaux décrits plus loin, la restitution de ces simulations s'est faite en deux étapes, (i) une réunion préparatoire visant à définir le format de restitution le mieux approprié et (ii) la restitution proprement dite auprès des panels d'acteurs, suivie d'une demi-journée à une journée de discussion.

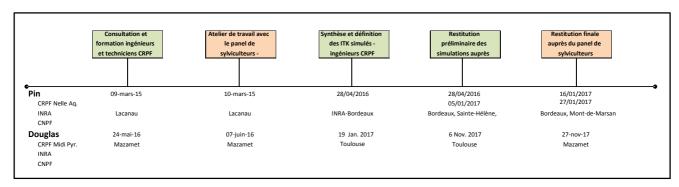


Figure 6. Diagramme chronologique des réunions et ateliers organisés pour la réalisation du projet EVAFORA.

Considérant que le modèle GO+ n'est valable que pour des peuplements réguliers et monospécifiques, les itinéraires techniques ne correspondant pas à ces critères ont été exclus de la modélisation.

## 3.1 Pin maritime

Concernant le Pin maritime, le premier atelier a été mené en lien avec le projet ANR MACACC en 2014. Une vingtaine de sylviculteurs : propriétaires forestiers « avertis » du CETEF des Landes et gestionnaires ont répondu présent et rempli les questionnaires. La synthèse des itinéraires est présentée dans le **Tableau 2**.

Le choix est fait de déclencher les coupes lorsque les circonférences moyennes sont atteintes, ce qui correspond à une approche « terrain » : le sylviculteur fait généralement le choix d'exploiter en fonction de l'état du peuplement et non de l'âge des arbres. Il en résulte des durées de révolution variables pour un même itinéraire technique en fonction des conditions de croissance. Il ressort de la synthèse des réponses que les itinéraires proposés recoupent bien d'autres panels de scénarios de gestion élaborés lors d'études d'état des lieux ou prospectives (Orazio et al., 2016, De Lary, 2015).

Tableau 2: Itinéraires techniques Pin maritime utilisés pour l'exercice de simulation

Itinéraires techniques Pin maritime (C.Maris, A. Castro, D. Loustau, D. Picart, S. Martel)												
	- "()				Déb	roussaillag	e + Eclairio	Récolte	Récolte finale			
Scénario	Densité à la plantation	Travail du sol	5 ans	7 ans	10 ans	Cmoy > 55 cm	Cmoy > 70 cm	Cmoy > 85 cm	Cmoy > 100 cm	Cmoy = 120 cm		
Standard 1 – S1	1250	х	0		0	30%	30%	30%	30%	100%	tronc	tronc
Standard 2 – S2	1250	х	0		0	30%	30%	30%	30%	100%	tronc +branche+aiguilles	tronc+souche
Raccourci 1 – R1	1250	х	0		0	30%	30%	30%	100%		tronc	tronc
Raccourci 2 – R2	1250	х	0		0	30%	30%	30%	100%		tronc +branche+aiguilles	tronc+souche
Intensif 1-I1	1250	х	0		0	30%	30%	100%			tronc +branche+aiguilles	tronc+souche
Intensif 2 – I2	1250	х	0		0	30%	100%				tronc +branche+aiguilles	tronc
Intensif 3 – I3	1250	х	0		0		100%					tronc +branche+aiguilles
Semi Dédié – SD	2500	х		50%		30%	30%	30%	30%	100%	tronc +branche+aiguilles	tronc+souche
Semi Dédié Court – C	2500	х					100%					tronc +branche+aiguilles
Scénario	Densité à la plantation		5 ans	10 ans	Cmoy > 55 cm	Cmoy > 75 cm	Cmoy > 95 cm	Cmoy > 115 cm	Cmoy = 150 cm	60 ans	Récolte	Récolte finale
Extensif – Ex	1250		0	0	30%	30%	30%	30%	100%		tronc	tronc
Auto éclaircie	5000									100%		tronc

L'itinéraire **Standard-1 (S1)** représente la sylviculture à objectif bois d'œuvre classiquement pratiquée jusqu'à aujourd'hui : révolutions de 40 à 45 ans comprenant 4 éclaircies amenant à 300 tiges/ha de densité finale. Il correspond

à l'itinéraire « Révolution Standard » proposé par De Lary (2015). L'itinéraire **Standard-2** (S2) est une variante du standard 1 comprenant en plus une récolte des menus-bois lors des éclaircies et des souches lors de la coupe finale, pratiques de plus en plus courantes sur le massif des Landes de Gascogne. L'itinéraire **Raccourci-1** (R1) et sa variante **Raccourci-2** (R2) avec récolte des rémanents et souches visent aussi la production de bois d'œuvre, mais avec des circonférences d'exploitation moindres permettant des débouchés en petits sciages (itinéraire Courte révolution 1 proposé par De Lary, 2015).

Les itinéraires Intensif-1 (I1), Intensif-2 (I2) et Intensif-3 (I3) correspondent à une intensification qui point en Aquitaine : révolutions raccourcies et exportation des souches et rémanents, tout en gardant une densité de plantation standard (1250 tiges/ha). L'itinéraire Semi-dédié court (SD) répond à la demande croissante de bois énergie, avec une densité de plantation très forte (2500 tiges/ha) et une première éclaircie à 7 ans où 50 % des tiges sont récoltées en biomasse à destination du marché de l'énergie. Le reste du peuplement suit un itinéraire sylvicole classique. L'itinéraire Dédié court (C) est un itinéraire dédié à la biomasse, sans éclaircie et avec une récolte du peuplement à une circonférence moyenne de 70 cm à destination de l'énergie.

Un itinéraire **Extensif (Ex)** est également modélisé : il correspond à une sylviculture où l'on cherche à produire des Gros Bois de qualité en une soixantaine d'années. Cet itinéraire déclenche les éclaircies pour des circonférences supérieures à celles du Standard, avec une coupe finale à une circonférence supérieure de 50% à celle du standard. Cet itinéraire comprend donc au final beaucoup moins d'interventions par unité de temps que le standard.

Enfin, un itinéraire **AutoEclaircie (Autoecl.)** sans gestion est simulé : il s'agit ici d'un peuplement dense au départ (proche de la densité d'une régénération naturelle) où aucune coupe n'est pratiquée si ce n'est une coupe finale à la circonférence cible de 120cm : c'est donc la seule mortalité qui régule le nombre de tiges par hectare.

Chacun de ces itinéraires comprend une préparation du sol (labour), ainsi que des débroussaillements par passage de rouleau landais à 5 et 10 ans (sauf Semi Dédié, Court et AutoEclaircie) comme cela se pratique couramment sur le massif (De Lary, 2015). L'ensemble de ces itinéraires représente un panel des itinéraires actuels et envisagés pour le futur dans les Landes. Contrairement au douglas, peu d'itinéraires en mélange ou en sylviculture irrégulière sont réalisés dans les Landes. Orazio et al (2016) indiquent ainsi qu'un bilan d'octobre 2015 révèle que seulement 1,5 % de la surface reboisée post-tempête (communication GIP ATGERI (2), 2015) l'a été en utilisant la clause biodiversité (CRPF Aquitaine et ONF, 2011).

## 3.2 Douglas

Le premier atelier du 7 juin 2016 dans le Tarn, sur le territoire du Haut Languedoc a réuni 26 personnes (propriétaires du CETEF du Tarn, gestionnaires, techniciens du CRPF). Après une présentation globale sur les conséquences du réchauffement climatique et la description du modèle GO+ et de ses possibilités, les sylviculteurs ont proposé des itinéraires techniques d'adaptation (voir le modèle de fiche en annexe 3).

Sur les 24 questionnaires analysés, la moitié proposent des itinéraires faisant appel au mélange d'essences, dont 5 concernent la sylviculture irrégulière. Ces itinéraires n'ont donc pas pu être traités en raison du champ d'application du modèle, limité à la futaie régulière monospécifique. Un besoin d'outils de modélisation de forêts mélangées et irrégulières s'exprime ainsi ici. La douzaine de questionnaires restant a donc été analysée et synthétisée dans le Tableau . A noter que contrairement aux Landes, le travail du sol n'a été proposé dans aucun itinéraire. Afin de diversifier davantage la gestion, trois autres itinéraires ont été proposé par le comité de pilotage du projet. Ils figurent en grisé dans le **tableau 3**.

Dans les hypothèses de travail, il a été établi d'utiliser les âges comme seuil pour définir le moment de l'exploitation. En pratique sur le terrain, à l'image du pin maritime, les gestionnaires locaux se fient aux diamètres pour prévoir leurs coupes. Toutefois en douglasaie, l'âge correspond relativement bien et suffit le plus souvent à estimer le moment d'une coupe. Dans le contexte local, la nécessité d'un degré de précision sur le moment de coupe est moindre en comparaison des besoins industriels de la filière forestière aquitaine.

**Tableau 3**. Itinéraires techniques Douglas issus de l'atelier Haut Languedoc

Nom de l'ITK	Densité de plantation	Durée de révolution	Travaux du sol	Dépressage (40%des tiges)	Eclaircie 1	Eclaircie 2	Eclaircie 3	Eclaircie 4	Eclaircie 5	Compartim ents récoltés	Produits BO	Produits BIBE	Remarques
Classique long	1200	60		15 ans	22 ans	30 ans	37 ans	44 ans	52 ans	troncs	+++	-	~ ITK BAU risque faible d'AFClim
Classique	1200	45		15 ans	22 ans	30 ans	37 ans			troncs	++	-	~ ITK BAU risque moyen d'AFClim
Récoltes intensives	1200	45		15 ans	22 ans	30 ans	37 ans			troncs + rémanents	++	-	
Faible densité	500	45			20 ans	30 ans	37 ans			troncs			
Très Faible densité	250	45		-	22 ans	30 ans	37 ans			troncs	++	+	
Faible densité court	500	37		-	20 ans	30 ans				troncs	+	+	~ ПК « adaptation » d'AFClim
Classique très court	1200	30		15 ans	22 ans					troncs		+++	
Forte densité très court	1600	30	Labour	-	-					troncs + rémanents	-	+++	ПК « intensif »

L'itinéraire **Classique** correspond à une sylviculture couramment pratiquée sur le territoire du Haut Languedoc : densité de plantation de 1200 tiges/ha pour une durée de révolution de 45 ans avec un dépressage (même si cette opération est de moins en moins courante) où 40 % du volume est prélevé et 3 éclaircies où l'on prélève à chaque fois 20 à 30 % du volume. Cet itinéraire correspond par ailleurs à l'option sylvicole D1 (« *Business as usual* » de l'étude de cas « Forêt de Douglas en Limousin » avec un risque moyen. La variante **Récoltes Intensives** prévoit les mêmes interventions, mais avec la récolte des rémanents. Une autre variante : **Faible densité** a été prévue avec les mêmes interventions, mais une densité de plantation moindre (500 tiges/ha). Cet ITK correspond à une préconisation qui est faite pour l'économie en eau dans le cadre des changements climatiques.

Le **Classique Long** représente une sylviculture relativement proche de la classique à la différence d'un âge de coupe rase plus tardif (60 ans), pour favoriser une production de gros bois de qualité. Cette sylviculture a été conseillée pendant longtemps et continue d'être une solution encouragée par le CRPF (CRPF Midi-Pyrénées, 2011) en tant qu'itinéraire « production de gros bois de haute qualité » mais elle est remise en question par la volonté des scieurs locaux de ne plus utiliser de gros bois. Cet itinéraire reprend donc les bases du Classique court mais en rallongeant la coupe rase à 60 ans permettant de faire 2 éclaircies de plus (à 44 et 52 ans).

Le scénario **Faible densité court** et les deux suivants sont plus hypothétiques et correspondent à des itinéraires peu ou pas du tout mis en place sur le périmètre de l'action, mais pourraient être à développer dans le cadre des changements climatiques. Ce scénario répond à un besoin de réduire les temps de rotation pour limiter les « accidents climatiques » (sécheresses, tempêtes...) mais aussi est le signe d'une certaine intensification particulièrement marquée dans d'autres itinéraires. Ceux-ci n'ont plus pour objectif premier la qualité des bois. Leur âge d'exploitation et leur diamètre est donc réduit. Toutefois, en diminuant la densité, le risque d'une branchaison importante est augmenté.

L'itinéraire **Très Faible densité** présente une densité de plantation extrêmement faible permettant de limiter les coûts à la plantation (bien qu'il contraigne à réaliser plus de dépenses notamment au niveau des protections gibier). Les éclaircies sont programmées tous les 10 ans et permettent au final de produire peu d'arbres mais avec de gros diamètres plus « rapidement ». Car si cet itinéraire est plus long que le précédent, il reste tout de même plus proche d'un itinéraire classique court. A cela se rajoute la difficulté technique de gérer la branchaison en ponctuant l'apport de lumière déjà important. Par ailleurs, ces itinéraires à faible densité permettent « d'économiser » les sols mais la quantité de lumière importante induite par cette faible densité rajoute la question de la non-formation d'une ambiance forestière, qui permettrait, le cas échéant, de limiter l'impact de chaleurs et sécheresses importantes.

Le scénario **Classique très court** prévoit les mêmes intervertirons que le Classique, mais avec une durée de révolution très réduite, aujourd'hui rarement pratiquée sur le douglas, mais qui pourrait se rencontrer davantage au vu de la demande en « bois moyen » des industriels.

Enfin, le scénario **Forte densité très court** répond à une volonté de production massive de biomasse. Cet itinéraire nécessite une plantation à haute densité (1600 tiges) avec un labour avant plantation. La coupe rase intervient à 30 ans

sans éclaircie préalable. Contrairement aux autres itinéraires, celui-ci prélève aussi les rémanents pour optimiser au maximum la quantité de matière récoltée.

## 4 Simulations sous climat futur

## 4.1 Les données et scénarios climatiques utilisés

## 4.1.1 Scénarios climatiques

Les scénarios climatiques découlent des scénarios définis dans le 5ème rapport du GIEC en 2014 : les RCP pour Representative Concentration Pathway. Les scénarios RCP sont quatre scénarios de l'évolution du forçage radiatif sur la période 2006-2300 (**Figure**). Le forçage radiatif est un concept quantitatif. Il correspond à l'impact qu'aurait un scénario en termes de rayonnement énergétique au sommet de la troposphère en réponse à un changement combiné des facteurs d'évolution du climat – comme la concentration des gaz à effet de serre et l'albédo des surfaces continentales. La sélection des scénarios RCP a été effectuée par les scientifiques sur la base de 300 scénarios publiés dans la littérature. Le RCP 8.5, le plus pessimiste, n'est dépassé que par environ 10 % des hypothèses envisagées, tandis que le plus favorable, le scénario RCP 2.6, ne dépasse que près de 10 % d'entre elles.

