

Les résultats des projets CARBOFOR et ANR-QDiv et les questions qu'ils soulèvent

Les avancées apportées par le projet ANR-Climator

par Vincent BADEAU

*Face aux changements
climatiques, les gestionnaires
forestiers se posent de nombreuses
questions. Quel avenir
pour les espèces actuelles ?
Que prédisent les modèles ?
Quelles successions envisager ?
Que conserver et comment ?...
Vincent Badeau fait ici le point
sur les différents travaux entrepris
pour identifier les relations entre la
distribution des espèces et le climat,
afin d'estimer comment
ces distributions pourraient être
modifiées en réponse aux différents
scénarios climatiques.
Il montre aussi qu'il est nécessaire
de coupler différentes approches
de modélisation pour espérer
encadrer de façon satisfaisante
les projections pour le futur.*

L'influence de l'homme sur le climat global étant largement admise par la communauté scientifique, et les résultats obtenus sur l'Holocène ayant montré que la réponse des espèces aux changements climatiques anciens s'est exprimée par de forts décalages géographiques des aires de répartition (BRADSHAW *et al.*, 2000, BRADSHAW & HANNON, 2004, SÁNCHEZ-GOÑI *et al.*, 2008), on assiste depuis une quinzaine d'années à un renouveau des études biogéographiques. De nombreux travaux ont été entrepris pour identifier les relations entre la distribution des espèces et le climat afin d'estimer comment ces distributions pourraient être modifiées en réponse aux différents scénarios climatiques. Les premières études françaises ont été lancées dans le cadre du projet GICC-Carbofor. Elles ont été complétées depuis par d'autres travaux notamment dans le cadre de deux projets financés par l'Agence nationale de la recherche (ANR) ; les projets QDiv et Climator. Cet article fait le point sur une partie de ces travaux.

1 - Projet GICC
2002/2004

Retour sur le projet Carbofor¹

Fig. 1 :
Modélisation de la répartition actuelle du chêne vert (a) et de l'évolution potentielle de son aire de répartition en 2100 (b). Répartition actuelle de 7 groupes biogéographiques déterminés par l'analyse de la distribution des 70 espèces ligneuses observées par l'IFN (c) et évolution spatiale potentielle de ces biomes en 2100 (d). Caractérisation du degré de méditerranéité actuel de la flore forestière (1200 espèces) par analyse factorielle (e) et évolution de ce caractère en 2100 (f).
D'après Badeau *et al.* (2004, 2010) et Wallerich (2006).

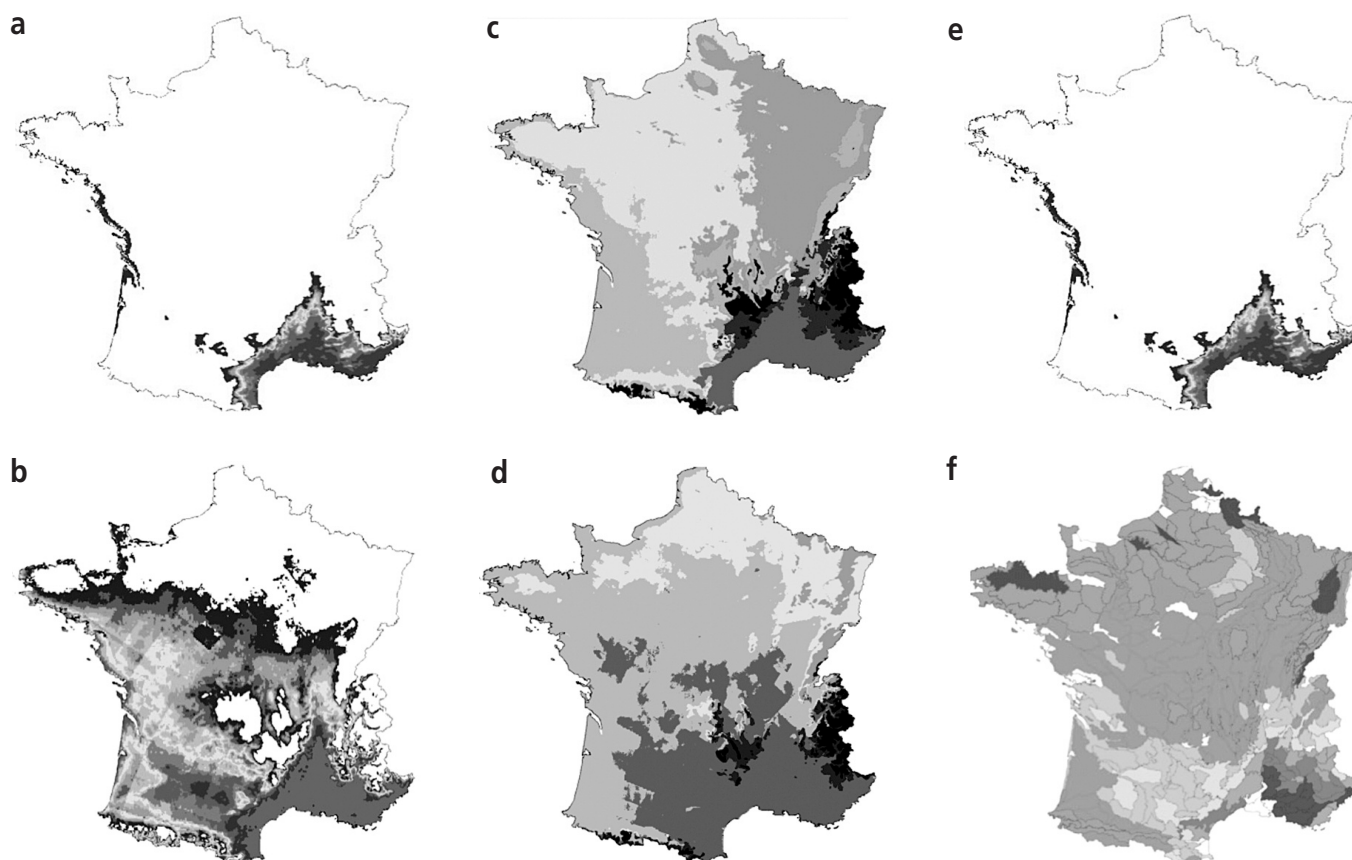
Au début des années 2000, plusieurs études sur les déplacements potentiels des aires de distribution étaient déjà disponibles en Europe, soit à des échelles régionales avec une résolution fine, soit sur des espaces plus importants mais au détriment de la résolution spatiale (SYKES *et al.*, 1996 ; PEARSON *et al.* 2002). A l'échelle française, aucune étude spécifique n'avait encore été réalisée, principalement en raison de l'absence de données homogènes, mais le travail devenait possible, d'une part, grâce aux données de l'Inventaire forestier national (IFN) et, d'autre part, grâce aux données climatiques spatialisées de Météo-France.

