

COMMENT ASSOCIER DIFFÉRENTS RÉSEAUX D'OBSERVATION POUR MIEUX COMPRENDRE LE CYCLE DU CARBONE EN FORÊT ? EXEMPLE DU MODÈLE CASTANEA

Éric Dufrêne
CNRS, Laboratoire Écologie
Systématique et Évolution



Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?
Exemple du modèle CASTANEA

Eric Dufrêne¹, Christophe François¹, Nicolas Delpierre¹, Hendrik Davi², Hélène Genet³, Joannès Guillemot⁴, Gueric le Maire⁴, Valérie Le Dantec⁵, Guillaume Marie⁵, Cécile Vincent-Barbaroux⁶

¹Écologie Systématique Évolution, Université Paris-Sud, CNRS, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 91400 Orsay, France
²URFM, INRA, 84914 Avignon, France
³Institute of Arctic Biology Univ. of Alaska Fairbanks, Fairbanks AK, USA
⁴UMR Eco&Sols, CIRAD, SupAgro, 34060 Montpellier, France
⁵CESBIO, CNRS, Univ. Paul Sabatier, CNES, IRD, 31401 Toulouse, France
⁶Dept. of Ecological Sciences, Fac. of Earth and Life Sciences, Amsterdam, Pays-Bas
⁷ARCHE-USC, Univ. d'Orléans, INRA, 45 000 Orléans, France

Une des critiques qui est souvent faite aux réseaux d'observation, entre autres par les bailleurs de fonds, c'est « en quoi votre réseau se différencie-t-il des autres et à quoi sert-il par rapport aux autres ? » Dans notre démarche de modélisation nous avons associé au cours du temps, sur une vingtaine d'années, un grand nombre de réseaux pour développer le plus proprement possible notre modèle de fonctionnement CASTANEA, grâce à la fructueuse complémentarité de leurs apports. C'est ce que je vais essayer de vous présenter en l'illustrant par quelques exemples.

Je n'ai cité comme auteurs que les modélisateurs directement concernés, l'équipe de mon laboratoire et d'autres, mais **je tiens à remercier ici** les très nombreux scientifiques et techniciens qui ont contribué de façon décisive aux travaux que je vais survoler. Et je remercie bien sûr tous ceux qui prennent des données : nous savons à quel point c'est contraignant et ingrat..

Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Un modèle = une représentation simplifiée de la réalité

Simplification → hiérarchisation et choix en fonction des objectifs

Hiérarchisation et choix → limites du modèle construit pour simuler d'autres processus ou d'autres échelles

Modèle basé sur les processus bio-physiques
CASTANEA
 Prédire pour mieux comprendre le fonctionnement d'un écosystème forestier en terme de cycles (C, H₂O, N)

2 Eric Dufréne Ecologie Systématique Evolution Beauce, 12 octobre 2017

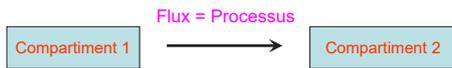
Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Modèle basé sur les processus bio-physiques

Modèle de Flux ou à Compartiments

permet de représenter les échanges de matière (et/ou d'énergie) entre les différentes parties d'un système complexe



Processus : représenté par une ou plusieurs équations avec des variables et des paramètres

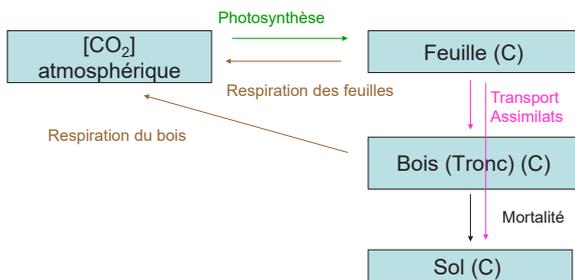
Compartment : variable d'état = quantité de matière

3 Eric Dufréne Ecologie Systématique Evolution Beauce, 12 octobre 2017

Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Modèle de Flux ou à Compartiments



4 Eric Dufréne Ecologie Systématique Evolution Beauce, 12 octobre 2017

Quelques rappels sur les modèles

Un modèle c'est une représentation forcément simplifiée de la réalité, c'est pourquoi ça ne marche pas toujours. Quand on construit le modèle on fait des choix de simplification. Ça implique que le modèle peut prédire un certain nombre de choses mais qu'on ne peut pas l'étendre à toutes les situations ; ça dépend des simplifications qui ont été faites. Si on l'étend trop, on commet de grossières erreurs. Donc je ne crois pas au modèle universel qui fait tout.

Ce qui nous est demandé, en tout cas au CNRS, c'est de comprendre, pas de prédire. Ce que nous construisons, à la base, c'est un modèle de compréhension. Mais ensuite, la société est plutôt intéressée par la possibilité de l'utiliser pour prédire et je suis très content quand on peut aussi apporter ça. D'où les discussions sur les comparaisons de modèles (en fin de session 2) : en fait chaque modèle cherche à comprendre un certain nombre de choses, et ensuite on les utilise pour simuler, avec plus ou moins de succès et plus ou moins d'erreur.