A partir de ces scénarios de concentration en GES, les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée. En parallèle, chaque scénario RCP est relié à un scénario d'émission élaboré par des socio-économistes. Si l'on compare les scénarios RCP aux anciens scénarios SRES, on constate que le scénario RCP 8.5 est un peu plus pessimiste que le scénario SRES A2, le RCP 6 est proche du SRES A1B, tandis que le RCP 4.5 est proche du SRES B1. Le seul scénario sans équivalent est le RCP 2.6 qui intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100.

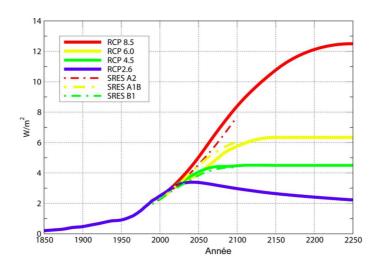


Figure 7. Les 4 scénarios RCP (GIEC, 2014), ainsi que les scénarios SRES (GIEC, 2007)

## 4.1.2 Régionalisation des scénarios climatiques

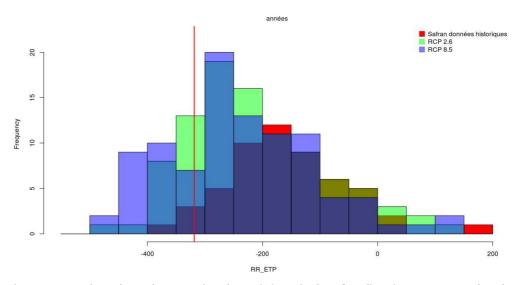
Le modèle climatique utilisé est le modèle dynamique régional du CNRM ALADIN (ALADIN-Climat v4) dont les simulations sont disponibles pour les scénarios climatiques RCP. Ces données sont mises à disposition par le portail DRIAS de Météo-France à une résolution de 8x8 km sur la France entière. Les simulations utilisées sont corrigées par la méthode quantile-quantile. Cette méthode corrige les valeurs des quantiles des séries quotidiennes des variables du modèle par celles calculées à partir des observations. La correction consiste à associer chaque centile du modèle au centile observé. Les données originales ont été interpolées au pas de temps horaire à partir d'un algorithme de l'INRA

développé par l'UMR ISPA. Cet algorithme tient compte de la hauteur solaire horaire et partitionne le rayonnement en fractions directe et diffuse en tenant compte des périodes de précipitations.

Dans le cadre de l'étude, afin de mieux comprendre les résultats du modèle sur des périodes particulières des journées simulées, les données journalières DRIAS et les moyennes journalières recalculées à partir des données interpolées à l'échelle horaire ont été comparées (voir annexe 4). Pour la majorité des variables, la correspondance est parfaite, mais pour d'autres, on ne retrouve pas systématiquement les valeurs journalières, notamment les températures minimales et maximales (différence de plus de 2°C pour environ 8 % des cas). Il a été aussi observé que le calcul de la pression atmosphérique ne prend pas en compte l'altitude, ce qui induit des erreurs dans le calcul de la pression partielle, de l'humidité relative et du VDP. L'algorithme d'interpolation de l'INRA va donc être corrigé prochainement. On remarque des discontinuités entre les données Safran historiques et les modèles climatiques RCP. Celles-ci sont plus marquées pour l'humidité relative et les extrêmes de températures.

## 4.2 Evénements extrêmes

Cette analyse simplifiée se base sur l'événement de sécheresse de 2003 et sur la fréquence de retour d'un tel épisode climatique dans les scénarios climatiques. On ne s'intéresse donc qu'aux indicateurs annuels de sécheresse atmosphérique (P-ETP estival et nombre de jours de forte température). De façon assez prévisible, les scénarios climatiques prédisent une diminution marquée de l'évapo-transpiration potentielle des mois d'été JJA. Cette diminution est plus marquée pour le scénario RCP 8.5 (**Fig. 8 &9**). Un événement tel que 2003 devrait se reproduire une année sur quatre en RCP 8.5 contre moins d'une année sur 20 en données historiques (trait rouge des histogrammes).



**Figure 8**. Histogrammes des valeurs de P-ETP dans les trois jeux de données climatiques. En rouge la valeur de P-ETP estival en 2003.

Nombre de jours de forte température annuelle

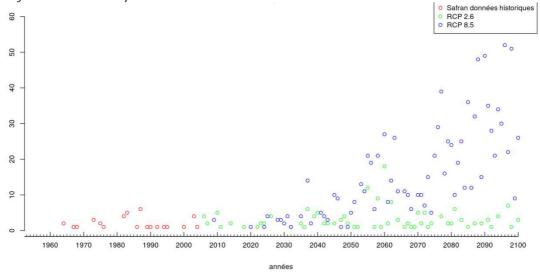


Figure 9. Evolution temporelle du nombre de jours de canicule dans les trois jeux de données climatiques.

Le nombre de jours par an de forte température atteint en 2003 (4 jours pour cette maille) devient plus fréquent dans ces scenarii climatiques (**Fig. 9**). A partir de 2040-2050, ce nombre de jours croît de façon assez rapide, particulièrement pour le scénario RCP 8.5. En se basant sur les deux indicateurs de sécheresse atmosphérique, on peut dire que des événements de stress hydrique comme 2003 reviendront dans le futur avec une fréquence multipliée par un facteur 5 à 20. L'évolution du nombre de jours à forte température souligne aussi l'augmentation marquée de la fréquence des canicules à partir de 2040-2050.

## 4.3 Simulations Pin maritime sous climat futur

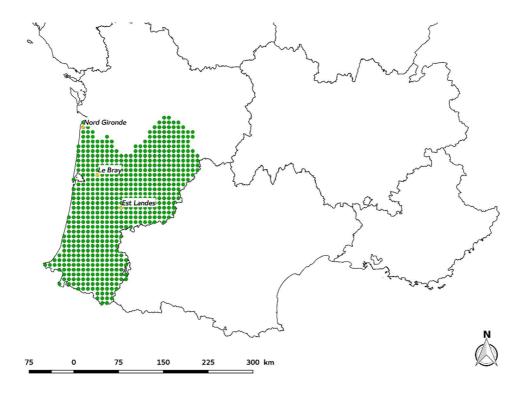
## 4.3.1 Protocoles des expériences de simulation

Les simulations ont été effectuées avec la version 26.13 du modèle, paramétrée et évaluée sur le Pin maritime. Afin de représenter la diversité des situations de disponibilité en eau, 3 classes de réserve utile (RU) ont été choisies : 25, 75 et 125 mm (ou kg H<sub>2</sub>O.m<sup>-2</sup>) de RU.

## Expérience 1 « locale ».

Dans cette expérience GO+ est exécuté sur deux mailles SAFRAN choisies pour leur représentativité du climat du massif landais :

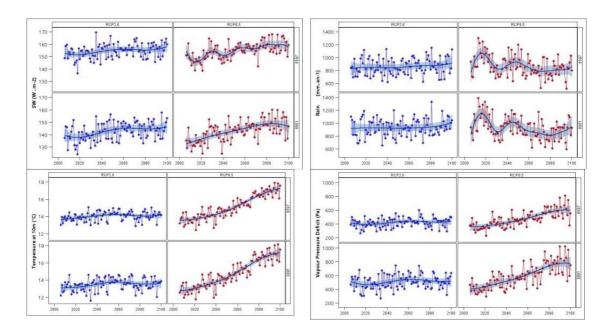
- le point 6597 de la grille Safran, représentatif du climat médocain du Nord du massif des Landes, en bordure atlantique.
- le point 8001 de la grille Safran, situé à l'Est des Landes, caractérisant un climat typique du cœur du massif forestier.



Carte 1. Représentation cartographique de la grille Safran utilisée pour l'expérience 2 « territoriale » (points verts) et points caractéristiques utilisés pour l'expérience 1 « locale » et la validation du modèle (points jaunes)

Les simulations ont été effectuées pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5, les deux points de grille, trois classes de réserve utile et les 11 itinéraires techniques (ITK) définis au paragraphe 4.1. Enfin, pour chacun des cas, les simulations ont été initialisées pour différentes classes d'âge, entre 3 et 7 suivant les durées de révolution des itinéraires techniques. On moyenne ensuite les résultats des simulations ce qui revient à simuler un massif en condition homogène avec des peuplements de classes d'âge équilibrées. Ceci permet de comparer des itinéraires de durées de révolution différentes en minimisant l'effet lié à l'âge initial.

Le scénario RCP8.5 simule un réchauffement continu et plus rapide en futur lointain que le RCP2.6, l'écart moyen de température moyenne annuelle et du déficit de pression de vapeur atteignant +4.1 °C et +160 Pa en fin de siècle (moyennes sur 2095-2100, Fig. 10)). Le régime de précipitation simulé sous le scénario RCP8.5 montre des variations temporelles marquées et accuse une différence de -120 mm en fin de siècle entre les RCP2.6 et 8.5. Les séries temporelles 2006-2100 de rayonnement solaire incident (SW), précipitations annuelles (P), température (T) et déficit de pression de vapeur (VPD) ne montrent pas de différence marquée entre les deux points de grille, quel que soit le scénario RCP. Toutefois, le centre des Landes (8001) accuse une T et un VPD plus élevés en fin de siècle que le littoral du Médoc (6597). La concentration en CO2 atteint 417 et 938 vpm en 2100 et sous les scénarios RCP 2.6 et 8.5 respectivement. Le régime de vent n'est pas différent entre les scénarios mais le vent moyen à 10 m est réduit de moitié à l'intérieur du massif (8001) par rapport au littoral (6597).



**Figure 10.** Séries temporelles 2006-2100 des valeurs moyennes annuelles de rayonnement incident de courte longueur d'onde (SW), hauteur de précipitations (Rain), température et déficit de pression de vapeur saturante (VPD) pour les points 6597 (Nord Gironde) et 8001 (centre Landes) selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5.

#### Expérience 2 « territoriale ». Simulation à l'échelle du territoire des Landes de Gascogne

Dans les résultats présentés dans cette expérience, le modèle GO+ est couplé au modèle CAT (Fortin et al. 2012) qui est un modèle d'allocation et de cycle de vie des produits récoltés distribuant la biomasse récoltée en 6 catégories de produits : bois d'œuvre, panneaux, ameublement, emballage, papier et fibre, énergie, autoconsommation. Ce modèle inclut les transformations secondaires et le recyclage. Compte tenu des résultats précédents et de la lourdeur du calcul pour l'ensemble du massif forestier des Landes, seules deux options sylvicoles sont simulées de 2006 à 2100 afin de représenter l'impact d'une intensification sylvicole, l'option standard et l'option I2.

Cette expérience est lancée pour chacune des 700 mailles *Safran* couvrant le massif des Landes de Gascogne et concerne donc 4 départements, Gironde, Landes, Pyrénées atlantiques et Lot et Garonne. En chaque point de grille, la superficie représentée par chaque classe d'âge a été calculée par l'IGN-IFN. La répartition des trois classes de sol a été calculée à partir de données « sols » IFN et de fonctions de pédo-transfert par l'INRA Nancy (UMR EEF, V. Badeau). Les classes d'âge et les types de sol sont supposés indépendants, la proportion de la superficie occupée par les classes d'âge est donc égale dans chacun des types de sol.

Afin de comparer les performances des options sylvicoles étudiées et leur interaction avec le climat, nous analysons ici les stocks de carbone *in situ* et *ex situ*, les échanges d'énergie, eau et carbone. A partir de ces données primaires simulées par GO+ - CAT, le forçage radiatif global instantané (*RF*) est calculé selon une approche inspirée de Bright et al. (2014) pour chaque alternative sylvicole. Le forçage radiatif (*RF*) intègre les effets biophysiques, *e.g.* le changement d'albédo, d'une part et les effets biogéochimiques sur le cycle du carbone d'autre part.

 Le forçage radiatif biophysique lié au changement d'albédo, RF<sub>B</sub> (W.m<sup>-2</sup>), est calculé à partir des valeurs de transmissivité atmosphérique moyennes mensuelles mesurées par télédétection (Data Center Surface Meteorological and Solar Energy (SSE) web

## Forçage radiatif

bien différencier les différentes Pour contributions au réchauffement planétaire, il est nécessaire de définir l'apport d'une espèce chimique au bilan énergétique de la Terre. Pour cela on utilise la notion de forçage radiatif. Il s'agit du flux d'énergie (en W/m2 ou substance J/s.m2) qu'une d'origine anthropique a ajouté durant une certaine période au bilan énergétique de la planète. Un forçage radiatif positif a un effet réchauffant avec une augmentation du bilan énergétique. A l'inverse, un forçage négatif a un effet refroidissant avec une diminution du bilan énergétique

portal supported by the NASA LaRC POWER Project<sup>1</sup> et du rayonnement incident de courte longueur d'onde des scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Le forçage provoqué par l'albedo de la région Aquitaine est calculé par intégration des points de grille 8x8 km pour toute la région (Bright et al. 2015, eq. 11). Il est intégré à l'échelle globale par le ratio de la superficie des forêts Aquitaine à celle du globe terrestre.