Les données de l'IFN permettent de cartographier la répartition actuelle des espèces ligneuses et herbacées avec un haut degré de précision par rapport aux cartes utilisées à l'échelle européenne : la pression d'échantillonnage de l'IFN est de l'ordre d'un point pour 135 ha de forêt alors que les cartes éditées par Flora Europaea (JALAS & SUOMINEN,

1972) utilisent un maillage de 50 km. Les données climatiques correspondent, d'une part, à des interpolations spatiales des normales trentenaires de températures et de précipitations à un pas de 1 km (modèle AURELHY de Météo-France, BENICHOU & LE BRETON, 1987) et, d'autre part, aux données de flux radiatifs issues des observations Météosat (Service d'archivage et de traitement météorologique des observations spatiales, CNRS-Météo-France). Enfin, des cartes de réserve utile en eau et de pH peuvent être dérivées de la carte des sols de France au 1/1 000 000^e (US Infosol, INRA-Orléans).

Les cartes de présence/absence des espèces peuvent alors être reliées statistiquement aux facteurs environnementaux, afin d'identifier les contraintes pesant sur les aires de répartition actuelles et de modéliser les évolutions potentielles de ces aires dans le cadre de scénarios climatiques.

Ces modèles, calibrés sur des essences individuelles (chêne vert, hêtre, etc.), des groupes d'essences (groupes chorologiques



établis à partir des 70 espèces ligneuses observées par l'IFN) ou la flore accompagnatrice (de l'ordre de 1200 espèces relevées par l'IFN), montrent qu'il est relativement facile d'identifier les contraintes climatiques pesant sur la répartition géographique des espèces forestières. Les projections de ces modèles selon un scénario climatique aux horizons 2050 et 2100 (modèle ARPEGE de Météo-France et scénario d'émission B2) montrent tous une progression potentielle des ensembles méditerranéen et aquitain et une régression potentielle des ensembles représentatifs des domaines montagnard et de la moitié nord de la France (Cf. Fig. 1).

Les principales conclusions du projet Carbofor sont donc que i) malgré les fortes pressions anthropiques liées à la sylviculture, l'empreinte climatique est déterminante pour expliquer la distribution actuelle des espèces forestières, ligneuses ou non, sur le territoire et que ii) une relativement faible évolution de ces contraintes (le scénario B2 est l'un des plus optimistes avec une progression des températures de l'ordre de 2°C) pourrait conduire à des modifications profondes de nos paysages.

Ces résultats sont cependant entachés de fortes incertitudes. La méthode choisie pour le traitement des données peut être mise en œuvre rapidement et elle permet de tester "en routine" un grand nombre d'hypothèses de travail (sur les espèces, les groupes d'espèces, les variables climatiques, etc.) mais c'est une modélisation statique et statistique des aires de répartition. Cette approche classique suppose qu'en tout point de l'espace, la présence de l'espèce soit déterminée par un ensemble fini de paramètres environnementaux et on admet que la modification de ces paramètres produit des changements instantanés dans la végétation, sans prendre en compte les processus dynamiques comme la migration, la compétition, les dépérissements, la mortalité, la variabilité génétique, les interactions biotiques, etc. Bien que la plupart des variables entrant dans les modèles semblent avoir une signification physiologique, l'approche n'est que corrélative et non pas causale. Enfin, les projections sont faites "à environnement constant", c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de prendre en compte dans ces modèles de niche des rétroactions liées à l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂. C'est pour explorer certains de ces problèmes que le projet QDiv a été lancé.