Le modèle que nous développons cherche à comprendre le fonctionnement d'un écosystème forestier en termes de cycles (de l'eau, du carbone, de l'azote...). C'est un modèle basé sur les processus, ce qu'on appelle modèle de flux ou à compartiments. En fait c'est assez simple : les compartiments sont les biomasses ou les quantités de matière (de l'eau, du carbone, de l'azote ou ce qu'on veut), et les flux sont les processus. Les processus sont représentés par des équations, avec une ou plusieurs variables d'entrée et un ou plusieurs paramètres. Ça donne des modèles relativement complexes avec de nombreuses équations.

Description de principe de CASTANEA (sur l'exemple du carbone)

Rentrons dans le concret avec le carbone.

On a un réservoir de carbone atmosphérique ; ce carbone peut rentrer dans la plante par photosynthèse (c'est le processus) et il est ensuite distribué dans la plante entre différents organes (ce sont les différents stocks). Ça peut aussi migrer vers le sol et être stocké dans le sol (il en sera question dans les deux exposés suivants). Et puis il y a d'autres processus, comme la respiration, qui font ressortir le carbone du système.



Photo : Jean-Pierre Galéme, ONF

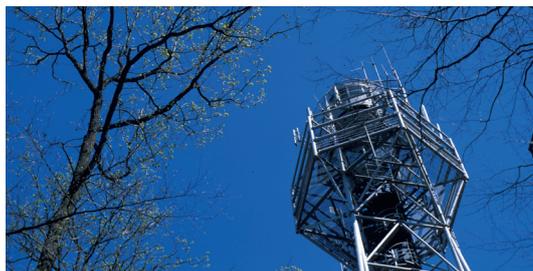
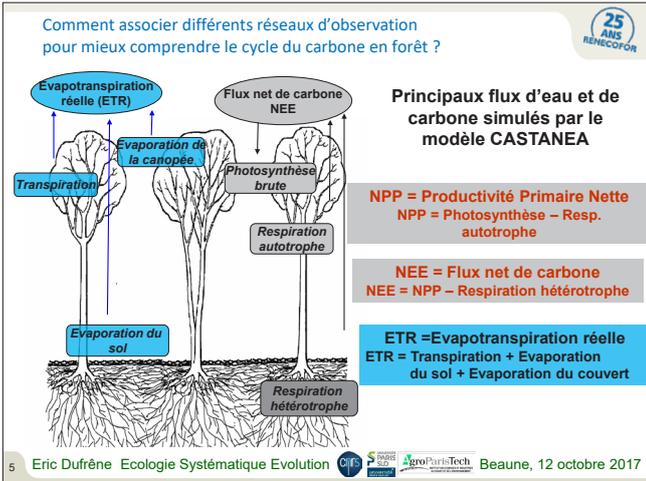


Photo : Luc Croisé, ONF

Le modèle de processus Castanea repose sur les données de sites très instrumentés comme ici, pour le chêne sessile, le site ICOS de Barbeau près de Fontainebleau



Les principaux flux de carbone sont la photosynthèse, la respiration autotrophe (celle des plantes) et la respiration hétérotrophe (celle des microbes du sol). La différence entre la photosynthèse et la somme des respirations, c'est ce qu'on appelle le flux net (NEE) : c'est ce que mesurent par exemple les tours à flux dans les dispositifs ICOS*. Le carbone disponible pour la croissance de la plante, ce qu'on appelle productivité primaire nette (NPP), c'est la différence entre la photosynthèse et la respiration autotrophe.

Pour l'eau on a des flux de transpiration (ce qui sort par les stomates des feuilles), des flux d'évaporation du couvert et des flux d'évaporation du sol dont le total constitue l'évapotranspiration réelle, mesurée aussi sur les sites à flux.

Jusqu'ici c'est assez simple : on est très proche des processus, qui relèvent de la physique ou de la physiologie. Maintenant, pour la distribution de la productivité primaire nette (NPP) entre les différents organes, on arrive dans la biologie et ça se complique : d'abord ça dépend fortement de l'espèce d'arbre, et on sait moins bien comment ça marche. Dans le modèle CASTANEA, on a choisi de représenter un certain nombre de compartiments de carbone (feuilles, branches, tronc, fines racines et grosses racines) et on a aussi un compartiment « de réserves » qui est en quelque sorte délocalisé.

Je ne vais pas plus loin dans la description de CASTANEA.

L'utilisation des réseaux de mesures et d'observation

On retrouve la pyramide déjà présentée par Myriam Legay (en ouverture de la session 2), avec au sommet des réseaux d'expérimentation *in situ* et de recherche, à forte intensité de mesure sur un très grand nombre de variables : en particulier ICOS, qu'on appelle vulgairement les sites à flux. Viennent en-dessous les réseaux de monitoring : monitoring très intensif dans les sites-ateliers du réseau F-ORE-T (qui en fait inclut une partie des sites à flux) ; monitoring intensif avec RENECOFOR, monitoring extensif de la Santé des forêts et de l'Inventaire. Ce que je veux dire ici, c'est qu'en termes de modélisation fonctionnelle (basée sur les processus), les sites très lourdement instrumentés peuvent être utilisés pour tester le modèle mais aussi pour le développer. Quant aux réseaux moins instrumentés, avec une moins forte densité de mesures, on peut tenter de les utiliser pour tester ou valider le modèle mais pas vraiment pour les développer.

