Changements climatiques et gestion de la forêt ligérienne (dossier)

Myriam Legay, Christine Deleuze, Jean-François Dhôte, Antoine Kremer, Brigitte Musch, Xavier Bartet

▶ **To cite this version:**

Myriam Legay, Christine Deleuze, Jean-François Dhôte, Antoine Kremer, Brigitte Musch, et al.. Changements climatiques et gestion de la forêt ligérienne (dossier). Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2019, 61-62, pp.11-64. hal-03183651

HAL Id: hal-03183651
https://hal.inrae.fr/hal-03183651

Submitted on 26 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Alain Blumet, ONF

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET GESTION DE LA CHÊNAIE LIGÉRIENNE

DOSSIER

Quels seront les impacts du changement climatique sur les emblématiques chênaies ligériennes ? Comment pourront-elles s'adapter, prendre part à l'atténuation de l'effet de serre ? Ce dossier restitue le séminaire du 28 juin 2018 organisé par la direction territoriale Centre-Ouest-Aquitaine pour faire le point sur l'état des connaissances et les pistes d'action.

Le sommaire et les exposés du séminaire ont été construits pour répondre aux questionnements et attentes des gestionnaires de la chênaie ligérienne, recensés au préalable. Pour autant, il n'est pas possible de synthétiser les propos sous forme d'une « foire aux questions », au demeurant forcément réductrice. D'où le choix d'une restitution complète, le discours des intervenants étant simplement ajusté (avec leur accord) au service de la clarté pour tous.

12 **Impacts du changement climatique sur la forêt, adaptation et contribution de la forêt à l'atténuation des changements climatiques**
par Myriam Legay

22 **Les forêts et la filière forêt-bois dans la lutte contre les changements climatiques**
par Christine Deleuze et Jean-François Dhôte

33 **Changements évolutifs chez les chênes au cours de changements environnementaux**
par Antoine Kremer

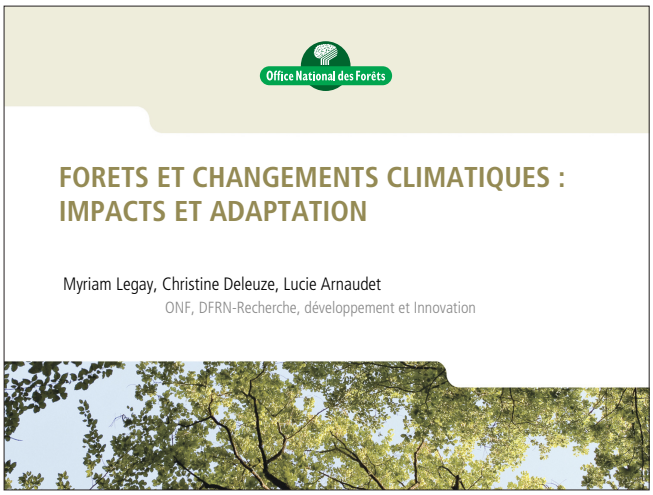
42 **Outils pour l'adaptation de la forêt aux changements climatiques : migration assistée et substitution d'essences**
par Brigitte Musch

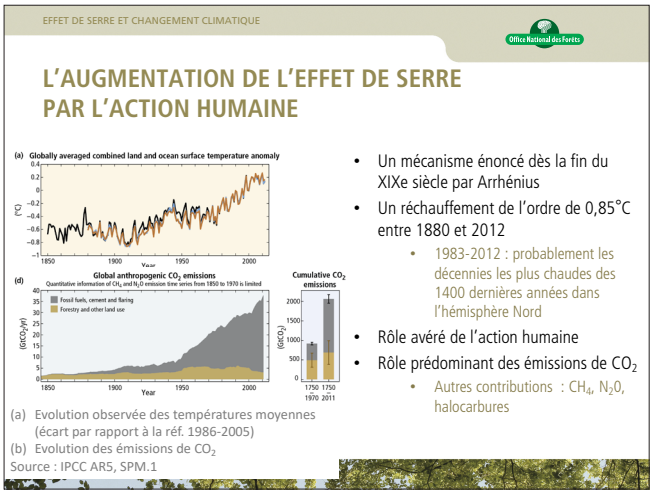
50 **Quels leviers d'adaptation dans la sylviculture ?**
par Myriam Legay

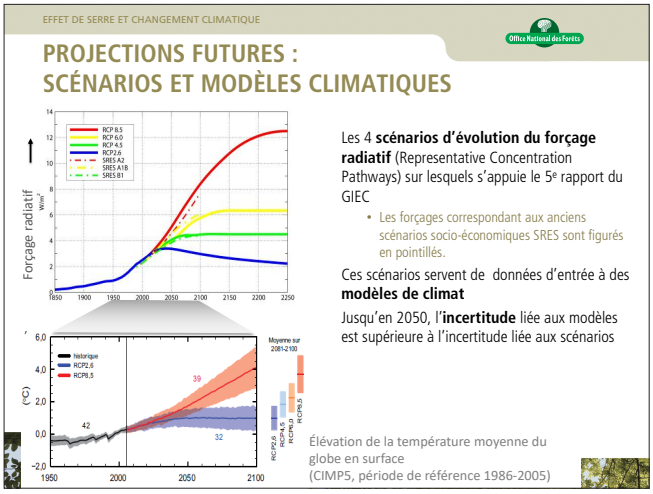
59 **Quelles orientations pour la gestion forestière dans le bassin ligérien ?**
par Xavier Bartet

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FORÊT, ADAPTATION ET CONTRIBUTION DE LA FORÊT À L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Myriam Legay
ONF, cheffe du département recherche développement et innovation (RDI)





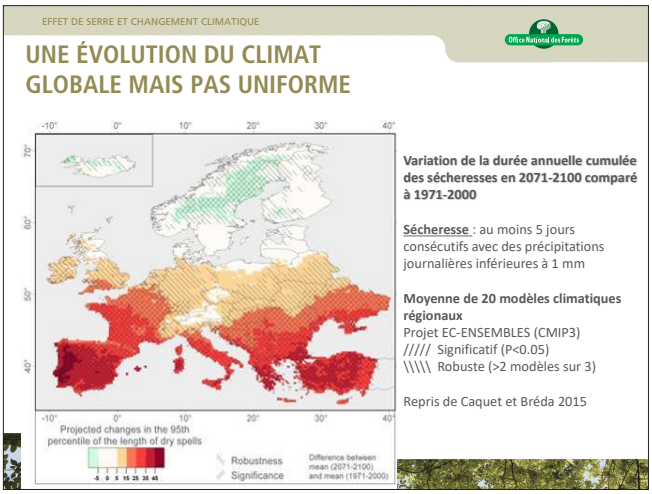


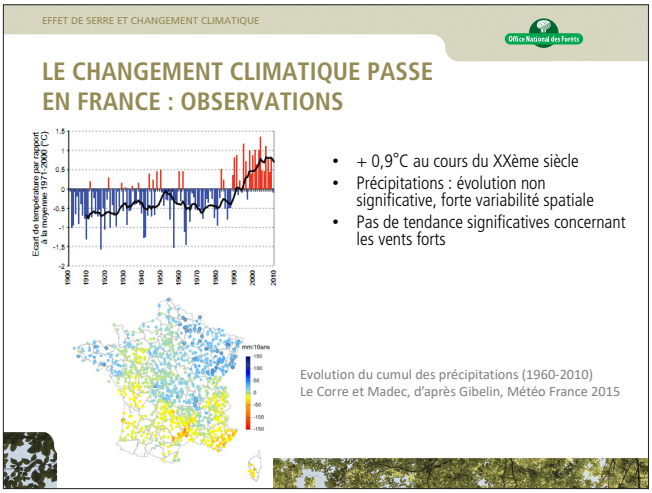
Pour commencer, plantons le décor avec un panorama général de la question « forêt et changement climatique ». Posons les repères avant d'approfondir les réflexions.

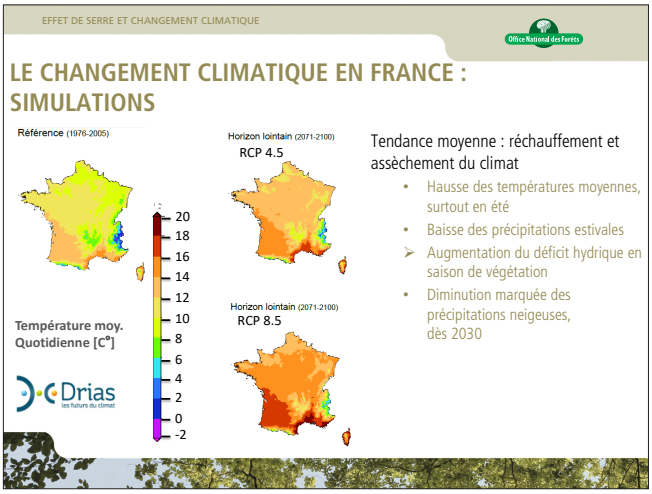
Le changement climatique : caractérisation

Comme vous le savez, le changement climatique est dû à l'augmentation de l'effet de serre induite par l'activité humaine. L'effet de serre est un phénomène naturel indispensable à la vie sur terre. Mais l'activité humaine, en émettant d'énormes quantités de gaz à effet de serre (GES) comme le montre le graphique du bas, a accru cet effet. Avec comme conséquence une augmentation des températures depuis 1850. Le phénomène n'est pas nouveau : le mécanisme a été énoncé dès la fin du 19e siècle et les premières mesures mettant en évidence l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère datent des années 1950-1960. Aujourd'hui on fait le constat d'un réchauffement de l'ordre de 1 degré dans l'hémisphère nord au cours du 20e siècle, et les dernières décennies multiplient les records de chaleur. Et si les émissions de dioxyde de carbone prédominent, il ne faut pas oublier les autres GES comme les halocarbures, les oxydes d'azote, le méthane, etc.

Pour **se projeter dans le futur**, on a besoin de faire des hypothèses sur l'évolution de l'activité humaine car l'évolution des GES en découle. Le dernier rapport du GIEC fournit des scénarios appelés RCP (*Representative Concentration Pathway*), des scénarios de forçage radiatif, c'est-à-dire d'importance de l'effet de serre 2250 (schéma du haut) ; du plus volontaire au plus laxiste, ils servent à explorer des situations possibles. Certains des anciens scénarios (A1b, A2, B1) figurent aussi, en pointillés, sur ce schéma : il n'y a pas de changement radical, mais les nouveaux scénarios se projettent plus loin, jusqu'en 2250.
On fait tourner les modèles de climat avec les valeurs de l'effet de serre prédit par ces scénarios, ce qui permet de simuler l'évolution du climat, représentée sur le graphique du bas pour les deux scénarios extrêmes : RCP 2,6 et RCP 8,5. Remarquez le halo autour des courbes : il correspond à l'incertitude de simulation du climat. Non seulement on a une grosse incertitude sur l'évolution des GES (d'où la gamme de scénarios) mais, si elle est supposée connue (en choisissant un scénario), on ne sait pas exactement ce que ça va donner car notre capacité à simuler le climat est imparfaite. Ce halo vient simplement des différences entre divers modèles de climats scientifiquement valables, et représente ce qu'on appelle la dispersion des réponses. Il faut souligner ici un point très important : en 2050, les scénarios jouent moins que l'incertitude de simulation. Ça veut dire que, pour le climat de 2050, les jeux sont déjà en partie faits en termes d'émission de GES ; il y a une inertie dans le système. On sait que ça se réchauffera ; les interrogations ne portent que sur les caractéristiques précises de ce réchauffement.







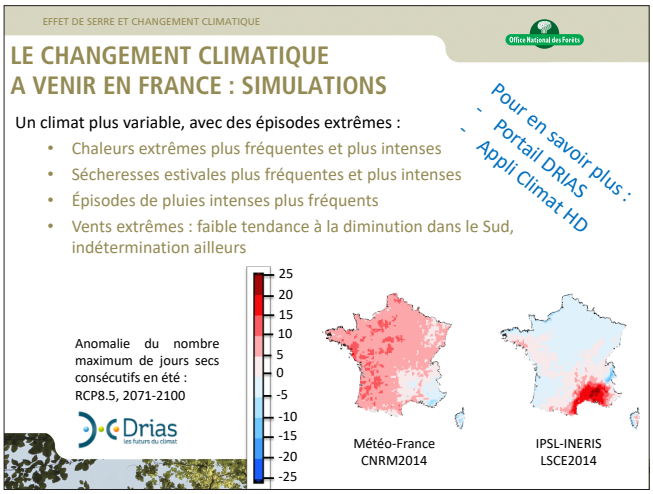
© Élise Perrouault / ONF

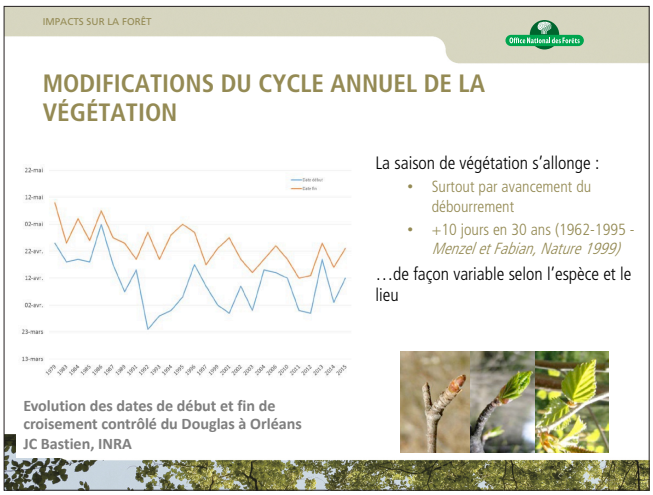
Il faut aussi savoir que c'est un réchauffement global mais pas uniforme, en particulier pour ce qui est lié aux précipitations. Cette carte concerne la durée annuelle cumulée de sécheresse ; c'est une carte « en anomalie » (j'en présenterai plusieurs), qui indique la différence entre le climat de référence, ici sur la période 1971-2000, et un climat futur, qui est ici pour la fin du siècle. L'important, c'est d'abord le gradient de couleur qui traduit le fait qu'on s'attend à ce que la durée de sécheresse augmente fortement au sud de l'Europe mais pas du tout dans le nord. Cependant la France est à la charnière de ces deux domaines, ce qui fait qu'on a une incertitude sur l'évolution de ce paramètre. Cette incertitude est évaluée, là encore, par la comparaison de modèles, et elle est représentée ici par des hachures (hélas peu visibles) : quand il y en a dans les deux sens c'est que l'évolution est à la fois robuste et significative. Malgré les incertitudes, on voit qu'il y a une augmentation de la sécheresse sur la France.

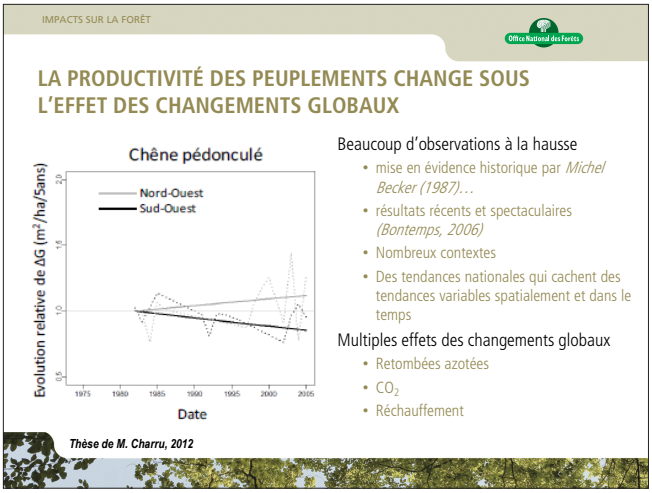
En France, l'observation du **climat passé** montre une augmentation claire des températures de 1900 à aujourd'hui. Pour les précipitations, par contre, le tableau n'est pas encore très clair. Il y a tout de même cette carte de l'évolution des précipitations au cours de la deuxième partie du 20e siècle, qui montre une certaine cohérence avec ce qui précède, c'est-à-dire globalement une tendance à la diminution vers le sud et pas de diminution au nord de la France, mais dans le secteur ligérien c'est un peu plus ambigu. L'effet est en tout cas beaucoup moins net qu'avec les températures.

En ce qui concerne **les projections futures**, on prévoit bien sûr un réchauffement représenté ici par des cartes de températures moyennes quotidiennes (en valeur absolue) : à gauche le climat de référence ; à droite le climat en fin de siècle d'après le scénario le moins pessimiste (RCP 4.5, en haut) et le plus pessimiste (RCP 8.5, en bas). Les valeurs de températures moyennes sont plus élevées, et on s'attend aussi globalement à un assèchement du climat, modulo toute les nuances que je viens d'expliciter. Pour la forêt, cette conjonction d'augmentation des températures, surtout en été, et de baisse des précipitations estivales est particulièrement sensible car elle conduit à une aggravation du déficit hydrique en saison de végétation. C'est ce qui compte le plus pour les forestiers et je dirais que, pour le secteur ligérien, c'est une préoccupation majeure.

On s'attend aussi à un climat plus variable, à des épisodes de chaleurs extrêmes de plus en plus intenses, à des sécheresses et aussi des **épisodes de pluies intenses plus fréquents.** Mais il n'y a pas de tendance claire sur la France pour les vents extrêmes, contrairement à ce qui se dit. Ça ne veut pas dire qu'il n'y aura pas d'évolution mais il y a des divergences entre les modèles.





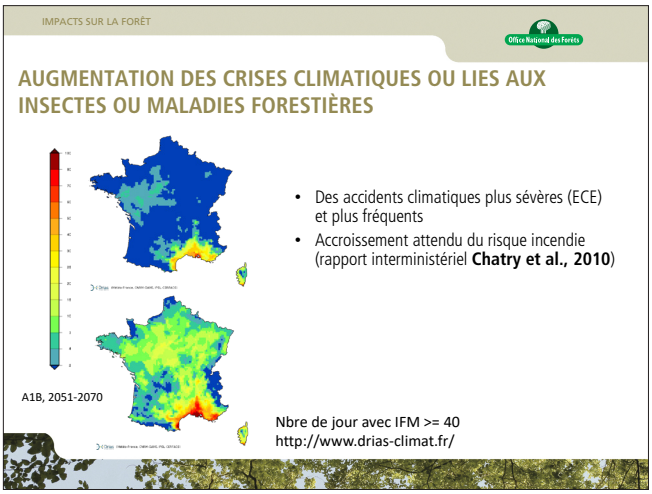


Ceci dit l'incertitude reste forte sur l'évolution des précipitations, comme en témoignent ces cartes en anomalie qui concernent le nombre maximum de jours secs consécutifs en été, d'après deux modèles mais pour le seul scénario RCP 8,5 (le plus pessimiste), projeté en fin de siècle. Les deux modèles ne donnent pas du tout le même patron géographique.
Je n'ai pas eu le temps de sortir des cartes sur la région mais je vous incite à aller voir le site de météo France, le portail DRIAS et en particulier l'application Climat HD qui permet d'avoir des projections locales et des comparaisons entre climats passés et climats actuels.

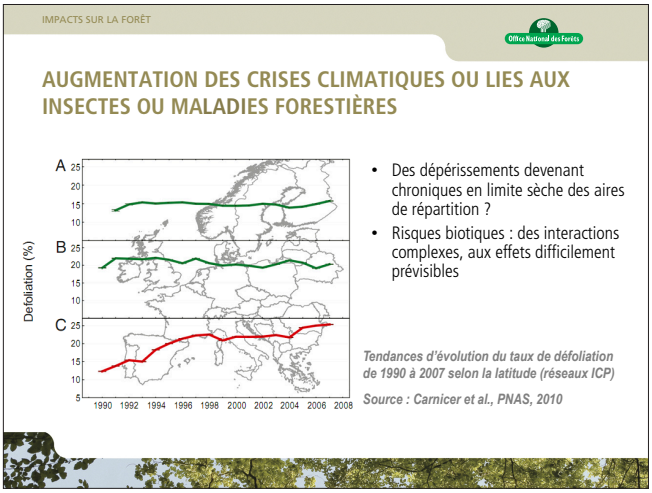
Les effets observés ou attendus du changement climatique sur la forêt

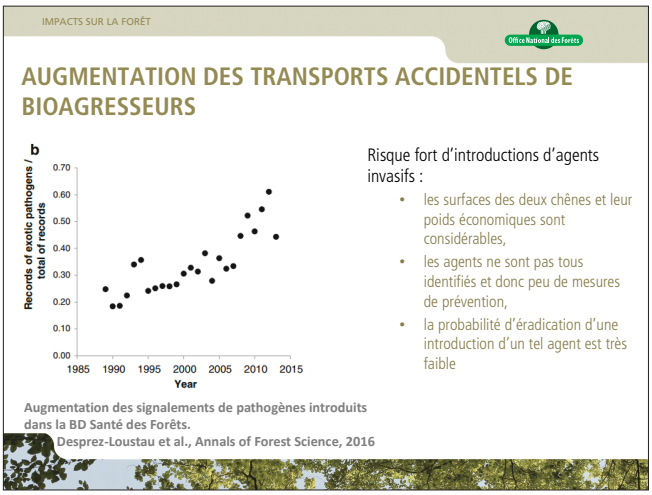
Venons-en maintenant aux effets du changement climatique, en commençant par les effets observés. Je parlerai aussi des effets attendus : soyez attentifs car ce n'est pas la même chose.
L'effet le plus immédiat concernant la forêt et son fonctionnement, c'est **la modification de la phénologie** : comme la phénologie répond au climat d'une année sur l'autre, elle répond forcément aux évolutions.
Voici l'exemple d'une série chronologique obtenue par Jean-Charles Bastien (INRA d'Orléans), qui procède à des croisements contrôlés sur le Douglas. Ces croisements correspondant à un stade phénologique bien précis, l'enregistrement des dates de début (en bleu) et fin (en rouge) de chaque campagne depuis 1979 permet d'observer une évolution, et elle est clairement significative. Globalement, une grosse analyse de Menzel et Fabian (1999), reposant sur des observations en jardins botaniques, a montré que l'augmentation de la période de végétation est de l'ordre de 10 jours en 30 ans. C'est surtout le débourrement qui est plus précoce ; le recul de la sénescence est beaucoup moins net.
En forêt, on n'est pas encore en mesure de voir ça. Malgré l'apparente simplicité des observations, c'est compliqué de constituer des séries chronologiques fiables parce qu'il faut assurer une constance dans les observations, les observateurs et les arbres observés. Le réseau RENECOFOR a des séries chronologiques qui commencent à être solides mais pas encore assez pour mettre en évidence une tendance générale.

En pratique, le premier effet mis en évidence en forêt, c'est le **changement de productivité**. Les changements de productivité ont été découverts au milieu des années 1980, dans le contexte des « pluies acides » ; on parlait alors de dépérissement de la forêt. On observait en Europe centrale et dans les Vosges des peuplements résineux qui s'étaient dégradés, avec décoloration des houppiers et perte foliaire. Michel Becker, chercheur à l'INRA, a étudié ces dépérissements dans les Vosges et il a fait de la dendrochronologie en pensant qu'il allait observer un décrochement de croissance qui permettrait de dater le début du phénomène. À sa grande surprise, il a observé de grosses chutes de croissance liées aux périodes de sécheresse mais la tendance au fil du temps était plutôt une augmentation de productivité. Ce résultat n'a été publié que plus tard ; sur le moment, la communauté forestière n'était pas prête à l'admettre. Ensuite, les résultats de ce type se sont multipliés dans tout l'hémisphère nord.
Plus récemment on s'est mis en France à explorer ces augmentations de productivité de façon plus systématique grâce aux données de l'inventaire forestier, dans tous les contextes géographiques et pour les différentes essences (cf. Thèse de Marie Charru). Dans le cas du chêne pédonculé, par exemple, on ne voit pas de tendance à l'échelle nationale ; mais quand on distingue le Nord-Ouest de la France et le Sud-Ouest, on voit respectivement une tendance à la hausse et une tendance à la baisse.



IFM = Indice Forêt Météo ; c'est un indicateur composite qui permet de quantifier quotidiennement la propension à l'éclosion et à la propagation initiale des feux en fonction des seuls paramètres météo.





Ce sont donc des tendances complexes, car ces changements de productivité (comme la croissance en général) intègrent beaucoup de choses :

- les retombées polluantes azotées qui peuvent stimuler la croissance,
- l'évolution du taux de CO_2 dans l'air qui a tendance à stimuler la photosynthèse et éventuellement à avoir un effet un peu réducteur de l'effet de la sécheresse ;
- le réchauffement qui a un effet plutôt stimulant sur la productivité… mais qui conduit aussi, avec éventuellement la baisse des précipitations, à aggraver le stress hydrique.

Suivant le contexte et l'essence, le poids respectif des différents facteurs peut évoluer dans un sens ou dans l'autre et pour l'instant on n'est pas capable de démêler comment.

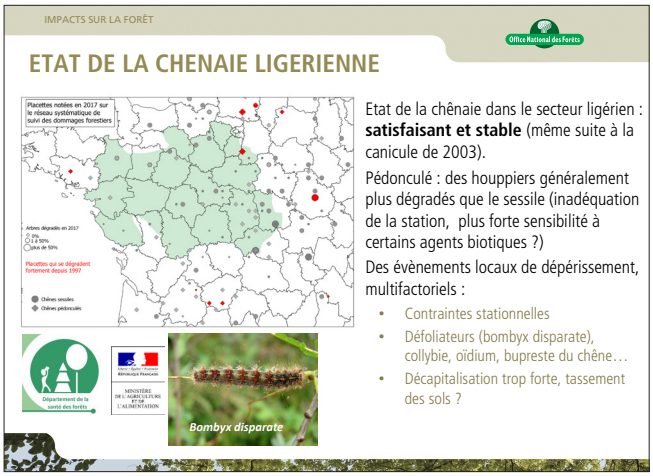
Un autre effet auquel on s'attend et que, probablement, on commence à observer (sans pouvoir tracer de tendance), c'est **l'augmentation des crises.** On s'attend à des accidents climatiques plus sévères et plus fréquents, dont les forestiers savent bien qu'ils se traduisent par des atteintes à la santé des peuplements bien souvent aggravées par des crises biotiques.