- Le forçage biogéochimique comprend :
  - la séquestration *in situ* du carbone (*RF*<sub>Eco</sub>) calculée à partir des valeurs simulées de *Net Ecosystem Exchange* (NEE en gC.m<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>). Elle concerne le sol et la biomasse de la végétation (arbres et sous étage).
  - Les émissions depuis les produits forestiers au cours de leur cycle de vie (RPP). Ces émissions sont différenciées pour les 6 catégories de produits forestiers et calculées à partir d'un modèle de décomposition de 1<sup>er</sup> ordre et des données de durée de vie des produits de Pin maritime qui vont de moins d'un an pour l'autoconsommation et l'énergie à 25 ans pour le bois d'œuvre.
  - Le bilan des émissions de carbone et oxyde nitreux d'origine fossile (RFF) provoquées par :
    - la sylviculture (élevage, transport et plantation des plants, préparation du sol, fertilisants, entretiens, éclaircies, récolte). Ces émissions incluent CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O et sont calculées d'après Gonzalez-Garcia et al. (2014). Ils incluent les opérations « amont » (pépinière, transport) et les opérations in situ (fertilisation, préparation du sol, plantation, débroussaillements, éclaircies et récoltes) jusqu'au dépôt des produits récoltés en bordure de parcelle. Les coûts d'amortissement des infrastructures et des engins mobilisés sont aussi inclus. Les valeurs appliquées pour le Pin sont de 16.7 et 16.0 kg CO<sub>2</sub> par m³ de bois récolté pour l'itinéraire standard et l'itinéraire intensif respectivement. Pour simplifier et parce que la majorité de ces émissions sont liées aux opérations de récolte, l'ensemble est considéré comme émis au moment de la récolte.
    - les coûts en énergie d'origine fossile de la transformation des produits récoltés qui sont pris en compte par le modèle CAT.
  - la substitution de produits à base de carbone fossile (gaz naturel, fuel, acier, béton, etc..) par l'utilisation des produits forestiers (RF<sub>S</sub>). Les coefficients de substitution (en kgC évité / kgC du produit utilisé) sont tirés de la compilation de Sathre et O'Connor (2010), les valeurs suivantes étant appliquées : 0 pour papier et autoconsommation, 0.5 pour l'énergie, 0.6 pour l'emballage, 2.1 pour panneaux et 3.0 pour le bois d'œuvre. Elles comprennent les émissions de CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> provenant de la décomposition des produits et les émissions de C fossile nécessaire à la fabrication de ces produits. Ces émissions, négatives, sont produites à la date de récolte. Ces émissions évitées n'ont une cohérence qu'en valeur relative, c'est à dire lorsque l'on compare deux scénarios sylvicoles, ce qui est bien le cas ici (voir rapport Gesfor : Vial et al., 2017).

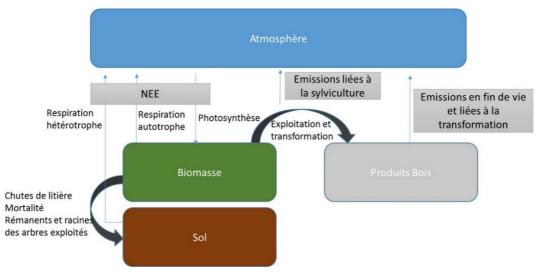


Figure : Illustration des flux pris en compte dans les calculs à l'échelle du massif des Landes de Gascogne

-

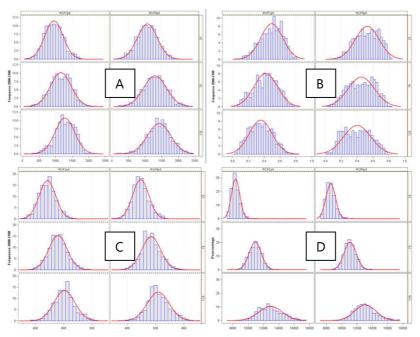
https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov

Le calcul du forçage biogéochimique tient compte de la dilution dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (Boucher et al. 2007), de leur impact radiatif instantané (Myrhe et al. 1998) et de leur rémanence dans l'atmosphère selon le calcul d'atténuation issu du modèle Bern 2.5 CC (Forster et al. 2007).

#### 4.3.2 Résultats et discussion

Expérience 1 « locale ».

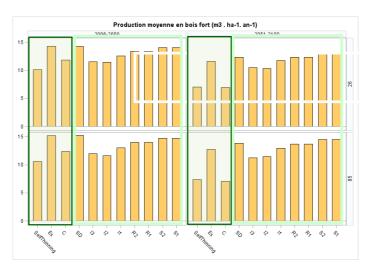
La Figure 11montre que, tous itinéraires techniques confondus, l'impact de la réserve utile sur le fonctionnement des forêts prédomine sur celui du climat. La différence d'impact climatique entre les deux RCPs, est relativement modeste malgré un stress hydrique augmenté sous scénario RCP8.5. Comme dans le cas du Douglas, nous attribuons cette faible différence à l'effet fertilisant de l'augmentation en CO<sub>2</sub> atmosphérique qui compense en grande partie les effets du réchauffement et de l'assèchement. La production biologique nette est même légèrement plus forte sous RCP8.5.



**Figure 11.** Distribution de fréquence des valeurs annuelles 2006-2100 de production primaire nette (A), indice de stress hydrique GO+ (B), évapotranspiration réelle (C) et stock de carbone du sol (D) pour les scénarios climatiques RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour 3 classes de réserve utile, 25, 75 et 125 mm. Les points de grille 6597 et 8001 sont confondus.

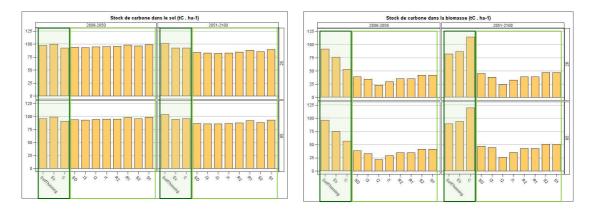
Dans la suite nous détaillons les résultats des simulations réalisées pour le point de grille 8001 (centre du massif). Deux périodes sont considérées sur le 21<sup>ème</sup> siècle : le futur proche (2006-2050) et le futur lointain (2050-2100). Par comparaison des valeurs obtenues selon différents ITK, les figures suivantes montrent l'impact de la gestion sur le fonctionnement et la production du Pin maritime. Toutes les simulations prévues ont été effectuées et les données correspondantes archivées, nous n'en présentons ici que les plus signifiants.

Deux ensembles d'ITK se différencient, un ensemble à densité « libre », non régulée (encadré vert foncé) incluant Autoéclaircie, Extensif (Ex) et Biomasse court France et un ensemble d'ITK à densité contrôlée (encadré vert clair) incluant les itinéraires Semi Dédié (SD), Intensif (I1-I3), Standard Court (R1-R2) ou Standard (S1-S2). Le premier ensemble présente des ITK sans éclaircies (AutoEcl. et C) ou avec des éclaircies plus espacées dans le temps (Ex). Ils produisent des peuplements à indice foliaire et densité plus élevées et relativement peu de prélèvement par unité de temps. Ils répondent plus négativement au climat que le second ensemble. La production en bois fort notamment est réduite de -30% (AutoEcl.), -19% (Ex) et -42% (C) entre le futur proche et le futur lointain sous les deux scénarios RCP2.6 ou RCP8.5. Pour le deuxième ensemble au contraire, la conduite des éclaircies et le déclenchement des coupes finales est basée sur des valeurs seuils de circonférence moyenne ce qui permet une régulation de l'indice foliaire et de la densité des arbres selon le rythme de croissance et donc le climat et la réserve utile. La baisse de production moyenne de ces ITK entre les périodes proches et lointaines ne dépassent pas -10% à l'exception de l'ITK SD où elle et de -13%.



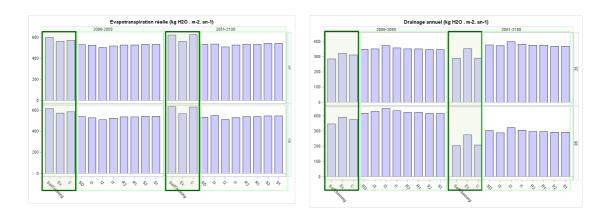
**Figure 12.** Valeurs moyennes de la production annuelle en volume de bois fort pour les scénarios climatiques RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour les périodes 2006-2050 et 2051-2100 (moyennes des classes de réserve utile et points de grille 6597 et 8001). Les ITK à densité libre sont encadrés en vert foncé, les ITK à densité contrôlée en vert clair.

Pour les 11 ITK évalués, les stocks de carbone *in situ* sont plus importants pour le sol que pour la biomasse. Les stocks du sol sont aussi moins sensibles à la sylviculture et au climat (Fig. 13). Le stock du sol est néanmoins diminué en futur lointain et de façon plus accentuée pour les modes de gestion intensifs où les exportations de biomasse sont accrues. Le stock de carbone dans la biomasse est contrôlé et régulé par la gestion pour les itinéraires à densité contrôlée pour lesquels il change peu entre les périodes et les scénarios de climat. Il est deux à trois fois plus important et augmente substantiellement en fin de siècle pour les itinéraires à moindre intervention, sous l'effet de récoltes, donc d'exportations, moins fréquentes et moins importantes (cf. Fig. 12) et secondairement, d'un taux de croissance réduit. Pour une durée de simulation fixée à 100 ans, du fait d'un taux de croissance plus faible, ces itinéraires vont présenter une fréquence du nombre d'éclaircies et de coupes rases plus réduite.

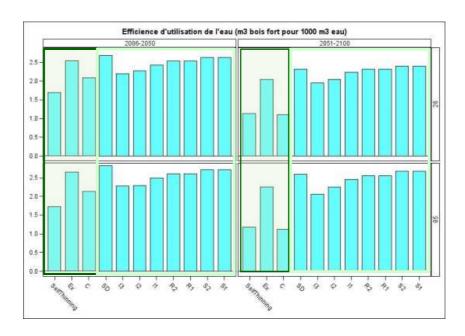


**Figure 13.** Valeurs moyennes du stock de carbone dans le sol (à droite) et dans la biomasse (à gauche) pour les scénarios climatiques RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour les périodes 2006-2050 et 2051-2100 (classes de réserve utile confondues).

L'évapotranspiration réelle moyenne des peuplements est dépendante de l'indice foliaire et de la densité des peuplements et donc, pour les mêmes raisons que pour la production, plus sensible au climat et aussi plus élevée pour les itinéraires à densité libre (**Fig. 14**). Le drainage annuel est en conséquence réduit de près de la moitié en fin de siècle pour les ITK à densité « libre », *AutoEcl., Ex* et *C.* L'efficience de l'eau, définie ici comme le rapport entre la production en bois fort et l'évapotranspiration réelle, réagit sensiblement à la gestion sylvicole et au climat (**Fig. 15**). Elle est plus faible pour le groupe « libre » que pour le groupe « contrôlé », les interventions (éclaircies) permettant de réguler la demande d'évapotranspiration et d'optimiser l'utilisation de l'eau. Parmi les ITK à densité contrôlée, l'efficience de l'eau diminue lorsque le niveau d'intensification augmente. Elle est aussi réduite sous futur lointain et climat plus sec, que sous futur proche.



**Figure 14.** Valeurs moyennes de l'ETR et du drainage pour les scénarios climatiques RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour les périodes 2006-2050 et 2051-2100 (classes de réserve utile confondues).



**Figure 15**. Efficience de l'eau évapo-transpirée en production de bois fort (m³ bois fort/1000m3 d'eau). Valeurs moyennes pour les scénarios climatiques RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour les périodes 2006-2050 et 2051-2100 (classes de réserve utile confondues).

Expérience 2 « territoriale ».

Les **figures 16 et 17** résument les résultats obtenus sur l'impact climatique des options de sylviculture envisagées et leur interaction avec les scénarios de climat. Les itinéraires sylvicoles appliqués (S et I1) affectent les stocks de carbone du sol et de la biomasse (**Fig. 16**). Le stock de carbone du sol reste stable en gestion standard mais diminue de 10 à 15% en fin de siècle en mode intensif en raison de la diminution des restitutions de matière organique au sol causée par les exportations accrues de biomasse (souches et branches) et par le travail du sol plus fréquent et plus intensif, ce qui est cohérent avec la littérature (Achat et al. 2015 a&b). Le stock de carbone dans la biomasse sur pied est aussi plus élevé en mode standard en raison d'une révolution plus longue. Ses fluctuations interannuelles reflètent l'évolution de l'âge moyen de la forêt et les variations de récolte annue le : notamment du fait des tempêtes de 1999 et 2009, les classes d'âge ne sont actuellement pas équilibrées sur le massif et ce déséquilibre se répercute sur les évolutions futures. Ces fluctuations sont amplifiées en mode intensif où la durée de rotation est plus courte.

Le stock dans les produits forestiers est d'un ordre de grandeur moins important que dans la biomasse ou le sol, résultats également cohérent avec d'autre travaux de modélisation (Fortin et al., 2012). Il varie fortement à l'échelle annuelle en mode intensif dont les récoltes sont de plus faible dimension et qui produisent donc d'avantage de produits à courte durée de vie (énergie, fibre, emballage).

L'effet du scénario climatique est surtout marqué en deuxième moitié du siècle. Le scénario RCP 8.5 présente des stocks plus faibles et diminuant plus fortement en fin de siècle que le scénario RCP 2.6. Cette diminution s'explique par la baisse de productivité primaire induite par les sécheresses et le réchauffement aggravés dont les effets négatifs sur la végétation l'emportent sur l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, confirmant les résultats préliminaires (Ciais et al. 2010). On ne

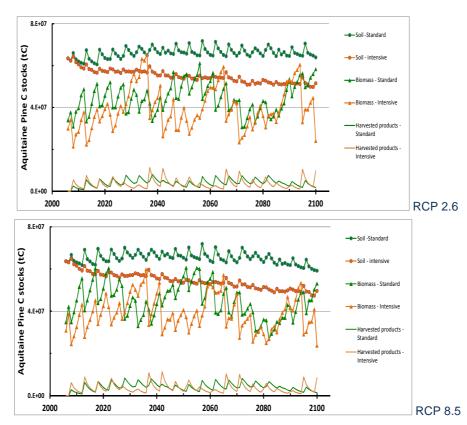
retrouve donc pas ici la tendance observée dans l'expérience locale qui était limitée à deux points de grille contre environ 700 ici. De plus, les ITK implémentés en mode territorial ne sont pas exactement identiques à ceux testés en mode local (régulation par l'âge au lieu de valeurs de circonférence cible précédemment).

Les effets biophysiques globaux (liés au changement d'albédo) sont plus faibles et moins contrastés par la sylviculture que les effets biogéochimiques (**Fig. 17**). Nous ne développons pas ici l'effet de la sylviculture sur l'évapotranspiration réelle des forêts de Pin en Aquitaine car les différences entre les options de sylviculture analysées, toutes deux à densité contrôlée, sont négligeables (moins de 1% sur le cumul 2006-2100), confirmant la proposition de Roberts (1980) sur le caractère conservatif de l'évapotranspiration en forêt et bien que les effets de changement de rugosité, indice foliaire ou densité des arbres (Bright et al. 2015, Nakai et al. 2008) sur les flux convectifs soient bien représentés dans le modèle GO+.