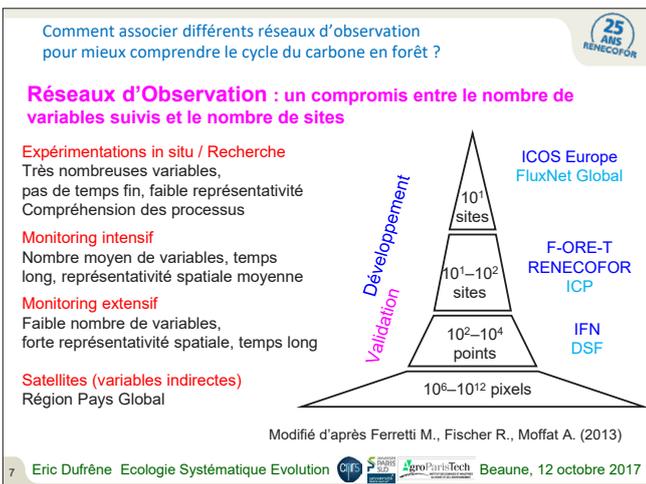
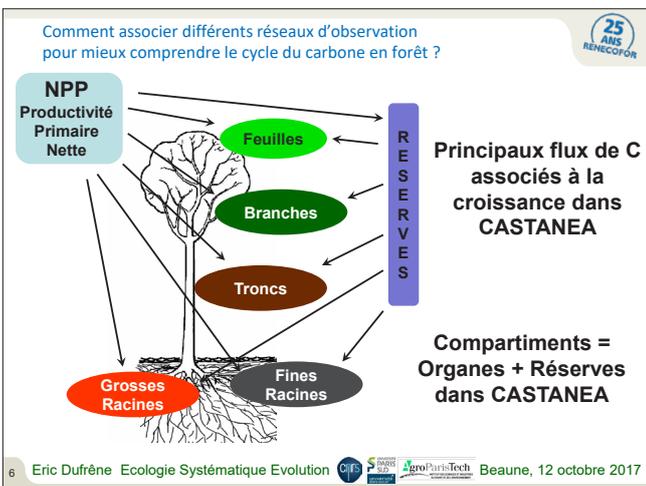


Photo : CNRS

Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Développement & test de CASTANEA pour les FLUX

Flux de carbone (C)

- Flux net de C (NEE)
- Photosynthèse (GPP)
- Respirations (R)
 - Sol et Organes

- Espèces
- Hêtre
 - Chêne sessile
 - Chêne vert
 - Epicéa
 - Pin maritime
 - Pin sylvestre
 -



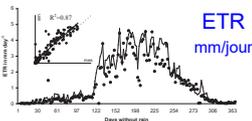
Flux d'eau (H₂O)

- Evapotranspiration
- transpiration
- Evaporation
- Interception
-

Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?

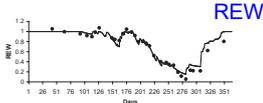
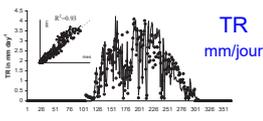


Hêtraie de Hesse (Lorraine)



Développement & test de CASTANEA FLUX

Flux d'Eau Journaliers sur une année 1997



- DONNEES
- CASTANEA

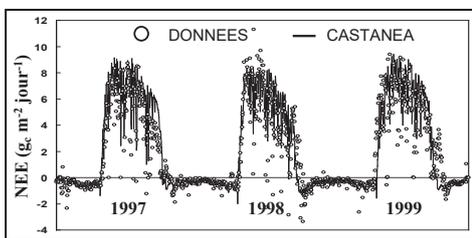


Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Hêtraie de Hesse (Lorraine)
Flux net de carbone journalier (NEE) 3 ans

Développement & test de CASTANEA



Développement et test de CASTANEA pour les flux

Revenons à CASTANEA, notre modèle de flux. Le développement et les tests se font au niveau des sites de recherche comme les sites ICOS. Pour les différents flux dont j'ai parlé précédemment, le modèle a été développé et testé pour un certain nombre d'espèces : hêtre, chêne sessile, chêne vert, épicéa, pin maritime, et pin sylvestre, mais pas au même niveau de précision. Nous avons plus d'expérience sur le hêtre, le chêne sessile et le chêne vert que sur les autres.

Tout ça a commencé à la fin des années 1990, ça fait pas loin de 20 ans qu'on est sur le coup ! Je vous présente ici des travaux réalisés avec les données du site-atelier / site ICOS de Hesse, qui nous a bien aidés à construire CASTANEA. Cela concerne la partie bilan hydrique avec, de haut en bas l'évolution de l'évapotranspiration, de la transpiration et de la réserve en eau du sol au fil des jours sur l'année 1997 ; les points sont des données mesurées, les traits sont les sorties de modèle. C'est une illustration de la capacité de ce type de modèle à reproduire les flux de transpiration et d'évapotranspiration, et la réserve en eau du sol. En médaillon, les courbes xy montrent qu'on a une assez bonne adéquation. C'est assez facile (disons pas trop difficile), avec des modèles de flux, de simuler des cycles annuels. L'interannuel, c'est une autre paire de manches.

Voyons maintenant, sur le même site, les flux nets de carbone sur 3 années. Là encore, on voit que ça marche à peu près. Mais en regardant dans le détail, on voit qu'à certains endroits le modèle surestime pas mal le flux net et qu'une autre année, par exemple, il va sous-estimer pas mal. Ces petites différences font que le modèle a du mal à représenter les variations interannuelles du bilan de carbone (et l'interannuel en général).

