

Programme Gestion et Impacts du Changement climatiques GICC

APR 2001

7/01 - Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles

Résumé du rapport final

Coordinateur : Denis Lousteau - INRA

Fait unique en Europe, le territoire national métropolitain est le point de rencontre de quatre zones biogéographiques contrastées, les zones tempérées semi-continentale et océanique, la zone méditerranéenne et la zone alpine. La variété des essences (feuillus caduques et persistants, résineux) et des profils écologiques des espèces forestières est donc importante. A cette complexité spécifique relative, la gestion sylvicole ajoute une variabilité spatiale et temporelle de la structure du couvert en terme de distribution de classes d'âge, type de couvert, composition spécifique. Le projet CARBOFOR, en mobilisant des approches expérimentales, des outils de modélisation et les données disponibles a permis de dégager les points communs mais aussi les différences de comportement de ces écosystèmes dans leur réponse au scénario climatique régionalisé 1960-2100. Cette analyse centrée sur le cycle du carbone, la biogéographie et la vulnérabilité aux pathogènes majeurs est résumée ici.

Nous avons exploré différentes approches de calcul de stock de carbone de la biomasse des forêts françaises. Les approches plus détaillées que l'approche des facteurs d'expansion comme l'utilisation d'équations de biomasse ou de maquette architecturale apparaissent comme prometteuses, surtout à l'échelle de l'arbre et du peuplement, mais insuffisamment renseignées pour s'appliquer à l'échelle du territoire national.

Nous avons révisé l'estimation du stock de carbone biomasse de la forêt française en appliquant un ensemble de tarifs mis au point d'après un ensemble de plus de 4000 fiches d'inventaires encore inexploitées à ce jour. Cette nouvelle estimation révisé à la hausse de près de 20% les valeurs proposées antérieurement. Le stock de carbone dans la biomasse forestière (aérienne et souterraine) est évalué à 71 t C/ha à l'occasion du dernier inventaire réalisé en moyenne en 1996, le volume sur pied étant de 154 m³.ha⁻¹. Si on extrapole ce stock à la totalité de la surface boisée, soit 14,86 millions d'ha, on obtient une estimation

globale de 1059 Mt C en 1996 et 830 Mt C en 1984. L'exploitation de ces deux inventaires permet d'évaluer, par différence de stocks, l'incrément net annuel en carbone dans la biomasse des forêts à 15,6 Mt C.an⁻¹ si on se limite aux formations boisées de production, et à 18,7 Mt C.an⁻¹ si on extrapole à l'ensemble des forêts (hors tempête) contre 10.5 Mt C.an⁻¹ en 1979-1991 estimé précédemment.

Les stocks de carbone - biomasse les plus élevés sont localisés dans les futaies feuillues à révolution longue localisées dans le Nord-Est de la France : Alsace, Lorraine, Franche-Comté, dans le Nord des Alpes et dans la partie occidentale du massif pyrénéen. Les régions méditerranéennes présentent les valeurs les plus faibles. La distribution géographique du stockage annuel net de carbone est sensiblement différente; la fixation nette de carbone est plus importante dans les forêts de production à révolution courte sur une large diagonale Sud-Ouest / Nord-Est, où ressortent les régions Aquitaine, Auvergne, Centre et Bourgogne. Cette situation a été bouleversée par les tempêtes de décembre 1999, qui ont causé d'importants dégâts sur une grande partie de cette zone. L'accroissement du stockage net de carbone annuel recouvre un accroissement "naturel" de la production dont les causes sont mal quantifiées. On peut remarquer qu'un accroissement similaire est bien prédit par les modèles utilisés plus loin sur la période 1960-2100.

L'analyse comparative synthétique des données de suivi expérimental du cycle du carbone mis en œuvre sur le réseau de sites ateliers du projet montre que les réponses énergétique, hydrique et carbonée des couverts forestiers nationaux au climat sont peu dépendantes de l'espèce. Elles sont contrôlées par le climat et la structure du couvert en terme d'indice foliaire, de densité des arbres, de biomasse et de hauteur. L'assimilation brute en carbone des futaies régulières adultes est comprise entre 1000 et 2500 g C m⁻² an⁻¹ (10 à 25 t C ha⁻¹ an⁻¹). La respiration de l'écosystème est responsable des variations inter-annuelles et inter-sites du bilan de carbone: les faibles valeurs d'échanges nets de carbone correspondent à des niveaux élevés de respiration de l'écosystème. Le déterminisme de ce flux est complexe et mal connu. Il est la somme des flux de respiration de la végétation et des flux de carbone liés à la dégradation des fractions de biomasse morte, résultant aussi bien de la mortalité naturelle que des éclaircies ou des coupes rases qui laissent à la surface ou dans le sol des résidus en quantité importante. Tous les sites étudiés sont soumis à une gestion forestière dynamique se traduisant par des rajeunissements périodiques de la structure du feuillage par éclaircies. La gestion sylvicole, en modifiant la structure physique du couvert, influence profondément le fonctionnement de ces écosystèmes en particulier la variabilité des flux et bilan de carbone à l'échelle inter-annuelle et entre les sites. Le régime de coupe (taillis ou futaie) et la durée des révolutions conditionnent fortement la structure d'âge des unités de gestion forestière, les stocks de biomasse accumulés et la productivité forestière à l'échelle régionale. L'âge des peuplements est un élément clé sur lequel intervient la gestion forestière.