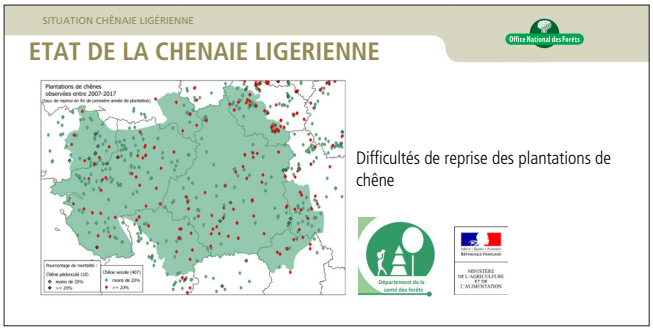
D'autre part les évolutions climatiques accroissent le risque incendie. Ces cartes sont dérivées d'un rapport interministériel de 2010 (auquel a contribué l'ONF) sur l'extension des zones sensibles aux feux de forêt. Elles représentent le niveau de risque incendie exprimé en nombre annuel de jours où l'indice IFM dépasse un certain seuil : sous climat actuel (en haut) et avec le climat projeté en deuxième partie de siècle (en bas) selon l'ancien scénario A1B (c'est un scénario moyen+). On voit une profonde modification à l'échelle de la France, et le secteur ligérien se retrouve dans un niveau de risque proche du niveau actuel dans le Sud-Est – Méditerranée.

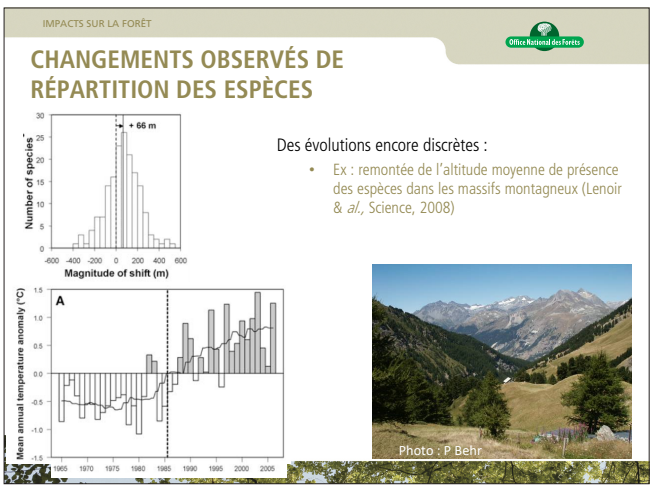
Pour ce qui est des **crises biotiques**, il est difficile d'observer une évolution ; les crises étant des phénomènes assez rares, il est difficile de déceler des tendances. Il y a cependant quelques résultats, souvent contestés il faut le dire, qui montrent des évolutions. Comme celui de cette étude qui a analysé les résultats du réseau ICP (Programme européen de surveillance de la santé des forêts), qu'on appelle en France le réseau 16x16. Cette étude regarde les tendances d'évolution du taux de défoliation de 1990 à 2008 en séparant les placettes en trois grands domaines : nord de l'Europe, latitudes moyennes et sud de l'Europe. Dans la partie nord on ne décèle rien de particulier alors que dans le sud il y a une tendance à l'augmentation.

En tant que forestier, on peut imaginer que, si le climat devient de plus en plus inconfortable pour une espèce d'arbre, on va voir des phénomènes chroniques de dépérissement, en particulier en limite d'aire de répartition. Mais pour les risques biotiques il y a des effets combinés du climat sur l'espèce d'arbre et sur le bio agresseur, avec un résultat difficilement prévisible, d'autant qu'en la matière le fait majeur est surtout l'augmentation des transports accidentels d'insectes ou de pathogènes.

On entend beaucoup parler aujourd'hui de de problèmes biotiques nouveaux et on a l'impression qu'ils augmentent. C'est vrai, et c'est constaté notamment sur ce graphique qui représente le nombre d'enregistrements de pathogènes exotiques dans la base de données du Département de la Santé des Forêts (DSF) entre 1985 et 2015 : la courbe est croissante et s'accélère, et c'est pareil pour les insectes. Il y a donc effectivement de plus en plus de maladies nouvelles, mais elles sont liées en premier ordre au transport accidentel d'espèces. Ce n'est







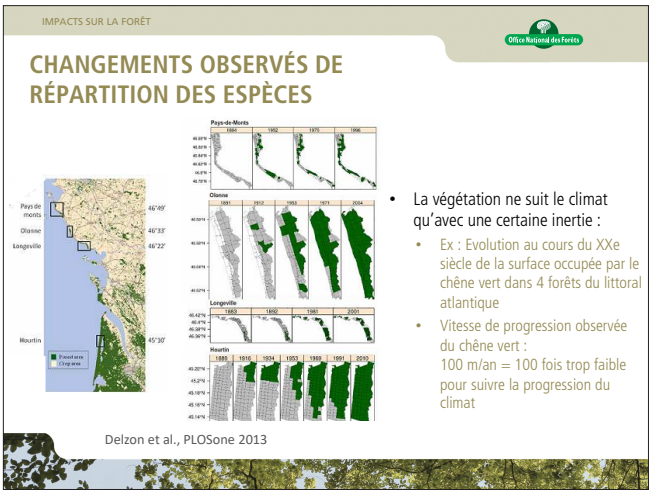
pas anodin pour le secteur ligérien, où le chêne est particulièrement dominant avec un poids économique énorme : si on simule un accident sanitaire sur la chênaie, les impacts sont désastreux. Or face à ce genre de problème nous sommes assez démunis : identifier les agents en cause n'est déjà pas évident, se prémunir contre est quasi infaisable et il est généralement impossible de les éradiquer. C'est donc une épée de Damoclès qui menace les zones de production et en particulier celles qui sont très centrées sur une essence.

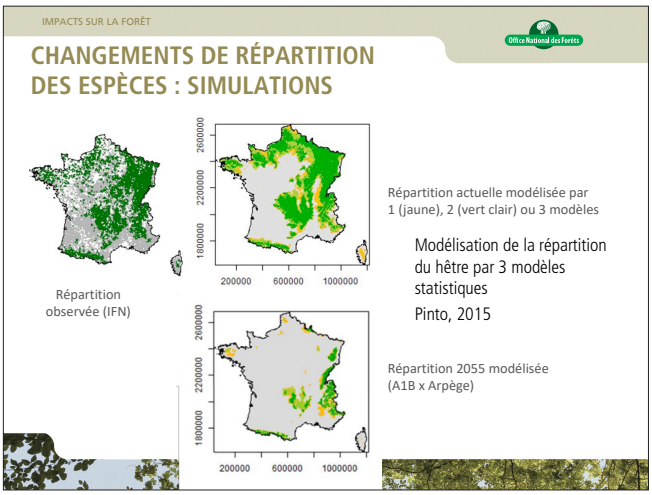
Reste que les agents pathogènes répondent eux-mêmes au climat, de façon parfois très nette. L'exemple le plus connu est la processionnaire du pin dont l'aire de répartition a clairement progressé entre les années 1980 et maintenant (et ça continue). On a pu démontrer, par la connaissance de la biologie de l'insecte, que cette progression est directement liée à l'évolution du climat. L'évolution observée de la répartition permet de calculer la vitesse de progression, qui est de 4 kilomètres par an au cours des 10 dernières années. Ce n'est pas très loin de la vitesse de progression des courbes d'isoclimat. Un insecte comme la processionnaire du pin est à peu près capable de s'adapter au changement climatique en suivant l'évolution du climat, en migrant.

Qu'en est-il actuellement de **l'état de la chênaie ligérienne ?**
Cette illustration et la suivante viennent du DSF, avec adaptation de mon cru. Jusqu'ici, l'état de la chênaie dans le secteur ligérien est globalement satisfaisant et stable, même après la sécheresse de 2003. On a des houppiers un peu plus dégradés sur le chêne pédonculé que sur le sessile, mais ce n'est pas nouveau : ça reste dans la logique de ce que l'on observe depuis le début du 20e siècle, d'après la littérature forestière courante. Avec peut être des problèmes stationnels, des problèmes de sensibilité plus forte du pédonculé à certains agents biotiques.
Et comme par le passé, on a aussi des épisodes locaux de dépérissement qui, pour le chêne, sont toujours d'une grande complexité avec des contraintes stationnelles, l'intervention de défoliateurs comme le bombyx disparate, mais aussi de l'oïdium et autres organismes (certains réagissant peut-être au climat, comme l'oïdium) et avec parfois peut être des problèmes de gestion.

Ce qui est peut-être un peu plus nouveau, c'est qu'on observe ces dernières années des difficultés de reprise des plantations ; mais là encore c'est multi factoriel et pas forcément dû au changement climatique.

J'en reste là pour les modifications de fonctionnement du couvert forestier, et j'en arrive aux **changements de répartition des végétaux** : est-ce que les espèces migrent localement ? Ce n'est pas facile à observer car il y a beaucoup d'inertie dans ce type de migration. Mais il y a quand même des résultats comme celui-ci, qui a été obtenu à partir d'un très gros jeu de relevés botaniques réalisés dans les massifs montagneux et qui se sont échelonnés depuis 1965 jusqu'à 2005. Chacun de ces relevés a été fait à une date précise et dans un lieu précis. Ce jeu de données a été partagé en deux : les relevés d'avant 1985 et ceux d'après. On voit sur le graphique du bas, qui représente l'anomalie de température par rapport à la moyenne de la température annuelle sur l'ensemble du jeu de données, que les relevés d'avant 1985 ont tendance à correspondre à un climat plus froid que le climat des relevés réalisés après 1985. Pour explorer la question de la migration, les chercheurs ont en fait calculé les optimums altitudinaux des espèces : pour une espèce donnée, ils ont calculé un optimum à partir de l'altitude des relevés correspondants dans la première période, puis ils ont calculé un optimum sur les relevés de la





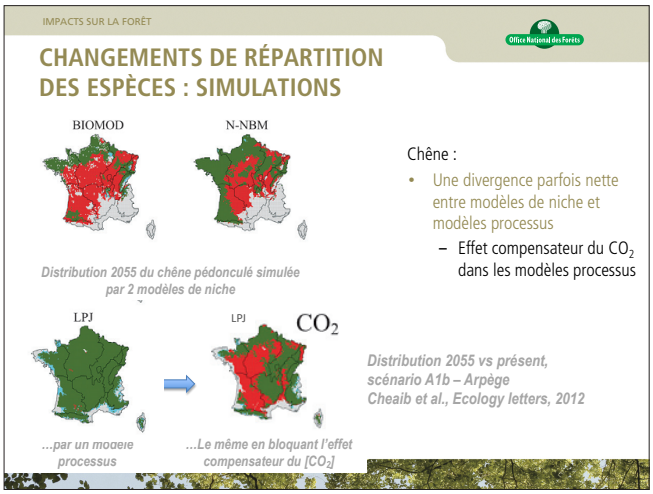
© Patrice Hirbec / ONF

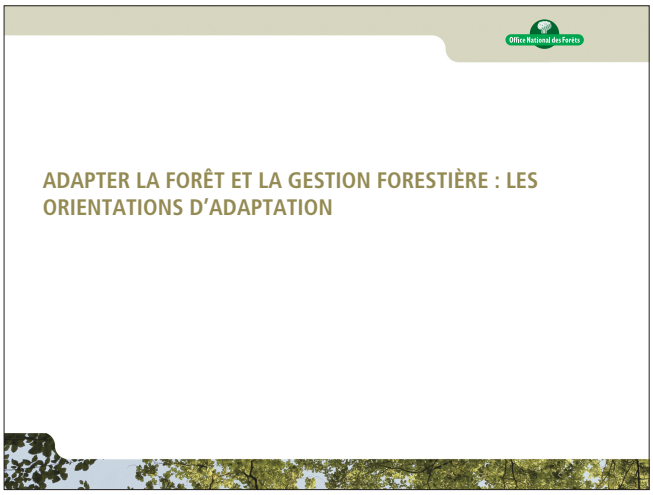
deuxième période. Ils ont comparé les deux séries d'optimums, et le décalage observé est en moyenne de 66 m vers le haut. C'est une observation, mais une observation indirecte, car on ne voit évidemment pas les plantes migrer : il faut des analyses statistiques pour mettre en évidence ce genre de chose.

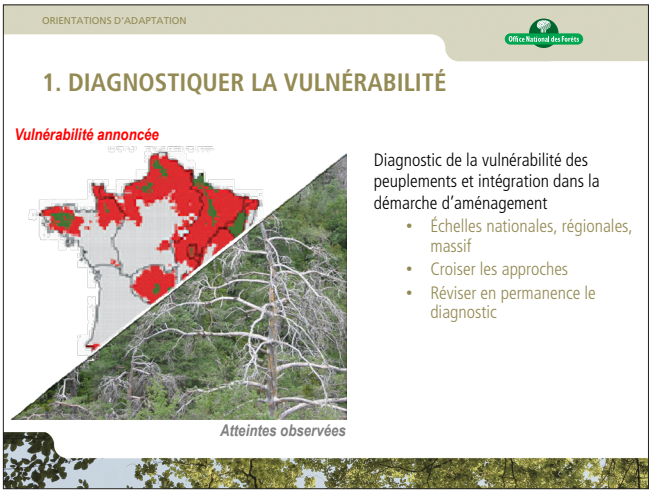
Malgré tout, il y a parfois des choses qu'un simple observateur pourrait voir, comme par exemple ce qui résulte d'une étude de l'INRA en collaboration avec l'ONF : une analyse d'aménagement sur quatre forêts du littoral aquitain et sur 5 ou 6 périodes d'aménagement, concernant l'évolution de la surface occupée par le chêne vert (en vert sur les cartes). On voit très clairement une progression de la surface occupée par le chêne vert, cohérente entre les quatre forêts. Évidemment il y a de multiples facteurs possibles, à commencer par l'intervention du sylviculteur, mais l'article discute tout ça de façon assez convaincante et il en déduit que le fait majeur est bien le réchauffement. Et ce qui est intéressant, c'est que le calcul de la vitesse de progression correspondante donne une vitesse de l'ordre de 100 m/an : ce n'est plus du tout du même ordre de grandeur que ce qu'on a vu chez la processionnaire du pin, et le chêne vert est en gros 100 fois trop lent par rapport à l'évolution du climat. En revanche, cette progression observée est cohérente avec les vitesses que l'on peut reconstituer dans la période post glaciaire.

Et si on essaie se projeter dans le futur, que donnera la poursuite du réchauffement sur la répartition des espèces forestières ? Il existe pour cela différents types de modèles, et je commence ici par le type le plus simple, en prenant l'exemple du hêtre. On part de la répartition observée de l'espèce (carte de gauche) et on essaie de la reproduire fidèlement avec des variables climatiques : on a alors une carte qui représente le climat favorable à l'espèce, sa « niche climatique » (carte en haut à droite). En fait, la carte donne ici le résultat de la comparaison de trois modèles bâtis sur le même principe, mais qui diffèrent un peu sur le choix des variables et des facteurs ; d'où la représentation en 3 couleurs, du vert vif au jaune selon que la niche y est prédite respectivement par les trois modèles, par deux modèles ou par un seul. La niche climatique du hêtre étant ainsi modélisée, il suffit d'injecter le climat futur attendu dans un scénario donné pour obtenir la répartition correspondante (carte du bas). Ici c'est la répartition en 2055 (autant dire demain !) selon le scénario A1B, un scénario un peu sévère, traduit par le modèle de climat Arpège : l'aire climatique du hêtre se restreint énormément et se concentre pour l'essentiel sur les massifs montagneux. C'est la publication des premiers résultats de ce type, en 2004, qui a déclenché la prise de conscience chez les forestiers.

Ce type de modèle est facile à faire, dès lors qu'on a de bonnes données de répartition de l'arbre et des variables climatiques correctes ; ça marche très bien pour certaines espèces, comme le hêtre, mais on verra que ça marche beaucoup moins bien pour le chêne, entre autres. Cela dit, ces modèles ont de sérieux défauts. En particulier, on ne sait absolument pas, dans notre exemple, ce que signifie le fait de passer du vert vif au gris : les hêtres ne vont pas dépérir massivement au 1er janvier 2055, mais cela veut-il dire qu'ils vont commencer à dépérir un peu avant ? Ou plutôt après ? Progressivement ou brutalement ? Avec ou sans effet de seuil ? Ou bien est-ce la régénération qui va commencer à flancher ? On n'en sait rien. Le modèle dit simplement qu'il ne connaît pas de hêtre en France qui vive sous un climat de mêmes caractéristiques que ce qui est prédit pour cet endroit à cette époque.





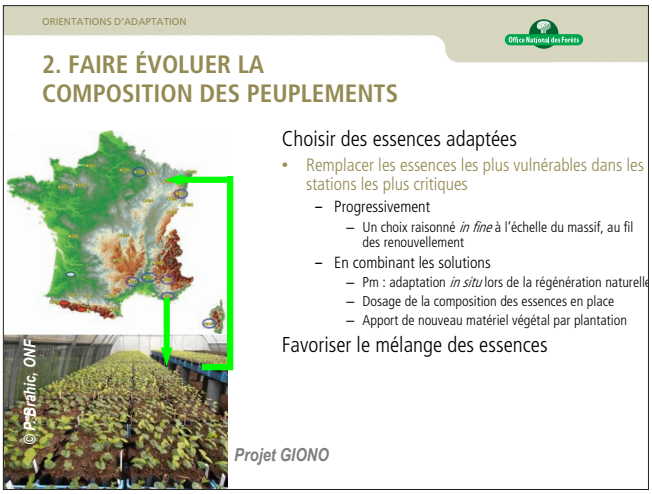


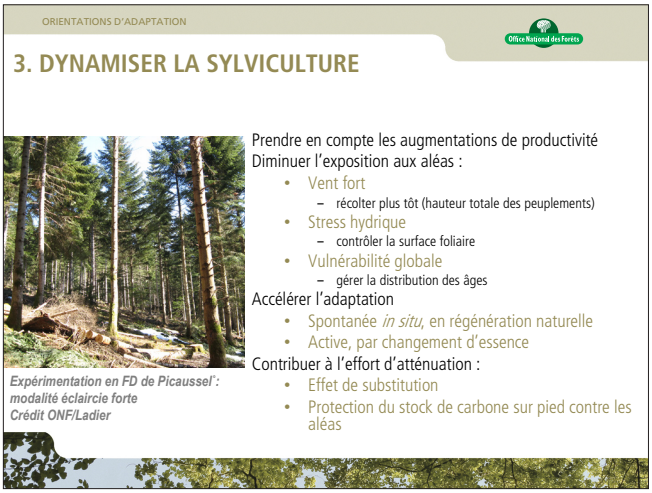
Il existe d'autres types de modèle qui ont d'autres types de propriétés : les modèles basés sur les processus. Sur des sites de mesures intensifs, on a étudié finement comment les divers processus répondent au climat : la respiration, la croissance, l'allocation du carbone aux différentes parties de l'arbre, etc. Le site de Barbeau par exemple, en forêt de Fontainebleau, est équipé d'une tour à flux et d'un tas d'instruments qui enregistrent heure par heure voire plus finement la température, l'humidité du sol, la transpiration de l'arbre, etc. Ça permet de bâtir des modèles où chacun des processus de l'arbre est relié au climat. Ces modèles prédisent en général de la croissance ; pour les transformer en modèles de répartition, on considère qu'en dessous d'un certain seuil de croissance, l'espèce n'est plus capable de se maintenir, n'est plus compétitive, et on détermine ce seuil en fonction de la répartition observée.
Ici, on confronte les résultats du modèle de processus LPJ (en bas) à ceux de deux modèles de niche (en haut) pour la répartition du chêne pédonculé en 2055 selon le scénario A1B-Arpège. Avec en vert les zones où le climat resterait viable pour l'espèce, en rouge les zones où il deviendrait impropre. On voit d'abord que les deux modèles de niche, qui par construction sont cohérents sur l'aire actuelle du chêne pédonculé, ne sont pas très d'accord sur son aire future, contrairement au cas du hêtre. On voit aussi (en bas à gauche), que le modèle basé sur les processus est assez optimiste pour le chêne pédonculé en 2055. Par contre, si on bloque dans ce modèle l'effet de l'augmentation du CO_2, on retombe sur une carte qui ressemble à celle de l'un des modèles de niche. C'est que le modèle de processus, lui, intègre le fait que le CO_2 joue positivement sur la croissance car il stimule la photosynthèse et diminue la transpiration des arbres. En effet, pour les échanges gazeux, les arbres ouvrent leurs stomates et, ce faisant, ils perdent de l'eau ; si la teneur atmosphérique en CO_2 augmente, ils ont moins besoin d'ouvrir les stomates pour le faire entrer et perdent moins d'eau.
Cela dit, les modèles ne sont globalement pas très bons pour le chêne, qui est une espèce compliquée à modéliser.

Les orientations pour adapter la forêt et la gestion forestière

Pour autant, on ne peut pas rester indifférent à ces projections et, à partir de 2005-2006, on a commencé à réfléchir à ce que l'on pourrait faire pour adapter la gestion face au changement climatique. Cela a débouché sur 5 recommandations d'adaptation, que l'on continue à faire évoluer car elles sont toujours un peu en réflexion.

La première recommandation c'est de **diagnostiquer la vulnérabilité**. À tout moment il faut essayer de cerner où sont les risques liés au climat. Pour ça on peut à la fois se nourrir des simulations, de la vulnérabilité qui est projetée par les modèles, et observer ce qui se passe en forêt. Ainsi par exemple, les dépérissements de pin sylvestre observés dans l'arrière-pays méditerranéen sont maintenant bien installés dans le paysage et assez clairement reliés au changement climatique (atteintes observées) ; situation qui peut prochainement arriver ailleurs en France. Il faut diagnostiquer ces vulnérabilités et le faire à toutes les échelles ; chacun peut y contribuer. À l'échelle nationale, le département RDI, peut donner des évolutions macro comme celles projetées par les modèles (vulnérabilité annoncée), mais à l'échelle du massif les forestiers ont leur propre connaissance des choses : il faut faire dialoguer les deux et il faut être capable de réviser son diagnostic à tout instant.

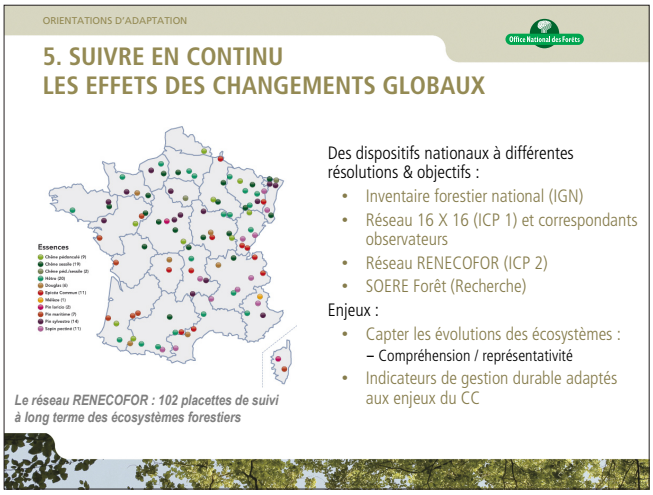


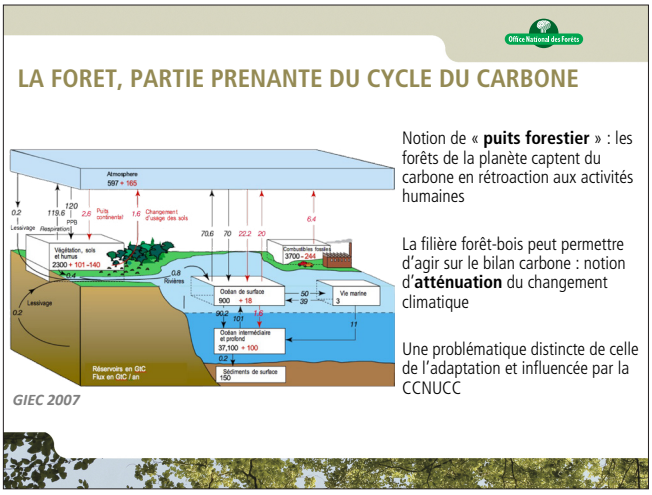


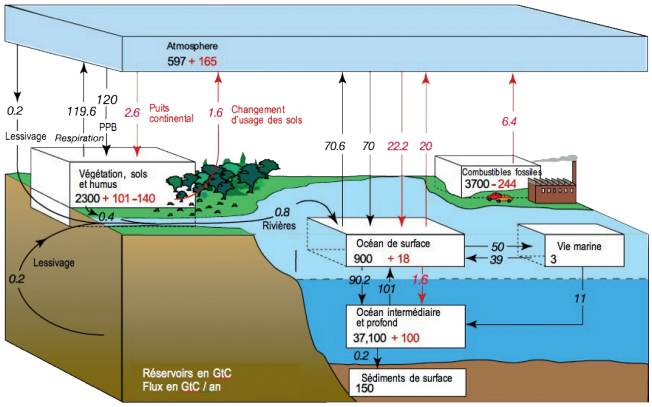
La deuxième recommandation, Brigitte Musch en parlera de façon plus approfondie, c'est de faire **évoluer la composition des peuplements.** L'idée est de choisir du matériel génétique plus adapté, en commençant par les situations les plus vulnérables. Sachant que changer le matériel génétique peut se faire de bien des façons différentes, avec des degrés d'intensité plus ou moins forts, depuis la régénération naturelle qui permet une certaine adaptation spontanée (on le verra dans l'exposé d'Antoine Kremer) jusqu'à l'apport de matériel exogène. En parallèle, une autre idée intéressante est de favoriser le mélange des essences.