Le projet QDiv

*Quantification des effets des changements globaux sur la diversité végétale*²

L'objectif de ce projet est de développer des outils quantitatifs de prédiction des effets des changements globaux sur la diversité et la répartition spatiale des plantes en France en s'appuyant sur un ensemble d'observations, d'expériences et de modèles. Différents modèles de répartition actuelle et future sont calculés afin d'accroître la qualité des projections, voire de dégager un consensus sur les risques associés aux changements du climat et des concentrations atmosphériques en CO₂ en éprouvant nos connaissances des mécanismes qui piloteront les changements d'aires de répartition (aide aux stratégies d'adaptation). Ces modèles sont des modèles de niche : Nancy-NBM (BADEAU *et al.*, 2010), Biomod (THUILLER, 2003) et Stash (SYKES *et al.*, 1996) ; un modèle de phénologie (Phenofit, CHUINE & BEAUBIEN 2001) ; trois modèles dynamiques globaux de végétation : Orchidée (KRINNER *et al.*, 2005), Ibis (KUCHARIK *et al.*, 2000), LPJ (STICH *et al.*, 2003) et un modèle mécaniste, Castanea (DUFRENE *et al.*, 2005).

Toutes les équipes (INRA Nancy, LECA Grenoble, CEFÉ Montpellier, CNRM Météo-France, ESE Orsay, LSCE Saclay), travaillent avec un lot commun de données agrégées sur des mailles de 8 km : des données climatiques journalières couvrant la période 1950-2100 (Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique) ; des données de présence/absence pour sept espèces observées par l'IFN (hêtre, chêne vert, complexe des chênes sessile / pédonculé / pubescent, mélèze, pin sylvestre) ; des pH, profondeurs de sols et réserves utiles en eau issus de la carte des sols de France au 1/1 000 000^e (US Infosol, INRA-Orléans).

Sans entrer dans le détail des résultats en cours de publication, nous pouvons dire que tous les modèles répondent globalement "dans le même sens" pour une espèce donnée. Les modèles statistiques sont toutefois plus efficaces que les modèles mécanistes pour redessiner les contours actuels des aires de répartition. Ce résultat est difficilement interprétable de façon univoque puisque les modèles statistiques s'appuient sur les observations (calibration selon l'aire réalisée) alors que les modèles mécanistes

2 - ANR Biodiversité, projet coordonné par Paul Leadley (Université Paris-Sud XI), 2005-2008 (2010), en cours de publication.

3 - ANR Vulnérabilité, milieux et climats, Nadine Brisson (Unité Agroclim, INRA-Avignon), 2007-2009(10).

(plus satisfaisant du point de vue du fonctionnement physiologique des espèces) retranscrivent des niches fondamentales. Pour les périodes futures, les modèles mécanistes simulent, de façon générale, des évolutions moindres des distributions que les modèles de niche. Pour le pin sylvestre, le chêne vert ou le groupe fonctionnel des feuillus sempervirents, les différents modèles sont en accord dans toutes les régions et mettent en évidence le rôle clé des températures. Pour le hêtre, le chêne pédonculé ou les feuillus décidus tempérés, les modèles projettent de fortes régressions en plaine, des régressions en montagne moins affirmées (voire des progressions pour certains modèles). Pour ces espèces, le bilan hydrique semble jouer un rôle clé ainsi que les concentrations en CO₂ atmosphérique que ne peuvent prendre en compte les modèles statistiques (d'où leur moins grand conservatisme).

Sans remettre en cause les acquis du projet Carbofor, les résultats du projet QDiv soulignent les incertitudes mises en évidence par l'utilisation de différents modèles sans que l'un ou l'autre puisse être qualifié de meilleur. Les modèles mécanistes devraient, en théorie, être plus performants pour projeter le devenir des espèces dans un domaine de conditions environnementales non encore observées, mais leur complexité les rend difficile à paramétriser ce qui conduit à de larges incertitudes sur les projections dans