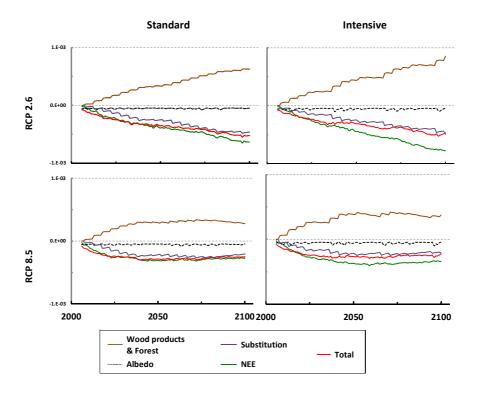
L'impact biophysique de la sylviculture s'explique donc essentiellement par les écarts d'albédo entre les deux schémas sylvicoles testés dont le plus intensif, avec des rotations plus courtes, expose plus de superficie en coupe rase et de jeunes peuplements dont l'indice foliaire est faible et l'albédo plus él vé : il est donc davantage « refroidissant » du point de vue biophysique.

Les effets « biogéochimiques » (cycle du carbone) de la gestion (**Fig. 17**) comprennent trois composantes, les échanges de carbone *in situ* (en vert), les émissions de CO<sub>2</sub> *ex situ* depuis les produits forestiers (en brun) et la substitution de carbone fossile par l'utilisation des produits bois (violet). Le forçage radiatif biogéochimique est moins fort sous RCP 8.5 où il semble saturer à partir de 2040 ce qui ne s'observe pas sous le scénario RCP 2.6. Cette différence est due à la saturation de l'impact des variations de concentration en CO<sub>2</sub> dans une atmosphère plus riche en gaz à effet de serre (934 ppm sous le RCP 8.5 contre 414 ppm en 2100 pour le RCP 2.6).

Les termes de forçage radiatifs dus à la végétation et aux produits sont les plus importants et de signe opposé, ils s'annulent presque mutuellement. Le résidu de la différence entre ces termes correspond au stockage dans le sol, la biomasse ou les produits forestiers. En fin de siècle ce stockage à long terme est cependant relativement faible, traduisant une relative stabilité de ces stocks, et il est moindre en gestion intensive. C'est donc surtout l'effet de substitution qui détermine finalement le forçage global de chacune des options.



**Figure 16.** Simulation des stocks de carbone sur pied, dans le sol et dans le pool de produits récoltés pour l'ensemble des futaies de Pin maritime de la région Aquitaine de 2006 à 2100 suivant les scénarios climatiques RCP 2.6 et 8.5.



**Figure 17.** Forçage radiatif instantané (W.m-2) des futaies de Pin maritime d'Aquitaine de 2006 à 2100 pour les deux itinéraires sylvicoles et sous deux scénarios climatiques et leur décomposition en émissions *in situ*, *ex situ* et substitution

## 4.4 Simulations Douglas sous climat futur

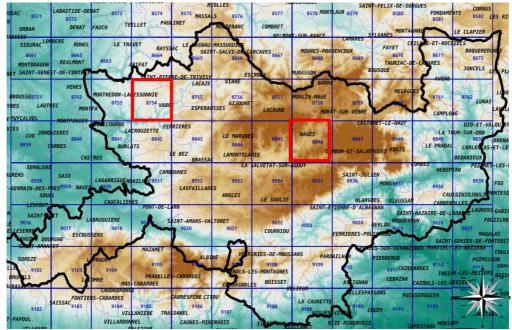
## 4.4.1 Protocole de simulation

Les simulations ont été effectuées avec la version 26.13 du modèle, paramétrée et évaluée pour le douglas (voir parties 2 et 3). Afin de représenter la diversité des situations rencontrées, des classes de disponibilité en eau ont été défin es : une classe médiane de 90 mm, correspondant à la valeur médiane des mesures réalisées en France sous douglas (Badeau, pers. Com et Breda et al., 2002) et deux classes à +/- 33%, soit 60 mm et 120 mm.

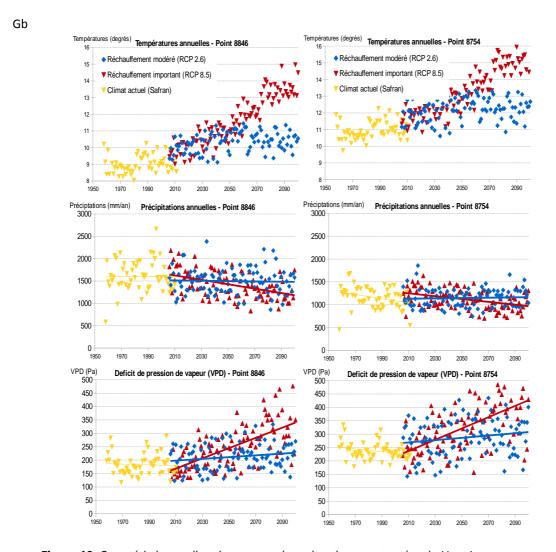
Les 8 itinéraires techniques testés sont décrits dans la partie 4 du présent rapport. Deux scénarios climatiques ont été simu és : RCP 2.6 et RCP 8.5. Ces scénarios, ainsi que leur régionalisation sont décrits dans la partie 5.1. Les résultats sont généralement présentés en scindant la période temporelle de simulation en deux, avec le futur proche (2006-2050) et le futur lointain (2050-2100).

## 4.4.2 Données climatiques en Haut Languedoc

L'échelle la plus fine à laquelle les projections climatiques RCP sont disponibles est la grille 8\*8km. Cependant, la variabilité du climat dans les territoires de moyenne montagne tel que sur le Parc du Haut Languedoc est très forte et il est difficile de la représenter (Fig. 18). Des points situés à quelques kilomètres l'un de l'autre présentent des profils climatiques très différents du fait de leurs altitudes, et de leur situation topographique contrastée. Les données climatiques utilisées en entrée du modèle ne sont donc pas proposées à une échelle assez fine pour que les sorties soient présentées sous forme cartographique. La reconstitution du climat infra maille est apparue hors de portée du projet Evafora. Par la suite, on a donc choisi donc de travailler principalement sur des échantillons représentatifs de stations.



**Carte 2.** Maillage « Safran » et topographie du territoire du PNR du Haut Languedoc. Les mailles 8754 et 8846 sont signalées en rouge.



**Figure 19.** Caractéristiques climatiques pour deux situations contrastées du Haut Langue oc : point 8846 (Nages) et point 8754 (Montredon-Labessonnié). a. Températures

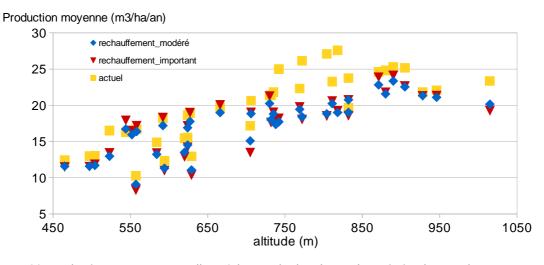
#### 4.4.3 Résultats et discussion

## Interaction climat- production

Dans un premier temps, les facteurs climatiques et leur lien avec la production sont étudiés. On se concentre donc sur les résultats de l'ITK standard et la RU médiane de 90 mm. On calcule les productions moyennes annuelles sur l'ensemble des points de la grille sur les périodes 2006-2100 pour les scénarios RCP 2.6 et 8.5 et 1958-2010 pour le climat historique Safran.

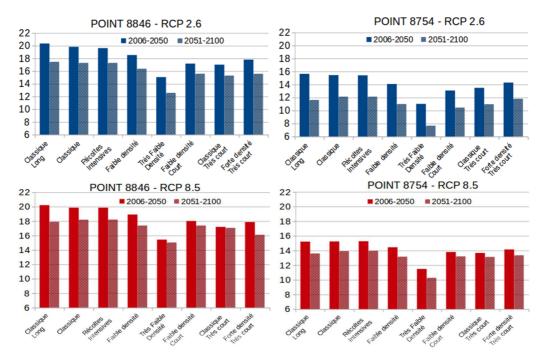
Nos résultats montrent que la corrélation entre la production et l'altitude est bien reproduite par les simulations, quel que soit le scénario (voir **Figure 20**). Les meilleurs productions sont atteintes à partir de 750 m d'altitude, ce qui correspond aux observations de terrain (CRPF Midi Pyrénées., 2011). Les productions historiques simulées sont en accord avec celles annoncées par les tables de production utilisées localem nt : environ 25 m³/ha/an pour la classe 1 d'Angelier (2007) et environ 21 m³/ha/an pour la classe 1 de Sardin (2012), et la classe B de CRPF Midi Pyrénées (2011).

On constate une perte de croissance entre le climat historique et le scénario RCP2.6. Bien que ce scénario représente un réchauffement modéré, les simulations montrent une rupture avec le climat passé. D'après nos simulations, les niveaux de croissance constatés jusqu'alors ne se retrouvent pas dans les scénarios futurs, en particulier pour les altitudes intermédiaires (Fig. 20). Par ailleurs, les niveaux de production sont similaires entre les RCP 2.6 et 8.5 pour chacun des points simulés.

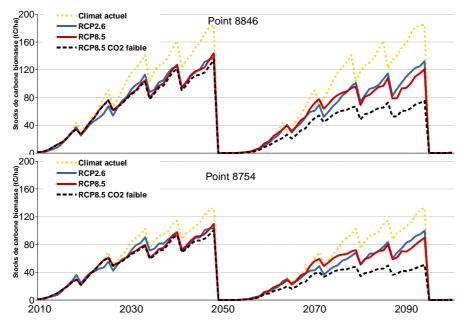


**Figure 20.** Production moyenne annuelle (m3/ha/an) du douglas sur le territoire du PNR du Haut Languedoc. Chaque point représente la production moyenne pour la période 2006-2100 pour une RU de 90 mm et l'ITK standard sur une maille Safran. Seules les mailles de plus de 450m d'altitude sont représentées.

La comparaison entre les différents itinéraires techniques pour les deux points sélectionnés montre la même tenda ce : les scénarios 2.6 et 8.5 présentent des productions relativement proches à la fois dans le futur proche (2006-2050) et dans le futur lointain (2050-2100) (**Fig. 21**). La diminution des précipitations, l'augmentation de la température et du VPD pour la 2ème moitié du 21e siècle en RCP8.5 laissent à penser que sous l'effet du stress hydrique, la croissance des peuplements serait diminuée, ce qui n'est pas le cas ici, l'augmentation en CO<sub>2</sub> atmosphérique compensant ces effets négatifs. Pour vérifier cette hypothèse, un scénario fictif « hybride », combinant le climat du RCP8.5 et les concentrations atmosphériques du RCP 2.6 a été testé. Les résultats en termes de carbone biomasse sont présentés sur la Fig. 22 pour les deux points sélectionnés (ITK Classique et RU de 90 mm).



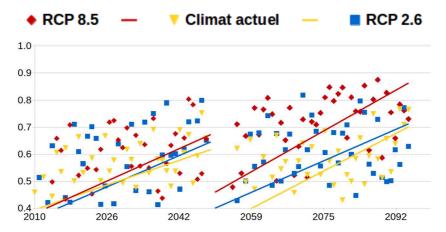
**Figure 21**. Productions moyennes annuelles (m³/ha/an) du douglas pour le futur proche et le futur lointain selon différents ITK et RCP. Les résultats représentent une moyenne des 3 classes de RU.



**Figure 22.** Stocks de carbone dans la biomasse des arbres (tC/ha) selon 4 scénarios climatiq es : RCP2.6, RCP8.5, données historiques (les données 1958-2010 ont été re-projetées sur 2006-2100) et un scénario combinant le climat RCP8.5 avec la teneur en CO2 atmosphérique du RCP2.6. ITK classique et RU = 90 mm.

On retrouve des stocks de carbone biomasse très proches entre les 2 RCP, inférieurs aux stocks simulés avec un climat historique, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus pour la production (**Fig. 21**). En revanche, on constate que les stocks de carbone dans la biomasse du scenario « hybride » diminuent fortement à partir de 2050, mettant en évidence l'effet compensateur du CO<sub>2</sub> atmosphérique en RCP 8.5. Sans cet effet compensateur, la production est diminuée respectivement de 35% et 40 % sur la période 2050-2100 pour les points 8846 et 8754 et les stocks de carbone « biomasse » sont diminués de 38 % et 44 %. Cet effet classique de fertilisation du CO<sub>2</sub> se retrouve dans des travaux de modélisation similaires (Magnani et al., 2004, Autres) et est semble-t-il observé au cours du 20<sup>e</sup> siècle (Charru et al. 2017). Son effet futur est incertain pour plusieurs rais ns : les mortalités liées au stress hydrique, non simulées ici,

pourraient grever la production sur le long terme (Sergent et al., 2014), tout comme l'apparition d'autres limitations, par exemple en éléments minéraux (voir discussions de la partie 5).



**Figure 23.** Indices de stress selon 3 scénarios climatiques pour l'ITK classique et une RU de 90 mm pour le point 8846

L'analyse des indices de stress montre une augmentation de ces derniers après 2050 pour le RCP 8.5, ce qui traduit bien les périodes de stress hydrique que les peuplements connaîtraient avec un tel climat sur la 2ème moitié du 21e siècle (Fig. 23). Ces résultats sur l'indice de stress indiquent clairement l'augmentation de la vulnérabilité du douglas aux risques de stress hydrique en RCP 8.5 par rapport au scénario historique ou au RCP 2.6.

## Impacts des itinéraires sylvicoles

Concernant le carbone « biomasse » (**Fig. 24**), on retrouve une gradation suivant la durée de révolut on : l'ITK qui stocke le plus de carbone est l'ITK le plus long. A durée de révolution égale, la diminution de densité initiale engendre une perte de carbone, très faible pour la densité de plantation de 500tiges/ha (ITK « faible densité »), et plus importante pour 250 tiges/ha (ITK « très faible densité »). Il est à noter qu'avec des densités aussi faibles, qui ne sont même pas testées sur le terrain, on se trouve probablement en dehors du champ d'application du modèle, puisque la végétation d'accompagnement qui apparait nécessairement n'est plus un sous étage, mais une essence de mélange. La surdensification à la plantation (1600 tiges/ha) présente en revanche un avantage en termes de carbone biomasse (« Forte densité très court » par rapport à « Classique très court »). Les niveaux de stock pour le point 8846 restent très proches entre le futur proche et le futur lointain et augmentent même légèrement en RCP 8.5. En revanche, pour de plus faibles altitudes (point 8754), les stocks diminuent de manière assez importante en RCP 2.6.