Troisième recommandation : **dynamiser la sylviculture**. J'y reviendrai en détail dans l'exposé sur les leviers d'adaptation en sylviculture. Globalement, cette recommandation obéit à un certain nombre de logiques, la première étant simplement de prendre en compte les augmentations de productivité. Le premier document qui a préconisé une dynamisation de la sylviculture à l'ONF est une instruction de 1994, directement inspirée des travaux de Michel Becker et qui avait suscité à l'époque un grand scepticisme. Aujourd'hui on a beaucoup évolué sur la question à l'ONF, et il y a en tout cas un consensus scientifique sur ces augmentations de productivité.
La deuxième idée, c'est qu'en dynamisant la sylviculture on peut avoir des cycles de production plus courts et donc diminuer la durée d'exposition aux aléas. C'est vrai pour le risque de vent fort, et ce n'est pas contradictoire avec ce que j'ai dit précédemment : rien n'indique *a priori* qu'il y aura plus de vents violents sur la France à l'avenir. Cependant la hauteur est le premier facteur de vulnérabilité des arbres au vent ; ça a été très bien démontré, notamment sur le hêtre dans l'Est, par les travaux de Jérôme Bock. Comme les arbres poussent plus vite, ils sont plus vulnérables donc le risque vent augmente pour les forêts.
On verra aussi qu'une sylviculture plus dynamique tend à diminuer le stress hydrique (nous conduisons des expérimentations sur ce point au département RDI). Et plus généralement, les peuplements âgés sont toujours plus vulnérables à peu près à tous les stress : avec des durées de production plus courtes, on diminue globalement la vulnérabilité. Enfin il y a d'autres effets intéressants : on accélère l'adaptation en raccourcissant les cycles, et on contribue à l'effort d'atténuation en fournissant du bois à la filière (je vais y revenir).

Quatrième recommandation : **maîtriser les risques ou leurs impacts.** En matière d'adaptation en général, c'est souvent un aspect qui est très développé ; mais en forêt, hélas, les capacités de maîtrise des risques sont faibles. Ce que l'on peut faire c'est d'abord limiter les facteurs de vulnérabilité supplémentaire. J'en cite deux exemples : éviter de dégrader les sols en faisant attention à l'organisation des exploitations (entre autres), et contrôler les populations de cervidés pour pouvoir régénérer activement et maîtriser finement la composition de la régénération. Un troisième type de risque sur lequel on peut avoir une relative maîtrise, du moins en tant que collectivité nationale, c'est la protection contre les bioagresseurs introduits.
Il faut aussi améliorer la culture de gestion de crise, et l'ONF a déjà fait des efforts avec les leçons de la crise de 1999 et plus récemment avec la parution du guide de gestion des forêts en crise sanitaire.







Dernière recommandation : **suivre les effets des changements globaux**. Il existe pour cela différents dispositifs de monitoring, répartis sur le territoire national et qui sont complémentaires les uns des autres :

- l'inventaire forestier qui fait des mesures sur quelque 8 000 points par an ;
- le réseau systématique 16x16 de surveillance sanitaire des forêts, avec moins de points mais un niveau d'information différent ;
- le réseau RENECOFOR qui compte « seulement » 100 placettes mais où on fait beaucoup plus de mesures ;
- et enfin, à l'autre extrémité du spectre, les quelques sites de mesures intensives déjà évoqués, où sont mesurés sont tous les paramètres du fonctionnement de l'arbre et du peuplement avec un niveau d'information très fin.

Les enjeux sont très importants. Il faut capter des évolutions des écosystèmes pour les comprendre et être capable de les évaluer de façon représentative à l'échelle de la forêt. Il faut aussi être capable de fournir des indicateurs de gestion durable adaptés, parce que nous sommes responsables devant la communauté nationale de la durabilité de la gestion

La contribution de la forêt à l'atténuation du changement climatique

Enfin on peut parler de « forêt et changement climatique » sous un angle tout à fait différent, celui de la contribution à l'atténuation du changement climatique. De quoi s'agit-il ?

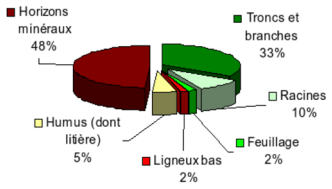
La forêt est partie prenante du cycle du carbone et, à l'échelle de la planète, c'est loin d'être négligeable. Ce schéma peu sympathique vient d'un ancien rapport du GIEC et représente les flux mondiaux de carbone sur la décennie 1990 en gigatonnes de carbone par an (GtC/an). Son intérêt, c'est de donner à comprendre ce qu'est le changement climatique. Les flèches noires représentent les flux naturels, entre océan et atmosphère et aussi entre biomasse terrestre et atmosphère. Ces flux naturels sont énormes et s'équilibrent. En comparaison, les flux anthropiques (flèches rouges) sont minuscules, mais le changement climatique c'est ça : un minuscule déséquilibre introduit dans des flux énormes. C'est pourquoi il est souvent difficile d'évaluer les choses.

Les flux anthropiques, c'est la déforestation représentée à gauche par le changement d'usage des sols qui renvoie dans l'atmosphère 1,6 GtC/an ; c'est aussi bien sûr la combustion des énergies fossiles figurée à droite (6,4 GtC/an). Cela crée un déséquilibre qui fait qu'en retour les écosystèmes terrestres (comme les écosystèmes marins) absorbent du carbone, d'abord par la reconquête de surfaces déboisées mais aussi par un surcroît de croissance qui peut être lié à l'augmentation du CO_2. D'où, à gauche, la flèche rouge vers le bas qu'on appelle le puits forestier : c'est ce qu'on évoque quand on dit que la forêt est un puits de carbone. Et ça donne prise à la filière forêt-bois pour agir sur le bilan carbone et contribuer à l'atténuation du changement climatique.

L'atténuation du changement climatique est une problématique complètement distincte de celle de l'adaptation au changement climatique : non seulement c'est une question différente au niveau scientifique, mais surtout elle est très influencée par le fait qu'en la matière on raisonne en lien avec le protocole de Kyoto, donc la convention des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC), avec des principes de « comptabilité carbone » assez compliqués.

ATTÉNUATION

STOCKAGE EN FORET ET PUITS DE CARBONE DIRECT EN FRANCE



- Stockage additionnel dans la biomasse forestière
  - 65 à 85 Mt eq CO_2/an
  - 14 à 17 % des émissions de gaz à effet de serre (GES)
  - C du sol non comptabilisé ou incertain
- Déséquilibre des classes d'âges
- Augmentation des surfaces (60% au XXème siècle)
- Augmentation de la productivité
- Une récolte < production
- Un stockage temporaire soumis à des risques

ATTÉNUATION

EVITER DES EMISSIONS DE CARBONE FOSSILE EN UTILISANT DU BE OU DU BO

$1m^3$ de bois = 1 tonne de CO_2
$1m^3$ de bois énergie subst. 0.35 eqCO_2
$1m^3$ de bois matériau subst. 1.3 eqCO_2

Le bois, matériau renouvelable à faible coût énergétique :
- 27 Mt CO_2éq économisées par an = 13 BO et 14 BIBE

Des économies cumulables chaque année et définitives

Un matériau polyvalent : cascade des usages

Un potentiel majeur de progression (construction et chimie verte)

Des estimations complexes et relatives au contexte : notion de **coefficient de substitution**

ATTÉNUATION

LES LEVIERS CARBONE DE LA FILIÈRE

Les 3 S de l'atténuation pour la forêt :
- Séquestration en forêt
  - 65 à 85 Mt eq CO_2 /an
  - = 14 à 17 % des émissions de gaz à effet de serre (GES)
- Augmentation du stockage dans les produits bois (nul en régime permanent)
- Substitution par des produits bois
  - 27 à 42 Mt eq CO_2 /an
  - = 5 à 9 % des émissions GES

Pour la France, le puits forestier, c'est-à-dire le stockage additionnel de carbone (ou séquestration), est tout à fait conséquent ; il correspond en gros à 14 à 17% des émissions des gaz à effet de serre de la France. Il est dû au déséquilibre des classes d'âges, au fait que la forêt française est une forêt en cours de maturation, notamment parce que les surfaces forestières ont augmenté de façon considérable au cours du 20e siècle. Il est à noter que le stock de carbone forestier dans le sol est du même ordre que celui représenté par la biomasse aérienne (voir graphique).

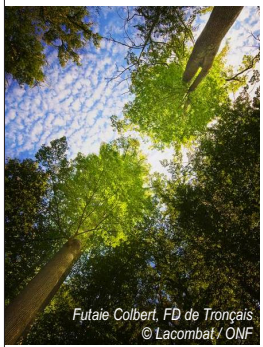
La forêt peut donc contribuer à l'atténuation en tant que puits de carbone, mais aussi en évitant des émissions de carbone fossile, par l'utilisation du bois comme combustible (bois énergie) ou comme alternative (bois d'œuvre) à d'autres matériaux, très dispendieux en énergie. Cet effet est moins direct et plus complexe à comprendre que le stockage en forêt car il faut estimer l'émission de carbone qu'on évite en construisant une maison à ossature bois, par exemple, plutôt qu'une structure classique en matériaux plus émetteurs de carbone. Cette estimation recourt à des « coefficients de substitution », présentés ici en équivalent de CO_2 évité pour la mise en œuvre d'un mètre cube de bois énergie ou d'un mètre cube de bois matériau. Ces coefficients de substitution sont assez complexes, car ils dépendent du contexte économique dans lequel ils sont établis. Par exemple, en France, une grande part de l'énergie est produite par l'industrie nucléaire, donc avec peu d'émission de CO_2, et ça joue sur le coefficient de substitution.

Quoi qu'il en soit, la filière forêt bois peut agir par trois leviers pour l'atténuation de l'effet de serre. La séquestration en forêt qui représente de 65 à 85 millions de tonnes équivalent carbone supplémentaire stockés dans la forêt par an. Le stockage dans les produits bois, mais ça c'est peu de choses et surtout c'est constant en régime permanent. Et, le plus important, la substitution par les produits bois dont je viens de parler, qui représente de l'ordre de 27 à 42 millions de tonnes de CO_2/an soit 5 à 9% des émissions de GES. Christine Deleuze et Jean-François Dhôte vont en discuter de façon plus approfondie. On ne peut pas optimiser simultanément la séquestration et la substitution, on ne peut pas à la fois stocker beaucoup de bois en forêt et produire beaucoup de bois à mettre en œuvre dans la filière. Le dilemme est de savoir quel est l'optimum. Et il n'est pas nécessairement le même dans toutes les situations.

Pour conclure

J'ai résumé ici les points principaux à retenir, qui donnent en quelque sorte le cadre des réflexions qui vont suivre.

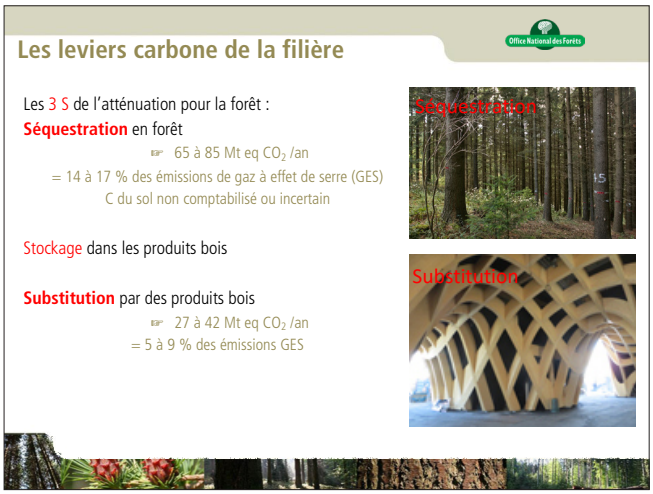
EN GUISE DE CONCLUSION

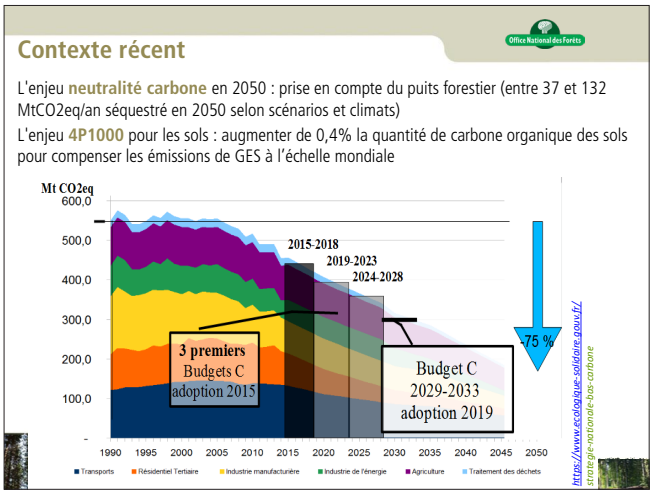

Futaie Colbert, FD de Tronçais
© Lacombat / ONF

- Les changements globaux agissent dès maintenant sur la forêt
- Ces changements peuvent être très déstabilisants dès 2050
- Des orientations d'adaptation :
  1. Diagnostiquer la vulnérabilité
  2. Faire évoluer la composition des peuplements
  3. Dynamiser la sylviculture
  4. Maîtriser les risques ou leurs impacts
  5. Suivre en continu les changements
- Les incertitudes sont importantes
  - Le risque d'agir dans l'incertitude doit être mis en balance avec le risque de ne rien faire
  - Tester un éventail de solutions d'adaptation
- La filière forêt bois peut agir contre le CC par 3 leviers : Séquestration en forêt, stockage dans les produits, substitution

LES FORÊTS ET LA FILIÈRE FORÊT-BOIS DANS LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Christine Deleuze
ONF, cheffe du pôle RDI de Dole
Jean-François Dhôte
Chercheur à l'INRA, UR AGPF





Il est question ici du bilan qu'on peut faire du rôle de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique. On parle bien de filière forêt-bois et pas seulement de forêt ; nous allons voir pourquoi c'est important.

La première partie de cet exposé s'attache à expliquer un ensemble de notions nécessaires à la compréhension de la façon dont la forêt, la sylviculture et l'utilisation du bois peuvent agir sur le bilan carbone, sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Dans la deuxième partie, Jean-François Dhôte présente les enseignements marquants d'une étude prospective conduite par l'INRA et l'IGN à la demande du ministère de l'Agriculture.

Éléments de contexte et enjeux

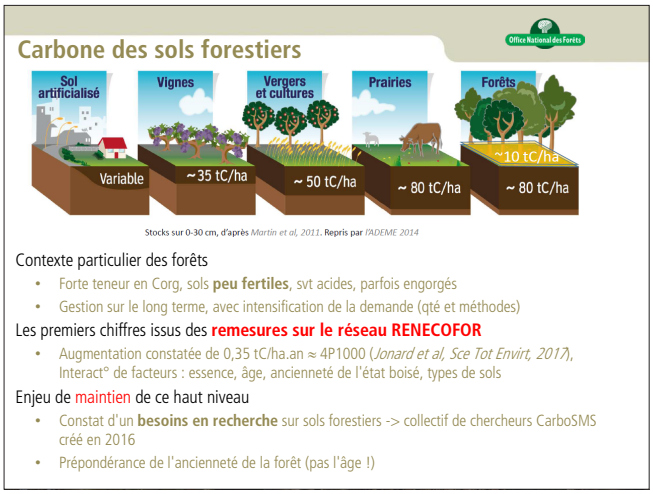
Rappelons d'abord les ordres de grandeur actuels des trois leviers d'action pour l'atténuation, les « 3 S » :

- la **séquestration en forêt** représente environ 15 % de nos émissions de GES ; ça correspond à l'augmentation de la biomasse forestière, au CO_2 additionnel ainsi puisé dans l'atmosphère et fixé par la photosynthèse ;
- le flux de **stockage dans les produits bois** est considéré comme nul, car le CO_2 immobilisé dans les charpentes, parquets et autres usages est à peu près stable dans le temps, en régime permanent ;
- par contre, l'utilisation de **produits bois en substitution** d'autres matériaux génère un flux d'émissions évitées dont l'ordre de grandeur correspond à 5 à 9 % de nos émissions effectives.

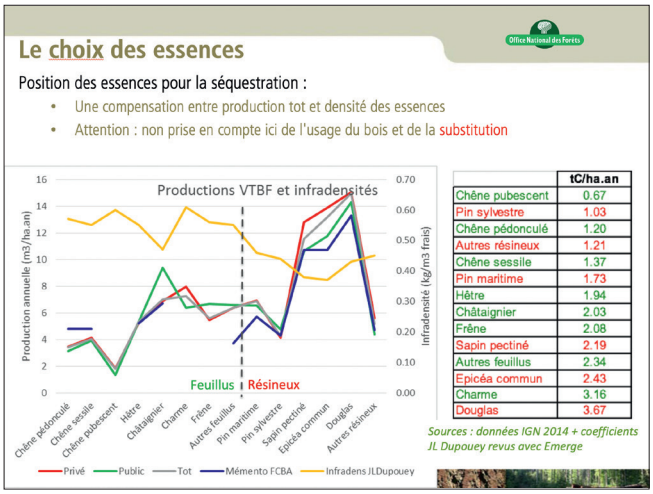
On voit d'emblée que si la forêt française se stabilise en surface, le flux de séquestration va s'amenuiser à mesure qu'elle progressera en capital sur pied. À terme, cette forêt sera globalement à l'équilibre et la séquestration s'annulera. Il faut donc vraiment réfléchir aux produits.

Abordons maintenant les éléments de cadrage politique, très liés aux conventions internationales, pour bien comprendre comment se présentent les enjeux de l'atténuation. Ce graphique montre l'évolution des émissions françaises de GES, mesurées depuis les années 90 (protocole de Kyoto) par grand secteur économique.
À partir de 1990, on voit d'abord que la prise de conscience permet de stabiliser les émissions alors que l'activité générale continue d'augmenter ; mais ça ne suffit pas, les quantités restent énormes. Au début des années 2000, les pays occidentaux s'en sont alarmés et se sont dit qu'il fallait faire beaucoup plus. Ils ont lancé le principe du « facteur 4 » : diviser par 4 les émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 1990, soit une réduction de 75 % (c'est la flèche turquoise). La France se donne cet objectif, et c'est le tout début de l'inflexion de ses émissions, mais on voit que la projection est drastique, qu'il va falloir faire de très gros efforts.

En 2015, à l'occasion de la COP 21 à Paris, la France met en place sa « Stratégie nationale bas carbone », avec des objectifs un peu plus ciblés, des priorités d'action, etc. C'est ce que représentent les rectangles noir et gris pour les 3 premières périodes.
En juillet 2017, le ministre Nicolas Hulot déclare qu'il faut être bien plus volontaire et que l'ambition pour 2050 n'est pas de réduire de 75 % mais de 100 % : c'est la neutralité carbone. Or ce n'était déjà pas très bien parti pour -75%... la tâche est donc ardue. Cependant il libère un peu les contraintes en annonçant qu'on prendra désormais en compte les flux négatifs, c'est-à-dire la séquestration. Actuellement, la séquestration en forêt compense environ 15 % de nos émissions, ce qui va permettre de tamponner un peu les 25 % manquants. Mais l'important pour nous est de savoir que la contribution de la forêt (séquestration et émissions évitées par substitution), qui était ignorée jusqu'ici, sera désormais prise en compte dans le bilan, selon un compromis qu'il faut imaginer et discuter dans un ensemble cohérent séquestration/substitution.
Enfin vous avez peut-être entendu parler de ce qu'on appelle le « 4 pour 1000 » (4P1000). C'est une initiative politique proposée par Stéphane Le Foll au niveau international lors de la COP 21 : si tous les pays faisaient un effort pour augmenter de 0,4 % par an la quantité de carbone dans tous les sols, ça permettrait de compenser complètement les émissions de GES au niveau mondial. L'initiative vise d'abord à promouvoir les bonnes pratiques qui permettent, grâce à la matière organique, de restaurer ou maintenir une certaine fertilité dans les sols agricoles et de soutenir les productions (et la sécurité) alimentaires ; mais elle concerne tous les sols, dont les sols forestiers.



© Luc Croisé / ONF

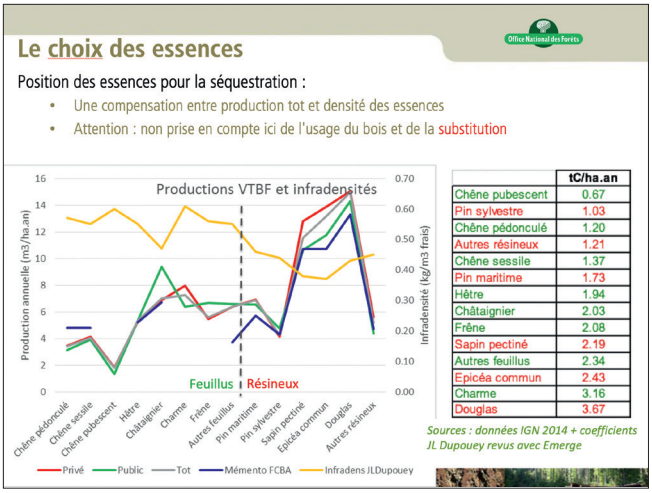


	tC/ha.an
Chêne pubescent	0.67
Pin sylvestre	1.03
Chêne pédonculé	1.20
Autres résineux	1.21
Chêne sessile	1.37
Pin maritime	1.73
Hêtre	1.94
Châtaignier	2.03
Frêne	2.08
Sapin pectiné	2.19
Autres feuillus	2.34
Epicéa commun	2.43
Charme	3.16
Douglas	3.67

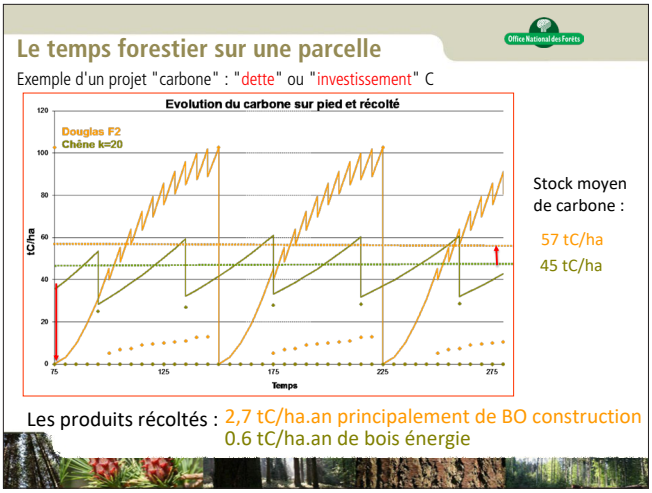
Quelques éléments de compréhension

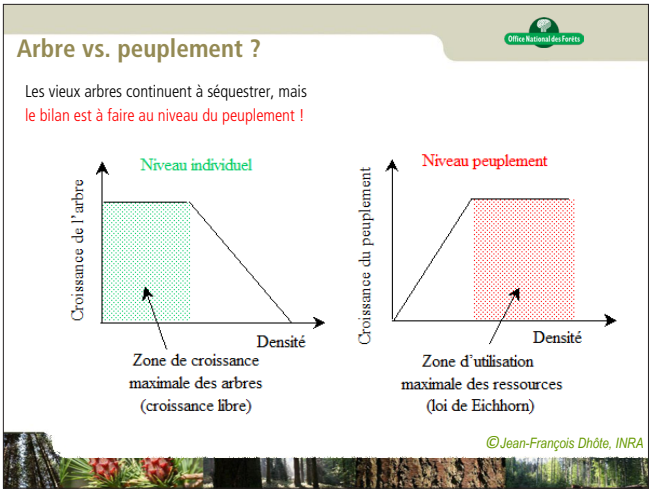
Concernant cette **séquestration dans les sols forestiers**, on a encore très peu d'éléments ; les travaux dans ce domaine sont très récents. On sait tout de même que les sols forestiers contiennent bien plus de carbone que les autres sols : environ 90 tonnes de carbone à l'hectare soit 2 à 3 fois plus que les grandes cultures et les vignes et beaucoup plus que les sols urbains. Et encore cette estimation ne tient-elle compte que des 30 premiers centimètres. Ces sols sont souvent fragiles ; s'ils ont beaucoup de carbone c'est aussi parce qu'ils sont acides et parfois engorgés. Or les enjeux de l'atténuation conduisent à une intensification de la demande de biomasse (bois énergie ou matériau de substitution) et des méthodes pour la récolter. Il faut donc veiller à la protection des sols, à la fois pour l'adaptation des forêts et au titre des mesures d'atténuation (biomasse, carbone du sol) ; il faut faire attention au tassement et aux exportations minérales.
Le réseau RENECOFOR a été le premier à apporter des éléments chiffrés sur l'évolution des stocks de carbone dans les sols forestiers au niveau national. Grâce à ses remesures (2e campagne « sols » environ 15 ans après la 1re) on a démontré que, sur l'ensemble des 100 sites, ce stock de carbone a augmenté en moyenne de 0,35 tonnes par hectare et par an ; ce qui équivaut quasiment, mais c'est une coïncidence, à +0,4 %/ha/an (4P1000). Même si le réseau n'est pas représentatif de l'ensemble de la forêt française, c'est un résultat significatif. Cependant il reste à comprendre comment les sols forestiers, qui contiennent déjà beaucoup de carbone, continuent d'en absorber. Un énorme effort de recherche est lancé sur ces questions depuis 2016. Pour l'instant, le facteur explicatif prépondérant serait l'ancienneté de la forêt (à ne pas confondre avec l'âge du peuplement) ; les sols de reconquête forestière après un passé agricole plus ou moins lointain ne seraient pas encore à l'équilibre pour le carbone.