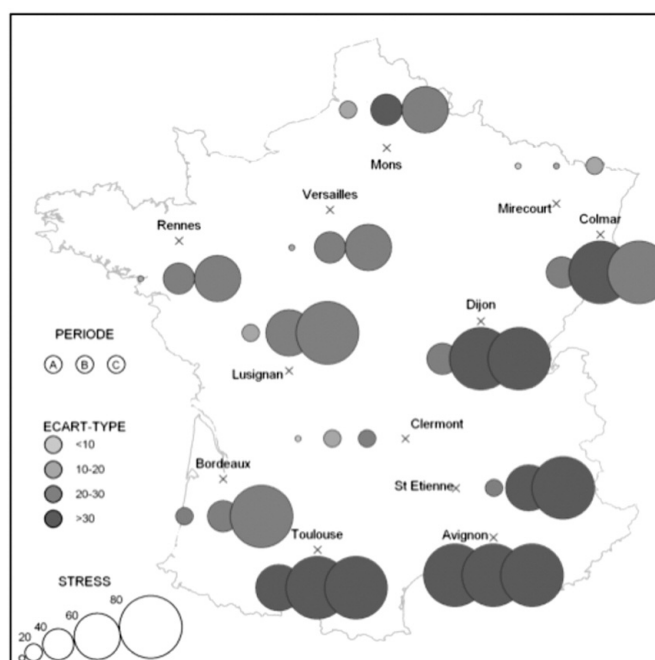
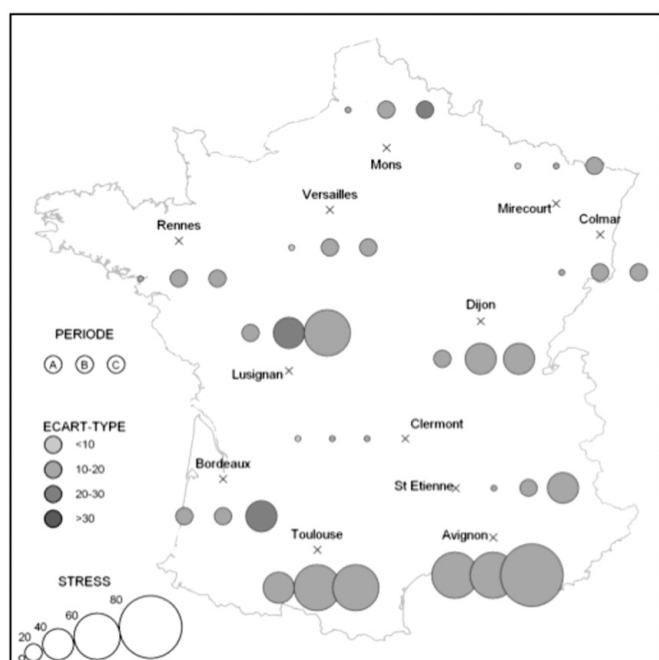
un environnement non constant. Si les modèles de niche semblent surestimer les évolutions potentielles des aires, il est fort probable que les modèles mécanistes les sous-estiment en raison d'un poids trop important accordé aux effets bénéfiques des augmentations de CO₂. Ajoutons à cela qu'aucun modèle n'est actuellement capable de prendre en compte des interactions avec les insectes, les maladies, les extrêmes climatiques, etc.

Le projet CLIMATOR Elaboration d'outils de références pour l'analyse de la vulnérabilité des agro-écosystèmes face au changement climatique³

L'objectif majeur du projet est de donner une vision la plus exhaustive possible du poids relatif des grandes fonctions écologiques et écophysologiques dans un contexte climatique changeant (fonctionnement hydrique, phénologie, accidents climatiques, interactions eau-carbone-azote au sein des couverts végétaux et dans les sols, adaptation de la microflore du sol aux fortes températures, risques phytosanitaires, durabilité des systèmes, etc.) et de diffuser de façon opérationnelle ces résultats auprès des scientifiques, des étudiants et des professionnels

Fig. 2 :

Evolution de l'intensité du déficit hydrique pour une forêt de feuillus (à gauche) et une forêt de conifères (à droite), pour le passé récent (A), le futur proche (B) et le futur lointain (C).
D'après Bréda et al., 2010



des métiers de l'agriculture et de la forêt. Un "cours en ligne"¹ a été ouvert et un "livre vert"² a été rédigé en collaboration avec les professionnels.

Dans ce projet, un effort particulier a été fait pour quantifier et hiérarchiser les sources d'incertitudes et de variabilité. Les incertitudes renvoient à une limite des connaissances, soit de façon irréductible (cas des scénarios d'émission de gaz à effet de serre), soit de façon réductible car liée à l'état actuel de la science (cas des modèles climatiques, des méthodes de régionalisation, des modèles d'impacts). Les sources de variabilité sont soit subies (variabilité des sols et des sites géographiques), soit constituent des choix possibles pour la conduite des cultures (choix des variétés, des provenances, des itinéraires techniques).

Le projet CLIMATOR regroupe dix-sept équipes et vingt-deux modèles agronomiques reconnus représentant le fonctionnement de quatre grands types de systèmes (cultures en rotations, prairies, vignes et forêts). Il s'appuie sur treize sites expérimentaux de l'INRA représentatifs des climats des grandes régions agricoles françaises (Avignon, Bordeaux, Clermont-Ferrand, Colmar, Dijon, Mirecourt, Mons, Lusignan, Rennes, St-Etienne, Toulouse, Versailles, la Guadeloupe) ; trois (ou cinq) types de sols caractéristiques des différentes cultures ; six modèles climatiques (deux versions du modèle ARPEGE (Météo France & CERFACS), deux modèles américains (GISS & NCAR), un modèle canadien (CCCMA) et un modèle japonais (MRI) ; trois scénarios d'émission (A2, B1, A1B) ; trois méthodes de régionalisation des Modèles de Circulation Générale (anomalies [ANO], corrections variables [QQ], régimes de temps [TT]).