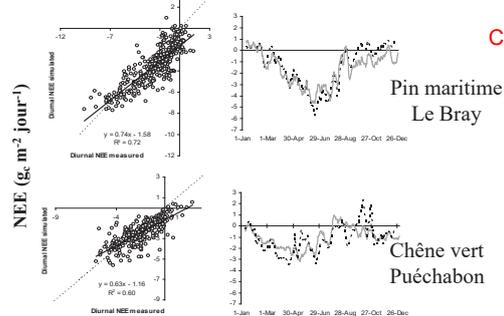
Nous ne nous sommes pas arrêtés au hêtre, nous avons continué avec les autres données disponibles, comme ici sur les sites historiques de flux : Le Bray près de Bordeaux pour le pin maritime et Puéchabon dans l'Hérault pour le chêne vert. À titre d'illustration, voici les résultats sur le flux net de carbone sur une année.

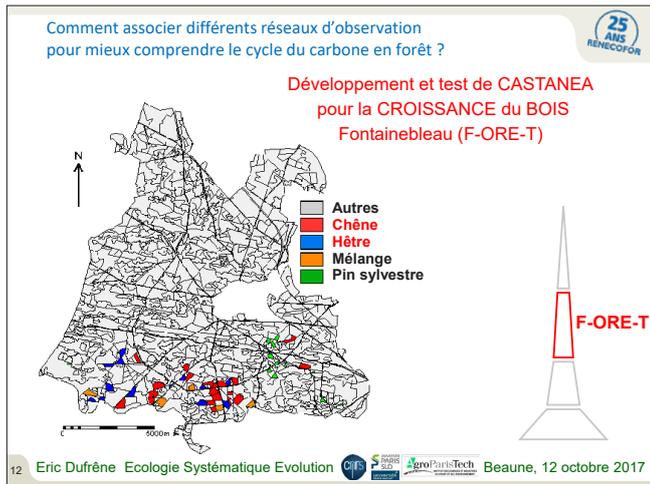
Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?



Flux net de carbone journalier (NEE) 1 an

Développement & test de CASTANEA FLUX





Développement et test de CASTANEA pour la croissance du bois

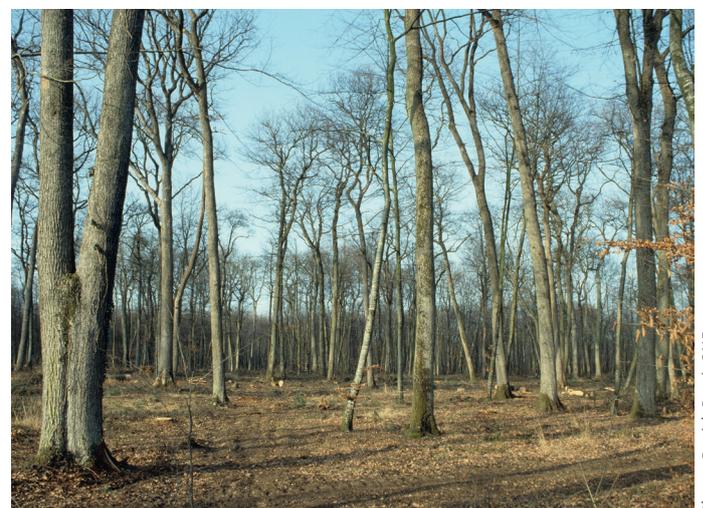
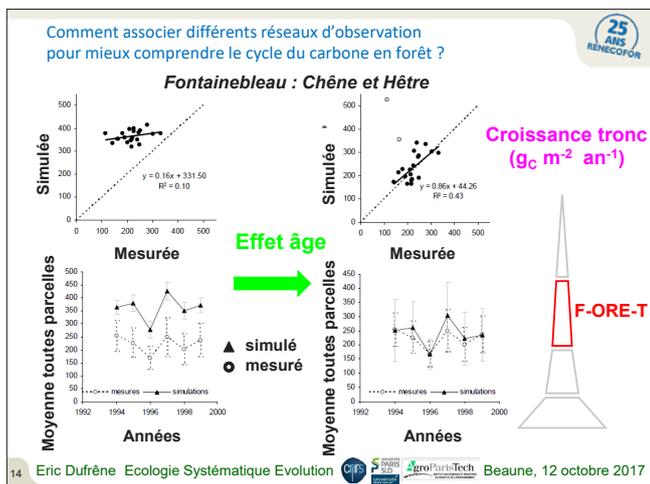
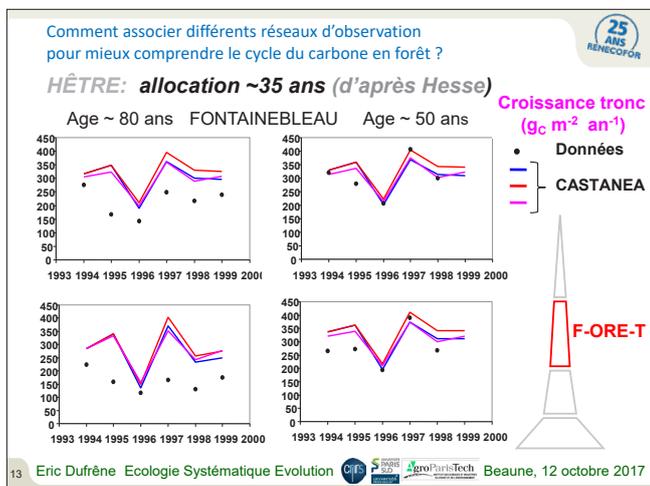
Je vais maintenant vous montrer ce qui peut se passer quand on change d'échelle, et je ne parle plus ici de flux mais de croissance du bois. Nous avons pris notre modèle, dûment testé sur le site de Hesse où il reproduisait assez bien la croissance, et nous l'avons transposé sur le réseau de parcelles de Fontainebleau qui fait partie du réseau F-ORE-T*. Ce réseau de parcelles a été mis en place pour la télédétection dans les années 90, mais en l'occurrence nous l'avons utilisé pour autre chose.