Passons à la **séquestration dans la biomasse** avec pour commencer la question du **choix des essences** : quelles sont celles qui séquestrent le plus de carbone ?
Je propose de comparer les essences sur la base des quantités de carbone fixé par hectare et par an. Sur ce graphique, j'ai reporté les informations de croissance annuelle (en m^3/ha/an) pour les différentes essences indiquées « en abscisses » : les informations de l'inventaire forestier (extraction 2014), pour l'ensemble des forêts (en gris) ou en séparant forêt publique (en vert) et forêt privée (en rouge), et les chiffres du mémento FCBA 2017 (en bleu). On voit qu'il y a des différences tranchées de productivité entre les feuillus (à gauche) et les résineux (à droite), et puis entre certains résineux et certains feuillus.



	tC/ha.an
Chêne pubescent	0.67
Pin sylvestre	1.03
Chêne pédonculé	1.20
Autres résineux	1.21
Chêne sessile	1.37
Pin maritime	1.73
Hêtre	1.94
Châtaignier	2.03
Frêne	2.08
Sapin pectiné	2.19
Autres feuillus	2.34
Epicéa commun	2.43
Charme	3.16
Douglas	3.67





Pour finir j'ai confronté ces données de production à la densité, ou plus exactement à l'infradensité en kg sec par m³ frais (courbe jaune, échelle de droite), selon les données de la base EMERGE moyennées pour la France. On voit bien que la densité contrebalance la production en volume ; que la biomasse sèche – et par conséquent la masse de carbone - est effectivement un compromis entre les deux. Mais plus précisément ? Quand on fait le bilan en tonnes de carbone par ha et par an en prenant tout en compte (branches comprises), on aboutit à une ordination des essences assez drastique. Les chênes sont assez mal classés ; je n'ai pas fait le calcul pour la chênaie ligérienne en futaie, qui est assez particulière, mais je ne pense pas que ça changerait grand-chose. Les pins sont à peu près au même niveau que le chêne : ils poussent un peu plus vite mais ils ont une densité bien plus faible. En revanche, les résineux de structure (sapin, épicéa, et surtout Douglas) ont une densité encore plus faible mais une croissance si forte qu'ils sont intéressants en termes de carbone séquestré potentiellement par hectare et par an. Noter enfin le cas du charme, dont la croissance est forte pour un feuillu et qui est très dense : il a un potentiel carbone très important.

Se pose ensuite la question du **choix des cycles et itinéraires de production**. L'idée est ici de donner des éléments de réflexion qui vont vous aider dans l'interprétation carbone des différentes options de gestion. Voici l'exemple très concret d'un *projet carbone* imaginant ce que donnerait l'installation de Douglas (en orange) par rapport à un taillis-sous-futaie (TSF) appauvri de chêne (en vert) : un peuplement peu productif qui a été géré de façon extensive. On a modélisé l'évolution du stock de carbone sur pied au fil du temps sur plusieurs cycles. Dans l'option poursuite du TSF, la 1re coupe sera réduite, histoire d'en tirer par la suite un meilleur parti (bilan carbone) ; la biomasse sur pied reste relativement constante (45 tC/ha en moyenne), les produits sont modestes (0,6 tC/ha.an). L'autre option est beaucoup plus active : on rase le TSF pour planter du Douglas, puis on voit la croissance du peuplement, les éclaircies, une grosse récolte finale à 75 ans et ainsi de suite. En phase de croissance, le stock de carbone atteint des niveaux élevés, mais quel est le bilan ? Au départ, la suppression du TSF induit ce qu'on appelle une « dette carbone » (le terme est mal choisi) ; mais au bout d'un moment, et sur une durée assez longue, le stock de carbone dépasse largement ce qu'il serait en TSF. Ramené à la révolution, ou pour une forêt à l'équilibre, ça donne un stock moyen de 57 tC/ha, soit un gain de plus de 25 %. La transformation du peuplement est donc plutôt un « investissement carbone » qu'on pourrait envisager de faire coïncider avec une échéance normale de coupe de TSF, pour minimiser la perte de départ. En outre, la récolte moyenne est bien plus forte (2,7 tC/ha.an), avec surtout des bois de structure, donc une valeur d'utilisation et de substitution (économie d'acier, de béton) plus importante que les produits du TSF.

Par ailleurs, on entend beaucoup dire que les gros arbres continuent à produire et à absorber du carbone, et qu'il vaut mieux les garder, allonger le cycle de production, parce que les jeunes en absorbent moins. Au niveau individuel, effectivement, les gros arbres absorbent plus de carbone que les petits. Mais c'est à l'échelle du peuplement qu'il faut faire le bilan. Dans une première phase, le peuplement s'installe et la croissance est assez libre et proportionnelle à la taille des arbres (croissance exponentielle) ; puis les arbres entrent en compétition et la croissance individuelle est ralentie tandis qu'au niveau du peuplement on arrive à l'utilisation maximale des ressources. Pour réfléchir au carbone forestier, c'est l'hectare de forêt qui est intéressant : sur un hectare, capter le plus possible de CO_2 c'est arriver au maximum de la production.

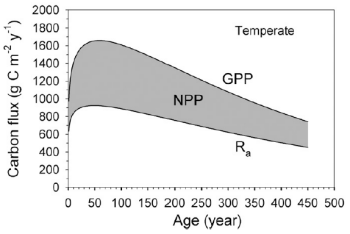
Arbre vs. peuplement ?

À l'échelle du peuplement, la productivité photosynthétique nette passe par un maximum *(Wang et al. 2011, J. Envir. Manag.)*

- autour de 50-55 ans pour des feuillus
- autour de 35-40 ans pour des conifères

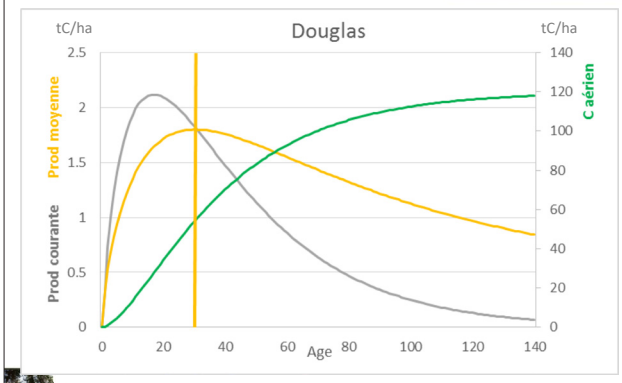
Attention à certaines études biaisées sur la croissance des vieilles forêts

- "oubli" des sites détruits
- effet fertilisant des dépôts azotés et du CO_2

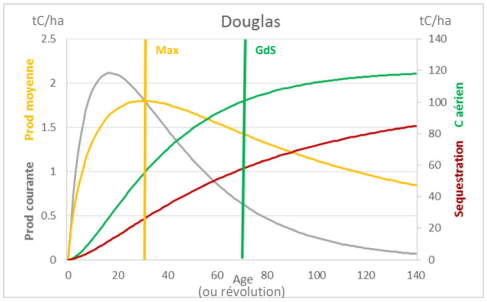


Tang et al., 2014, PNAS

Maximum de production et GdS



Maximum de production et GdS



Les guides sont bien au-delà du maximum de production : valorisation des produits

GdS = 49 % du max de séq pour 78% de la prod max

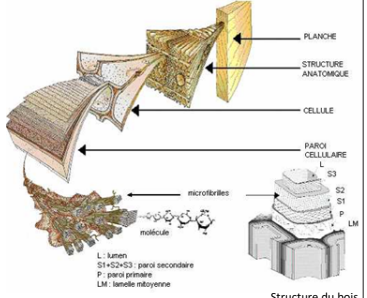
Compromis entre un haut niveau de séquestration et une production forte
Diminuer la production réduit le stockage et la substitution
Réfléchir la production en terme d'effets de substitution des produits
Accroitre la séquestration augmente l'exposition des peuplements et diminue leur résilience

L'enjeu de substitution

Le bois, un matériau **polyvalent**

- Construction, aménagement
- Tonnellerie, menuiserie,
- Caisserie, emballage
- Fibres cellulosiques, celluloses
- Produits chimiques, pharmaceutiques

Substitution BO > BI > BE mais…



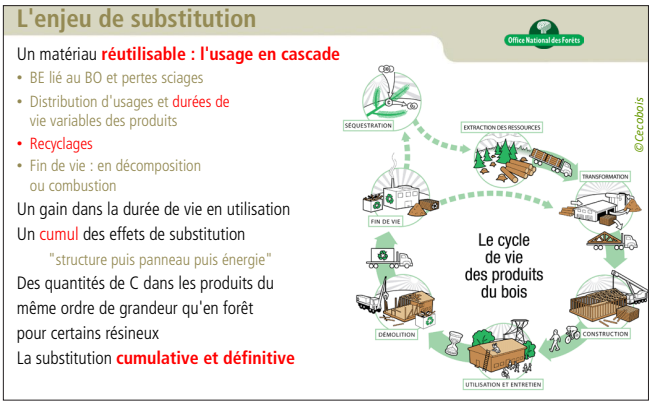
Structure du bois
(observations mluti échelles : d'après Harrington, 1998)

À l'échelle peuplement, la productivité potentielle évolue avec l'âge. C'est quelque chose qui se mesure sur les sites de suivi intensif très instrumentés. La productivité primaire brute (GPP), c'est-à-dire la masse de carbone assimilée par unité de temps, passe par un maximum puis décline progressivement. Pour la productivité primaire nette (NPP), il faut défalquer la respiration, qui diminue dans cet exemple mais qui est souvent stable ou peut augmenter ; dans tous les cas, la productivité nette passe aussi par un maximum. Et ce maximum est autour de 50-55 ans pour les feuillus, 35-40 ans pour les conifères. J'ajoute sur ce point que certaines études sur la croissance des vieilles forêts concluent que les peuplements vieillis continueraient à séquestrer, que ce soit en France ou en Allemagne ; mais il y a de gros problèmes méthodologiques ou biais dans ces études, qui ne prennent en compte ni les dépôts azotés, ni l'effet « fertilisant » du CO_2, et qui n'incluent pas dans les analyses les sites détruits par les tempêtes, etc.

Je continue sur la notion de productivité pour aborder **la question de l'âge d'exploitabilité**, avec ces courbes de dendrométrie classique bien connues des forestiers ; ce sont en l'occurrence les courbes du Douglas, exprimées non pas en volume mais en carbone. En vert, c'est la courbe de croissance du peuplement (échelle de droite). En gris, c'est la courbe de l'accroissement courant, qui passe assez tôt par un maximum. Et en jaune, c'est l'accroissement moyen du peuplement, avec un maximum au moment où les deux courbes se croisent.

Rappelons d'abord que l'âge d'exploitabilité fixé dans les guides de sylviculture (GdS) est bien au-delà de ce qui correspondrait au maximum de production, car il s'agit surtout d'optimiser la valorisation des produits bois. Valorisation au sens économique, mais qui est essentielle aussi du point de vue du bilan carbone, en ce sens qu'elle intègre la valeur de substitution : dans le cas du Douglas, on vise les produits de structure, qui ont une forte valeur de substitution.
J'ai ajouté ici, en rouge, la courbe « séquestration », qui représente le stock moyen de carbone sur pied, en fonction de la durée de révolution, pour une forêt à l'équilibre. Pour une révolution de 40 ans, par exemple, ce stock moyen sur pied est d'environ 40 tC/ha ; pour une révolution beaucoup plus longue, de l'ordre de 70 ans, il avoisine 60 tC/ha. Cela permet une nouvelle lecture du compromis sur l'âge d'exploitabilité, dans le contexte de l'atténuation : en allongeant encore la révolution on augmente la séquestration sur pied, mais on perd en flux vers les produits, vers la substitution. Ici, la décision du guide (70 ans) correspond à environ 50 % du maximum de séquestration moyenne (le maximum, c'est si on ne fait plus rien sur la forêt) et à 80 % de la production maximale. Ce compromis est par définition modulable, mais il ne faut pas perdre de vue qu'en augmentant la révolution, on va avoir un capital sur pied très important et une plus grande difficulté à réagir à toute l'instabilité dont a parlé Myriam Legay.

Pour terminer, je voudrais insister sur **l'enjeu de substitution**. Pour l'atténuation du changement climatique, le bois est un matériau de substitution qui a beaucoup d'atouts parce qu'il est polyvalent. On peut utiliser le bois brut ou le déstructurer plus ou moins et aller jusqu'aux molécules. Le bois peut donc déjà répondre à des besoins actuels ou émergents très divers : construction, tonnellerie et menuiserie, caisserie, fibres, pétrochimie, usages pharmaceutiques etc.



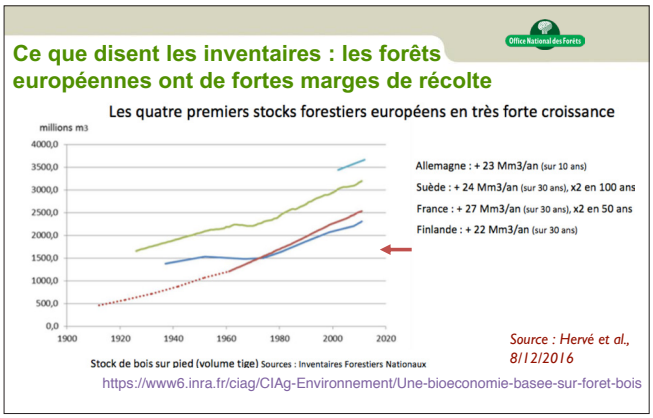
Aujourd'hui l'effet de substitution est globalement plus favorable pour les usages en bois d'œuvre que pour le bois d'industrie ou l'énergie. Mais les enjeux de la bioéconomie pourraient perturber cette hiérarchie. Les travaux qui foisonnent dans ce domaine voient l'arbre comme une usine à fabriquer des molécules carbonées d'un immense intérêt, en particulier les « extractibles » (molécules d'intérêt comme les terpènes ou polyphénols, que l'on trouve dans l'écorce ou les nœuds et que l'on sait extraire industriellement).
Et puis il y a les enjeux de masse, comme la production d'énergie, les fibres (papier, biocomposites) ou les biocarburants en remplacement des matériaux fossiles, et qui sont pour nous une affaire majeure de gestion durable (préservation des sols et de la fertilité minérale, notamment).

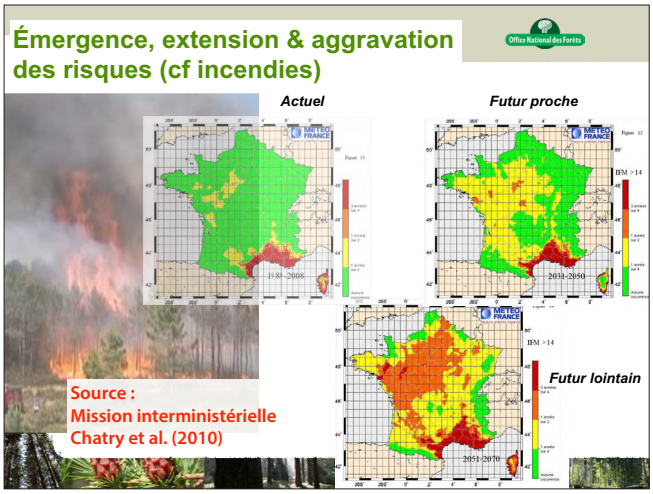
Ceci étant, comme les intérêts du bois sont très divers, il est souvent possible de le réutiliser, de concevoir des usages en cascade. Le bois de charpente, par exemple, peut être récupéré à la démolition pour être déchiqueté et entrer dans la composition de panneaux qui, en fin de vie, pourront alimenter des chaudières. Or à chaque réemploi ou recyclage du bois s'ajoute un nouvel effet de substitution. De plus, les émissions qu'on a évitées par la substitution le sont pour toujours. La substitution est donc cumulative et définitive. C'est fondamental de bien comprendre cette incidence de l'utilisation des différents produits bois, et d'y réfléchir collectivement pour raisonner les prélèvements et orienter la production forestière sur ces différentes utilisations de substitution.

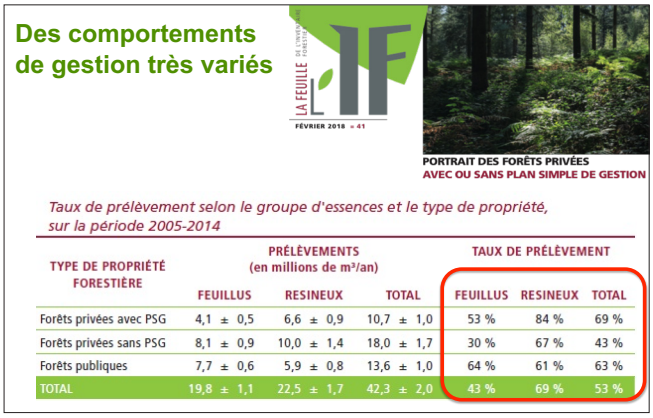
L'étude INRA-IGN sur le rôle de la filière forêt-bois française dans l'atténuation du changement climatique

Maintenant que le contexte et les notions fondamentales sont bien précisés, je vais présenter les grandes lignes d'une étude commandée par le ministère de l'Agriculture (MAA) à l'INRA et l'IGN : une étude prospective sur le potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre par la filière forêt-bois française à l'horizon 2050. Elle a été réalisée par un groupe d'une vingtaine d'experts de l'INRA et l'IGN mais aussi d'AgroParisTech et FCBA, sous l'égide d'un comité de pilotage qui réunissait des représentants du MAA et autres instances concernées, ainsi que des professionnels.
Le rapport complet est disponible sur les sites de l'IGN et de l'INRA.

Le ministère nous a passé **une commande difficile**. Il nous a demandé de préciser les leviers d'atténuation sur lesquels on pourrait jouer, à travers différents type de produits. Il nous a également demandé d'essayer de chiffrer la contribution des sols (en utilisant les résultats de RENECOFOR), ce qui jusque-là n'était pas fait dans les exercices de ce type. Et surtout il nous a demandé de bien appréhender le fait que toute décision d'usage des ressources forestières est par nature une décision intégrée qui considère d'autres objectifs, notamment des objectifs de production, de la multifonctionnalité etc., et qui est soumise aux autres facettes du problème climatique. À savoir : le besoin de s'adapter au changement climatique qui adviendra (même s'il y a beaucoup d'incertitudes sur la façon dont il se manifestera), et le fait que le déploiement de ce changement climatique dans le temps ne sera pas forcément régulier, mais plutôt avec des événements peu prévisibles et assez brutaux, de grande amplitude.

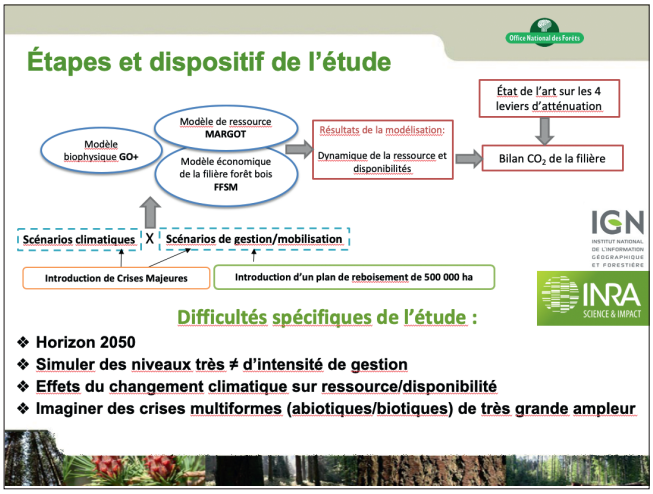






Taux de prélèvement selon le groupe d'essences et le type de propriété, sur la période 2005-2014

TYPE DE PROPRIÉTÉ FORESTIÈRE	PRÉLÈVEMENTS (en millions de m³/an)			TAUX DE PRÉLÈVEMENT		
	FEUILLUS	RESINEUX	TOTAL	FEUILLUS	RESINEUX	TOTAL
Forêts privées avec PSG	4,1 ± 0,5	6,6 ± 0,9	10,7 ± 1,0	53 %	84 %	69 %
Forêts privées sans PSG	8,1 ± 0,9	10,0 ± 1,4	18,0 ± 1,7	30 %	67 %	43 %
Forêts publiques	7,7 ± 0,6	5,9 ± 0,8	13,6 ± 1,0	64 %	61 %	63 %
TOTAL	19,8 ± 1,1	22,5 ± 1,7	42,3 ± 2,0	43 %	69 %	53 %



Je tiens à préciser **quelques éléments importants pour cette étude.** D'abord il faut savoir, malgré ce qui se dit (parfois jusque chez les scientifiques), que **les forêts d'Europe sont loin d'être surexploitées**. Il y a assez longtemps que le niveau de récolte a baissé par rapport à ce qui serait utilisable dans ces forêts. On voit sur cette figure que la France est, parmi les pays européens, celui qui stocke du bois dans ses forêts avec le rythme le plus élevé : le volume sur pied a doublé en 50 ans et il a probablement été multiplié par 5 depuis la statistique Daubrée de 1908. Il y a donc un potentiel qui est très largement sous-exploité. Je le dis ici à un auditoire ONF qui n'est sûrement pas le principal responsable de cette sous-exploitation, mais c'est important quand même d'en avoir conscience, car il y a à l'ONF un savoir-faire qui pourrait être utilement investi ailleurs.

Pour ce qui est de la **dimension « risques forestiers »** de cette prospective sur le 21e siècle, il est important de signaler qu'il y a d'une part l'émergence de risques, et d'autre part une extension du domaine des risques et une aggravation. L'émergence, c'est l'apparition de risques à un niveau qui devient significatif. C'est ce qui est illustré ici avec le cas incendies en secteur ligérien, zone de production du chêne. Mais ça concerne aussi les maladies nouvelles qui viennent d'ailleurs, pas forcément sous un déterminisme climatique, et qui peuvent *de facto* devenir des moteurs majeurs d'évolution des ressources forestières, on le voit bien avec la chalarose pour le frêne…

Dans ce travail de portée nationale, enfin, on se devait de considérer les **comportements de gestion variés**. Ne serait-ce qu'en observant globalement le taux de récolte selon le groupe d'essences (feuillus ou résineux) et le type de propriété (forêts privées, avec ou sans PSG, et forêts publiques) on voit déjà se dessiner des comportements de gestion différents. Et bien sûr cette moyenne nationale recouvre des différences très fortes de comportements locaux. C'est ce qui fait que la plupart des modèles dynamiques existant dans les laboratoires de recherche sont incapables de simuler la complexité de ces situations. La complexité n'est pas uniquement liée à l'impact du climat et à ses incidences écologiques sur l'évolution des forêts, elle est aussi liée à la complexité microgéographique et socio-économique du comportement des acteurs.

Dispositif de l'étude et résultats essentiels

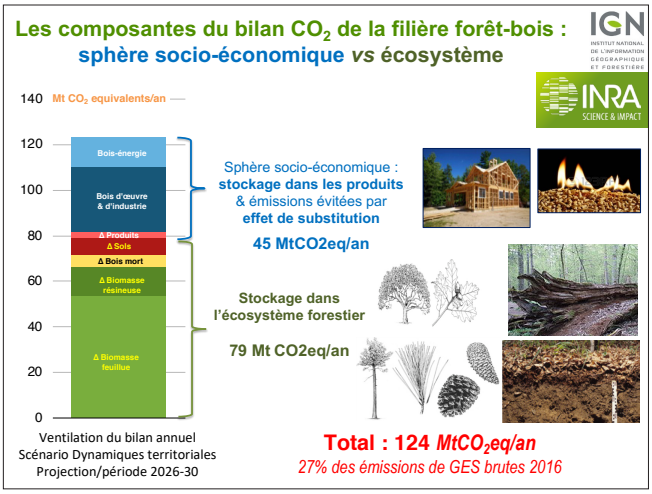
L'IGN a eu un rôle fondamental dans ce travail, toute l'ingénierie est là : le modèle de ressource MARGOT (voir encadré) et la capacité à faire fonctionner des modèles qui marchent à tous points de vue. Il serait trop long d'expliquer ce que j'entends par « qui marchent » mais c'est fondamental dans la confiance qu'on lui a accordé.
Le travail a été organisé comme indiqué sur ce schéma, que je ne vais pas commenter en détail. Je veux surtout présenter l'aspect de scénarisation, au début de la chaîne.
Nous avions initialement le projet de combiner les scénarios de gestion/mobilisation des ressources forestières avec les scénarios climatiques. Cela n'a pas été facile et nous avons travaillé finalement avec deux niveaux de scénarios climatiques et trois niveaux de gestion/mobilisation ; l'indication cernée de vert (plan de reboisement de 500 000 ha), c'est un élément d'un de ces scénarios. Nous nous sommes surtout rendu compte que la prise en compte des risques forestiers nous obligeait quasiment à faire une troisième couche de scénarisation, celle des crises majeures, vu la complexité des phénomènes concernés ; c'est pourquoi j'ai donné quelques indications là-dessus en préambule.