Pour la forêt, le protocole de simulation s'appuie sur trois modèles : BILJOU, un modèle fonctionnel de bilan hydrique des peuplements (GRANIER *et al.*, 1999) ; GRAECO, un modèle fonctionnel couplant eau, carbone, croissance et gestion sylvicole (LOUSTAU *et al.*, 2005) et des modèles statistiques de l'évolution des présences d'essences (BADEAU *et al.*, 2010). Trois types de couverts sont étudiés : feuillus (type hêtre ou chêne vert), conifères à fort indice foliaire (sapin, épicéa, douglas) et plantation de pin maritime avec un sous-étage herbacé.

Pour le bilan hydrique, les simulations réalisées dans le cadre de Climator font

apparaître que l'intensité du déficit hydrique augmente au cours du temps, quels que soient le sol, la projection climatique et le site. Cette dégradation du bilan hydrique des forêts est particulièrement marquée pour les forêts de conifères à fort indice foliaire et ceci dès le futur proche (Cf. Fig. 2). À noter que la recharge en eau des sols est meilleure dans les forêts de feuillus décidues qui bénéficient d'une restitution en eau plus importante au milieu en dehors de la période de végétation, quand il n'y a plus de feuillage. Les analyses mettent également en évidence une tendance à la réduction progressive de la consommation en eau des peuplements, liée aux régulations induites par les sécheresses qui affecteront en retour la fixation du carbone, et donc la productivité.

Les impacts du changement climatique sur le rendement ne sont étudiés que pour le pin maritime. Les résultats montrent des pertes significatives de rendement pour tous les sites (sauf Mirecourt à l'horizon 2050). Ces pertes relativement faibles au futur proche (– 4,6% en moyenne) s'aggravent dans un futur lointain (– 11% en moyenne). Ces résultats sont conditionnés en premier ordre par l'augmentation des températures annuelles moyennes, puis par la baisse de la pluviométrie (augmentation de la demande évaporative et baisse de la disponibilité en eau du sol). Pour maintenir un état hydrique correct, les arbres limitent alors leur transpiration ce qui limite leur photosynthèse et, au final, la productivité. L'augmentation de la concentration en CO₂ peut finalement être considérée comme la seule modification se traduisant par un effet positif sur la productivité des peuplements. Pour le pin maritime, bien que les valeurs absolues de perte de rendement dépendent fortement de la méthode de régionalisation du climat, toutes convergent vers une évolution négative de la productivité (Cf. Fig. 3).

Trois des modèles statistiques, développés dans le cadre du projet Carbofor sont utilisés dans le projet Climator : chêne vert, hêtre et zones biogéographiques (groupes d'espèces). Les différents scénarios climatiques appliqués à ces modèles conduisent à des résultats cohérents avec ceux des projets Carbofor et QDiv : diminution des probabilités de présence du hêtre sur tout le territoire ; augmentation des probabilités de présence du chêne vert vers le nord de la France ; extension spatiale des groupes biogéographiques méditerranéen et aquitain. Cependant,

1 - www.avignon.inra.fr/cours_en_ligne_climator

2 - Téléchargeable gratuitement à l'adresse suivante : www.inra.fr/la_sciences_et_vous/dossiers_scientifiques/changement_climatique/en_savoir_plus/ouvrages/livre_vert_du_projet_climator

l'exercice Climator met en lumière les incertitudes sur l'évolution potentielles des niches en lien avec les séries climatiques utilisées. Dans le cas du hêtre par exemple, les plus fortes régressions potentielles ne sont pas directement liées au scénario d'émission : selon les sites étudiés, les scénarios A1B ou B1 peuvent avoir un impact plus important que le scénario A2, en théorie plus « pessimiste ». Ces différences de réponses ne sont pas forcément conservées dans le temps : localement, la hiérarchie des scénarios peut être modifiée entre le futur proche et le futur lointain. A scénario constant (A1B) l'influence des méthodes de régionalisations n'est pas homogène entre les sites (une méthode donnée ne conduit pas de façon univoque à des résultats plus optimistes ou plus pessimistes). Les différentes méthodes de régionalisation peuvent avoir des impacts plus forts que ceux générés par les différents scénarios d'émission (Cf. Fig. 4).