Ces graphiques présentent la croissance annuelle observée (points) ou simulée (traits) sur des parcelles de hêtre âgé d'environ 50 ans (à droite) ou 80 ans (à gauche), de 1993 à 1999. Les 3 couleurs de courbes correspondent à des petites différences dans le modèle, on ne s'en préoccupe pas ici. Enfin la croissance n'est pas exprimée en m³ mais en grammes de carbone/m²/an.

On voit que sur les jeunes parcelles, on était assez bien calé en valeur absolue de croissance. Par contre, sur des parcelles de 80 ans, on avait une assez bonne représentativité de la dynamique interannuelle mais avec un gros décalage. Je rappelle que dans CASTANEA la partie croissance est largement empirique et que donc c'est difficile à transposer. Et là, on a un effet âge évident.

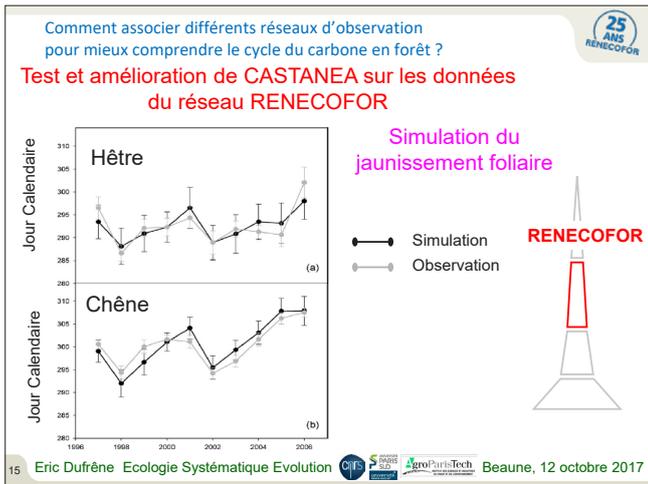
Nous avons refait la comparaison (croissance observée et simulée) pour l'ensemble des parcelles chêne et hêtre de ce même réseau. C'est ce qui est présenté ici à gauche, chaque point représentant la moyenne de toutes les parcelles : on retrouve le décalage ; on voit le biais (graphique du haut).

Nous avons donc réfléchi pour prendre en compte les effets âge, notamment en introduisant dans le modèle la quantité de bois qui respire, laquelle varie avec l'âge. La partie du bois qui respire, c'est-à-dire l'aubier, c'est important dans le bilan de carbone. En faisant ça, nous avons amélioré sensiblement nos prédictions. Ce n'est pas de la calibration mais du développement : nous avons vraiment changé les variables et les équations du modèle et après nous l'avons de nouveau testé sur les parcelles.



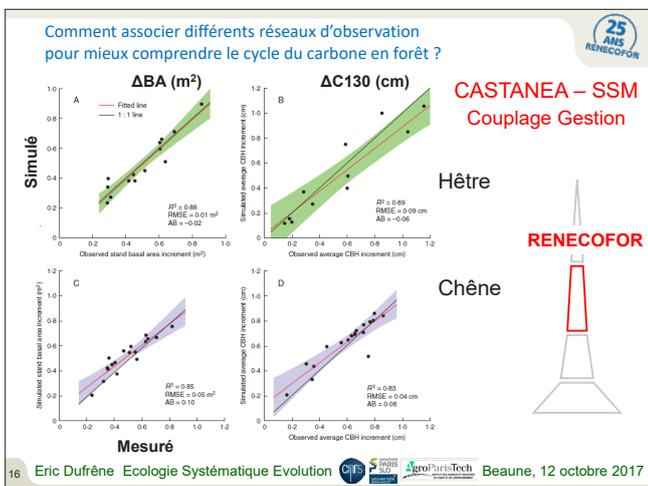
Parcelle de chêne et hêtre en forêt de Fontainebleau

Photo : Patrick Barré, ONF



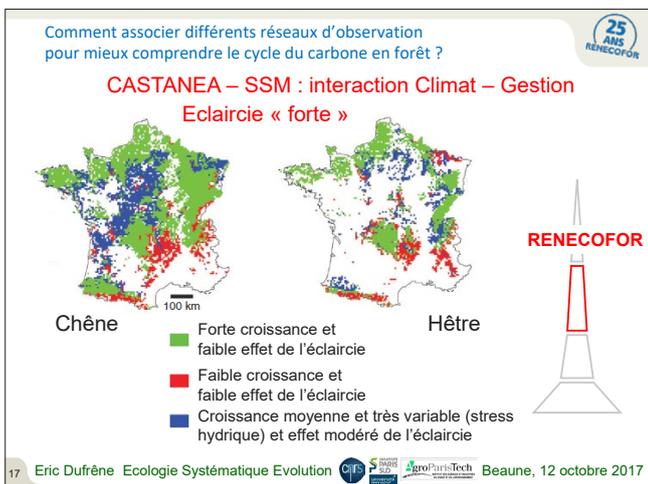
Test et amélioration de CASTANEA sur les données RENECOFOR