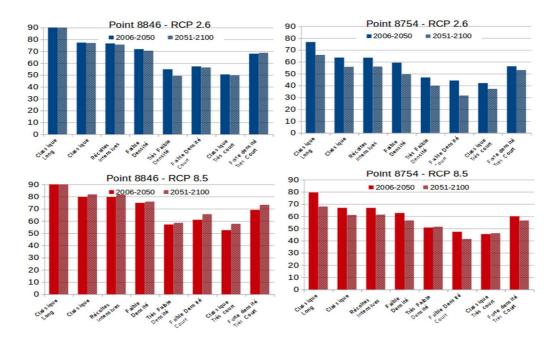


Figure 24. Stocks de carbone biomasse (tC/ha). Valeurs moyennes sur les périodes 2006-2050 et 2050-2100.

Les stocks de carbone du sol ont été calculés pour le début de la période de simulation (moyenne 2006-2010) et à la fin de cette dernière (moyenne 2095-2100), ce qui permet de mieux représenter les plus lentes variations de carbone de ce compartiment. Les deux points simulés montrent des tendances opposés pour les itinéraires « classiques » (Figure 25). Alors que le point 8846, de bonne fertilité montre une augmentation des stocks, comme observé sur le réseau Renecofor (Jonard et al., 2017). En conditions moins favorables (point 8754), les stocks diminuent y compris pour la sylviculture classique, ce qui s'explique par une valeur de stock initiale élevée par rapport au stock « à l'équilibre ». L'évolution du carbone du sol est liée à la production moyenne par le biais des apports de litiè es : les itinéraires les moins productifs génèrent moins de chutes de litière et d'apports de matière lors des coupes (rémanents) soit moins de carbone en entrée du compartiment sol. Cela s'observe en particulier pour les itinéraires à faible et très faible densité. L'itinéraire de récoltes intensives présente un stock de carbone du sol plus faible en fin de période que l'itinéraire classique dont il se différencie uniquement par les compartiments récoltés. Cela met donc en évidence l'effet dépréciateur sur le carbone du sol des récoltes « arbres entiers ». L'itinéraire « forte densité très court », malgré la forte densité à la plantation a un stock de carbone du sol plus faible que l'ITK « Classique très court » de la même durée de révolution, mais sans labour. Cette pratique se traduit donc sur le long terme par une diminution des stocks de carbone du sol. Enfin, le scénario climatique RCP 8.5 apparait plus favorable au stockage de carbone dans le sol que le scénario 2.6.

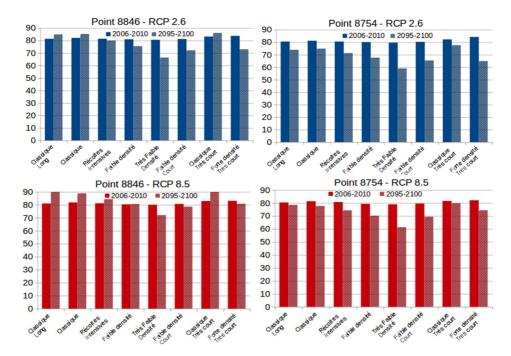
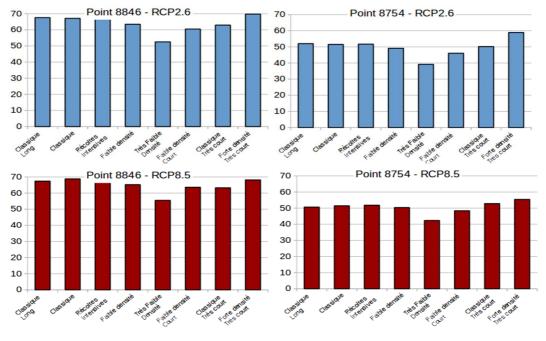
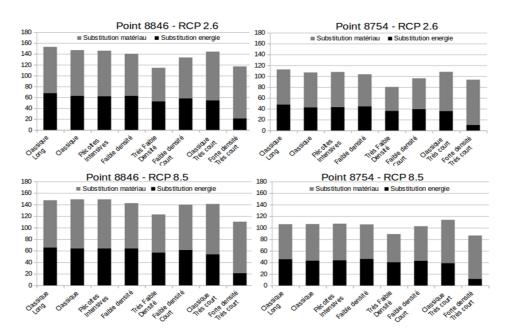


Figure 25. Stocks de carbone du sol (tC/ha).

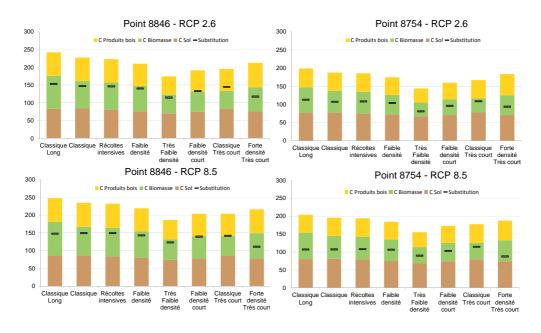


**Figure 26.** Stock de carbone dans les produits bois (tC/ha) sur la période 2006-2100, données issues de l'outil CAT paramétré pour le Douglas.



**Figure 27.** Effets de substitution énergie et matériau par rapport à un scenario d'absence de forêt. Valeurs cumulées sur la période 2006-2100 en tC/ha.

La durée de vie moyenne des produits bois (PB) de construction (la majeure partie des produits ici), étant supérieure aux durées de révolution des différents ITK, on constate une accumulation du stock PB tout au long du 21<sup>e</sup> siècle puisque par ailleurs les stocks PB sont initialisés à une valeur nulle en 2006. Le choix est donc fait de montrer les valeurs de stock moyen pour toute la période 2006-2100 (**Figure 26**). L'ordre de grandeur du stock moyen dans les produits exprimé par ha de forêt est le même que le stock biomasse, ce qui est cohérent avec les résultats du projet GESFOR pour le douglas (Vial et al., 2017). La substitution présente des valeurs élevées (**Figure 27**), le douglas permettant de produire une proportion relativement importante de bois de construction pour lequel l'effet de substitution est fort. Les différences entre les itinéraires sont essentiellement dues aux écarts de production totale (quantité de bois produit) et à sa répartition entre bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie (qualité du bois produit).



**Figure 28**. Bilan carbone global sur la période 2006-2100 en tC/ha, comprenant les stocks moyen biomasse (vert), produits bois (jaune) et sol (marron), ainsi que les effets de substitution cumulés (traits noirs)

Sur le bilan global des stocks, on constate que ce sont les stocks biomasse qui sont les plus variables (Fig. 28). L'itinéraire de très faible densité présente le moins bon bilan ; les densités de plantation testées ici sont toutefois extrêmement

faibles et le carbone biomasse de cet itinéraire pourrait être sous-estimé, comme expliqué ci-dessus. On observe une tendance de stock de carbone plus faible pour les plus courtes révolutions, que les effets de substitution ne compensent pas.

# 5 Cycles biogéochimiques des nutriments

## 5.1 Objectifs

L'objectif de cette partie est d'abord de vérifier le réalisme des simulations de GO+, vis-à-vis des quantités de nutriments nécessaires pour satisfaire la production de biomasse prédite par le modèle puis d'analyser les exportations de nutriments prédites en fonction des scénarios de sylviculture et climat.

La croissance des plantes peut être limitée par la disponibilité des éléments minéraux, principalement l'azote (N) et le phosphore (P) (Elser et al., 2007; Lebauer and Treseder, 2008; Harpole et al., 2011). Le modèle GO+ n'inclue actuellement pas de couplage dynamique des cycles biogéochimiques du carbone (C), de l'N et du P, et n'inclue donc pas d'effet de la disponibilité en nutriments sur la croissance à chaque pas de temps simulé. Il est donc nécessaire de vérifier le réalisme de la demande en N-P par la biomasse prédite (Achat et al., 2016), en comparant par exemple cette demande à des bilans entrées-sorties évalués indépendamment. Nous avons développé un **module** « *nutriments* » adjoint à GO+, permettant de faire cette comparaison.

Le module « nutriments » présente aussi l'avantage de permettre une évaluation des itinéraires sylvicoles vis-à-vis du coût en nutriments associé. Un second objectif est donc d'évaluer différentes options sylvicoles en analysant plusieurs indicateurs : quantités d'éléments minéraux exportés avec les récoltes, bilans entrées-sorties, changements dans les stocks de C-N-P dans les sols. Cette évaluation permet une évaluation des itinéraires sylvicoles vis-à-vis de la durabilité de la fertilité chimique des sols. Au final, l'utilisation conjointe des indicateurs de GO+ et des indicateurs de son module « nutriments » peut permettre une évaluation « multicritère » des risques environnementaux, répondant ainsi aux demandes actuelles (cf. appel à projet GRAINE) et faisant un lien avec d'autres travaux pour l'ADEME (Achat et al., 2015a-b ; projets RESOBIO & GESFOR).

**Un article** a été soumis à *Forest Ecology and Management*: David L. Achat, Simon Martel, Delphine Picart, Christophe Moisy, Laurent Augusto, Mark R. Bakker, Denis Loustau, *Modelling the nutrient cost of biomass harvesting under different sylvicultural and climate scenarios in production forests.* 

# 5.2 Description du module « nutriments »

Le module « nutriments » est couplé au modèle GO+ et en utilise les sorties (DBH, âge, biomasses aériennes et racinaires des arbres sur pied et compartiments récoltés, biomasses du sous-bois et stocks de C du sol) agrégées à l'échelle annuelle (Fig. 29). Le contenu en nutriments (N, P, K, Ca & Mg) des compartiments de biomasse est calculé à partir de relation allométriques. Les effets de l'âge des arbres et des dimensions des compartiments sur les concentrations en nutriments sont pris en compte en adaptant des relations existantes (par exemple, Augusto et al., 2008, 2015) ou en ajustant des relations à partir de compilations de données issues de recherches bibliographiques (Fig. 29). Les minéralomasses de la végétation du sous-bois sont calculées en utilisant des concentrations en nutriments dans les racines et celles dans les parties aériennes de différentes espèces (compilation de données publiées et de données communiquées par Bakker et Gonzalez (UMR INRA-Bordeaux-Sciences-Agro ISPA)) (Fig.29).

Les stocks de nutriments dans les différents compartiments organiques du sol (DPM, RPM, BIO/HUM/IOM) sont calculés en utilisant des rapports stœchiométriques C : N et C : P dans les litières et le sol (données utilisées : Achat et al. (2009), Augusto et al. (2010), données issues du réseau RENECOFOR et communiquées par M Nicolas (ONF)). Ces minéralomasses des arbres sur pied et du sous-bois et les stocks de nutriments dans la matière organique du sol sont utilisés pour calculer les changements cumulés de stocks de nutriments (N & P organique) dans l'écosystème. Ces derniers sont finalement comparés à des bilans entrées-sorties dans l'écosystème. Ces bilans ont pu être évalués pour les peuplements de Pin maritime dans le contexte des Landes de Gascogne, c.-à-d. un contexte avec suffisamment de connaissances sur les cycles des éléments minéraux (par exemple : Augusto, 2010 ; Augusto et al., 2005 ; Trichet et al., 2009).

Les bilans sont calculés en prenant en compte les différents flux entrants (dépôts atmosphériques N-P en fonction de l'âge des arbres, fixation non symbiotique et symbiotique de l'N en fonction de l'âge du peuplement, fertilisation

phosphatée à l'installation du peuplement, apport de P par altération des minéraux) et les différents flux sortants (exportations avec les récoltes (voir ci-dessus), lixiviation en fonction de la durée écoulée après coupe rase). Compte tenu de la variabilité dans les valeurs des flux, des estimations « hautes », « basses » et « moyennes » des bilans entréessorties ont été calculées. Les valeurs maximales des entrées et les valeurs minimales des sorties sont utilisées pour les estimations « hautes » des bilans. Les valeurs minimales des entrées et les valeurs maximales des sorties sont utilisées pour les estimations « basses » des bilans. Les valeurs moyennes des entrées et des sorties sont utilisées pour les estimations « moyennes » des bilans.

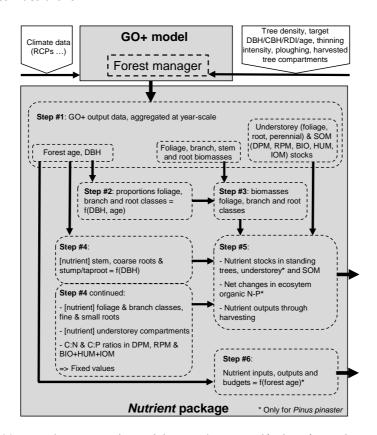


Figure 29. Fonctionnement du module « nutriments », développé pour le modèle GO+.

# 5.3 Sites, scénarios climatiques et itinéraires simulés

Les simulations ont été effectuées sur la période 2006-2100, en utilisant deux scénarios climatiques : le RCP 2.6 visant à limiter le réchauffement climatique en dessous de 2°C par rapport aux températures préindustrielles et le RCP 8.5 avec des émissions très importantes de gaz à effet de serre (données dérivées du modèle GCM Aladin, distribuées sur la grille SAFRAN de 8 km de résolution ; http://www.drias-climat.fr/). Deux points de grille ont été sélectionnés: 7416 & 5884, respectivement pour le Pin et le Douglas. Ces points ont été choisis car ils sont les plus proches de sites ayant fait l'objet de validations en termes de croissances/biomasses (site « Le Bray » dans les Landes de Gascogne pour le Pin maritime ; site « Le Quartier » dans le Puy-de-Dôme pour le Douglas ; Loustau et al., 2018).

Une série d'itinéraires techniques, réalistes par rapport aux pratiques actuelles ou à venir (Colin et al., 2009; de Lary et al., 2015; Orazio et al., 2015; Ortisset et al., 2011; Sardin et al., 2003, 2012), a été sélectionnée de façon à inclure un itinéraire standard (récolte du tronc seul ; longueur de révolution standard) et à étudier :

- Les effets de la récolte des branches et souches/pivots (en plus du tronc) : comparaison entre le standard et l'intensif 1 pour Pin et Douglas,
- Les effets de la récolte des branches, souches/pivots et aiguilles : comparaison entre le standard et l'intensif 2 pour Pin et Douglas,
- Les effets additionnels de 1) la récolte des branches, souches/pivots et aiguilles et 2) la réduction de la durée de révolution : comparaison entre le standard et l'intensif 3 pour Pin et Douglas,
- Les effets additionnels de 1) la récolte des branches, souches/pivots et aiguilles, 2) la réduction de la durée de révolution et 3) l'augmentation de la densité initiale visant à produire du bois énergie : comparaison entre le standard et l'intensif 4 pour Pin uniquement,

- L'effet de l'augmentation de la durée de révolution (en maintenant la récolte du tronc seul) : comparaison entre le standard et l'extensif pour Pin et Douglas.