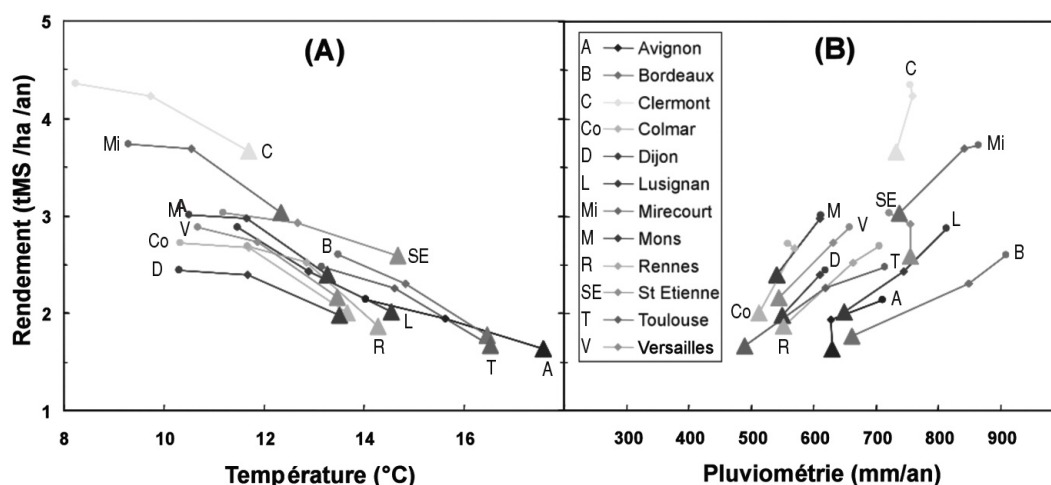
Même si un croisement exhaustif de toutes les modalités n'a pas été matériellement possible, les simulations réalisées dans le cadre du projet mettent en évidence que la variabilité interannuelle du climat et la variabilité géographique restent les sources majeures de variabilité des résultats des modèles. Pour le futur lointain, le poids du scénario climatique domine largement les effets dus à la méthode de régionalisation, mais à l'horizon du futur proche leurs variabilités sont du même ordre de grandeur. La variabilité due aux types de sol est supérieure ou au moins égale aux incertitudes sur le changement climatique (tous scénarios et méthodes de régionalisation confondus).

Conclusions

Les résultats du projet Carbofor n'ont pas été remis en question par les analyses réalisées dans le cadre des projet QDiv et Climator. Divers éléments ont cependant pu être précisés. Le changement climatique entraînera des conditions plus défavorables pour les couverts forestiers, essentiellement en raison de l'augmentation des températures et des stress hydriques ; niveau de stress étant par ailleurs dépendant de la surface évaporante des forêts (indice foliaire ou LAI). L'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère concomitamment à l'élévation des températures est très certainement un élément clé de l'évolution des écosystèmes, cependant la quantification de cette compensation reste encore très incertaine (cf. les modèles mécanistes de QDiv ou le modèle Graeco pour Climator). A l'inverse des grands systèmes de culture, il y a peu d'incertitude sur le sens des effets du changement climatique sur les forêts et les stratégies d'évitement semblent limitées.

Ces résultats mettent en évidence le caractère prospectif, et non prévisionnel, de la simulation des impacts du changement climatique sur les couverts forestiers : face aux différentes sources d'incertitude et de variabilité, les projets QDiv et Climator montrent qu'il est nécessaire de coupler différentes approches de modélisation pour espérer encadrer de façon satisfaisante les projections pour le futur. Tous ces projets, grâce à un travail conjoint avec les différentes communautés de climatologues et de modélisateurs, fournissent un nouveau cadre d'ana-

Fig. 3 :
Evolution, sur les 12 sites (scénario A1B, méthode de régionalisation QQ, Sol 3) du rendement du pin maritime (FCM) en fonction de la température annuelle moyenne (A) et de la pluviométrie annuelle moyenne (B). Pour chaque station, les trois points reliés représentent les trois périodes Passé récent (PR), Futur proche (FP) et Futur lointain (FL), où FL est représenté par le triangle.