Je change encore d'échelle et j'arrive à RENECOFOR, avec un travail de simulation du jaunissement foliaire réalisé par Nicolas Delpierre dans le cadre de sa thèse (publiée en 2009). Le jaunissement est plus difficile à mesurer que le débourrement et il y avait à l'époque (c'est encore vrai) très peu de modèles capables de le représenter correctement, pour des raisons différentes de mesure et de modélisation (on connaît moins bien les processus). Voici une illustration qui montre qu'en moyenne, sur l'ensemble des placettes chêne et hêtre du réseau RENECOFOR, on arrive assez bien à représenter les variations interannuelles de jaunissement. Mais si on regarde placette par placette ce n'est pas aussi « joli » que ça, pour dire les choses honnêtement.

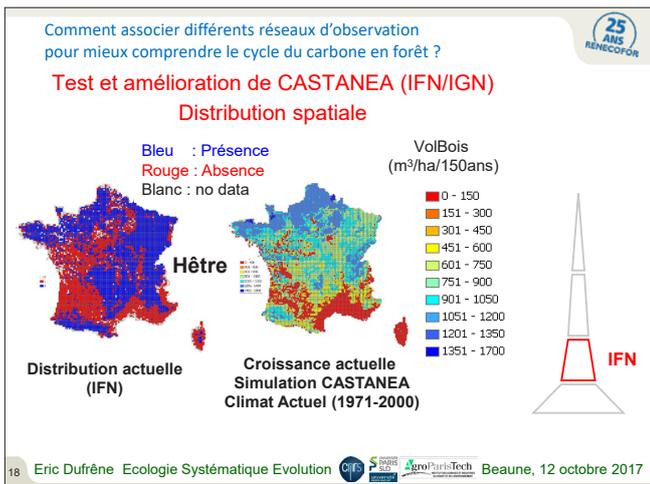


Plus récemment, Joannès Guillemot (pendant sa thèse aussi) a couplé le modèle CASTANEA avec un modèle forestier (dendrométrique), développé par Jean-François Dhôte et publié par Le Moguedec et Dhôte. L'idée est d'étudier, parce que c'est une question de science et une question de société, l'effet des interactions entre la gestion et le climat sur la croissance et éventuellement le dépérissement des forêts. Or CASTANEA, qui fait des flux et de la croissance mais ne prédit que le comportement d'un arbre moyen, ne permet pas de le faire.

Les données de RENECOFOR ont été utilisées pour tester et améliorer ce modèle couplé. C'est ce qui est illustré ici : à gauche pour l'accroissement en surface terrière du peuplement, à droite pour la croissance moyenne en circonférence, chez le hêtre en haut et le chêne en bas, avec les valeurs simulées en ordonnées et les valeurs mesurées en abscisse. Je ne détaille pas.

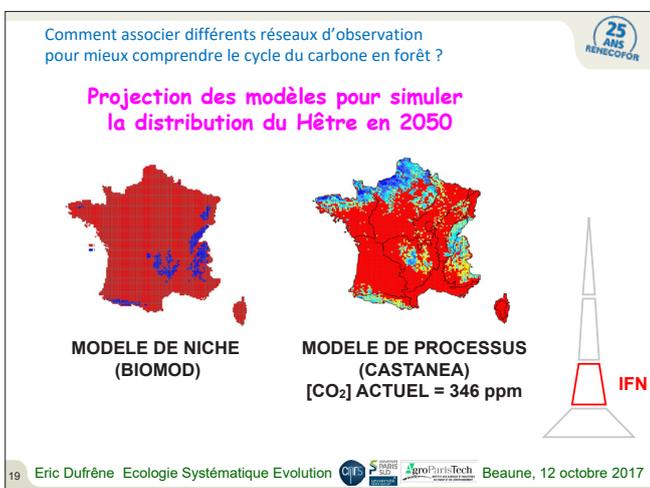


Grâce à ce travail sur les peuplements RENECOFOR on a pu poursuivre et appliquer des éclaircies. Ici je présente le cas des éclaircies les plus fortes, qui restent relativement modérées en conduisant à un RDI (indice de densité relative) final de 0,4. Joannès a simulé l'effet sur la production du chêne (à gauche) et du hêtre (à droite), sur l'ensemble de la France (en s'appuyant sur les données de l'IFN). Nous avons été un peu surpris : les effets sont relativement faibles, en particulier sur les zones à forte croissance. Sur les zones à forte croissance, on a un faible effet de l'éclaircie pour les deux espèces (vert). Sur les zones de faible croissance, on a aussi un faible effet de l'éclaircie (rouge). C'est sur les zones de croissance intermédiaire que l'effet de l'éclaircie est le plus fort. Notre interprétation c'est que, en gros, c'est lié à la sécheresse : en zone forte croissance on est sur sols profonds et on est rarement limité ; éclaircir n'améliore rien sur la production. En zone de faible croissance, on est tout le temps limité par la sécheresse donc éclaircir ne change pas grand-chose. Par contre, entre les deux, il y a une gamme de situations avec des effets plus nets. Attention : c'est un exercice de style sans prétention de vérité. Je veux juste montrer que, maintenant qu'on a ce modèle couplé, on continue à travailler dessus et on veut aller vers des prédictions plus fiables.