Pour chaque essence, chaque RCP et chaque itinéraire, plusieurs simulations sur 2006-2100 ont été réalisées en utilisant différentes classes d'âge initial, simulant ainsi des « patchs » de forêts ayant des âges différents. Des moyennes à l'échelle de ces « patchs » ont ensuite été calculées.

# 5.4 Principaux résultats

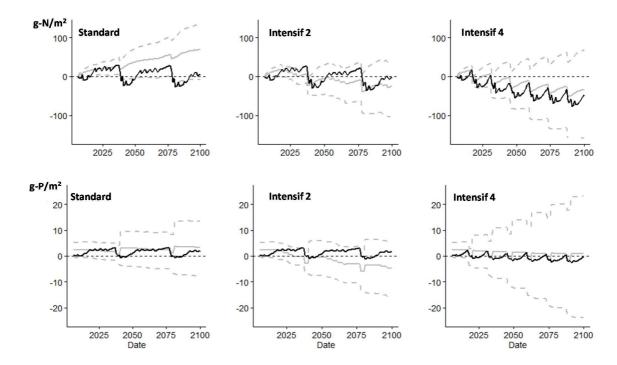
### 5.4.1 Réalisme des simulations de GO+ vis-à-vis des besoins en N-P

Les demandes en nutriments par la biomasse simulée et les changements dans les stocks de matière organique du sol (changements cumulés des stocks de N-P dans l'écosystème) ont pu être calculées et comparées à des bilans entréessorties dans l'écosystème pour des peuplements de Pin maritime dans les Landes de Gascogne (Fig. 30):

- Pour plusieurs itinéraires (par exemple, le standard et l'intensif 4), la demande en nutriments est généralement inférieure ou égale aux estimations moyennes des bilans. Pour ces cas, les biomasses et les stocks de matière organique simulés par GO+ sont donc réalistes.
- Pour d'autres itinéraires (par exemple, l'intensif 2), la demande en nutriments est supérieure aux estimations moyennes des bilans mais inférieure aux estimations « hautes » des bilans. Pour ces cas, les biomasses et les stocks de matière organique simulés par GO+ restent donc plausibles.

## 5.4.2 Evaluation du coût en nutriments (N, P, K, Ca & Mg)

Un exemple des biomasses récoltées et des exportations de nutriments est présenté pour le Pin maritime dans la figure 31. Conformément à des études précédentes (par ex. Achat et al. 2015a : projet RESOBIO), la récolte des rémanents conduit à une augmentation importante des exportations de nutriments (itinéraires intensifs 1 & 2). Ceci est plus particulièrement vrai lorsque le feuillage, riche en éléments minéraux, est récolté (intensif 2), alors que le gain en biomasse récoltée avec ce compartiment est faible. La réduction de la durée de révolution (intensifs 3 & 4) conduit à une perte de biomasse récoltée et une augmentation des exportations de nutriments car 1) les jeunes peuplements sont moins productifs que les adultes et 2) les compartiments des jeunes arbres sont plus concentrés en éléments minéraux (ces effets sont pris en compte dans l'approche de modélisation). Ceci a des conséquences importantes sur l'indice d'efficience d'utilisation des nutriments (Fig. 32) : par exemple, pour le Pin, les valeurs relatives diminuent de 1 (standard) à 0.29-0.48 (intensif 4). Cela signifie que, pour les mêmes quantités de nutriments exportés, la biomasse récoltée diminue de -71, -71, -61, -56 et -52% pour N, P, K, Ca and Mg, respectivement. A l'inverse, en extensif, les troncs des arbres récoltés à la coupe rase ont des plus gros diamètres et donc des concentrations en nutriments plus faibles. Ceci conduit à une efficience d'utilisation des nutriments légèrement plus importante, par rapport à l'itinéraire standard (par ex. augmentation de +6-8% des biomasses récoltées pour les mêmes quantités de nutriments exportés). Les résultats sont similaires pour le Douglas.

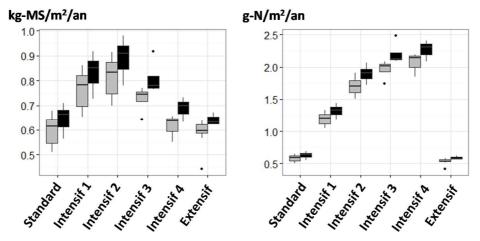


**Figure 30.** Comparaisons entre les changements cumulés de stocks de N-P dans l'écosystème (arbres sur pied, sous-bois & matière organique du sol; courbes noires) et les bilans entrées-sorties cumulés (courbes grises continues = estimations moyennes; courbes grises discontinues = estimations hautes et basses). Simulations Pin maritime sur la période 2006-2100. Exemple pour le RCP 2.6. Age initial du peuplement = 1 an.

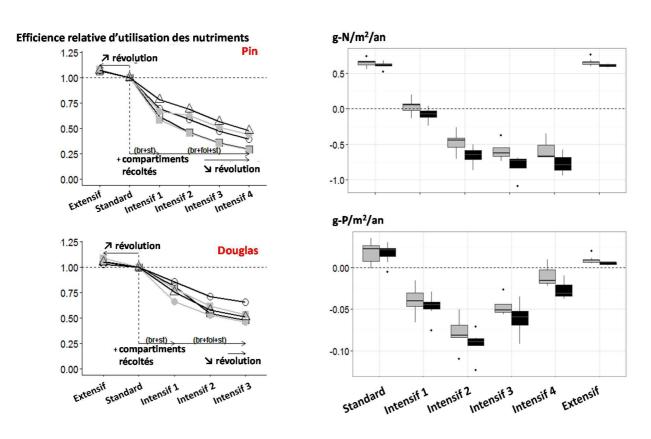
Pour le Pin, l'augmentation des exportations de N-P dans les itinéraires intensifs 1 & 2 a logiquement un impact négatif sur les bilans entrées-sorties (**Figs. 31 & 32**). Les résultats sont plus complexes pour les itinéraires intensifs 3 & 4 : l'effet négatif des exportations d'N est en partie compensé par une augmentation de la fixation symbiotique (prise en compte d'une fixation symbiotique plus importante dans les jeunes peuplements et donc dans les itinéraires à plus courte révolution) et l'effet négatif des exportations de P est complètement, ou en partie, compensé par une augmentation des apports de P par fertilisation (plus de révolutions et donc globalement plus d'apport de P à l'installation des peuplements).

En plus des bilans entrées-sorties, GO+ et le module « nutriments » permettent d'évaluer les changements dans les stocks de C, N et P dans la matière organique du sol. Conformément à une précédente méta-analyse (Achat et al., 2015b: projet GESFOR), la récolte des rémanents conduit à une perte de C du sol de l'ordre de 5% (Fig. 33). La réduction de la durée de révolution a un effet négatif supplémentaire (diminution atteignant -16%); ceci est principalement lié au fait que la productivité et donc les retours au sol de matière organique (chute de litière; résidus de récolte) sont plus faibles dans les jeunes peuplements et donc dans les itinéraires à courte rotation. En conséquence, les stocks de N-P dans la matière organique du sol sont aussi affectés (Fig. 33).

Les simulations montrent finalement que les récoltes de biomasses, les exportations de nutriments et par conséquent les bilans entrées-sorties varient également entre les scénarios climatiques (Figs. 31 & 32). Nous observons notamment une plus forte productivité et donc une récolte de biomasse et des exportations de nutriments plus importantes sous RCP 8.5, liées à un effet « fertilisant » de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique).

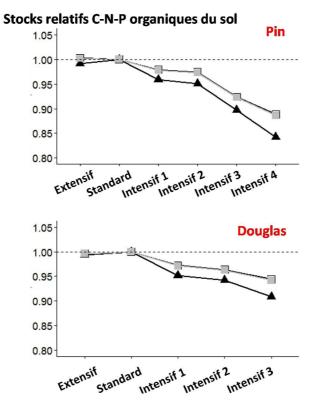


**Figure 31.** Bilan des ITK en termes de biomasse (matière sèche) récoltée (à gauche) et nutriments exportés (à droite) (exemple pour N). Exportations moyennes annuelles pour le Pin maritime sur la période 2006-2100, sous RCP 2.6 (gris) et 8.5 (noir).



**Figure 32.** Gauche: Indice de l'efficience d'utilisation des nutriments (kg-matière-sèche-récoltée/g-nutriments-exportés), exprimées relativement à l'itinéraire standard. Simulations Pin maritime et Douglas sur la période 2006-2100. N = carrés blancs; P = carrés gris; K = ronds blancs; Ca = ronds gris; Mg = triangles. Valeurs moyennes sur 2006-2100 (il n'y a pas de différence entre RCP).

Droite: Bilans entrées-sorties N-P pour le Pin maritime. Moyennes annuelles sur 2006-2100, sous RCP 2.6 (gris) et 8.5 (noir).



**Figure 33.** Stocks C-N-P organiques du sol (moyennes sur la période 2006-2100), exprimés relativement à l'itinéraire standard. Simulations Pin maritime et Douglas. C = triangles; N = carrés blancs; P = carrés gris.

# 6 Valorisation des résultats

Le projet a été l'occasion de nombreux échanges avec les acteurs de la forêt privée (propriétaires membres de CETEF, experts forestiers, techniciens de coopératives, techniciens de CRPF, chargés de mission des institutions locales) formalisés au cours de réunions comme décrit au chapitre 3. De nombreux autres échanges informels ont eu lieu et ont permis un dialogue entre ce projet et d'autres projets sur les mêmes territoires : projets MACACC et Life Forest CO2 en Aquitaine, projets Atlas bioclimatique, VIADUC et FORECCAST en Haut Languedoc. La nature de la propriété forestière dans les territoires étudiés a favorisé les échanges avec les forestiers privés. Toutefois, une Web Conférence avec les équipes de RDI de l'ONF est programmée le 5 mars 2018, permettant des échanges avec la forêt publique sur les conclusions du projet.

Des communications de vulgarisation ont été réalisées ou sont en cours de finalisation : un rapport synthétisant les résultats EVAFORA Pin maritime et Forest CO2 est en rédaction. Un document synthétique de 4p. sur le même focus sera par ailleurs réalisé. Il est destiné à être diffusé aux professionnels aquitains. Le numéro 244 de la revue Forêt Entreprise sera entièrement consacré au sujet de l'atténuation du changement climatique par la forêt. Il paraitra fin 2018/début 2019. Plusieurs pages seront réservées au projet EVAFORA. Enfin, les acquis du projet sont intégrés aux formations organisées par le CNPF-IDF (ex : formation pour les décideurs régionaux organisée par le RMT AFORCE en 2016 ; formation « Les projets carbone forestiers en pratique » organisée en 2017 et renouvelée en 2018).

Enfin, un atelier à destination des praticiens de la forêt privée (propriétaires, gestionnaires, techniciens de développement) est organisé le 15 mars 2018 dans le cadre d'EVAFORA. Cet événement permettra la diffusion des résultats du projet et sera élargi à d'autres projets de R&D sur la thématique « forêt et carbone ». Une place importante sera laissée aux échanges avec les participants. Une page internet dédiée à l'atelier servira à la diffusion de certaines présentations à la suite de l'événement.

La liste suivante résume les principales communications liées au projet.

### Communications en lien avec le projet

Achat DL, Augusto L, Gallet-Budynek A, Loustau D, 2016. Future challenges in coupled C–N–P cycle models for terrestrial ecosystems under global change: a review. Biogeochemistry, 131, 173–202.

Achat DL, Martel S, Picart D, Moisy C, Augusto L, Bakker MR, Loustau D. Modelling the nutrient cost of biomass harvesting under different sylvicultural and climate scenarios in production forests. Soumis février 2018 à Forest Ecology and Management.

Dhôte J.F., Roux A., Bastien J.C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.-M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.-M., Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Martel S., Meredieu C., Moisy C., Pâques L., Picart-Deshors D., Rigolot E., Saint-André L., Schmitt B. 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière Forêt-Bois Françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. INRA-IGN, 93p, étude disponible sur le site INRA.

Lefèvre, F., Loustau, D., Marcais, B. (2015). Vers une gestion adaptative des forêts. Pour la Science, 18-21.

Loustau D., Moreaux V., Moisy C., Deshors-Picart D., Lafont S., Benest F., Lagouarde J.P., Bosc A. (2014). Energy, water and carbon balance of managed forests: comparing the future to the past. Geophysical Research Abstracts, 16. Presented at EGU European Geosciences Union General Assembly, Vienne, AUT (2014-04-27 - 2014-05-02). [Présentation orale]

Loustau, D., Bonal, D. (2014). Climate and drought effects on forest carbon balance: lesson from three case studies. Presented at « Changement climatique, agriculture et forêt ». Symposium bilatéral franco-allemand, Berlin, DEU (2014-05-07 - 2014-05-07). [Présentation orale]

Loustau, D., Bosc, A., Moisy, C., Moreaux, V., Deshors-Picart, D., Jacquet, J.-S., Rabemanantsoa, T., Défossez, P., Benest, F. (2014). *Climate change and French managed forests. Challenges, urgencies and management*. Presented at RISK-GO Kick off meeting, Freiburg, DEU (2014-01-14 - 2014-01-14). [Présentation orale]

Loustau, D., Lafont, S., Longdoz, B., Ceschia, E., Tallec, T., Joffre, R., Klumpp, K., Loubet, B., Chabbi, A., Simioni, G., Garrigues, S., Bonal, D., Mary, B., Conil, S. (2015). *Agriculture, sylviculture et gaz à effet de serre : observations du réseau Ecosystèmes-Fr de l'infrastructure ICOS*. Presented at Carbones atmosphériques naturels et anthropiques. Chaire Évolution du climat et de l'océan du Collège de France, Paris, FRA (2015-05-22). [Présentation orale]

Loustau, D., Martel, S., (2015). Comprendre, simuler et gérer l'impact climatique des forêts. Présentation au Forum Forêt, Paris (2015-13-11). [Présentation orale]

Martel, S., Picart, D., Bosc, A., Moisy, C., Lafont, S., Loustau, D., Picard, O., Breda, N. (2015). *Climatic impacts on managed forests: projecting the future from the past*. Presented at « Our Common Future under Climate Change », Paris, FRA (2015-07-07 - 2015-07-10). [Poster]

Martel, S., Loustau, D., Picard, O., Picart, D., Moisy, C., Bosc, A., Lafont, S. (2016). *Modéliser l'atténuation à partir de scénarios d'adaptation*. Présenté à «Séminaire de formation pour les décideurs régionaux « Faire face aux enjeux du changement climatique et se préparer à relever le défi » », Poitier (2016-09-28). [Présentation orale]

Martel, S., (2016). Gestion forestière en Europe et atténuation du changement climatique : des résultats récents suscitent le débat. Forêt Entreprise 38–41.