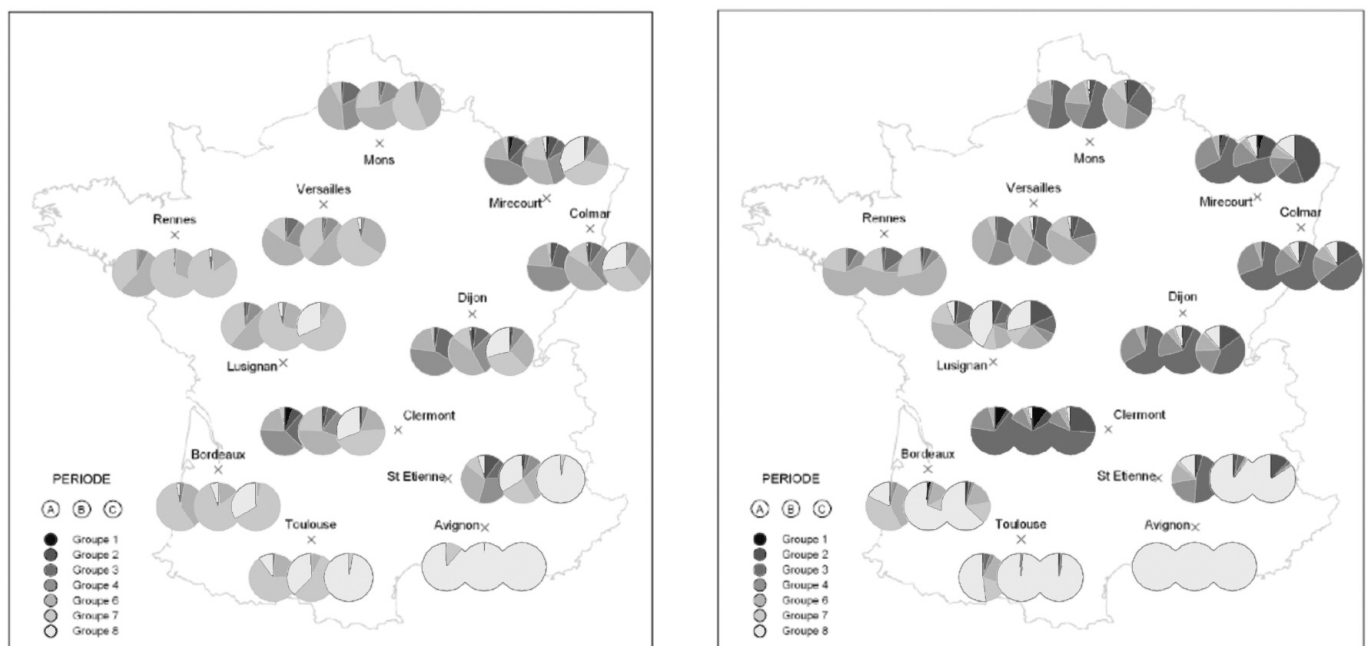
lyse multi-modèles et multi-scénarios des impacts que pourrait avoir l'évolution du climat sur les peuplements forestiers.

V.B.

Bibliographie

- Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Forêt Entreprise*, 162, avril 2005, 25-29.
- Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2010. *Climate change and the biogeography of French tree species: first results and perspectives*. Loustau, D. (Editeur). Forests, Carbon Cycle and Climate Change. Versailles (FRA) : Editions Quae ; Update Sciences et Technologies : 231-252.
- Benichou P. & Le Breton, 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie*, 19, 23-34.
- Bradshaw R.H.W., Holmqvist B.H., Cowling S.A. & Sykes M.T., 2000. The effects of climate change on the distribution and management of *Picea abies* in southern Scandinavia. *Can. J. For. Res.*, 30, 1992-1998.
- Bradshaw R.H.W. & Hannon G.E., 2004. The Holocene structure of North-west European temperate forest induced from palaeoecological data. In: Honnay, Verheyen, Bossuyt & Hermy (Eds.), *Forest Biodiversity*, 2004, IUFRO – CABI Publishing, 11-25.
- Chuine I. & Beaubien E., 2001. Phenology is a major determinant of temperate tree distributions. *Ecology Letters*, 4: 500-510.
- Dufrène E., Davi H., François C., Le Maire G., Le Dantec V., Granier A., 2005. Modelling carbon and water cycles in a Beech forest. Part I: Model description and uncertainty analysis on modeled NEE. *Ecological Modelling*, 185: 407-436.
- Granier A., Bréda N., Biron P. & Villette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116 : 269-283.
- Jalas J. & Suominen J., 1972–1991. *Atlas Flora Europaeae: Distribution of Vascular Plants in Europe*, vols. 1 - 9. Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.
- Krinner G., Viovy N., de Noblet N., Ogée J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S. & Prentice I., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 19 (1), GB101510.1029/2003GB002199.
- Kucharik C. J., Foley J. A., Delire C., Fisher V. A., Coe M. T., Lenters J. D., Young-Molling C., Ramankutty N., Norman J. M. & Gower S., 2000. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure, *Global Biogeochem. Cycles*, 14(3), 795– 826.
- Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogée J., Hendrick D., Francois C., Dufrène E., Deque M., Cloppet E., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Pignard G., Hamza N., Granier A., Bréda N., Ciais P., Viovy N., Delage J. (2005) – Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree Physiology*, 25, 313-323.
- Vincent BADEAU
UMR INRA-UHP
Écologie & écophysiologie forestières
Équipe phytoécologie forestière
Centre INRA de Nancy
54280 Champenoux
badeau@nancy.inra.fr

Fig. 4 :
Probabilité d'occurrence de 7 groupes biogéographiques : méditerranéen (groupe 8), aquitain (groupe 7), Nord-Ouest (groupe 6), Nord-Est (groupe 4), montagnards (groupes 1,2,3), pour les trois périodes étudiées : A passé récent, B futur proche, C futur lointain, selon le scénario A1B régionalisé par la méthode QQ (à gauche) ou la méthode TT (à droite).