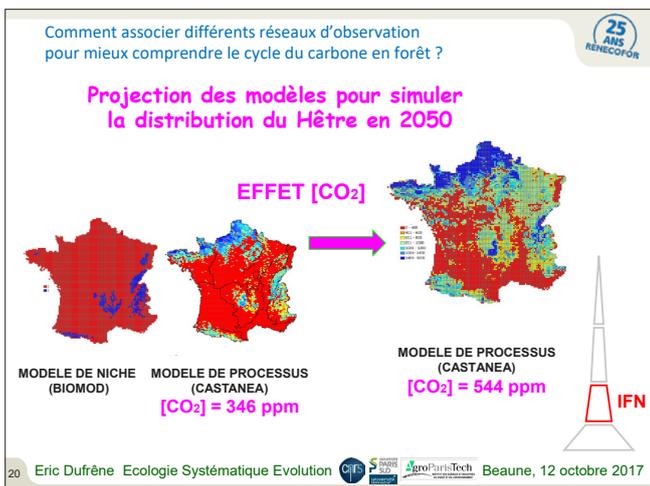


Test et amélioration de CASTANEA sur les données IFN – Distribution spatiale

En 2012 il y a eu un gros travail d'intercomparaison de modèles¹ sur la prédiction des changements d'aire de répartition, confrontant une gamme de 8 modèles dont CASTANEA. Or CASTANEA a la spécificité de ne pas prédire de distribution ; il prédit de la croissance. Comment avons-nous fait pour simuler des distributions ? À gauche vous voyez la distribution actuelle du hêtre pour l'IFN. Nous avons regardé les différents niveaux de croissance et nous avons pensé qu'en seuillant à un certain niveau (cette fois c'est du volume de bois en m³/ha sur 150 ans, donc sur une révolution), on pouvait obtenir une carte, disons de croissance seuillée, qui ressemblait bien à cette carte de distribution.



Dans un deuxième temps, nous avons utilisé ça pour faire des projections avec les climats futurs supposés. L'illustration concerne la simulation de la distribution du hêtre en 2050 : à gauche, avec un modèle de niche (ici c'est BIOMOD, mais j'aurais pu en prendre un autre) et à droite, avec CASTANEA, en bloquant le CO₂ atmosphérique à son niveau actuel (350 ppm). On voit que l'aire du hêtre se rétrécit beaucoup, et qu'elle « résiste » un peu mieux selon CASTANEA, en particulier là où il pleut plus. Ça c'est des petites différences entre modèles.



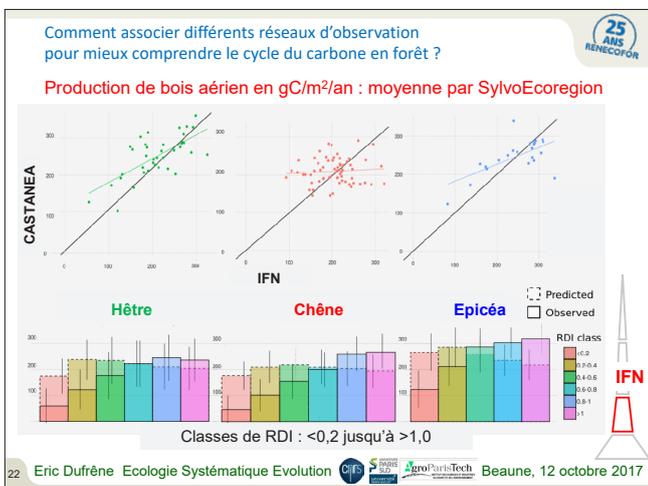
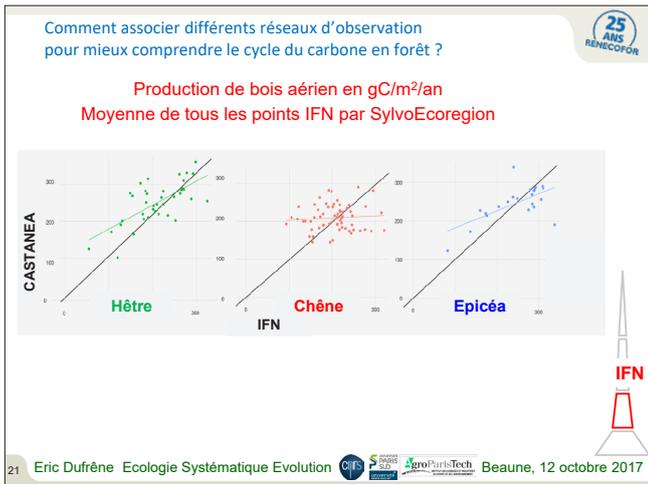
Là où ça devient plus intéressant, en tout cas pour moi, c'est que lorsqu'on fait la même chose en passant de 350 ppm à 540 ppm de CO₂ dans l'atmosphère, la distribution du modèle CASTANEA pour le hêtre change beaucoup ; or cet effet du CO₂ n'est pas pris en compte par les modèles de niche et ne peut pas l'être parce qu'il n'y a pas de gradient de CO₂ actuellement sur les zones climatiques. Je ne prétends pas que ce qui sort de CASTANEA est meilleur, je n'en sais rien et je ne veux pas parler de comparaisons, ce n'est pas le but ici. Mon message, c'est qu'un modèle comme CASTANEA, quand il est validé, permet d'éteindre ou allumer des effets pour les tester de manière indépendante ou en combinaison maîtrisée. On peut allumer ou éteindre l'effet CO₂, ou un effet sécheresse, ou un effet température, et on peut étudier les interactions entre ces variables. Il y a peu de modèles, en dehors des vrais modèles de processus, qui en soient capables. .