L'étude (achevée fin 2004) de la dynamique du carbone dans les sols sous hêtraie et Pin confirme l'importance des effets de la gestion sur le cycle du carbone. Elle fait ressortir la relative jeunesse du pool de carbone impliqué dans le flux hétérotrophe de carbone annuel, les âges du carbone variant de moins de 5 ans dans les horizons OL et OF à 150 ans dans l'horizon A1. La différenciation avec l'âge du peuplement se traduit essentiellement dans les moder par la formation progressive de l'horizon OH, étalée sur plus de 50 ans et qui s'observe aussi bien sous Hêtre que sous Pin. La prise en compte de la non stationnarité de cet horizon dans les modèles de dynamique du carbone forestier semble donc nécessaire en particulier dans les peuplements gérés où les travaux de préparation du sol peuvent enfouir totalement cet horizon avec un temps de retour pouvant atteindre moins de 40 ans dans les scénarios de gestion intensifs. La conversion progressive des humus de type mull en moder, phénomène relié à l'exportation des bases, l'acidification par les litières accumulées et la

disparition progressive des vers de terre, apparaît aussi déterminante pour la simulation de la dynamique du carbone en relation avec l'âge du peuplement.

Nous avons affiné les outils de description simplifiée du fonctionnement de ces écosystèmes, i.e. les modèles mécanistes décrivant les grands processus physiques et biologiques impliqués dans le cycle du carbone dans ces écosystèmes. L'évaluation comparative de ces modèles par différents critères statistiques en terme de précision, robustesse, et sensibilité aux facteurs climatiques n'est pas encore totalement achevée. Les incertitudes de ces modèles ont été quantifiées autour de 60 gC m^{-2} pour la croissance et 80 gC m^{-2} pour les échanges nets de C soit 26% d'incertitude en moyenne pour le modèle CASTANEA. Nos principales conclusions sont qu'une modélisation mécaniste semble assez robuste pour prédire les différents termes des bilans d'eau et de carbone (NEE, GPP, NPP, ETR,...) sur de longues séries temporelles affectées par une évolution climatique et sylvicole et qu'ils sont suffisamment sensibles aux déterminants environnementaux ou sylvicoles du fonctionnement des forêts pour réaliser cet objectif. Cependant, la traduction de ces résultats en terme de bilan hydrique du sol ou de biomasse produite sont, eux, moins cohérents leur précision varie d'un site à l'autre et ce type de prédiction est donc plus incertain.

L'expérience numérique qui a été conduite ici pour construire le scénario climatique régionalisé 1960-2100, basée sur le scénario d'accumulation B2, se caractérise par une élévation des températures en toute saison, surtout en été, par une augmentation des pluies hivernales sur les façades maritimes (hors Méditerranée) et sur les reliefs (hors Pyrénées). Sur le plan hydrique, la disponibilité en eau des sols pour la végétation est fortement amoindrie sauf en hiver. Rappelons que le scénario étudié ici est le scénario B2 du GIEC. Il faut considérer que les conclusions issues des études d'impact du projet CARBOFOR correspondent à une vision modérée, voire optimiste du scénario climatique national en France métropolitaine, si les scénarios d'émission se fondent sur une poursuite exponentielle au cours du 21ème siècle, dans la lignée de ce qui a été fait au cours du 20ème siècle, se confirment.

La simulation à long terme de la production potentielle des écosystèmes forestiers montre une réponse positive au scénario climatique, les décidus profitant légèrement plus que les conifères de l'effet fertilisant du CO_2 et du réchauffement, entre autres par l'allongement de leur saison de végétation. Cet effet est plus marqué dans le Nord -Est où le régime hydrique est moins affecté par le scénario. Ces conclusions demeurent contingentes de la façon dont le modèles utilisés représentent le couplage des bilans de carbone et d'eau en période de stress et lorsque le CO_2 atmosphérique augmente.

La simulation des révolutions complètes à quatre climats 1980, 2015, 2045 et 2080 aboutit à des résultats contrastés suivant les régions et les essences considérées. L'évolution dans le temps et la répartition géographique des changements de production et de fonctionnement dépendent de l'importance respective des effets du CO_2 , du réchauffement et de l'aggravation des stress hydriques. Les effets prédits sont globalement positifs dans le Nord de la France pour les feuillus sociaux avec une réponse décroissante de l'Est vers l'Ouest, la façade Nord-Ouest présentant même une anomalie de production nette négative. Dans le Sud Ouest ils sont positifs en début de siècle puis s'inversent avec une anomalie négative augmentant vers l'intérieur des terres en fin de simulation (2080). Cette simulation met en évidence plusieurs interactions importantes. Les scénarios de gestion intensifs et les stations les plus fertiles sont les plus sensibles au changement climatique analysé.