Remerciements à

A. Bosc, N. Bréda, N. Brisson, A. Cheaib, I. Chuine, C. Cluzeau, C. Delire, J. Drapier, E. Dufrêne, J.L. Dupouey, C. François, E. Gritti, P. Leadley, C. Le Bas, M. Legay, F. Levraut, D. Loustau, C. Massoni, W. Thuiller, N. Viovy, M. Wallerich.

Pearson R.G., Dawson T.P., Berry P.M. & Harrison P.A., 2002. SPECIES: A Spatial Evaluation of Climate Impact on the Envelope of Species. *Ecological Modelling*, 154, 289-300.

Sánchez-Goni M.F., Landais A., Fletcher W.J., Naughton F., Desprat S., Duprat J., 2008. Contrasting impacts of Dansgaard-Oeschger events over a western European latitudinal transect modulated by orbital parameters, *Quaternary Science Reviews*, 27, 1136-1151.

Sykes M.T., Prentice I.C., and Cramer W., 1996. A bioclimatic model for the potential distributions of North European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography*, 23, 203-233.

Stich S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer A., Kaplan W., Levis J., Lucht S., Sykes M., Thonicke M. & Venevski K., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Vegetation Model. *Global Change Biology*, 9, 161-185.

Thuiller W., 2003. BIOMOD: Optimising predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9, 1353-1362

Wallerich M., 2006. Etude de la répartition des espèces forestières françaises : modélisation et cartographie d'ensembles biogéographiques actuels et projections possibles pour 2100. Université Henry Poincaré Nancy I, 25p.

Résumé

De nombreux travaux ont été entrepris, depuis une dizaine/vingtaine d'années, pour modéliser les relations entre la distribution des espèces et le climat, afin d'estimer comment ces distributions pourront être potentiellement modifiées. Ils concernent toutes les communautés vivantes considérées à l'échelle de l'espèce, du groupe fonctionnel ou du biome ; à des échelles régionales ou très globales ; avec des résolutions spatiales très variables et des objectifs de conservation de la biodiversité ou de production.

Les premiers résultats disponibles (2000) dans le cadre du projet CARBOFOR (cartes de déplacement potentiel de quelques grandes essences forestières) ont suscité un certain émoi dans la communauté forestière. D'autres projets de recherche ont alors été lancés pour compléter ces résultats.

Le projet ANR-QDiv utilise 8 modèles pour analyser la réponse de quelques espèces au changement climatique (modèles de niche statistiques, modèles mécanistes ; statiques ou dynamiques ; centrés sur les espèces ou les types fonctionnels).

Dans le cadre du projet ANR-Climator associant de nombreuses disciplines (climatologie, agronomie, écophysiologie, bioclimatologie, science du sol) ont été produits des méthodes et des résultats sur les incertitudes affectant les impacts régionalisés du changement climatique sur divers systèmes cultivés et pérennes.

Les analyses réalisées dans le cadre des projets QDiv et Climator ont permis de préciser certains éléments. Le changement climatique entraînera des conditions plus défavorables pour les couverts forestiers, essentiellement en raison de l'augmentation des températures et des stress hydriques. L'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère est un élément clé de l'évolution des écosystèmes, mais dont la quantification reste encore très incertaine.

Ces résultats mettent en évidence le caractère prospectif, et non prévisionnel, de la simulation des impacts du changement climatique sur les couverts forestiers et qu'il est nécessaire de coupler différentes approches de modélisation pour espérer encadrer de façon satisfaisante les projections pour le futur.

Summary

Results of the CARBOFOR and ANR-Qdiv projects and the questions they raise - Advances brought by the ANR-Climator project

Over the last ten/twenty years, much work has been undertaken in modelling the relationship between species distribution and climate in order to assess how such distribution patterns may change in the future. The studies have involved all living communities taken at the level of single species, functional groups or a biome; at regional or more global levels; with very variable spatial resolution and with the objectives of preserving biodiversity or production.

The first results available (2000) within the framework of the CARBOFOR project (mapping of the potential displacement of certain major forest tree species) created a definite stir amongst the forestry community. Hence, other projects were launched to throw further light on these results.

The ANR-Qdiv project uses eight models to analyse the response of a number of species to climate change (statistical niche models, mechanistic models; static or dynamic; centred on species or on functional types).

Within the framework of the ANR-Climator project which involves a range of disciplines (climatology, agronomy, ecophysiology, bioclimatology, soil science), methods and results have been produced on the uncertainty concerning the impact of climate change at a regional level on various cultivated, perennial systems.

The analyses carried out within the framework of the QDiv and Climator projects have made it possible to specify certain elements. Climate change will induce less favourable conditions for forest cover, mainly because of the rise in temperature and lack of water. The increase in the amount of CO₂ in the atmosphere is a key factor in the evolution of ecosystems, though quantifying the effect remains uncertain.

Such results highlight how the simulation of the impact of climate change on forest cover is exploratory and not predictive. They also underline the necessity to combine different approaches to modelling if we hope to devise a satisfactory framework for projections about the future.