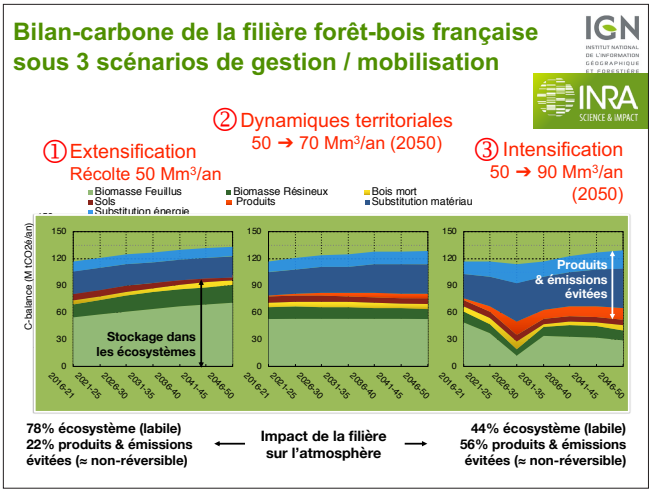
LES OUTILS DE SIMULATION

MARGOT (MAtrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale) : placé au cœur du dispositif, ce modèle de ressource de l'IGN permet d'obtenir, par période quinquennale (de 2016 à 2050), l'évolution des stocks sur pied, les volumes annuels de bois mort ainsi que les volumes récoltés selon leurs usages, fixés de façon exogène au(x) modèle(s) sauf dans le cas où le scénario prévoit une poursuite du trend actuel. C'est sur cette base qu'a pu être réalisé, par période, un bilan carbone des différents compartiments de la filière forêt-bois française : stockage dans l'écosystème forestier (sur pied, bois mort et sols) ; stockage dans les produits bois ; émissions de GES évitées par effets de substitution dans les secteurs énergie et matériaux.

FFSM (French Forest Sector Model) : modèle économique de la filière mobilisé pour examiner les conditions dans lesquelles peuvent se mettre en place les options de gestion envisagées et pour permettre l'analyse économique des conséquences de certaines des options retenues.

GO+ est un modèle de croissance représentant les principaux processus biophysiques et biogéochimiques d'un écosystème forestier géré ; il permet au modèle de ressource MARGOT de prendre en compte l'impact du climat sur la croissance et la production des peuplements.



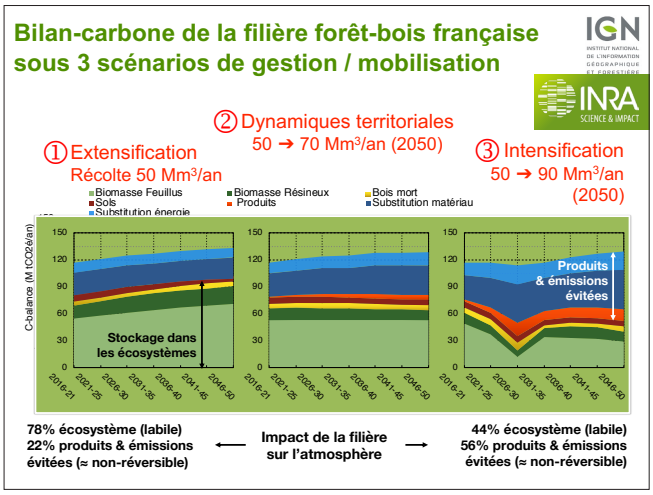


Quand on combine 3 couches de scénarisation de ce genre, cela fait vite une explosion du nombre des possibles, et tout ça est à décliner sur la France entière, avec une multiplicité d'espèces, de catégories de propriétaires, etc. Cela représente un travail de titans, que nous avons dû faire en 2 ans, et certains d'entre nous y ont d'ailleurs laissé des plumes. Ce que je vais vous montrer maintenant n'en est qu'une partie, c'est celle que je considère comme la plus fiable. Mais tout ça est sujet à beaucoup de controverses et à prendre, bien entendu, avec un peu de distance.

Voyons d'abord le mode d'emploi des résultats qui vont suivre, la façon de **représenter le bilan CO_2 complet de la filière forêt-bois**. En bas, c'est le stockage de carbone dans l'écosystème forestier (la séquestration), qui comprend bien sûr la biomasse feuillue et la biomasse résineuse (en vert clair et foncé), mais aussi les compartiments rarement renseignés que sont le bois mort et les sols (respectivement en jaune et rouge). Dans la partie haute, c'est ce qui relève de la sphère socioéconomique : les phénomènes de stockage « produits » (orange) et de substitution (bleu). La distinction est importante parce que la vulnérabilité de ces deux grandes composantes du bilan CO_2 n'est pas du tout la même. Du côté des produits, on est soumis à des effets de vulnérabilité socio-économique mais on a les moyens de se protéger contre la disparition du carbone stocké. Par exemple, pour tout ce qui est construction bois, on sait aujourd'hui se protéger contre l'incendie de façon bien plus efficace qu'à la fin du moyen âge. En revanche, pour tout ce qui concerne le stockage dans l'écosystème, on est beaucoup plus dépendant des aléas. Les chiffres indiqués sont juste un rappel des ordres de grandeur actuels.

Venons-en au **résultat principal, qui résume l'étude**. Il y a là beaucoup d'informations importantes, je vais être un peu long…
De gauche à droite, on a les trois scénarios de gestion/mobilisation de la ressource, et je dois donner d'emblée une précision sur le scénario 3 que nous avons appelé « intensification », car le terme est ambigu et génère beaucoup de malentendus et controverses.
Ce scénario 3 correspond à une remise en gestion durable généralisée des forêts françaises y compris en montagne. Il concerne donc les forêts peu ou pas gérées actuellement et suppose de se remettre à y faire des coupes, des travaux, de la chasse pour pouvoir régénérer, etc. C'est pourquoi nous avons utilisé le mot « intensification », mais il vaudrait mieux dire « remise en gestion généralisée du territoire forestier ». Quoi qu'il en soit, ce scénario se traduit numériquement par une forte augmentation de la récolte annuelle : elle passe de 50 Mm³/an à 90 Mm³/an à l'horizon 2050, ce qui est un changement de monde complet.
Au centre, le scénario 2 appelé « dynamiques territoriales » consiste à reproduire les comportements de gestion actuels des différentes petites régions et catégories de propriétaires forestiers. Comme il applique les mêmes taux de récolte à une ressource française en expansion, il se traduit par une nette augmentation du niveau absolu de la récolte.

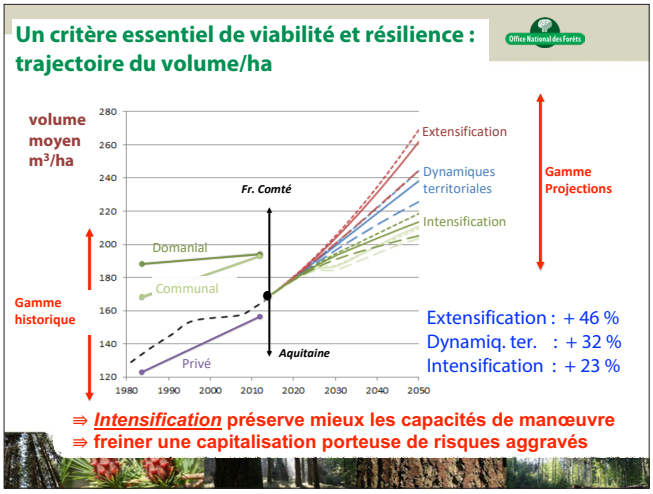
À gauche, le scénario 1 dit « extensification » se caractérise par le maintien du niveau absolu de récolte actuel : 50 Mm³/an ; cela correspond à un allègement du taux de récolte puisque le volume disponible, lui, continue d'augmenter.
Dans le détail, la définition des scénarios intègre des hypothèses très contrastées sur les priorités d'actions, qui gère effectivement et qui ne gère pas, ce qu'on fait comme investissement, comme effort de renouvellement, comme maitrise de populations d'ongulés, etc.



[NDLR : (i) le bilan est présenté ici à climat constant ; l'effet des scénarios climatiques sur la disponibilité en bois est évoqué plus loin ; (ii) la réduction du stockage forestier jusqu'en 2030 dans le scénario 3 correspond aux coupes rases du plan de reboisement de 500 000 ha associé à ce scénario]

© France Bois Régions - France Bois Forêt - Plan Rapproché

Importance de l'effet de substitution dans le bilan : dans cette étude, le coefficient de substitution du matériau inclut inclut la valorisation énergétique des co-produits (chutes et autres "connexes")



On s'intéresse à **l'évolution du bilan carbone au cours du temps pour chaque scénario**, de 2016 à 2050 ; bilan ventilé comme indiqué précédemment avec, en partant du bas, le stockage dans l'écosystème (biomasse feuillue et résineuse, bois mort et sol) puis la sphère socio-économique. On voit apparaitre dans les scénarios 2 et 3 un liseré orange qui représente le stockage dans les produits bois, dont Christine a dit qu'il est nul en régime permanent. C'est que, dans ces deux scénarios, on sort du régime permanent parce qu'on mobilise beaucoup plus de bois et qu'on en injecte bien plus dans la sphère socio-économique qu'il n'en sort par destruction de bâti existant. La différence donne donc un flux net de stockage dans le compartiment des produits bois, qui reste assez ténu en ordre de grandeur.

En revanche, on voit l'importance des phénomènes de substitution. Cependant ils sont sujets à caution et à controverse – notre groupe d'experts assume la vivacité de ces controverses – car l'évaluation est très sensible à la valeur du coefficient de substitution retenu. Nous avons choisi le coefficient 1,6 après une analyse complète de la bibliographie, mais si on passe à 1 ou à 3, ça change un peu le panorama d'ensemble… Ce qu'on peut en dire, c'est que la substitution (c'est-à-dire les émissions de CO_2 évitées) liée aux utilisations en bois matériau ou en bois d'industrie est systématiquement plus forte que celle de l'usage énergétique. C'est lié à ce dont a parlé Christine avec les aspects efficience du process et le recyclage, y compris le recyclage énergétique lié à l'usage « produit ». Je m'explique : dans notre étude, le coefficient de substitution du matériau inclut le bénéfice lié à la valorisation énergétique des co-produits (sciures, délignures, etc.) liés à l'usage du matériau. Je tiens à cette convention de calcul (il peut y en avoir d'autres) parce qu'il y a une liaison industrielle entre ces deux valorisations : si on ne sort pas le produit bois, on n'aura pas la valorisation énergétique associée.

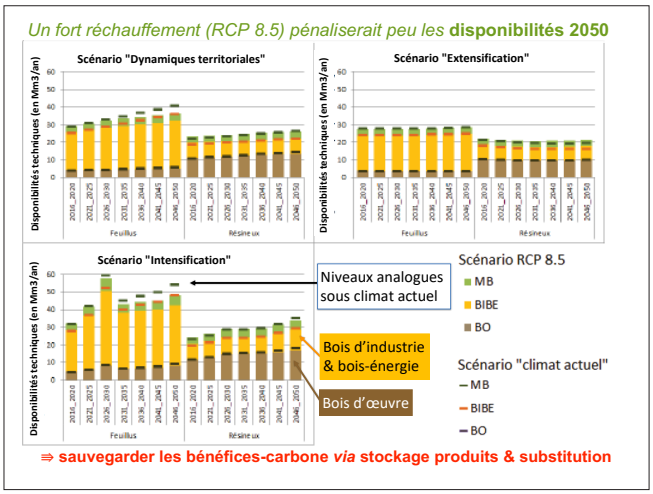
Globalement, la contribution de la forêt est de plus en plus prépondérante dans le scénario 1, à travers le stockage dans les écosystèmes ; *a contrario*, lorsqu'on valorise beaucoup la forêt avec une récolte soutenue de produits qu'on injecte dans l'industrie, le stockage dans l'écosystème ralentit mais il y a une compensation qui se fait par l'ensemble des contributions (scénarios 2 et 3). Il faut surtout voir que, quand on introduit les risques dans la réflexion, la partie labile du bilan, c'est-à-dire la partie exposée au risque de relarguer du carbone dans l'atmosphère massivement et de manière incontrôlée, est beaucoup plus faible en proportion dans le scénario 3 que dans le scénario 1. Autrement dit, en maintenant le niveau actuel de récolte nationale, on expose massivement la ressource forestière à des grands évènements de dommages généralisés comme on a pu en connaitre dans les décennies précédentes. Alors qu'en généralisant la gestion (scénario 3), on sécurise tout le carbone accumulé lors des décennies précédentes en le transformant en produits qui créent de la valeur et évitent des émissions par effet de substitution.

Un autre **aperçu important : l'évolution du volume par hectare**, toutes propriétés confondues, dans les différents scénarios. Nous avons ici les scénarios 1, 2 et 3 respectivement en rouge, bleu et vert, avec pour chacun plusieurs courbes liées aux différentes versions du modèle MARGOT ; la version qui rend le mieux compte des variations du stock sur pied est celle dite « avec densité-dépendance », qui correspond chaque fois à la courbe la plus basse.

On voit qu'à l'échéance de 2050, dans les trois hypothèses (scénarios), on sort de la gamme historique de volume sur pied que nous avons connue depuis 50 ans en moyenne nationale. Cette moyenne couvre des variations entre régions, dont on voit l'ampleur actuelle entre les deux « extrêmes », Aquitaine et Franche-Comté. Et le groupe d'expert considère

que cette évolution attendue du stock moyen par hectare correspond dans une large mesure à un saut dans l'inconnu et à une prise de risque systémique par rapport à tout ce qui est lié à l'excès d'accumulation de volume sur pied. C'est-à-dire (cf. exposé précédent) : le vent (lié à la hauteur), l'incendie, les insectes et la sécheresse.

Je passe rapidement sur cette autre illustration, juste pour dire que la simulation du climat très réchauffé RCP 8.5 a déjà des effets détectables à l'échéance 2050, ce qui n'était pas garanti au départ, mais que pour autant, les disponibilités en bois sont peu pénalisées.
Pour chacun des scénarios de gestion/mobilisation, on voit ici l'évolution de la récolte de 5 ans en 5 ans ventilée par produits ; à gauche pour les feuillus, à droite pour les résineux. Dans ce climat déjà assez dégradé en 2020, le niveau de récolte reste préservé au minimum à son niveau actuel, et même le niveau le plus exigeant, donc le scénario « intensification », peut être conservé.

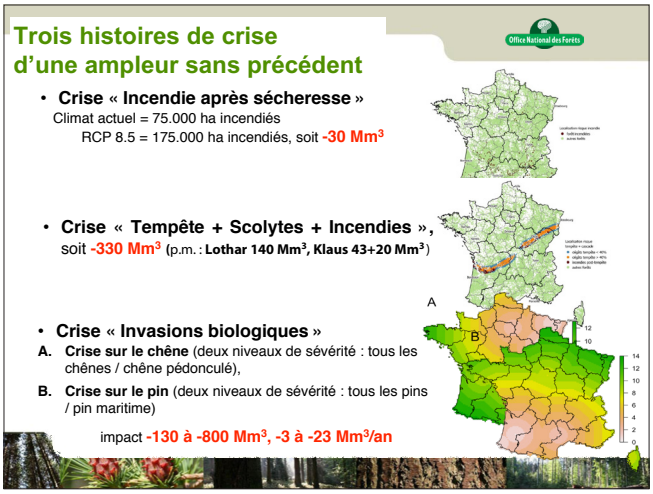


Ce que je veux aborder plus en détail, c'est la **simulation de crise « d'une ampleur sans précédent »**. C'était notre commande aux spécialistes de la sécheresse, des insectes, des maladies, etc. : concevoir des histoires de crises très impactantes pour la forêt, en allant au-delà des précédents historiques connus.

Premier type de crise : l'incendie après sécheresse. On a pu simuler un évènement déjà considérable : 175 000 ha brûlés en une saison (sous hypothèse climat RCP 8.5). C'est très au-delà de ce à quoi on est accoutumé en France, mais c'est 2 fois moins de surface incendiée qu'en 2017 au Portugal. Disons que c'est la grande crise majeure la plus « modérée » de nos simulations, avec un effet sur le bilan national de -30 millions de m^3.

Le deuxième type est une crise déclenchée par une tempête. La tempête a été configurée avec une trajectoire visant à impacter un maximum d'essences productives (épicéa, chêne, etc.), et le scénario inclut les risques secondaires qui s'enchainent ensuite. L'événement a 2 fois la taille de Lothar (1999) et à peu près 5 fois la taille complète de Klaus (2009) sur la totalité du syndrome. Là ça devient vraiment important : ça représente 330 millions de m^3 et ça commence à se « voir » dans notre rapportage annuel à la commission des Nations unies sur le changement climatique.

La troisième histoire de crise est celle qui est globalement la plus impactante pour le bilan national et particulièrement dans le secteur ligérien. Ce sont des scénarios d'invasion biologique par des pathogènes émergents, sur le modèle de la chalarose en termes de diffusion et dynamique de mortalité. Ce modèle est celui qui *a priori* pose le plus de problème du point de vue de l'aménagement, de la sylviculture et de la programmation des ressources forestières. On a une crise chêne, avec un pathogène qui frapperait d'abord dans le nord-est de la France avant de se propager à travers le pays. Et à l'inverse on a une crise pin qui partirait du sud-ouest. Avec pour chacune 2 hypothèses de sévérité : le seul chêne pédonculé ou tous les grands chênes, d'une part, le pin maritime ou l'ensemble des 5 pins, d'autre part.



Cela aboutit à des impacts assez différents et qui s'échelonnent de 130 à 800 Mm^3 de dégâts pour l'ensemble de la crise jusqu'en 2050. Les flux annuels correspondants pendant la crise vont de 3 à 23 Mm^3/an : il s'agit de récolte de sauvetage, réalisée de façon plus ou moins complète selon le degré de performance industrielle de la filière que nous avons adopté. En ordre de grandeur, avec 800 Mm^3 on s'approche de la taille de la crise du dendroctone en Amérique du Nord, qui a dégagé 1 milliard de m^3 de pins. Cela a représenté au pire 2,5 fois la possibilité de provinces comme la Colombie Britannique, sans compter qu'il fallait bien entendu continuer les coupes dans les Douglas, etc. Ce troisième type de crise correspond à des hypothèses qu'on peut qualifier de disruptives, et qu'il me parait important de considérer dans le panorama de la réflexion stratégique : cela fait partie du paysage du possible, même si on a du mal à y croire quand on voit des éléments de résilience des écosystèmes. J'ajoute que, dans l'ensemble de notre travail, c'est ce type de risque qui a eu les impacts les plus forts de dégradation du bilan carbone national. Il faut le prendre au sérieux dans la programmation, dans l'aménagement des massifs et la diversification des massifs.

Que peut-on conclure sur les leviers forestiers d'atténuation ?

Tout d'abord, **la forêt est un joueur majeur de la politique climatique du pays.** Cela implique, de la part des forestiers et des acteurs de la filière forêt-bois, de monter en gamme dans leurs interventions vis-à-vis de la société. Commencer à discuter avec les secteurs de l'énergie et du BTP, et plus seulement entre acteurs de la filière forêt-bois. Nous représentons une valeur en tant que filière et nous devons être capables de parler à Bouygues, à Vinci et à Total. C'est un vrai choc culturel.

Quid de l'évolution du puits forestier français ? Il y aura probablement des situations d'augmentation de la productivité dans certaines régions, notamment en montagne ; mais en plaine on peut s'attendre à une diminution de la productivité, surtout vers le sud. La forêt publique est globalement plus mûre et proche de l'équilibre que la moyenne française ; la récolte y atteint un pourcentage très important de l'accroissement, et on voit bien qu'elle commence à se réguler par les grandes crises. La forêt domaniale, notamment, en est actuellement à 190 m^3/ha et il n'est pas évident qu'il y ait beaucoup de marge de progression vers le haut. Je le dis avec force, parce qu'on entend certains acteurs du débat forestier dire qu'on peut faire comme les Allemands, aller jusqu'à 300 m^3/ha… Cela n'a pas de sens ; 190 m^3/ha c'est déjà beaucoup, et il faut se préoccuper de la sécurisation de ce stock forestier très important. La dominance du chêne rajoute à la nécessité et l'urgence de sécuriser ces stocks et de penser à leur trajectoire d'évolution. Pourquoi ? Parce que le chêne concentre énormément de valeur : valeur d'usage (valeur économique, valeur financière) mais aussi valeur de tous les services écosystémiques associés. C'est, dans une large mesure, la performance sylvicole du bassin ligérien qui soutient la multifonctionnalité des forêts publiques et les services écosystémiques dans la France entière. Les forestiers peuvent le dire haut et fort, et c'est important que la société l'apprenne et le comprenne.

Comment raisonner l'atténuation par la gestion ? Christine a montré que le minimum pour raisonner carbone, c'est l'échelle parcelle ou peuplement, dans le cadre de projets. Mais plus généralement, il faut **raisonner au niveau du massif** parce que c'est celui de l'aménagement forestier ; c'est à cette échelle que se font les compensations entre peuplements jeunes et adultes, et qu'on recherche une certaine régularité (même si elle peut être mise en défaut par des déséquilibres momentanés). C'est à cette échelle aussi qu'il faut penser la diversification des choix, notamment dans les massifs feuillus de plaine : les hêtraies bien sûr mais aussi les chênaies. On peut imaginer par exemple de diversifier soit avec des peuplements mélangés (utiliser les pins comme *nursing* pour améliorer l'installation de chêne là où c'est difficile…), soit par alternance de peuplements : là où la régénération a échoué, on peut planter dans certains cas du Douglas ou du pin maritime, etc. Cependant il est utile aujourd'hui de considérer un panel beaucoup plus large d'options de diversification : des transferts de provenances, de la plantation de chênes apparentés qui peuvent s'hybrider avec les chênes locaux, de la plantation d'autres espèces performantes sous climat plus sec (le robinier par exemple, le pin maritime et autres), qui sont déjà dans le paysage et qui peuvent être utilisées sous des formes nouvelles comme essences subsidiaires à objectif bois d'œuvre.

Les sols forestiers contribuent aussi au bilan carbone, sachant qu'ils sont actuellement, comme la biomasse, dans une période d'accumulation. Cette situation permet d'imaginer des stratégies où on s'autoriserait des réductions locales de stock, dûment raisonnées et compensées par les sites où le stock s'accumule, le bilan consolidé étant au minimum stable tandis qu'en moyenne le carbone des sols continue à augmenter. On a tout intérêt à avoir une approche stratégique de l'usage des sols et de la biomasse, de façon à garder une séquestration totale dans les forêts qui soit significative, mais sans compromettre leur viabilité à l'avenir et en permettant d'utiliser une fraction plus élevée de l'accroissement.

Par ailleurs l'amont et l'aval sont liés. Il est important, notamment, de **soutenir la capacité des industries du bois à absorber de grosses masses de produits accidentels** (il y en aura forcément) pour sécuriser l'avenir. Ne pas compter *a priori* sur le commerce international pour écouler nos produits accidentels car on a vu en 1999 les risques de profonde déstabilisation des chaînes de valeur associés aux grandes crises sanitaires forestières. Il est donc important pour nous, en tant que forestiers, d'aider à se structurer un tissu industriel sain qui soit capable de valoriser tous les produits (pas seulement le merrain) pour solidifier ce qu'on pourrait appeler l'écosystème forêt-industries du bois locales. *A contrario*, les industriels doivent comprendre que les forestiers ne pourront pas produire indéfiniment les mêmes mix d'espèces qu'aujourd'hui si le climat se dégrade très fortement. Cela veut dire que **l'industrie du bois devra mieux utiliser les pins, en particulier,** et mieux les rémunérer qu'aujourd'hui. Nous savons que c'est possible : on commence à parler du pin d'Alep qui devient une espèce un peu mieux reconnue, on sait qu'il y a de la marge aussi pour le pin sylvestre. Il va falloir dépasser les phénomènes de marché qui font qu'actuellement les industriels préfèrent l'épicéa ; nous devons accepter le fait qu'il y a du sapin à transformer, et même du gros sapin, et qu'il y aura de plus en plus de pins sur le marché. Enfin nous devons apprendre à faire la bio-économie avec des pins, parce que si nous subissons un réchauffement de 3 °C, ce seront forcément des essences incontournables.

Pépinière expérimentale de Guéméné Penfao : se préparer à une adaptation pro-active des forêts (essences diversifiées, plantations réussies...)

Quelques messages, pour finir

Je retiens que la forêt doit changer, qu'elle va changer, que le travail en forêt doit changer, et tout cela sous incertitude. L'incertitude est profonde mais ce n'est pas une raison pour ne pas prendre de décision. Au contraire, ces décisions doivent être bien raisonnées, transparentes pour les parties prenantes, et nettes ; et elles ont inévitablement **une dimension de prise de risque**. Jusqu'ici, lorsque vous régénérez du chêne avec un objectif 180 ans, vous prenez évidemment un risque : un risque un peu calculé et à peu près transparent. Maintenant, lorsque vous allez diversifier ces peuplements vous allez prendre aussi des risques. Toute la question est de savoir lesquels, de savoir si on est capable de les quantifier et si on est capable de les argumenter face à la société et face à tous les groupes qui fatalement vont contredire les choix qui auront été faits. Ce **besoin de pédagogie** va être un élément fondamental de l'aménagement forestier et de la programmation générale des ressources. Les connaissances évoluent, ce qui veut dire que les métiers doivent **travailler plus étroitement ensemble**. Notamment R&D, formation et gestion quotidienne. Dans ce cadre, les « experts » sylviculture ou aménagement, rodés aux questions de climat et aux nouveaux outils d'aide à la décision, vont devoir jouer un rôle très important de diffusion de la formation.

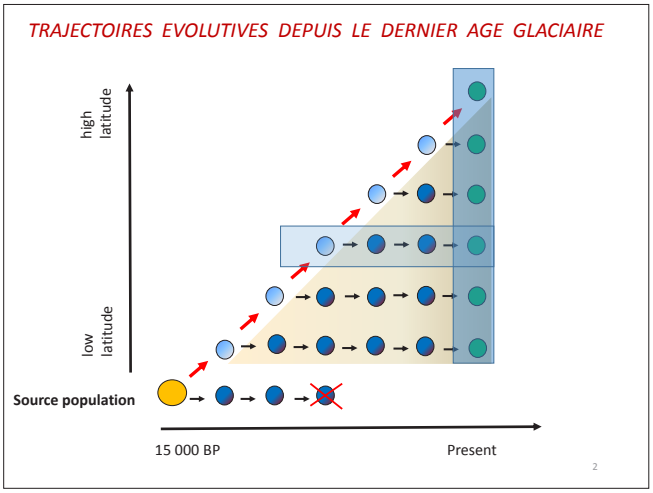
Par ailleurs je pense, même si ça sort du cadre de mon exposé, que **le choix des ressources génétiques sera un levier essentiel de changement**. Plutôt que de s'affronter *a priori* sur le choix entre futaie régulière ou irrégulière, commençons par parler des ressources génétiques avec lesquelles nous pourrons créer une forêt résiliente et productive. Depuis cette entrée par les ressources génétiques, on va arriver à la fructification, au renouvellement, aux phénomènes de flux de gênes, de consanguinité, de dépression de consanguinité… Ce qui nous amènera à la façon de régénérer les peuplements et *in fine* aux modes de traitement sylvicole les plus appropriés pour supporter cette gestion beaucoup plus complexe des ressources génétiques.