Photo : Luc Croisé, ONF

Données de base pour tester le modèle, les mesures de croissance (techniques en test sur la placette CHS77)

¹ Cheaib A, Badeau V, Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrene E., Francois C., Gritti E.S., Legay M., Page C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P., 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. Ecology Letters, vol. 15 (6), pp.533 - 544



Comment associer différents réseaux d'observation pour mieux comprendre le cycle du carbone en forêt ?

25 ANS RENECOFOR

Perspectives

Mettre à contribution les différents réseaux en poursuivant la démarche de façon simultanée ou itérative

Réseaux avec des collaborations déjà engagées

Fructification : RENECOFOR (ICOS)
Croissance/Production : IFN

Nouvelles collaborations à engager

FluxNet Global : ex/ Douglas
ICP : ex/ élargir la gamme de climats/sols
DSF : ex/ test LAI
Données satellitaires : ex/ test GPP & extension à l'Europe

23 Eric Dufréne Ecologie Systématique Evolution AgroParisTech Beauce, 12 octobre 2017

Test et amélioration de CASTANEA sur les données IFN – Production de bois aérien

Nous avons aussi cherché à reproduire la croissance en bois aérien observée par l'IFN à l'échelle de la France et par SylvoEcoRégion (SER). Il se trouve que CASTANEA reproduit très bien la croissance moyenne à l'échelle de la France, mais pas au niveau SER. Vous voyez ici la croissance en bois aérien de chaque SER simulée par CASTANEA, en comparaison de l'estimation de l'IFN, pour le hêtre, le chêne et l'épicéa. Chaque point représente la moyenne de toutes les placettes d'une SER. Au mieux, le résultat est biaisé (hêtre, épicéa), au pire, il ne reproduit absolument pas les différences de croissance observées par l'IFN (chêne). Nous cherchons donc à comprendre pourquoi ; c'est un travail en cours.

Par exemple, nous avons ventilé la production simulée et observée par classes de RDI (les densités) ; le RDI varie de 0,2 pour le plus bas, à 1,2 pour le plus haut. En gestion normale, il est à 0,6 – 0,8 (barres bleu turquoise) et on voit que pour le hêtre et le chêne il n'y a pas de différence dans cette classe entre les pointillés et le trait, ce qui signifie que pour une gestion normale CASTANEA reproduit bien la croissance. C'est logique : c'est là-dessus qu'il a été développé. On est dans le même cas qu'avec l'âge lorsqu'on est passé de Hesse à Fontainebleau, sauf qu'ici ce sont des effets densité (gestion). Notre idée c'est que, là encore, la quantité de biomasse de bois vivant (l'aubier) pourrait varier alors que le modèle la suppose simplement proportionnelle, en gros, à la quantité de bois total avec un effet âge. Peut-être que, quand on coupe plus, la proportion d'aubier change et ça respire beaucoup plus ; ça expliquerait qu'avec le modèle on ne retrouve pas cet abaissement de croissance aux faibles densités. Mais ce n'est qu'une hypothèse, et c'est compliqué à tester.

Perspectives

Ne croyez pas que le cheminement soit linéaire. En changeant quelque chose dans le modèle pour l'améliorer sur les données IFN, on peut dégrader les prédictions aux échelles/étapes précédentes. On procède donc en boucles itératives et tous les réseaux sont mis à contribution, selon la question qu'on se pose. Les perspectives ? Continuer. Car il n'y a pas, en France ou en Europe, de modèle de processus qui sache faire ce qu'on vise avec CASTANEA. Si on y arrive, c'est une avancée considérable pour répondre à de nombreuses questions posées par les changements climatiques. Actuellement, nous travaillons sur la fructification avec RENECOFOR, et sur la croissance/production avec l'IFN. Nous aimerions aussi explorer les effets densité grâce aux données du GIS Coop*, un des rares réseaux sylvicoles avec des densités faibles, mais ses peuplements sont encore un peu jeunes.

Nous avons quelques projets avec d'autres réseaux : le réseau FluxNet* aux USA, par exemple, pour adapter CASTANEA au Douglas (il n'y a pas de site à flux Douglas en Europe). On a vu (discussion de la session 2) que les transpositions de modèle entre les USA et la France peuvent être hasardeuses, mais ce n'est pas le cas sur les flux parce qu'on est proche des processus. Nous envisageons aussi d'élargir la gamme pédoclimatique en travaillant sur le PIC Forêts* ; nous aimerions tester l'indice foliaire (LAI), un paramètre important du modèle, avec les données DSF sur le dépérissement, par exemple. Et il y a bien sûr les données satellitaires, dont j'ai dit (session 2) qu'elles ont leurs limites, mais qui peuvent être profitables si on veille à la manière de les utiliser... Merci.