## Publications en préparation

Loustau, D., Moreaux, V., Moisy, C., Picart, D., Lagouarde, J.P., Martel, S. Bosc, A. Biophysical and biogeochemical impacts of plantation forests as instantaneous radiative forcing from 2012 to 2100. (en préparation).

Loustau D., Moreaux V., Picart D., Martel S., Achat D., Moisy C., Vezy R., Bosc A., Trichet P., Badeau V., de Noblet - Ducoudré N., Roupsard O., Meredieu C., Merzeau D., Nicolas M., Ibrom A., Matteucci G., Longdoz B., Jolivet C., Black T. A., Picard O. 2018. Mechanistic modeling of the combined effects of climate and management on the energy, water and

carbon exchanges in forest ecosystems: description and evaluation of the Inra GO+ model, version 26.14. Geoscientific Model Development, discussion, to be submitted March 2018.

# 7 Conclusion générale

Le projet EVAFORA a pu être conduit selon le plan de travail prévu et associer à sa réalisation les partenaires opérationnels (sylviculteurs, gestionnaires) et détenteurs de données (GIS coop). Cette coopération entre chercheurs, ingénieurs et partenaires du projet a pu être menée à bien grâce au détachement l'INRA d'un ingénieur du CNPF-IDF, Simon Martel, au sein de l'équipe projet de l'UMR ISPA de novembre 2014 à novembre 2017. Elle a effectivement permis aux acteurs de s'approprier la démarche de modélisation mise en œuvre et d'y contribuer. Elle a aussi motivé le développement de cette approche pour prendre en compte de nouvelles opérations sylvicoles (éclaircies ciblées sur indicateurs cibles) et itinéraires, ainsi qu'une nouvelle essence (le Douglas). Elle a permis de développer le couplage des modèles GO+ et CAT pour proposer une prise en compte intégrée de l'ensemble forêt-bois, et d'adjoindre au modèle principal un module permettant l'évaluation des impacts des itinéraires testés sur le bilan minéral in situ.

Les principales avancées scientifiques permises par Evafora sont la consolidation et la professionnalisation de la démarche de modélisation qui a été conduite et son ouverture vers une prise en compte plus complète des enjeux forestiers à la fois en termes de production commerciale et en termes d'impact environnementaux. EVAFORA a permis de développer la robustesse des modèles à travers leur évaluation avec des données de différentes origines et natures (flux, données de croissance individuelle et par peuplement, test de modalités sylvicoles...). En permettant une analyse intégrée amont-aval incluant énergie, carbone, eau et nutriments majeurs, EVAFORA a apporté des éléments qui nous semblent originaux et novateurs sur l'impact climatique des choix techniques pour des espèces commerciales tempérées. L'analyse des itinéraires testés croisés avec les scénarios de climat tel qu'elle a pu être mise en œuvre permet une meilleure prise en compte des impacts positifs et négatifs de l'intensification de la sylviculture de production. Le dialogue avec les partenaires opérationnels a permis de mieux positionner cette démarche de modélisation en lien avec les attentes des professionnels et en complément d'autres outils de diagnostic ou de modélisation. En termes opérationnels, le projet EVAFORA trouvera une suite à travers le projet opérationnel Forêts-21 (MAAF) et si il est retenu- avec le projet BIOSYLVE proposé à l'appel GRAINE.

## Adaptation des itinéraires techniques sylvicoles au changement climatique.

Les principaux enseignements que nous tirons du projet à ce stade quant à l'adaptation au contexte climatique futur de la sylviculture du Pin maritime et du Douglas, essences à vocation de production par excellence, sont les suivants.

- 1. La démarche participative développée avec le projet EVAFORA auprès des partenaires professionnels a permis de nettement améliorer l'appropriation des résultats de modélisation et recherche par les acteurs d'une part, mais aussi le développement du réalisme et de la versatilité des outils de modélisation développés d'autre part.
- 2. Quels que soient les scénarios climatiques envisagés ici ou dans les projets antérieurs, le climat futur sera plus chaud et plus sec, l'incertitude dans ce domaine étant la vitesse et l'intensité de ce réchauffement ainsi que l'occurrence et la sévérité d'évènements extrêmes. Il sera aussi plus riche en CO<sub>2</sub>. Dans ce contexte, l'évolution du déficit de pression de vapeur de l'air et de la demande évaporative est assez incertaine mais nos résultats suggèrent que celle-ci a un impact majeur sur le fonctionnement et la productivité forestière, impact par ailleurs peu pris en compte dans les études similaires. L'impact de cette évolution du climat ne peut donc être ignoré des analyses prospectives de la filière forêt bois française.
- 3. Des interactions substantielles mises en évidence entre le climat et les itinéraires techniques sylvicoles testés, il ressort que l'intensité et la durée des épisodes de stress hydrique futurs résultent de l'interaction entre les peuplements forestiers et les variables météorologiques concernant l'état hydrique de l'atmosphère et les précipitations. Nous soulignons donc l'importance d'aller au-delà d'une approche basée sur de seuls indices climatiques.
- 4. Parmi l'ensemble des alternatives sylvicoles étudiées, les options techniques permettant un contrôle de l'indice foliaire, de la biomasse et de la densité des arbres en pilotant les éclaircies par des valeurs seuils de dimension des arbres offrent une réelle capacité de régulation et d'adaptation du fonctionnement des peuplements forestiers en fonction du climat, tant sur le plan biophysique, hydrologique que biogéochimique. Au contraire, les options de sylviculture à densité non ou peu régulée ont tendance à exposer des indices foliaires et stocks de biomasse sur pied trop élevés aux aléas climatiques ce qui en accentue les impacts négatifs.

5. L'extensification de la gestion sylvicole (moins d'interventions que dans les itinéraires standards préconisés) présente donc le risque d'accroître la vulnérabilité des forêts de production au changement climatique. L'autorégulation de la physionomie des peuplements par des processus endogènes spontanés (mortalité, abscission foliaire, changement d'allocation de la croissance, contrôles stomatique et métaboliques) est en effet insuffisante compte tenu de l'ampleur et de la rapidité de la perturbation climatique en cours.

### Impact climatique de la sylviculture

Les résultats auxquels cette analyse conduit montrent que l'impact stationnel (ici considéré comme combinaison du climat local et de la réserve en eau du sol, sans fertilité chimique) est prépondérant par rapport à l'impact du changement climatique. Ceci montre l'importance du diagnostic stationnel dans le choix des essences et de l'itinéraire technique quel que soit le scénario climatique envisagé.

D'après nos résultats, les impacts du climat sur le fonctionnement forestier s'accéléreront dans la 2ème moitié du 21<sup>e</sup> siècle, avec des compensations potentielles importantes : fertilisation CO<sub>2</sub>, rétroactions sur la fertilité minérale des sols et l'efficience de l'eau. Nos résultats et conclusions doivent être de ce point de vue considérés comme fragmentaires. Les versions du modèle GO+ utilisées ne prennent encore en compte ni les effets potentiels du CO<sub>2</sub> sur la régulation stomatique ni les rétroactions de l'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> sur les besoins en éléments minéraux des arbres, interaction – clé.

Pour l'effet d'atténuation c'est surtout la partie aval du système forêt – bois qui différencie les impacts climatiques des options sylvicoles examinées ici pour les deux essences résineuses Pin maritime et Douglas. Pour le Pin maritime en Aquitaine, en termes d'impact radiatif, et sous les hypothèses posées dans notre étude, la production moindre de produits à longue durée de vie en mode intensif, dont l'effet de substitution est important, n'est que partiellement compensée par l'intensification de la production d'énergie et fibre. Produire des matériaux à longue durée de vie et fort potentiel de substitution (bois d'œuvre, sciage, placage) est potentiellement et à long terme aussi bénéfique au climat qu'intensifier la production de produits à courte durée de vie et faible potentiel de substitution (énergie, fibre). C'est d'autant plus vrai que l'itinéraire « standard » conduit aussi à une production relativement élevée de connexes vers des utilisations en fibre ou énergie. Notre analyse montre que l'intensification de la sylviculture (dans des contextes de systèmes sylvicoles déjà relativement intensifs) conduit de surcroît à une diminution des stocks de carbone dans la biomasse sur pied et, surtout, dans la matière organique du sol, ce qui pose la question du maintien de la fertilité du sol à long terme, qui est examinée plus avant dans la section suivante.

Nous montrons que même à court terme, une intensification à grande échelle de la production de Pin maritime ne semble pas sensiblement plus avantageuse pour le climat qu'une sylviculture permettant une valorisation en bois d'œuvre, sciage, placage. Cette conclusion, valable ici pour une forêt de production où la sylviculture est réellement présente et largement optimisée, n'est pas forcément généralisable à d'autres contextes forestiers. L'évolution actuelle des marchés du bois et la tendance à utiliser de plus en plus de grumes de petit diamètre en construction pourraient modifier à la marge ces résultats dans les prochaines décennies.

### Durabilité géochimique des itinéraires sylvicoles

L'étude réalisée dans le cadre d'EVAFORA a permis de montrer un réalisme des prédictions de GO+ en termes de demande en nutriments par la biomasse prédite. Le module « nutriments » a également permis d'évaluer les itinéraires sylvicoles vis-à-vis du coût en nutriments associé aux récoltes de biomasses. Cette étude a confirmé l'impact négatif de la récolte des rémanents et du raccourcissement de la durée de révolution sur les exportations de nutriments, les bilans entrées-sorties et les stocks dans le sol.

L'utilisation conjointe des variables de sortie de GO+ et CAT avec son nouveau module « nutriments » permet une évaluation multicritères des itinéraires techniques (bilans de C, bilans radiatifs, bilans hydriques, bilans en nutriments, stocks de nutriments dans le sol). Cette approche, avec ses limites, peut donc représenter un cadre d'étude très prometteur et novateur pour orienter sur le choix des options sylvicoles. Son développement futur avec une intégration mécaniste des rétroactions entre les cycles des éléments minéraux du sol, du carbone et de l'eau étendra son champ d'application dans le cadre des projets proposés ou en cours de démarrage.

# 8 Références citées

- Achat DL, Augusto L, Gallet-Budynek A, Loustau D, 2016. Future challenges in coupled C–N–P cycle models for terrestrial ecosystems under global change: a review. Biogeochemistry, 131, 173–202.
- Achat DL, Bakker MR, Augusto L et al. (2009) Evaluation of the phosphorus status of P-deficient podzols in temperate pine stands: combining isotopic dilution and extraction methods. Biogeochemistry, 92, 183–200.
- Achat DL, Deleuze C, Landmann G, Pousse N, Ranger J, Augusto L, 2015a. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth A meta-analysis. Forest Ecology and Management, 348, 124–141.
- Achat DL, Fortin M, Landmann G, Ringeval B, Augusto L, 2015b. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. Scientific reports, 5, 15991.
- Augusto L (2010) Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Fonctionnement biogéochimique d'écosystèmes forestiers de production. INRA Bordeaux. p 59.
- Augusto L, Achat DL, Bakker MR, et al, 2015. Biomass and nutrients in tree root systems–sustainable harvesting of an intensively managed Pinus pinaster (Ait.) planted forest. GCB Bioenergy, 7, 231–243.
- Augusto L, Bakker MR, Morel C et al. (2010) Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of a region? A case study in a maritime pine forest in southwestern France. European Journal of Soil Science, 61, 807–822.
- Augusto L, Crampon N, Saur E, Bakker MR, Pellerin S, de Lavaissiere C, Trichet P, 2005. High rates of nitrogen fixation of Ulex species in the understory of maritime pine stands and the potential effect of phosphorus fertilization. Canadian Journal of Forest Research, 35, 1183-1192.
- Augusto L, Meredieu C, Bert D, et al, 2008. Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. Annals of Forest Science, 65, 808.
- Badeau, V., et al. (2010). Climate change and the biogeography of French tree species: first result and perspectives.in "Forests, carbon cycle and climate change. in "Forests, carbon cycle and climate change", D. Loustau Ed., Quae Eds., 231-252.
- Bright, R. M., et al. (2015). Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities. Global Change Biology 21(9): 3246-3266.
- Cameron, D. R., M. Van Oijen, C. Werner, K. Butterbach-Bahl, R. Grote, E. Haas, G. B. M. Heuvelink, R. Kiese, J. Kros, M. Kuhnert, A. Leip, G. J. Reinds, H. I. Reuter, M. J. Schelhaas, W. De Vries and J. Yeluripati (2013). Environmental change impacts on the C- and N-cycle of European forests: a model comparison study. Biogeosciences 10(3): 1751-1773.
- Ciais, P., D. Loustau, A. Bosc, J. Ogée, E. Dufrêne, C. François, N. Viovy and F. Delage How will the production of French forests respond to climate change? An integrated analysis from site to country scale. Forests, carbon cycle and climate change. D. Loustau. Paris, Quae: 201-227.
- Bosveld, F.C., Bouten, W., 2001. Evaluation of transpiration models with observations over a Douglas-fir forest. Agric. For. Meteorol. 108, 247–264. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00251-9