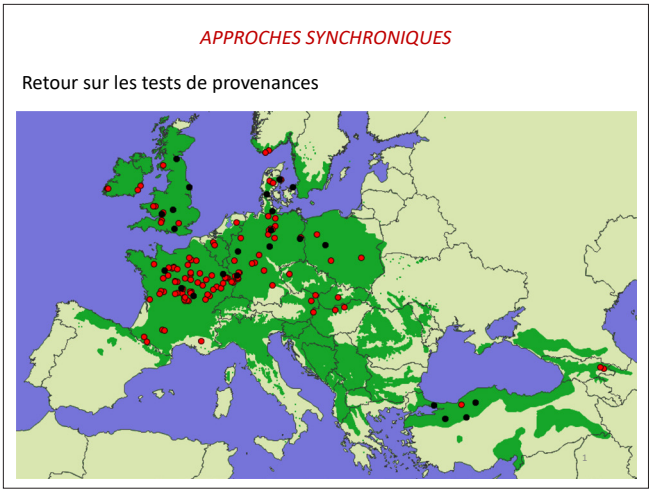
Quelques mots enfin sur la nécessité de **solidifier le modèle économique**. Je sais que la question de la maîtrise des coûts est un point sensible... On peut imaginer qu'une partie du chemin vers des solutions pour la maîtrise des coûts passe par la recherche de nouvelles ressources financières, notamment par le financement des aménités, par de la taxe carbone, par des changements fiscaux… Cela dit, ce sera plus facile pour les forestiers d'obtenir de tels canaux de financement si, en parallèle, ils démontrent leurs propres efforts de rationalisation de la gestion (organisation, logistique, etc.). De ce point de vue, faire de la plantation réussie et à bas coût, c'est un enjeu fondamental, et les chercheurs peuvent vous y aider.

© Annabelle Rogerie / ONF

CHANGEMENTS ÉVOLUTIFS CHEZ LES CHÊNES AU COURS DE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Antoire Kremer
Chercheur à l'INRA Bordeaux
UMR Biodiversité, Gènes et Communautés (BIOGECO)





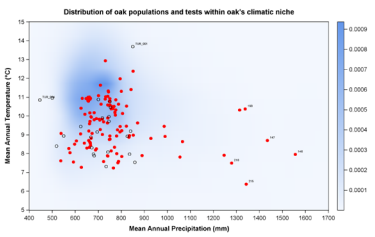
Venons-en à la chênaie. Dans quelle mesure le chêne pourra-t-il s'adapter au changement climatique ? Le passé peut éclairer le futur.

On s'interroge depuis quelques années sur les possibilités d'adaptation biologique des espèces au changement climatique. Les arbres, en particulier les espèces très longévives comme les chênes, recèlent une diversité génétique très élevée par rapport aux autres organismes. Or la diversité est le fuel de l'évolution : plus il y a de diversité dans une population, plus elle a la possibilité d'évoluer en cas de crise environnementale ou de facteurs sélectifs importants. Nous cherchons donc à étudier expérimentalement s'il est possible de détecter des changements de rythme d'évolution biologique chez les chênes au cours de changements climatiques documentés.

Les approches pour étudier ces évolutions sont résumées dans ce schéma. Il représente les trajectoires évolutives de la plupart des espèces en Europe depuis les 15 000 dernières années, avec le réchauffement postglaciaire. En bas à gauche, en orange, se trouve une population source, qui est une population refuge. Au fur et à mesure que le climat s'est réchauffé, les populations qui en dérivent ont migré vers le nord. Elles sont restées aussi au sud, là où, pour elles, le climat a changé le plus fortement : il y a eu des extinctions, mais surtout une très forte adaptation.
Comment étudie-t-on ces changements évolutifs ? En comparant des populations actuelles situées sous des climats différents : c'est **l'approche dite synchronique** (rectangle vertical). On étudie leurs différences pour des caractères d'intérêt économique ou écologique, et on réinterprète ces différences en fonction du temps et de l'évolution qui a eu cours par le passé. C'est ce qu'on fait classiquement dans les tests de provenances où sont rassemblées en un même lieu des populations venant de différents endroits. Mais nous essayons aussi, notamment avec le projet Treepeace, d'étudier les changements d'adaptation sur une même population pendant plusieurs générations : c'est **l'approche diachronique** (rectangle horizontal). C'est beaucoup plus compliqué. Je vais lister les résultats obtenus récemment avec ces deux approches, notamment en travaillant sur des forêts ou des populations du secteur ligérien.

Résultats de l'approche synchronique

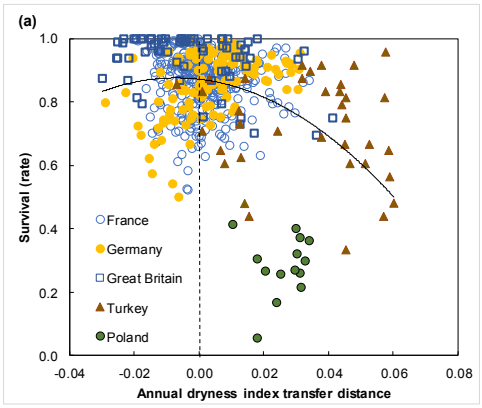
Commençons par les résultats les plus récents des tests de provenances (approche synchronique donc). Les points rouges sur la carte correspondent aux provenances de chêne sessile échantillonnées et les points noirs aux sites de test où ces populations ont été installées. Dans les années 80 et début des années 90, ces provenances ont été installées sur 4 sites en France : les forêts domaniales de la Petite Charnie (72), Vierzon (18), Vincence (58) et Sillégny (57). D'autres tests ont été installés en Europe et, pour les situations très méridionales, jusqu'en Turquie. Au total, 23 sites.



APPROCHES SYNCHRONIQUES

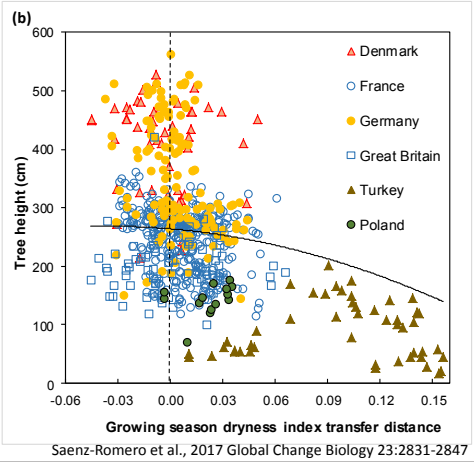
Retour sur les tests de provenances : distribution des populations et sites de test dans la niche climatique du chêne

VARIATIONS DE LA SURVIE EN FONCTION DU TRANSFERT



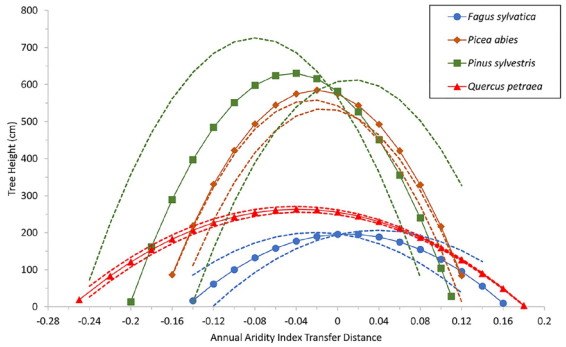
Saenz-Romero et al., 2017 Global Change Biology 23:2831-2847

VARIATIONS DE LA CROISSANCE EN FONCTION DU TRANSFERT



Saenz-Romero et al., 2017 Global Change Biology 23:2831-2847

RÉPONSES COMPARÉES DE DIFFÉRENTES ESPÈCES



Saenz-Romero et al., 2019. PeerJ 7:e6213

On voit ici les caractéristiques climatiques correspondant à ces provenances (en rouge) et sites : T° moyenne annuelle en Y, précipitations en X, le nuage bleu foncé correspondant aux meilleures conditions climatiques pour le chêne (la gradation de bleu représente la probabilité d'occurrence du sessile dans l'enveloppe bioclimatique).

L'idée est de voir comment réagissent les populations transférées d'un climat à l'autre, d'une région à l'autre. On essaye d'exprimer la réponse d'une population à un transfert climatique spatial ; cette information peut aider à comprendre comment la population pourrait changer avec le changement climatique temporel.

On étudie notamment deux caractères très liés à la valeur adaptative : la croissance en hauteur et la survie. Voyons d'abord la survie. Sur ce graphique, l'axe des Y représente le taux de survie et l'axe des X représente la distance écologique du transfert, c'est-à-dire la différence entre le climat d'où viennent les plants et le climat du site où ils ont été transférés. Ici cette distance est calculée à partir d'un indice de sécheresse (combinaison de plusieurs variables climatiques liées à la température et aux précipitations). Une distance de transfert nulle correspond aux populations locales ; vers la droite, la sécheresse augmente et vers la gauche c'est la pluviométrie. L'analyse donne une courbe quadratique qui montre la réponse de la survie en fonction de l'augmentation de la sécheresse, ou de sa diminution dans l'autre sens. On note dans ce cas, et en général (mais ce n'est pas toujours vrai), que les populations locales ont la meilleure survie.

Cet autre graphique représente la croissance en hauteur en fonction de la distance de transfert calculée d'après l'indice de sécheresse. On a encore une courbe quadratique, assez aplatie, et on remarque surtout la très grande dispersion des points autour de cette courbe de réponse. Ceci est lié en partie aux conditions environnementales locales extrêmement variées (provenances installées dans toute l'Europe) et aux différences de gestion sylvicole entre les sites. Il n'y a eu aucune homogénéité dans les règles de gestion : chaque pays a géré ses tests selon ses propres habitudes.
Mais ce qui est surprenant dans les deux cas, c'est la forme relativement aplatie de la courbe ; on s'attendait à un maximum beaucoup plus « pointu ». C'est ce qui nous a conduits, avec le même groupe de chercheurs, à comparer ces courbes avec celles d'autres espèces.

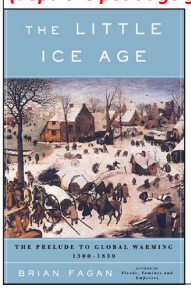
C'est donc la même approche qui a été appliquée à plusieurs espèces, en l'occurrence l'épicéa, le pin sylvestre, le chêne sessile et le hêtre, qui couvrent de très grandes aires de distribution et qui sont comparables. Les courbes de réponse sont représentées ici pour la croissance en hauteur : le chêne sessile est en rouge, le hêtre en bleu, l'épicéa en marron et le pin sylvestre en vert ; l'analyse a été faite avec le même modèle que précédemment. On est frappé ici par la très grande différence entre les courbes. Elles sont très aplaties dans le cas des deux feuillus et nettement plus pointues pour les deux conifères. Ce qui traduit une plus forte résilience de ces feuillus au transfert climatique par rapport aux conifères. On peut aussi noter que l'optimum des deux conifères ne correspond pas au point 0 du transfert. En clair : les populations actuelles se trouvent en moyenne dans des situations plus sèches que celles où elles donneraient leur optimum.

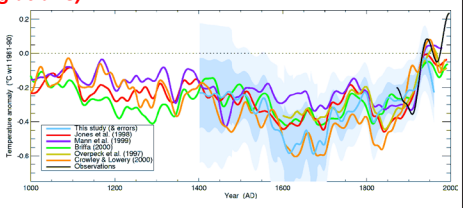
CHANGEMENTS EVOLUTIFS A DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS

- ❑ DURANT LES DERNIERS MILLENAIRES (HOLOCENE)
- ❑ DEPUIS LE PETIT AGE GLACIAIRE (depuis 1650..)
- ❑ AUJOURD'HUI (sur deux générations)

7

*CHANGEMENTS EVOLUTIFS DURANT L' **ANTHROPOCENE***
(depuis le petit âge glaciaire)



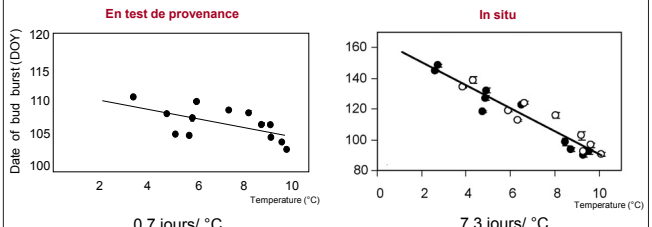


Briffa K.R. et al. 2001 Journal of Geophysical Research 106 2929-2941

8

Différenciation génétique le long de gradients de température

2°C to 12°C température moyenne du printemps



Vitasse et al. 2009, *Canadian Journal of Forest Research* **39(7):** 1259-1269
Vitasse et al. 2009, *Agricultural & Forest Meteorology* 149: 735-744

9

L'approche diachronique (projet Treepeace 2014-2019)

Voyons maintenant la deuxième approche, qui est une approche diachronique : on essaie de suivre les mêmes populations[1] au cours du temps pour voir s'il y a eu effectivement des changements de nature génétique qui peuvent conduire à une meilleure adaptation.
Nous avons utilisé cette approche pour 3 échelles de temps :

- les changements au cours de l'Holocène, c'est-à-dire depuis le dernier maximum glaciaire, soit 15 000 ans ;
- les changements depuis le depuis le petit âge glaciaire, une période comprise entre 16e et le 19e siècle où il a fait nettement plus froid en Europe ;
- et aujourd'hui, les changements d'une génération à la suivante.

La mesure des changements évolutifs dans les populations de chêne peut se faire à deux niveaux. On les mesure au niveau de caractères ayant un intérêt économique ou écologique ; la plupart du temps il s'agit de croissance, phénologie, densité du bois, etc. Et d'autre part on essaie de les suivre au niveau du génome, mettant à profit la connaissance récente du génome entier du chêne. On peut comparer un génome ancien à ce génome actuel de référence (il est possible de reconstituer un génome ancien à partir de restes fossiles ou archéologiques) ; mais, pour l'instant, on ne sait pas interpréter en termes d'adaptation les différences qu'on observe, parce qu'on ne sait pas à quoi elles correspondent en termes d'expression du génome. Je ne vais donc pas évoquer aujourd'hui les travaux à l'échelle de l'Holocène, entièrement basés sur de l'analyse de l'ADN ancien. Je passe directement au point suivant.

Approche diachronique depuis le petit âge glaciaire

Vous voyez ici des reconstitutions de l'évolution climatique au cours du dernier millénaire et vous pouvez remarquer qu'entre 1500 et 1850 environ, il y a eu des températures nettement plus froides qui ont sévi en Europe et qui sont assez bien documentées dans des récits historiques. L'idée est de voir si on peut noter des différences génétiques entre la descendance des populations qui ont connu cette période dite du petit âge glaciaire et celle des populations actuelles. Ce qui dénoterait un changement génétique dû sans doute à l'évolution climatique.
Sur quels caractères essaie-t-on d'étudier cela ? Surtout sur des caractères phénologiques : la date de débourrement et, dans une moindre mesure, la date de sénescence des feuilles. Parce qu'on sait, d'après des résultats antérieurs que je vais illustrer ici, que la date de débourrement dépend d'une façon linéaire de la température.

Le schéma de droite présente des résultats obtenus *in situ*, pour des chênaies échelonnées sur des transects pyrénéens, depuis les basses altitudes jusqu'à pratiquement 1 500 m. Il donne la date de débourrement (nombre de jours depuis le 1er janvier, sur l'axe des Y) en fonction de la température moyenne du printemps sur le site où les bourgeons ont été observés ; température qui était d'environ 10°C en basse altitude et 2°C seulement pour les sites les plus élevés. On constate bien une relation pratiquement linéaire : la date de débourrement avance de 7 jours par degré de réchauffement.
Quand on récolte les graines de ces peuplements pyrénéens et qu'on les installe en test de provenances (graphique de gauche), la relation

[1] Ce n'est pas tout à fait vrai à l'échelle de l'Holocène

est maintenue ; avec une pente moins importante, mais il y a toujours cette décroissance de date de débourrement quand la température du site d'origine augmente. Autrement dit : le débourrement est plus précoce pour les populations qui viennent de basse altitude. En test de provenances, toutes les provenances étant rassemblées sur un même site, ces différences sont forcément de nature génétique et elles sont ici de l'ordre de 0,7 jour par degré de réchauffement. Ces graphiques permettent de montrer que le débourrement répond phénotypiquement (*in situ*) mais aussi génétiquement à un changement de température. Ce que l'on note sur la courbe de gauche c'est la réponse génétique des populations aux différences de température historiques qu'elles ont connu depuis qu'elles sont installées dans les Pyrénées.

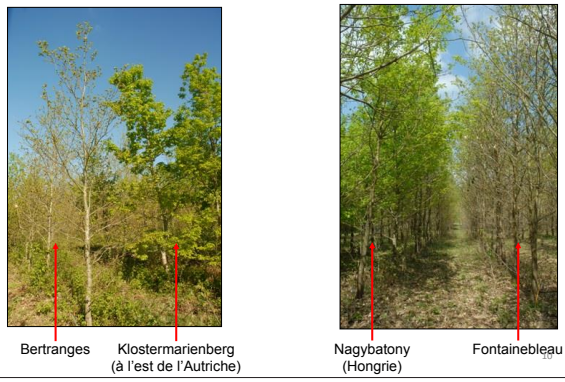
On observe cette même différenciation génétique de la date de débourrement dans les tests de provenances européennes dont j'ai parlé précédemment. Ces photos montrent nettement les différences de date de débourrement entre provenances : les provenances françaises des Bertranges (photo de gauche) et Fontainebleau (photo de droite) débourrent plus tardivement qu'une provenance issue de collines en Europe centrale (sous climat continental plus chaud).
Forts de cette information, nous avons voulu savoir si les populations qui ont connu le petit âge glaciaire, qui ont donc connu un climat nettement plus froid, débourraient plus tardivement que prévu par ces observations en tests de provenances.

Mais avant de détailler cette étude, je voudrais vous donner un aperçu de ce que l'on sait du petit âge glaciaire, d'après une petite étude biblio. C'était une période plus froide en moyenne qui a sévi, selon les auteurs, entre 1400 et 1850. Plus froide surtout au travers d'événements climatiques extrêmes et notamment des hivers plus froids. Les étés, les baisses de températures ont été moins importantes. À l'intérieur de ce petit âge glaciaire, notamment en Europe de l'Ouest, il y a eu deux périodes plus froides que les autres : la fin du 17e siècle et la première moitié du 19e siècle. Il existe aussi des effets documentés sur les arbres. On note en particulier dans les régions plus boréales que la limite de la végétation, notamment des arbres, était nettement plus au sud, et on a observé la même chose en altitude.
Voici aussi deux illustrations de ce que pouvait être cette période, par contraste avec ce qu'on connaît aujourd'hui.

DIFFERENCIATION GENETIQUE DE LA DATE DE DEBOURREMENT ENTRE PROVENANCES

0.7 Jour / °C

Test de provenances de la Petite Charnie



10

QUE PEUT ON DIRE DU PETIT AGE GLACIAIRE ?

- UNE PLANETE PLUS FROIDE (de 1400 à 1850)
- UNE PERIODE AUX EVENEMENTS CLIMATIQUES EXTREMES
- CHANGEMENTS DE TEMPERATURE + IMPORTANTS EN HIVER QU'EN ETE
- DEUX PERIODES + FROIDES DURANT LE PAG (17ième siècle, Première moitié du 19ième siècle)
- DES EFFETS DOCUMENTES SUR LES ARBRES

11

PETIT AGE GLACIAIRE

1850-1860

Glacier d'Argentière

1966

Mann M. E. 2002
Encyclopedia of Global Environmental Change,

http://glaciers-climat.fr/Glacier_d_Argentiere/Glacier_d_Argentiere.html

12

PETIT AGE GLACIAIRE

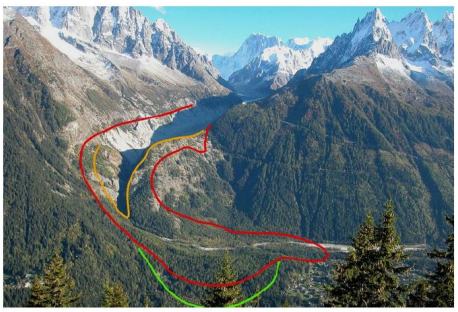
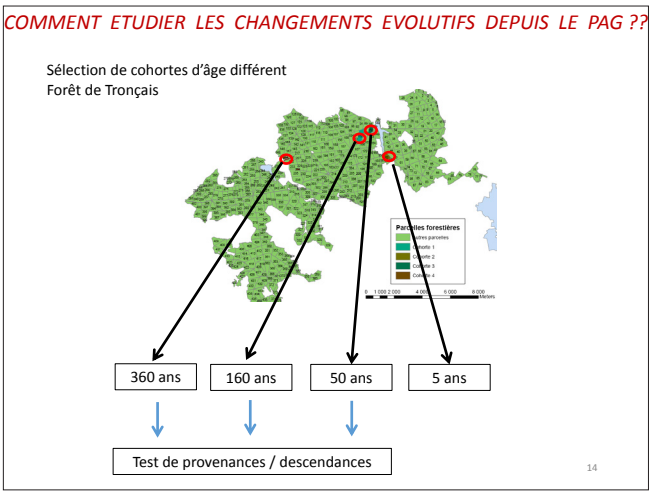
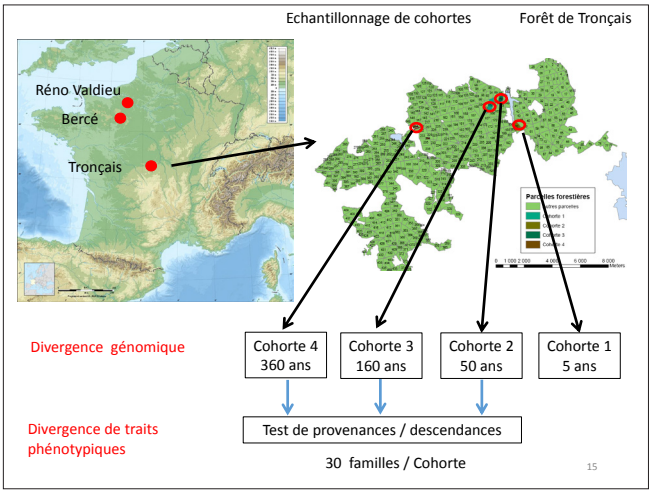


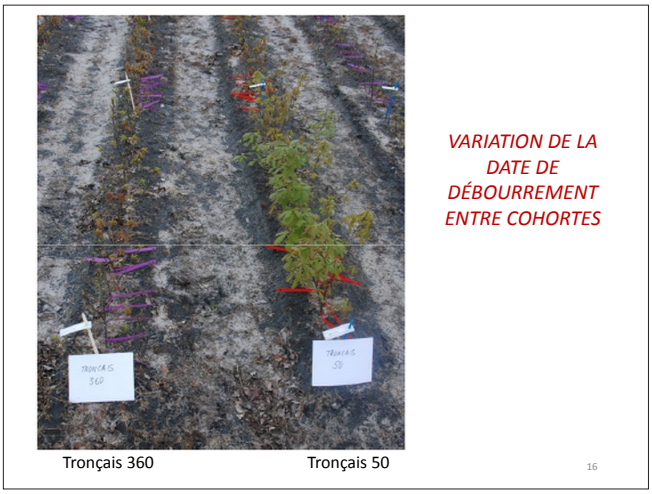
***Figure 6**: Variation du front du glacier de la Mer de Glace: en 1644 (vert), 1821 (rouge) et 1895 (orange). ©: S. Nussnaumer/FNS*

In Duloutre S, Ce que nous peut nous apprendre l'étude du Petit Age Glaciaire

13







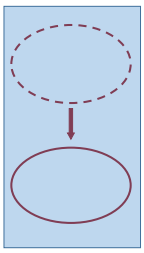
J'en arrive maintenant à cette question : **comment mesurer les différences de nature génétique entre populations qui ont connu le petit âge glaciaire et les populations actuelles ?**
Pour cela, nous avons essayé de repérer dans les forêts françaises des populations très âgées, qui ont connu cette période ; c'est le cas en forêt de Tronçais. Nous y avons échantillonné des cohortes âgées de 360 ans, les plus vieilles, jusqu'à des cohortes actuelles très récentes de 5 ans. Elles correspondent forcément à des parcelles différentes de futaie régulière. Chacune de ces cohortes a fait l'objet de récolte et d'installation en test de provenances/descendances à Loches. Évidemment il n'y a pas eu de descendance pour la cohorte la plus récente de 5 ans, mais nous avons pu en avoir sur la cohorte de 50 ans.
Nous étudions, d'une part, les différences au niveau de l'ADN des arbres des 4 cohortes en forêt (*in situ*) et, d'autre part, les différences entre populations dans des tests de provenances. Si on voit des différences entre les cohortes de 360 ans et de 50 ans dans les tests de provenances/descendances, alors ces différences sont forcément dues à des différences génétiques.