Les cartes de production potentielle simulées confirment l'importance des interactions climat – réserve utile des sols et le comportement variable des types fonctionnels de la forêt française. Les différences apparaissant, attribuées à la paramétrisation différente des modules de phénologie et bilan hydrique des modèles, reflétant bien les points d'incertitude existant sur la réponse écophysiological des espèces concernées.

La distribution des aires géographiques potentielle des essences sur le territoire national telle qu'elle est projetée au travers du scénario climatique fait apparaître un déplacement des groupes d'essences méridionaux vers le Nord et vers l'Est. Les groupes montagnards et continentaux tendent à régresser fortement, le cas du hêtre qui est réduit à l'extrême Nord-Est du territoire national en 2100 est emblématique à cet égard. Cette conclusion rejoint les résultats prédits en terme de fonctionnement et de production. Les espèces les plus sensibles et donc vulnérables sont les espèces supportant mal les sécheresses édaphiques et celles en limite Sud de leur aire naturelle comme le Hêtre. Les trois expériences de simulation et la modélisation des aires géographiques donnent une image cohérente de l'évolution du paysage forestier national au cours du 21^e siècle. En fin de siècle, le potentiel climatique de production est diminué sur la moitié Sud et la façade Ouest du pays où l'effet du cycle saisonnier des précipitations est défavorable mais demeure neutre ou bénéficiaire dans la partie Nord Est. On observe une extension de la forêt méditerranéenne, de productivité faible, au détriment des forêts de production atlantique (les Landes de Gascogne) et des forêts de feuillus sociaux de plaine où se concentre actuellement le stock de biomasse sur pied le plus important.

L'impact du changement climatique sur les pathosystèmes se traduit par de fortes extensions d'aires potentielles pour les espèces dont la survie hivernale est limitée par les températures basses. Dans le cas de l'oïdium, le réchauffement se traduirait par une augmentation très importante du risque en terme de fréquence, passant de 10% à 50-70% des années dans le Sud-Ouest. Pour les rouilles du Peuplier, parasites polycycliques, une augmentation de 1°C conduit à un avancement de la date des premières infections de 11 jours se traduisant potentiellement en fin de saison par une augmentation de 30% de la proportion de tissus malades. Par contre, l'évolution du régime hydrique (baisse des précipitations pendant la saison de croissance) affecte très différemment les espèces selon leur biologie.

Les conclusions de ces résultats en terme d'aménagement et de gestion sylvicole et environnementale demanderont à être confrontées à d'autres résultats concernant les impacts en terme de risque, mais aussi à une analyse socio-économique cohérente, ce qui dépasse le cadre de ce projet. Néanmoins, l'interaction que nous prédisons entre les impacts du climat et la gestion montre que :

- tous les impacts du scénario analysé analysés dans ce projet sont importants en valeur absolue. Le potentiel global de production de la forêt française sera modifié et cette modification présentera des variations géographiques importantes, le Nord étant avantagé et le Sud et les zones montagneuses plus menacées. La répartition stationnelle et géographique des fonctions forestières et donc des scénarios de sylviculture sera affectée.
- ce changement est brutal, il intervient sur un laps de temps inférieur à la durée d'une révolution, et il est discontinu, l'évolution de la production forestière dans le temps présente un maximum de production nette atteint entre 2015 - 2045 suivi d'une diminution ultérieure. Ceci pose la question du couplage recherche - développement opérationnel en matière de gestion des écosystèmes forestiers et des ressources en eau aux échelles régionales et nationales.
- la capacité de réserve en eau des sols et régions forestières et les conditions locales de disponibilité en nutriments sont les facteurs clés déterminant la réponse des peuplements au changement climatique au moins dans la moitié Sud et sur la façade Ouest du pays.
- nos résultats suggèrent une évolution forte du « paysage phytosanitaire forestier » en lien avec les changements climatiques. Les changements projetés de distribution et

impact des parasites conduisent à préconiser une gestion anticipative et préventive des risques, en particulier pour éviter ou limiter la dissémination des parasites dans leurs enveloppes climatiques potentielles. Le choix des espèces ou variétés pour les reboisements devra être raisonné en fonction de ces risques.

Ces conclusions et leur incertitude appellent de nouvelles recherches expérimentales portant sur l'écophysiologie des espèces métropolitaines, en particulier les effets des limitations trophiques multiples, la phénologie et la capacité phénotypique d'adaptation à des stress thermiques et hydriques. Les moteurs de simulation permettant de mettre en œuvre des prédictions multi-échelles sont opérationnels et pourraient être utilisés pour développer la prise en compte e.g. du cycle de vie des produits du bois. Une première étape de convergence des modèles mis en œuvre a été réalisée par ce projet mais laisse encore demeurer des différences et appelle à poursuivre l'effort d'harmonisation des outils de simulation utilisés. L'application de ces approches à des peuplements irréguliers ou mélangés est aussi devenue aujourd'hui une étape envisageable.