- Charru, M., Seynave, I., Hervé, J.-C., Bertrand, R., Bontemps, J.-D., 2017. Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. Annals of Forest Science 74, 33. <a href="https://doi.org/10.1007/s13595-017-0626-1">https://doi.org/10.1007/s13595-017-0626-1</a>
- Ciais, P., Paris, J., Rivier, L., Ceulemans, R., Dolman, A.J., Flaud, J., Garrec, C., Gerbig, C., Grace, J., Huertas, E., Johannessen, T., Jordan, A., Levin, I., Lindroth, A., Loustau, D., Papale, D., Ramonet, M., Valentini, R., Vesala, T., Kaukolehto, M., Watson, A., 2012. ICOS, Integrated Carbon Observing System, a Research Infrastructure to Integrate Greenhouse Gas observations in Europe. AGU Fall Meeting Abstracts 34, 03.
- Colin A, Barnérias C, Salis M, Thivolle-Cazat A, Coulon F, Couturier C, 2009. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. ADEME, 105 pp. <a href="http://www.dispoboisenergie.fr/doc/ADEME">http://www.dispoboisenergie.fr/doc/ADEME</a> boisenergie rapport final dec2009.pdf
- CRPF Midi-Pyrénées. 2011. « Le Douglas en futaie régulière ». Guide pratique de sylviculture. Albi: CRPF Midi Pyrénées.
- De Lary, Roland. 2015. « Massif des Landes de Gascogne. II ETAT DES CONNAISSANCES TECHNIQUES ». Bordeaux: CRPF Aquitaine.
- Drewitt, G.B., Black, T.A., Nesic, Z., Humphreys, E.R., Jork, E.M., Swanson, R., Ethier, G.J., Griffis, T., Morgenstern, K., 2002. Measuring forest floor CO<sub>2</sub> fluxes in a Douglas-fir forest. Agricultural and Forest Meteorology 110, 299–317. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00294-5
- Elser J, Bracken M, Cleland E, Gruner D, Harpole W, Hillebrand H, Ngai J, Seabloom E, Shurin J, Smith J, 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecol. Lett., 10, 1135–1142
- Farquhar, G., Caemmerer, S., Berry, J., 1980. A Biochemical-Model of Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C-3 Species. Planta 149, 78–90. <a href="https://doi.org/10.1007/BF00386231">https://doi.org/10.1007/BF00386231</a>
- Fernández-Martínez, M., S. Vicca, I. A. Janssens, J. Sardans, S. Luyssaert, M. Campioli, F. S. Chapin Iii, P. Ciais, Y. Malhi, M. Obersteiner, D. Papale, S. L. Piao, M. Reichstein, F. Roda and J. Penuelas (2014). Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance. Nature Clim. Change 4(6): 471-476.
- Fortin, M., Ningre, F., 2012. Reducing Greenhouse Gas Emissions While Producing Timber From EvenAged Sessile Oak Stands Within 100 Years. URL <a href="http://hdl.handle.net/2042/48443">http://hdl.handle.net/2042/48443</a>
- Guillemot, J., Delpierre, N., Vallet, P., François, C., Martin-StPaul, N.K., Soudani, K., Nicolas, M., Badeau, V. and E. Dufrêne (2014). Assessing the effects of management on forest growth across France: insights from a new functional– structural model. Annals of Botany, 114:779-793.
- Harpole WS, Ngai JT, Cleland EE, Seabloom EW, Borer ET, Bracken MES, Elser JJ, Gruner DS, Hillebrand H, Shurin JB, Smith JE, 2011. Nutrient co-limitation of primary producer communities. Ecol. Lett., 14, 852–862.
- Harrington, C.A., Gould, P.J., St.Clair, J.B., 2010. Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir. Forest Ecology and Management, Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate Selected papers from the conference on "Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate with Emphasis on Forest Health: A Review of Science, Policies and Practices", Umeå, Sweden, August 25-28, 2008. 259, 798–808. <a href="https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.018">https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.018</a>
- Henry, M., Bombelli, A., Trotta, C., Alessandrini, A., Birigazzi, L., Sola, G., Vieilledent, G., Santenoise, P., Longuetaud, F., Valentini, R., Picard, N., Saint-André, L., 2013. GlobAllomeTree: international platform for

- tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. iForest Biogeosciences and Forestry 6, 326–330. <a href="https://doi.org/10.3832/ifor0901-006">https://doi.org/10.3832/ifor0901-006</a>
- Humphreys, E.R., Black, T.A., Ethier, G.J., Drewitt, G.B., Spittlehouse, D.L., Jork, E.-M., Nesic, Z., Livingston, N.J., 2003. Annual and seasonal variability of sensible and latent heat fluxes above a coastal Douglas-fir forest, British Columbia, Canada. Agricultural and Forest Meteorology, A tribute to George W. Thurtell's contributions in micrometeorology 115, 109–125. <a href="https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00171-5">https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00171-5</a>
  - Hynicka, J. D., Pett-Ridge, J. C. and Perakis, S. S. (2016), Nitrogen enrichment regulates calcium sources in forests. Glob Change Biol. Accepted Author Manuscript. doi:10.1111/gcb.13335
- Jassal, R.S., Black, T.A., Cai, T., Morgenstern, K., Li, Z., Gaumont-Guay, D., Nesic, Z., 2007. Components of ecosystem respiration and an estimate of net primary productivity of an intermediate-aged Douglas-fir stand. Agricultural and Forest Meteorology 144, 44–57. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.01.011
- Jonard, M., Fürst, A., Verstraeten, A., Thimonier, A., Timmermann, V., Potočić, N., Waldner, P., Benham, S., Hansen, K., Merilä, P., Ponette, Q., de la Cruz, A. C., Roskams, P., Nicolas, M., Croisé, L., Ingerslev, M., Matteucci, G., Decinti, B., Bascietto, M. and Rautio, P. (2015), Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. Glob Change Biol, 21: 418–430. doi:10.1111/qcb.12657
- Kay, M., 1978. Foliage biomass of Douglas fir in a 53-year-old plantation. New Zealand Journal of Forestry Science.
- Kramer, K., B. Degen, J. Buschbom, T. Hickler, W. Thuiller, M. T. Sykes and W. de Winter (2010). "Modelling exploration of the future of European beech (Fagus sylvatica L.) under climate change-Range, abundance, genetic
- Kramer, K., I. Leinonen and D. Loustau (2000). "The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview." International Journal of Biometeorology 44(2): 67-75.
- Kramer, K., I. Leinonen, H. H. Bartelink, P. Berbigier, M. Borghetti, C. Bernhofer, E. Cienciala, A. J. Dolman, O. Froer, C. A. Gracia, A. Granier, T. Grunwald, P. Hari, W. Jans, S. Kellomaki, D. Loustau, F. Magnani, T. Markkanen, G. Matteucci, G. M. J. Mohren, E. Moors, A. Nissinen, H. Peltola, S. Sabate, A. Sanchez and M. Sontag (2002). Evaluation of six process-based forest growth models using eddy-covariance measurements of CO2 and H2O fluxes at six forest sites in Europe. Global Change Biology 8(3): 213-230.
- Lebauer DS, Treseder KK, 2008. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. Ecology, 89, 371–379.
- Link, T.E., Unsworth, M., Marks, D., 2004. The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. Agricultural and Forest Meteorology 124, 171–191. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.01.010
- Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogee, H. Davi, C. Francois, E. Dufrene, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy and F. Delage (2005). Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the subregional level. Tree Physiology 25(7): 813-823.
- Loustau, D., Bosc, A., Colin, A., Ogée, J., Davi, H., François, C., Dufrêne, E., Déqué, M., Cloppet, E., Arrouays, D., Bas, C.L., Saby, N., Pignard, G., Hamza, N., Granier, A., Bréda, N., Ciais, P., Viovy, N., 2010, Forests, carbon cycle and climate change. Projet Carbofor

- Loustau, D., J. Ogee, E. Dufrene, M. Deque, J. L. Dupouey, V. Badeau, N. Viovy, P. Ciais, M. L. Desprez-Loustau, A. Roques, I. Chuine and F. Mouillot (2007). Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. Forestry and climate change: 143-150.
- Loustau, D., Moreaux, V., Picart, D., Martel, S., Achat, D.L., Moisy, C., Bosc, A., 2018. Mechanistic modeling of the combined effects of climate and management on the energy, water and carbon exchanges in forest ecosystems: description of the Inra GO+ model. Geoscientific Model Development
- Luyssaert, S., M. Jammet, P. C. Stoy, S. Estel, J. Pongratz, E. Ceschia, G. Churkina, A. Don, K. Erb, M. Ferlicoq, B. Gielen, T. Gruenwald, R. A. Houghton, K. Klumpp, A. Knohl, T. Kolb, T. Kuemmerle, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, M. J. McGrath, P. Meyfroidt, E. J. Moors, K. Naudts, K. Novick, J. Otto, K. Pilegaard, C. A. Pio, S. Rambal, C. Rebmann, J. Ryder, A. E. Suyker, A. Varlagin, M. Wattenbach and A. J. Dolman (2014). Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. Nature Climate Change 4(5): 389-393.
- Manter, D.K., Kavanagh, K.L., Rose, C.L., 2005. Growth response of Douglas-fir seedlings to nitrogen fertilization: importance of Rubisco activation state and respiration rates. Tree Physiol. 25, 1015–1021.
- Medlyn, B.E., Dreyer, E., Ellsworth, D., Forstreuter, M., Harley, P.C., Kirschbaum, M.U.F., Le Roux, X., Montpied, P., Strassemeyer, J., Walcroft, A., Wang, K., Loustau, D., 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. Plant Cell and Environment 25, 1167–1179. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00891.x
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 2013. « Agriculture, Forêt, Climat; Vers des stratégies d'adaptation ». Rapport AFClim. Paris: Centre d'étude et de prospective, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.
- Mohren, G.M.J., 1987. Simulation of forest growth, applied to Douglas fir stands in The Netherlands.
- Mohren, G. M. J., H. H. Bartelink, K. Kramer, F. Magnani, S. Sabaté and D. Loustau (2000). Modelling long-term effects of CO2 increase and climate change on European forests, with emphasis on ecosystem carbon budgets. Forest ecosystem modelling, upscaling and remote sensing. R. J. M. "Ceulemans, F. Veroustraete, V. Gond and J. B. H. F. Van\_Rensbergen. The Hague, The Netherlands, SPB Academic Publishing bv: 179-192.
- Moreaux, V., 2012. Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France. Bordeaux 1.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., others, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature 463, 747–756.
- Orazio, Christophe, Vincent Banos, Philippe Deuffic, Baptiste Hautdidier, et Arnaud Sergent. 2016. « A Forward-Looking Approach to Foster Integrated Forest Development. A Case Study in the Forests of the Landes de Gascogne ». *Revue Forestière Française*. http://hdl.handle.net/2042/62005.
- Paul-Limoges, E., Black, T.A., Christen, A., Nesic, Z., Jassal, R.S., 2015. Effect of clearcut harvesting on the carbon balance of a Douglas-fir forest. Agricultural and Forest Meteorology 203, 30–42.
- Porte, A., Loustau, D., 1998. Variability of the photosynthetic characteristics of mature needles within the crown of a 25-year-old Pinus pinaster. Tree Physiology 18, 223–232.

- Porte, A., Trichet, P., Bert, D., Loustau, D., 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (Pinus pinaster Ait.). Forest Ecology and Management 158, 71–83. <a href="https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00673-3">https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00673-3</a>
- Ramaswamy, V., et al., 2001. Radiative forcing of climate change. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 349–416.
- Sabate, S., C. A. Gracia and A. Sanchez (2002). Likely effects of climate change on growth of Quercus ilex, Pinus halepensis, Pinus pinaster, Pinus sylvestris and Fagus sylvatica forests in the Mediterranean region. Forest Ecology and Management 162(1): 23-37.
- Saltre, F., A. Duputie, C. Gaucherel and I. Chuine (2015). "How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech." Global Change Biology 21(2): 897-910.
- Sardin T, 2012. Douglasaies françaises, ONF. ed, Référentiels sylvicoles.
- Sardin T, Canteloup D, Ansolabehere JM, Beautret JP, Belliard T, Beylard JF, Capelle V, Dumas JM, Gourgues S, Hautclocq JL, Lanusse M, Sulpy JP, Villiers T, Faure F, 2003. Guide de sylviculture du Pin maritime de lande. Office National des Forêts (ONF), Toulouse, 62 pp.
- Sathre, R. and J. O'Connor (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. <u>Environmental Science and Policy</u> **13**(- 2): 102 114.
- Trichet P, Bakker MR, Augusto L, Alazard P, Merzeau D, Saur E, 2009. Fifty Years of Fertilization Experiments on Pinus pinaster in Southwest France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer. Forest Science, 55, 390-402.
- Vial, E., Fortin, M., Cornillier, C., 2017. Bilan environnemental des systèmes forestiers vis-à-vis du changement climatique : pour une optimisation des pratiques sylvicoles et des politiques territoriales, Projet GESFOR. ADEME.
- Van Oijen, M., Rougier, J., Smith, R., 2005. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. Tree Physiol. 25, 915–927.
- Van Oijen, M.,Reyer, C., Bohn, F.J., Cameron, D.R., Deckmyn, G., Flechsig, M., Härkönen, S., Hartig, F., Huth, A., Kiviste, A., Lasch, P., Mäkelä, M., Mette, T., Minunno, F., and W. Rammer (2013). Bayesian calibration, comparison and averaging of six forest models, using data from Scots pine stands across Europe. Forest Ecology and Management 289: 255-268.

# L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

# LES COLLECTIONS **DE L'ADEME**



#### ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



### **EXPERTISES**

*L'ADEME expert :* Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



## FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



### **CLÉS POUR AGIR**

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



#### HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

# PROJET EVAFORA

#### Résumé

Le projet EVAFORA vise à définir et évaluer l'effet d'atténuation de scénarios de gestion permettant l'adaptation de peuplements forestiers au changement climatique, dans une démarche de recherche participative.

L'articulation entre travaux de recherche et transfert vers les acteurs de terrain est au cœur du projet sur deux zones d'étude : le massif de pin maritime des Landes de Gascogne et les douglasaies du Haut Languedoc. Des options de gestion co-construites ont été implémentées dans la chaîne de modèles GO+ - CAT qui décrit le fonctionnement in situ et ex situ du continuum forêt-produits bois. Un module spécifique « nutriment » a été développé. Il calcule les quantités de nutriments (N et P) nécessaires pour satisfaire la production de biomasse prédite par le modèle et établit des bilans N-P entrées-sorties, les exportations en N-P-K-Ca-Mg, ainsi que les évolutions des stocks de C-N-P du sol. La chaîne de modèles a simulé la dynamique de fonctionnement 2006-2100 sous deux scénarios climatiques du GIEC : RCP 2.6 et RCP 8.5.

Les résultats des simulations montrent que les scénarios climatiques ne se contrastent fortement que dans la deuxième moitié du siècle. Cette différenciation des scénarios climatiques après 2050 se retrouve dans la réponse des écosystèmes forestiers, notamment sur les indicateurs de stress. Cependant, alors que l'augmentation du stress hydrique en scénario de réchauffement important (RCP8.5) ralentit fortement la croissance après 2050, l'augmentation du CO2 atmosphérique compense ces pertes en améliorant les performances photosynthétiques.

Concernant la gestion, les itinéraires techniques intensifs incluant un travail du sol ou un prélèvement accru de biomasse (rémanents et souches) entraînent une diminution sur le long terme des stocks de carbone et nutriments dans le sol et la biomasse sur pied. Tant pour le Douglas que pour le Pin maritime, nos conclusions montrent que les scénarios d'intensification testés (raccourcissement des révolutions et augmentation de la biomasse prélevée) ont un effet d'atténuation du changement climatique plus faible que la sylviculture standard d'une part et exigent une compensation en nutriments significative d'autre part.





www.ademe.fr