Cette manip a été répétée dans deux autres forêts : Bercé et Réno-Valdieu, avec toujours le même schéma de 4 cohortes. Chaque cohorte compte une cinquantaine d'arbres pour l'analyse de la divergence des génotypes, et 30 d'entre eux ont fait l'objet de récolte de glands pour les tests de descendances. Toute cette manip a commencé il y a 5 ans : je peux évoquer aujourd'hui les premiers résultats concernant le débourrement, mais sans support graphique car le projet n'est pas terminé, et les résultats ne sont donc pas encore publiés.
En test de provenances/descendances, on peut observer le débourrement dès la deuxième saison de végétation : nous savons que c'est un critère extrêmement stable génétiquement donc relativement peu dépendant de l'âge.

À Tronçais, pour les cohortes *in situ*, les mesures ont été faites 3 années de suite (2015, 2016, 2017). La cohorte 4 (≈ 360 ans) débourre en général plus tardivement que la cohorte 3 (≈ 160 ans) et que la cohorte 2 (50 ans). Il semblerait donc que les arbres qui ont connu le petit âge glaciaire, donc qui ont vécu sous des températures plus froides, ont tendance à débourrer plus tardivement. Dans le test de descendances correspondant (2 années de mesure : 2016 et 2017), on retrouve la même distribution : la cohorte 4 débourre plus tardivement que la cohorte 3 et que la cohorte 2. La photo illustre cela en pépinière : sur la ligne de gauche on a la descendance d'une parcelle de 360 ans et à droite celle d'une parcelle de 50 ans.

À Bercé, les résultats *in situ* sont, pour 2016 et 2017, assez voisins de ceux de Tronçais ; c'est moins le cas pour 2015 où le constat est plutôt inverse. Mais en test de descendances, les résultats ne vont pas dans le même sens. La descendance de la cohorte 2, la plus jeune, est celle qui a tendance à débourrer le plus tardivement ; par contre, on retrouve bien entre les descendances des cohortes de 3 et 4 la variation à laquelle on s'attendait. Nous sommes en train de faire des vérifications, car cela pourrait être lié au fait que la cohorte 2 se trouvait peut-être localement dans conditions particulières. Depuis l'année dernière nous avons installé des enregistreurs de températures pour savoir si, entre les différentes parcelles que nous avons échantillonnées, il n'y avait pas des différences de température susceptibles d'induire ces différences de réponses génétiques.

CHANGEMENTS EVOLUTIFS CONTEMPORAINS (D'une génération à la suivante)



$\Delta = \overline{Z}_{t+1} - \overline{Z}_t$

1990 – 2000
≈ 100 ans

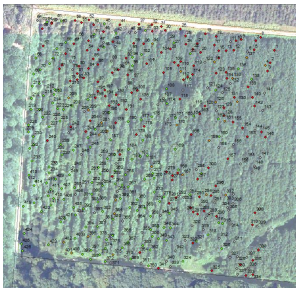
2014-2016
14 à 24 ans

17

Parcelle 26 de la FD Petite Charnie

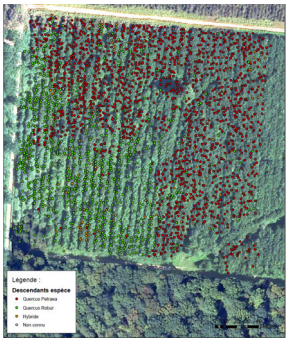
PARCELLE 26 FD PETITE CHARNIE

Génération 1 (1996)



262 Arbres adultes
(échantillonnage exhaustif)

Génération 2 (2014)

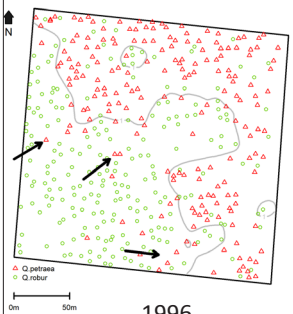


2500 descendants
(échantillonnage systématique)

18

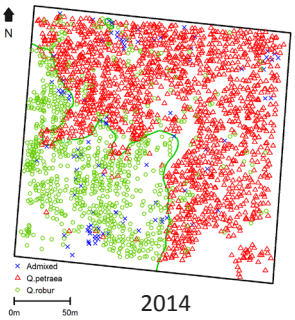
CHANGEMENTS DEMOGRAPHIQUES

Truffaut et al. 2017 New Phytologist 215: 126-139



1996

Sessile: 42,3%
Pedonculé: 51,9%
Admixed: 5,8%



2014

Sessile: 63,1 %
Pedonculé: 32,9%
Admixed: 4,0%

19

CHANGEMENTS D'AIRE D'OCCUPATION

1996

Sessile: 49,8 %
Pedonculé: 50,2 %

2014

Sessile: 66,5 %
Pedonculé: 33,5 %

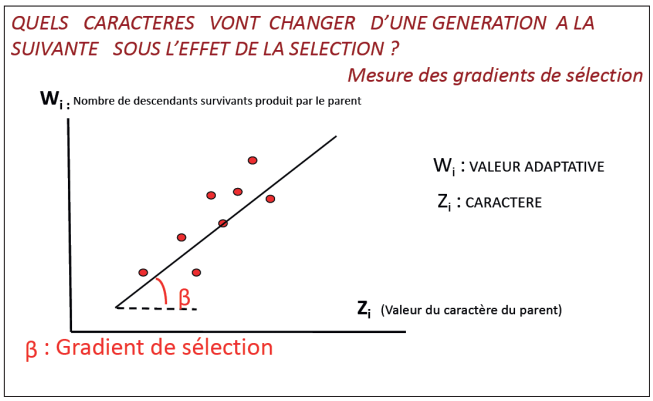
Approche diachronique à l'échelle contemporaine

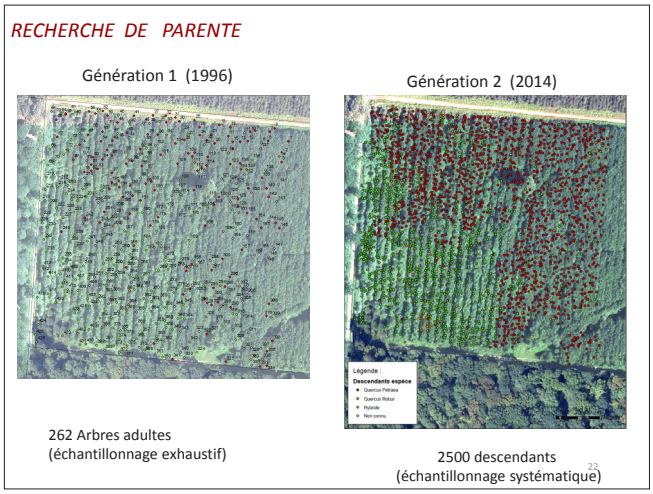
L'autre échelle de temps que je voudrais illustrer maintenant c'est celle des changements évolutifs contemporains : peut-on voir des différences génétiques d'une génération à la suivante dans les peuplements de chênes ?
Les travaux conduits sur ce sujet dans la parcelle 26 de la Petite Charnie ont commencé il y a une trentaine d'années, en 1989 ; ils portent sur 2 générations. La première génération, c'est le peuplement mère de chênes sessiles et pédonculés, qui avait 100 ans. Des coupes d'ensemencement y ont été faites en 1989 puis 1992-93 et la coupe définitive a eu lieu en 2000 (médaillon du haut : image du peuplement dans les années 90). [NDLR : l'âge du peuplement « mère », 100-110 ans de la coupe d'ensemencement à la coupe définitive (1989-2000), correspond à l'âge de renouvellement du chêne pédonculé, fortement représenté dans le mélange.] Ce peuplement s'est reproduit par régénération naturelle et donne aujourd'hui un gaulis (médaillon du bas), que nous avons échantillonné entre 2014 et 2016.

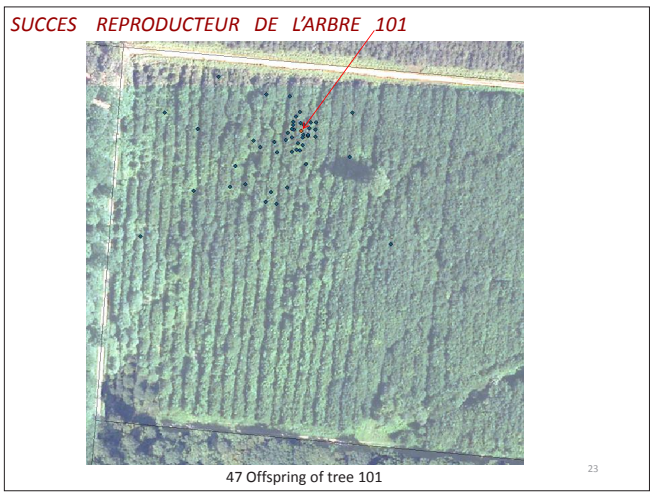
Dans nos analyses, nous comparons des arbres adultes avec leurs descendances qui ont, à l'époque des mesures, entre 14 et 24 ans. Nous avons reconstruit toutes les filiations par analyses génétiques : on sait exactement, pour chaque arbre du peuplement de la 2e génération, qui étaient ses parents dans la génération précédente. Ce suivi des généalogies nous permet donc de suivre précisément les évolutions des caractères. Vous avez ici une illustration des deux générations. Le schéma suivant va vous les montrer de manière plus précise.

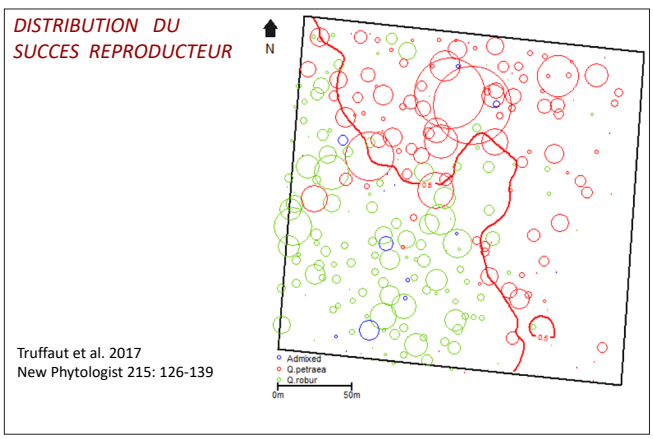
En premier lieu, nous avons cherché à savoir s'il y a, entre les deux générations, des différences dans l'aire occupée à la fois spatialement et démographiquement par les deux espèces. Vous voyez à gauche le peuplement adulte, avec le chêne sessile en rouge et le chêne pédonculé en vert : tous les arbres de la première génération (après coupes d'ensemencement) ont été échantillonnés, génotypés et mesurés en 1996 pour un certain nombre de caractères quantitatifs (j'y reviendrai plus loin). À droite c'est la régénération dans laquelle nous avons fait, à 20 ans environ, un échantillonnage pratiquement tous les 3 à 6 mètres un peu dans tous les sens. Pour tous les individus on a déterminé l'espèce par analyse génétique, de manière précise donc, ce qui permet de comparer la répartition géographique et démographique entre les 2 espèces. À la première génération le pédonculé représentait 52 % en nombre d'arbres et le sessile 42 % ; il y avait également un certain nombre d'hybrides (*admixed*). À l'heure actuelle, il y a 63 % de sessile et 33 % de pédonculé.
[NDLR : la régénération a bénéficié, entre 0 et 20 ans, de travaux de dégagement destinés à contenir les espèces concurrentes et *a priori* sans incidence sur la démographie des chênes].

Ces changements démographiques correspondent évidemment à des changements en termes de surface occupée. Globalement on a une augmentation du sessile, en aire et en démographie, par rapport au pédonculé (cf. flèches noires).









Au-delà de ces changements démographiques, nous avons cherché à savoir s'il y a **des caractères qui vont changer d'une génération à la suivante.** C'est la grande question : est-ce que génétiquement les populations vont évoluer ? Compte tenu de la différence d'âge, on ne peut pas comparer directement des caractères sur la régénération (mesurée à 20 ans) et sur les arbres adultes (qui, eux, avaient 100 ans). Mais on peut faire des hypothèses sur l'évolution génétique en estimant le succès reproducteur des individus, c'est-à-dire le nombre de descendants produits par un parent donné et survivants à l'issue de la phase juvénile, ici à 20 ans ; c'est ce qu'on appelle ici la valeur Wi. Ce nombre de descendants survivants est exprimé en fonction d'un caractère du parent (comme par exemple le débourrement) : c'est la valeur Zi en axe des X (ex : date de débourrement moyennée éventuellement sur plusieurs années). Et on regarde s'il y a une relation entre ce caractère chez les parents et le nombre de survivants que chacun a produits. C'est ce qu'on appelle un gradient de sélection : s'il y a une relation linéaire positive entre ces 2 variables, le caractère concerné a tendance à être favorisé dans la génération suivante. Ça se comprend intuitivement : plus un caractère est exprimé chez un parent donné et plus ce parent donne de descendants, plus ce caractère sera favorisé dans la génération suivante. Nous avons donc mesuré ces deux variables : d'une part le succès reproducteur (la valeur Wi) de chaque parent, pour les 2 espèces, et d'autre part un certain nombre de caractères des parents (Zi) qui sont de natures très différentes (croissance, débourrement, densité, etc.). Tout ça pour détecter une éventuelle relation linéaire entre Wi et Zi, un gradient de sélection qui permette de dire comment la population risque de changer au niveau génétique d'une génération à la suivante.

Le succès reproducteur a été estimé par recherche de parenté, comme je l'ai indiqué précédemment : pour tous les descendants (à droite) nous avons recherché les 2 parents (à gauche) par analyse d'empreinte génétique. En voici une illustration : on voit en vert tous les descendants produits par l'arbre parent 101, figuré par un point rouge. Ces descendants sont assez regroupés autour du parent, on pense alors que ce sont les descendants de la mère 101 ; mais il y en a qui sont plus loin, plus dispersés, et qui sont sans doute des descendants de l'arbre 101 par pollen (notre système n'identifie pas le père ou la mère, mais simplement un parent).

Nous pouvons ainsi représenter le succès reproducteur de tous les parents : le diamètre du cercle indique le succès reproducteur de chaque parent. Vous pouvez remarquer que les cercles rouges sont en moyenne beaucoup plus grands que les cercles verts, ce qui montre que le succès reproducteur moyen du chêne sessile est nettement plus important que celui du chêne pédonculé. Mais ce qui nous intéresse ici en premier lieu c'est de voir si le succès reproducteur est corrélé à une variable phénotypique du parent.

Les caractères évalués peuvent être classés par catégorie : caractères de croissance (circonférence, hauteur, largeur de cernes, aire du cerne), infradensité du bois, métabolites secondaires du bois, phénologie (floraison mâle et femelle, débourrement, sénescence), et un certain nombre de caractères physiologiques (en liaison avec le métabolisme de l'eau notamment, en particulier la discrimination isotopique du carbone et l'efficience d'utilisation de l'eau). Pourquoi analyser les métabolites secondaires ? Parce qu'ils sont souvent en liaison avec les capacités de résistance des espèces à des agents pathogènes ou à des insectes. Bien qu'on n'en connaisse pas la corrélation étroite chez le chêne, c'est important de voir si ces caractères risquent de bouger ou pas.

CONCLUSIONS

Changements évolutifs perceptibles à différentes échelles de temps.

Différences entre chêne sessile et pédonculé

Changements démographiques et d'aires d'occupation mis en évidence dans un peuplement mixte chêne sessile et chêne pédonculé

Ampleur de ces changements génétiques reste modeste en valeur « absolue », mais en valeur « adaptative » ?

Conséquences au niveau de la gestion : maintien ou non de vieux peuplements

7

Remerciements

Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec l'ONF, et notamment : Alexandre Durin qui a suivi tout ce qui s'est passé en forêt de Tronçais en matière de débourrement, Jean Pierre Huvelin à la pépinière de Guéméné, Lucie Arnaudet, Myriam Legay et François Morneau de la RDI, et le personnel des différentes forêts concernées. Ils ont mobilisé un certain nombre de collègues, jeunes doctorants ou post-doctorants qui continuent d'y travailler car le projet (financé en particulier par l'Union européenne) n'est pas fini.

Nous estimons, pour tous ces caractères, le gradient de sélection c'est-à-dire la pente de régression entre le succès reproducteur et la valeur du caractère. Ces corrélations sont de nature génétique (nos méthodes permettent de s'affranchir des effets environnementaux). Elles sont très nettes pour les caractères de croissance. Pour le reste, il n'y a que le débourrement et l'efficience de l'utilisation de l'eau qui montrent un gradient de sélection significatif, et seulement chez le pédonculé. Le coefficient de régression est négatif dans le cas du débourrement, ce qui veut dire que la sélection avantage les individus précoces. Il est positif pour l'efficience de l'utilisation de l'eau, ce qui va dans le sens d'une meilleure efficience. À l'issue de ce travail, nous aurons une image globale du syndrome d'évolution qui permettrait d'indiquer les caractères qui risquent de bouger d'une génération à l'autre du fait la sélection génétique sans doute induite par le changement climatique.

Que peut-on tirer de ces analyses ?

Ces recherches sont académiques, elles ne se prêtent pas tout de suite à des applications. Il était important pour nous de voir s'il y a (ou pas) des changements évolutifs de nature génétique, perceptibles à différentes échelles de temps : la réponse est oui, avec apparemment quelques différences entre chêne sessile et chêne pédonculé. On note aussi des différences plus immédiates, et plutôt de nature phénotypique : différence démographique ou d'aire d'occupation, notamment dans les peuplements mixtes chêne sessile / chêne pédonculé. L'ampleur de ces changements génétiques reste modeste en valeur absolue mais pas forcément en valeur adaptative. Alors, quelles peuvent être les conséquences pour la gestion des peuplements ? On peut se poser la question de conserver de très vieux peuplements compte tenu du fait que ces vieux peuplements peuvent conduire à une certaine inertie génétique. Ils trainent des adaptations contemporaines d'événements climatiques antérieurs, qui n'ont plus cours, et peut-être faut-il aller vers des sylvicultures un peu plus dynamiques.

Questions / Réponses

Brigitte Pilard-Landeau, dépt Gestion durable et multifonctionnelle des forêts – D'après les résultats sur les gradients de sélection, le chêne pédonculé aurait un peu plus de valeur adaptative - ou en tout cas il est moins pire - que ce à quoi on pouvait s'attendre ?

Antoine Kremer – Je ne pense pas qu'on puisse interpréter les gradients de sélection comme une meilleure résilience du chêne pédonculé que du chêne sessile, c'est même plutôt l'inverse. La sélection a un effet sur un certain nombre de caractères chez le pédonculé et il n'y a pas d'effet, du moins dans nos résultats, sur le sessile : ça irait plutôt dans le sens que le sessile serait "indifférent" pour ces caractères à l'effet de la sélection ; il a de la réserve de variabilité. Les caractères comme le débourrement et l'efficience d'utilisation de l'eau (nous avons estimé l'héritabilité de ces caractères) sont très variables. Donc même si la sélection va finalement avoir un effet sur le chêne pédonculé, il y a chez lui suffisamment de variabilité dans ces caractères pour qu'il puisse changer. Les résultats montrent qu'il va changer, que la génération suivante sera légèrement différente pour ces caractères de la génération actuelle.

Xavier Bartet, DT adjoint Centre-Ouest-Aquitaine – Vu la vitesse du changement climatique, **le chêne aura-t-il la capacité de s'adapter** ou bien la course contre la montre est-elle perdue d'avance ?

Antoine Kremer – Ça revient à poser la question du potentiel adaptatif. Le potentiel adaptatif, comme je le disais en introduction, ça se traduit quantitativement par des notions de diversité, de variation génétique. Ces espèces ont de très grands niveaux de diversité. Ce que nous avions vu avec des méthodes assez anciennes de marqueurs génétiques (type isozymes, etc.), et en tests de provenances, est aujourd'hui plus que confirmé par la connaissance du génome entier. Il y a deux grandes catégories d'espèces qui montrent une très forte diversité génétique : les insectes sociaux et les arbres, et parmi les arbres, les espèces plus longévives, notamment les chênes. Nous avons fait récemment, suite à la publication du génome du chêne, une analyse comparée avec d'autres

espèces publiées jusqu'à présent : au sommet, il y a le chêne sessile. On a les éléments explicatifs de cette grande diversité, et il y a deux grandes catégories de raisons :

1 – le fait que ce soient des espèces très grégaires.
Les tailles des populations sont très grandes ce qui maintient la diversité par rapport à d'autres espèces. Toute diversité est créée par des mutations à un moment donné au cours de l'histoire, les autres espèces de taille plus petite perdent cette diversité. Pour qu'un allèle nouveau se maintienne, il faut qu'il y ait une taille de population suffisamment grande ; sinon il risque d'être simplement perdu du fait du hasard de la sélection. Donc ce sont des espèces qui accumulent de la diversité en ne la perdant pas, par rapport à d'autres espèces. Ils deviennent en quelque sorte "obèses" de diversité. Et en plus ils s'échangent des gènes entre populations très différentes.

2 – le phénomène d'expansion post-glaciaire.
Une autre manière d'illustrer le fait que les chênes ne perdent pas de diversité c'est de voir la diversité entre populations du Sud et populations du Nord. Chez beaucoup d'autres espèces, notamment chez l'homme, quand on compare la diversité des populations européennes et des populations africaines au niveau du génome, les premières ont beaucoup moins de diversité. C'est lié au fait qu'en migrant on ne peut que perdre de la diversité. Les populations européennes de l'homme viennent d'Afrique et il y a eu perte de diversité au cours de la migration, même si aujourd'hui il y des mélanges entre populations. Le séquençage du génome du chêne pédonculé s'est fait sur une vingtaine de populations depuis le sud de l'Europe, jusqu'au nord de l'Europe. Il n'y a pas de différence de niveau de diversité. Ces populations ont maintenu leur niveau de diversité. Ceci est dû aux communications de pollen, qui maintiennent considérablement et de manière continue cette diversité.

Pour revenir à la question, on peut avoir une idée du potentiel d'adaptation en comparant l'aire de distribution actuelle des chênes par rapport à ce qu'elle était à la fin de la dernière ère glaciaire. Les modèles de niche qui simulent les modifications d'aire de répartition au cours de l'histoire, et au cours des changements climatiques futurs, montrent généralement une translation d'aire avec le réchauffement climatique. Mais quand on regarde historiquement ce qui s'est passé, ce n'est pas une translation mais une expansion. Les populations sont restées au sud aussi et se sont adaptées ; ça semble montrer que même en cas de changement climatique très important il y a eu adaptation.

Mais attention : s'il y a beaucoup de diversité, on ne sait pas forcément si toute cette diversité est utile et contribue forcément, entièrement à l'adaptation. Il peut y avoir également des effets délétères. Il y a de la diversité, une partie peut contribuer à l'adaptation, une autre peut avoir des effets plus négatifs. Il faut donc être prudent, ***mais globalement je suis plutôt optimiste.***

Bertrand Dugrain, Directeur agence Berry-Bourbonnais – Il y a beaucoup de chêne pédonculé en FD de Châteauroux, et l'aménagement de 2012 a pris la décision, sur la base des connaissances du moment, de passer en chêne sessile, ce qui amène à engager des itinéraires techniques coûteux et compliqués. La question de fond pour les gestionnaires, c'est celle du risque à long terme entre les deux options : compter sur une régénération de chêne pédonculé ou opter pour une plantation de chêne sessile. **Les connaissances et données nouvelles de la R&D pourraient-elles faire évoluer le jugement sur les risques respectifs du pédonculé et du sessile ?**

Myriam Legay – Réponse dans l'exposé sur les leviers d'adaptation dans la sylviculture.

Eric Sevrin, CRPF Ile-de-France et Centre – Remarques d'ordre général
La forêt privée se pose les mêmes questions que l'ONF, elle a les mêmes attentes et travaille avec la recherche et l'ONF pour pouvoir avancer. La coopération est fondamentale, d'où l'importance du RMT AFORCE[2], où chaque organisme peut poser ses questions, avoir un certain nombre de réponses, charge à nous de les diffuser. Mais ***je veux insister sur la communication :*** *il faut que forêt publique et forêt privée aient la même communication vis-à-vis de l'extérieur. Comme l'a dit Jean-François Dhôte, les forestiers sont attaqués de toutes parts, il y a beaucoup de gens qui parlent à notre place et c'est très difficile pour nous de faire comprendre nos actions… Par exemple en région Centre, quand on va voir le conseil régional en disant « le chêne est prépondérant (plus de 60% de la surface forestière régionale) et le changement climatique risque de le mettre en difficulté, il faut donc diversifier les peuplements et sur nos sols pauvres, acides et hydromorphes les solutions aujourd'hui c'est des résineux… » on nous répond : « vous ferez sans résineux ». Si nous ne tenons pas le même discours sur les enjeux majeurs auxquels est confrontée la forêt, qu'elle soit publique ou privée, ce sera compliqué d'agir. Les indispensables efforts de plantation vont nécessiter d'améliorer nos itinéraires pour que ce soit le moins cher possible. Aujourd'hui, il est très difficile de planter en forêt privée, mais chez nous 50 % de la surface de chêne est en pédonculé : la régénération naturelle ne peut pas être la seule option. On a de toute façon besoin d'enrichir les peuplements, sinon les transformer, et ça nécessite aussi un meilleur équilibre sylvo-cynégétique ; la chasse, c'est quelque chose d'important dans la région, mais le coût dissuasif des protections compromet le renouvellement.*

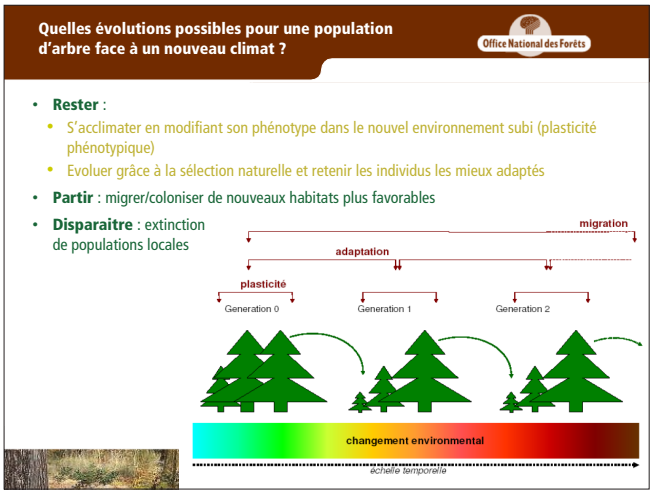
[???] technicien ONF dans la Sarthe – Ce qui a été dit sur les taillis pauvres qu'il faudrait transformer me rend un peu inquiet pour le cas des stations hydromorphes dans lesquelles on voudrait faire des travaux du sol. Et à mon avis ça engage aussi les histoires de carbone dans le sol : on va relarguer du carbone en faisant des travaux lourds et on a eu déjà beaucoup d'échecs. Alors faut-il vraiment transformer tous les taillis pauvres en plantations résineuses ? Ou peut-être ai-je mal compris ?

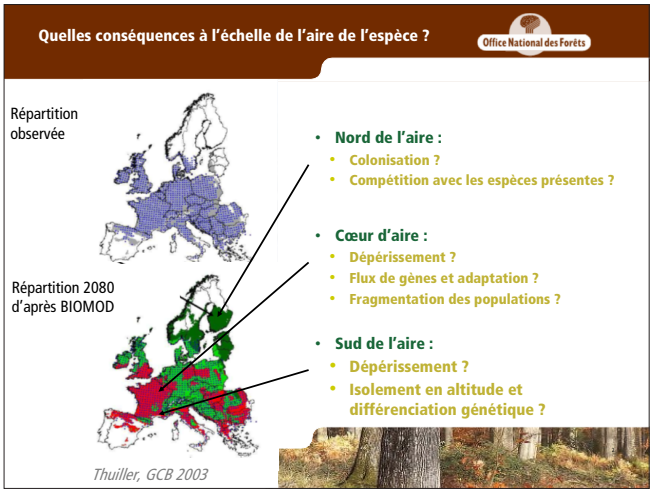
Eric Sevrin – Tout n'est pas à transformer dans les peuplements pauvres que j'ai évoqués, et je ne parlais pas de coupes rases et travaux lourds. Les sols hydromorphes, chez nous, c'est la grande majorité, et nous savons bien qu'il faut faire extrêmement attention à la remontée du plan d'eau : quand on y fait des coupes rases suivies de plantation, on a beaucoup de mortalité. Il y a donc toute une réflexion technique (y compris bilan carbone) et économique à avoir là-dessus, des techniques d'enrichissement à développer, des choses comme ça… [voir aussi l'exposé de C. Deleuze et J.F. Dhôte sur la façon de raisonner globalement le bilan carbone]

[2] Voir encadré p. 48

OUTILS POUR L'ADAPTATION DE LA FORÊT AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : MIGRATION ASSISTÉE ET SUBSTITUTION D'ESSENCES

Brigitte Musch
ONF (RDI), cheffe du CGAF – Conservatoire génétique des arbres forestiers





Au-delà du potentiel d'adaptation locale du chêne, voyons comment les ressources génétiques peuvent être un levier pour adapter les forêts au changement climatique.

Face au changement de du climat, quelles solutions pour les arbres forestiers ?

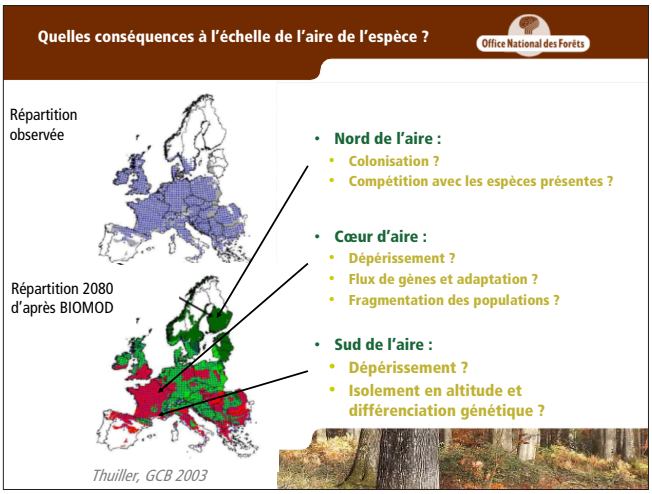
Lorsque leur environnement change, la première solution pour les arbres forestiers, qui ne sont pas des êtres très mobiles, est de s'adapter sur place aux nouvelles conditions. C'est ce que les généticiens appellent la plasticité. Comme l'a dit Antoine Kremer, il y a une grande diversité au sein des espèces, entre populations et même entre individus, ce qui leur confère une certaine capacité à s'adapter à divers changements environnementaux. Les chênes de Bercé, qui ont 350 ans et qui ont connu le petit âge glaciaire, subissent aujourd'hui le réchauffement climatique et cependant ils sont toujours là. On peut donc compter sur une certaine plasticité, une certaine résilience de l'arbre en lui-même. Mais si les changements sont de grande ampleur, on ne sait pas jusqu'où jouera cette résilience, ni à partir de quand les arbres vont commencer à montrer des signes de dépérissement. Pour le Pin sylvestre, c'est apparemment déjà le cas en zone méditerranéenne (cf. exposé introductif).

La deuxième solution c'est de s'adapter via la reproduction : passer à la génération suivante avec de la sélection, c'est-à-dire des caractères mieux adaptés aux nouvelles conditions. Cela peut se faire soit par régénération naturelle, soit par récolte de graines et plantation ; la reproduction, ce n'est pas uniquement la régénération naturelle.

La dernière solution c'est de partir, de migrer pour retrouver des conditions plus favorables. Mais ça n'est pas simple, comme l'a rappelé Myriam Legay avec l'exemple du chêne vert : la vitesse de progression qu'il devrait avoir pour « suivre » le changement climatique est 100 fois supérieure à la vitesse de progression dont il est capable.

Et sinon, s'ils n'ont plus assez de diversité pour tenir localement (en tant qu'individus), s'ils n'arrivent plus à se reproduire en transmettant les bons gènes, et s'ils n'ont pas réussi à propager leur descendance un peu plus loin, ils ne peuvent que disparaitre. C'est ce que l'on appelle l'extirpation, c'est-à-dire la disparition d'une population, mais pas de l'espèce en général.Comment cela se traduit-il au niveau des aires de répartition ?

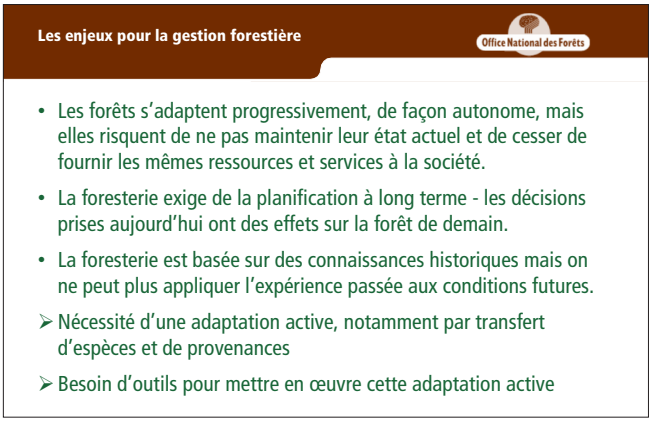
En voici une illustration avec un modèle de niche climatique dont a déjà parlé Myriam Legay : en haut, c'est l'aire de répartition actuelle de l'essence (ici, le chêne sessile) et, en bas, l'évolution projetée en 2080 pour un scénario climatique donné (A1F1).

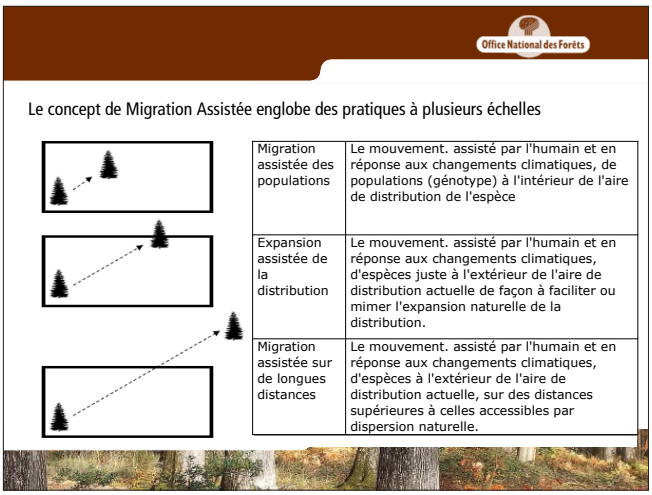


Vert foncé = extension ; vert clair = maintien ; rouge = disparition

Faire du chêne de Bercé à Malmö !

Au nord de l'aire du chêne, les Suédois peuvent se frotter les mains : produire du chêne de Bercé à Malmö, ils en rêvaient ! Ils font plus qu'en rêver : ils viennent déjà visiter les tests de provenance de chêne de forêt domaniale de La Petite Charnie pour savoir quelles sont les provenances les mieux adaptées. Et en septembre [2018], une délégation de sylviculteurs suédois vient observer notre sylviculture pour voir comment ils vont pouvoir adapter la méthode à leur territoire...





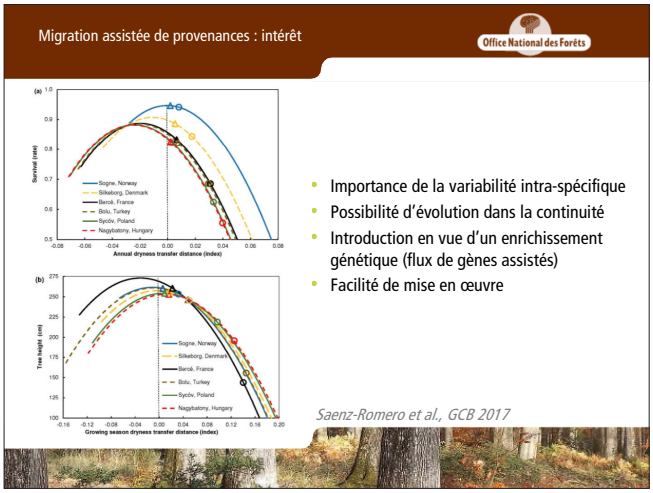
Au nord c'est assez simple, l'aire de répartition va s'étendre. On peut quand même se poser la question de la compétition avec les espèces déjà présentes, mais sur ce point le sylviculteur aura un rôle à jouer. Au sud de l'aire, c'est assez simple aussi. Là, la probabilité est forte qu'il y ait de gros dépérissements, des extirpations de populations, et des populations de plus en plus isolées sur des secteurs particuliers. Antoine Kremer a dit qu'une des raisons de la diversité du chêne réside dans le fait que les peuplements sont interconnectés, que les pollens peuvent, de proche en proche, brasser cette diversité. Si la taille des populations se réduit et si on perd ces corridors de mélange de gènes, ces populations vont peu à peu s'appauvrir génétiquement, il va y avoir des phénomènes de consanguinité et elles péricliteront alors même que les conditions climatiques resteront correctes dans leurs refuges.
Mais pour le cœur de l'aire actuelle, c'est plus flou. Pour certaines espèces on peut penser qu'il y aura des dépérissements, mais on n'a pas encore toutes les données sur leurs capacités d'adaptation. On sait qu'il continuera d'y avoir des flux de gènes et qu'on pourra jouer sur la fameuse plasticité d'adaptation des peuplements, mais dans certaines zones on peut quand même craindre une certaine fragmentation des populations.

Les enjeux pour la gestion forestière

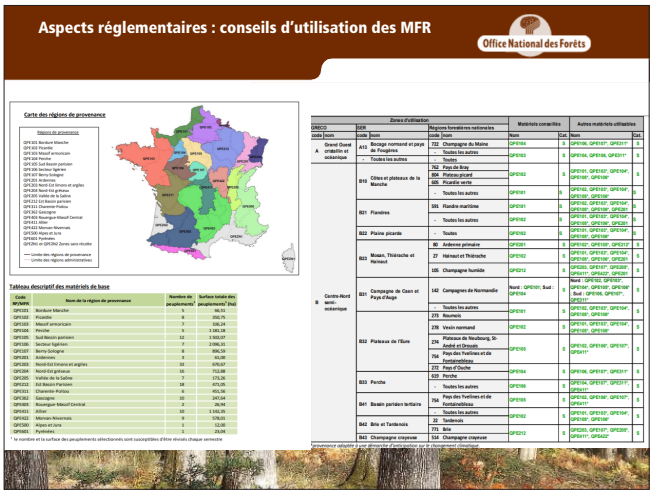
De manière générale, les forêts s'adaptent toutes seules, de façon autonome mais c'est très progressif et, comme l'a dit Jean-François Dhôte, les choses vont changer beaucoup plus rapidement que ce dont on a l'habitude.
Or notre mission de forestiers, c'est de faire en sorte que la forêt puisse continuer à fournir les mêmes ressources et rendre les mêmes services à la société. Comment ? Il faut aujourd'hui préparer demain et après-demain, c'est-à-dire avoir des espèces qui s'adaptent localement aux conditions climatiques actuelles mais aussi aux conditions climatiques qui régneront dans 50, 100 ou 150 ans. L'enjeu est d'autant plus important que l'espèce est plus longévive. Jusqu'ici, la foresterie a vécu sur l'expérience historique ou sur des connaissances issues de recherches menées dans un climat supposé stable. Mais aujourd'hui tout change et ce n'est pas un simple phénomène de translation, de déplacement. De multiples facteurs entrent en ligne de compte et on sait qu'ils vont évoluer, mais on ne sait pas forcément dans quel sens. Par conséquent, nous allons aussi devoir évoluer, changer un certain nombre de concepts, et c'est loin d'être évident. Nous avons besoin d'une adaptation active, besoin d'agir maintenant malgré les questions en suspens et les risques. Une des solutions, c'est le transfert d'espèce ou de provenance, c'est la migration assistée.

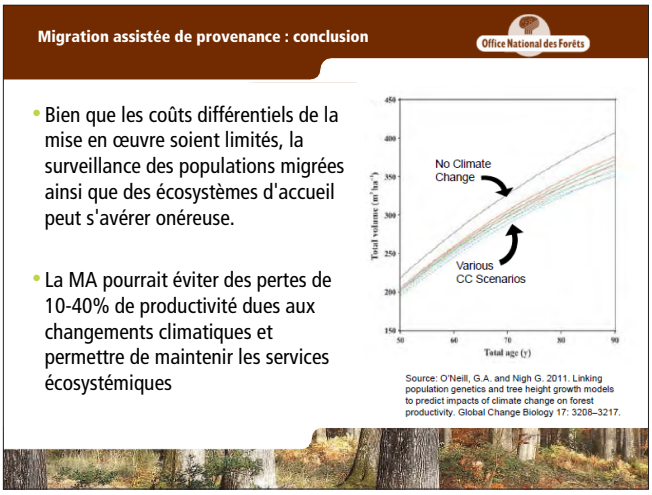
Qu'est-ce que la migration assistée ?

Il s'agit tout simplement d'aider les espèces à « suivre » ou retrouver un climat qui leur convient, en leur faisant parcourir le chemin qu'elles ne peuvent pas faire naturellement. Ce concept englobe des pratiques à plusieurs échelles. Il y a d'abord la migration assistée des populations (des provenances), une action assez simple que le département RDI a commencé à mettre en œuvre avec le projet GIONO. C'est un déplacement voulu, en réponse au changement climatique, mais qui reste à l'intérieur de l'aire de distribution de l'essence : on amène dans le cœur de l'aire une provenance de la marge sud.



[NDLR : les signes ° et Δ sur les courbes sont sans rapport avec la présentation]



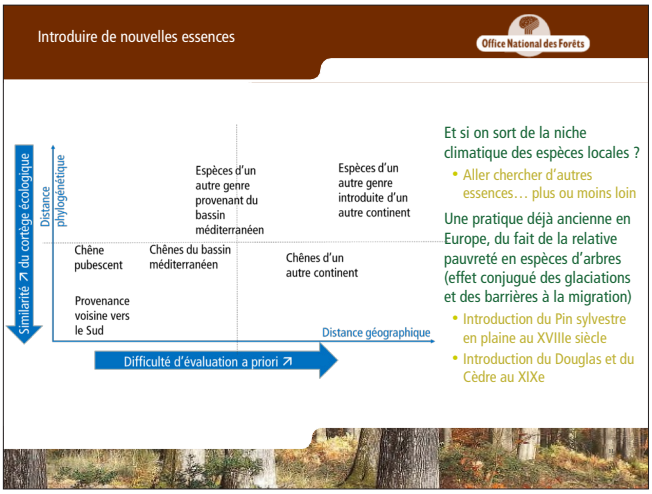


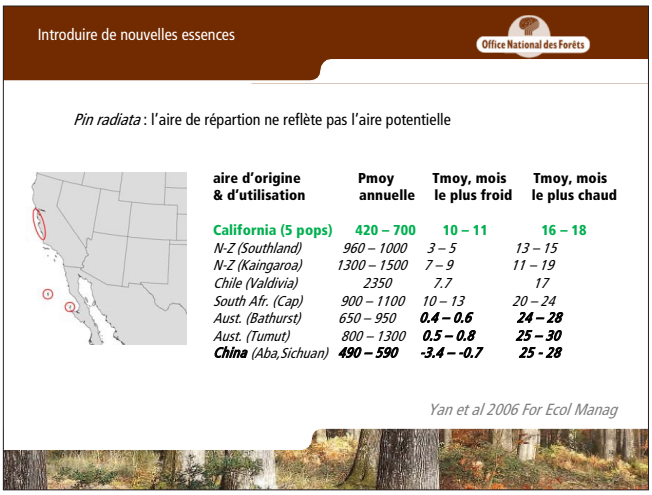
On peut ensuite installer l'essence en limite de son aire de distribution, juste un peu au-delà, dans des conditions un peu limitantes, en tout cas au début. On prend donc des risques plus importants.
Enfin, la dernière forme de migration assistée se fait à très longue distance, complètement en dehors de l'aire de répartition de l'espèce. Ça s'est beaucoup fait, mais dans un autre contexte, pour des essences comme le Douglas ou le chêne rouge.

Pour la **migration assistée de provenances**, l'important c'est la variabilité intra-spécifique, illustrée par ces graphiques qui résultent des travaux présentés par Antoine Kremer sur la réponse des populations de chêne au transfert d'une région à l'autre. Réponse pour les critères de survie (en haut) et croissance en hauteur (en bas), en fonction d'un indice de distance climatique représentant respectivement la sécheresse annuelle et la sécheresse durant la saison de végétation.
Il y a au sein des (et parmi les) populations des arbres forestiers un vivier de diversité - donc de possibilités d'adaptation - très important qui permet d'évoluer dans la continuité, en déplaçant des provenances de la même essence. Ça n'est pas absolument sans risque, on n'est pas à l'abri d'une survie ou d'une qualité de bois un peu plus faible, mais la sylviculture va pouvoir aussi jouer. En conservant globalement la même ressource et le même paysage, on minimise le besoin d'adaptation forestière et sociétale. L'avantage est aussi que l'apport de provenances pertinentes agit sur le vivier de la ressource génétique locale en y introduisant de nouveaux gènes, par exemple pour une meilleure résistance à la sécheresse. Il ne s'agit pas de remplacer la ressource locale, mais de faire de l'enrichissement génétique de nos populations. Et enfin la migration assistée de provenance est relativement facile à mettre en œuvre.

Dernièrement, Irstea a fait un énorme travail de révision des aspects réglementaires des conseils d'utilisation des matériels forestiers de reproduction. Les documents récapitulant ces conseils sont disponibles sur le site du ministère de l'Agriculture. On voit ici, par exemple, les différentes régions de provenance du chêne sessile : la révision de la fiche conseil a permis, pour les différentes zones d'utilisation, d'ouvrir le recours à de nouvelles provenances au titre de la migration assistée. Le paradigme qui veut que la provenance locale soit ce qu'il y a de mieux n'est pas vraiment remis en cause, mais si on veut commencer à évoluer, on en a la possibilité réglementaire. Dans la dernière colonne du tableau des conseils d'utilisation, « Autres matériels utilisables », certaines provenances sont assorties d'un astérisque qui signifie que le ministère les autorise pour une démarche d'anticipation du changement climatique. C'est une application pratique des résultats de recherche dont Antoine Kremer a parlé, en particulier des résultats des tests de provenance de La Petite Charnie.

Tout n'est pas rose pour autant : on va avoir besoin de tracer correctement ce que l'on fait. Il va falloir surveiller ces populations migrées, et voir comment les écosystèmes vont s'adapter ; il peut y avoir des échecs. Cela va demander de la formation et de l'investissement en forêt, ce qui peut se révéler assez onéreux. Toutefois la migration assistée pourrait éviter des pertes de 10 à 40 % de la productivité, c'est aussi à prendre en compte : on prend un risque mais un risque mesuré et qui, au final, peut être très fructueux.
Mais voyons plus loin avec à la **migration assistée d'espèces**. Il s'agit de choisir des espèces à installer en dehors de leur aire de répartition. L'ennui, c'est qu'on a beaucoup moins d'informations disponibles sur les réactions possibles des plants. Alors comment raisonner ?





Voici un schéma pour illustrer la situation, appliqué à la chênaie. Le plus simple, quand on sort localement de la niche climatique, c'est d'aller chercher plus au sud des provenances voisines qui auront moins de difficultés à s'adapter. C'est la migration assistée de provenances, dont nous venons de parler. On peut donc continuer à utiliser des ressources génétiques de même essence mais à une certaine distance géographique (cf. axe horizontal).

On peut aussi augmenter la distance phylogénétique (axe vertical) en choisissant cette fois d'autres essences. Des essences présentes sur le territoire qui, comme le chêne pubescent, appartiennent au même complexe d'espèces (les « chênes blancs ») et qui peuvent se mélanger naturellement avec l'essence locale ; ou bien des chênes du bassin méditerranéen. L'avantage, c'est que c'est relativement peu coûteux et peu risqué parce que, par exemple, les cortèges de pathogènes ont co-évolué avec les espèces de chênes. En poussant plus loin, on peut aller chercher des chênes d'un autre continent : il y a en Amérique du Nord ou de l'autre côté de la Méditerranée de nombreux chênes qui s'apparentent à des chênes européens.

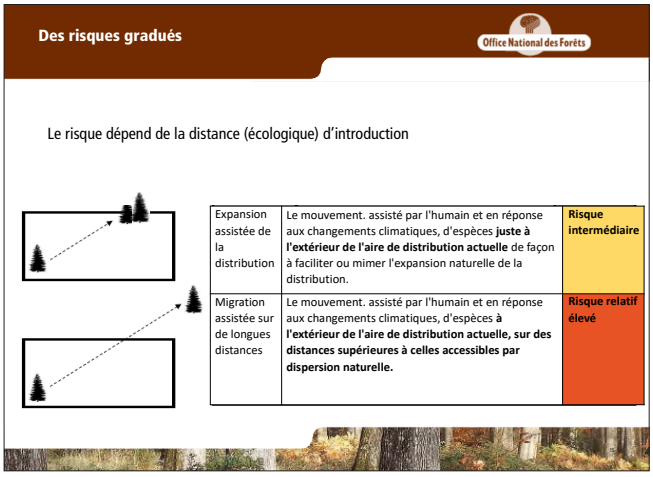
Enfin on peut augmenter encore la distance phylogénétique en allant chercher des espèces d'un autre genre : soit des espèces du bassin méditerranéen, et là encore on limite les risques au niveau des pathogènes, soit carrément des essences introduites dans notre continent. Ceci a déjà été fait pour un certain nombre d'espèce avec des réussites mais aussi des échecs.

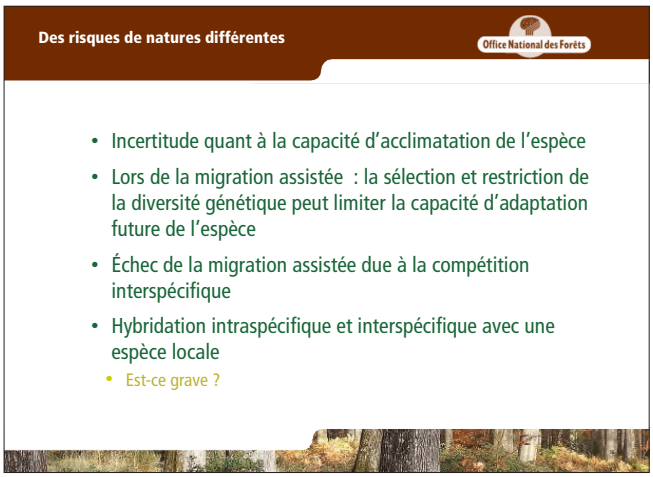
On peut penser que la méthode est assez simple : on repère les besoins écologiques, l'aire de répartition bioclimatique des essences possibles, on regarde où se trouvent (se trouveront) ces conditions en France, et on fait le transfert. Oui… mais non ! Quand on a affaire à une essence dont l'aire de répartition est très petite, on suppose *a priori* qu'elle n'est pas très capable d'adaptations pédoclimatiques, que sa diversité génétique est relativement faible. Or ce n'est pas forcément le cas : le pin de Monterey *(Pinus radiata)* en est un contre-exemple éclatant. Son aire naturelle de répartition est minuscule, c'est la baie de Monterey en Californie. Pourtant il a été implanté un peu partout dans le monde, de la Californie jusqu'à la Chine en passant par l'Afrique du Sud, et les conditions dans lesquelles il peut survivre et prospérer sont très différentes de celles de la population d'origine. C'est plutôt une bonne nouvelle, mais c'est un peu embêtant car la méthode simple pour proposer de nouvelles essences… n'est finalement pas si simple.

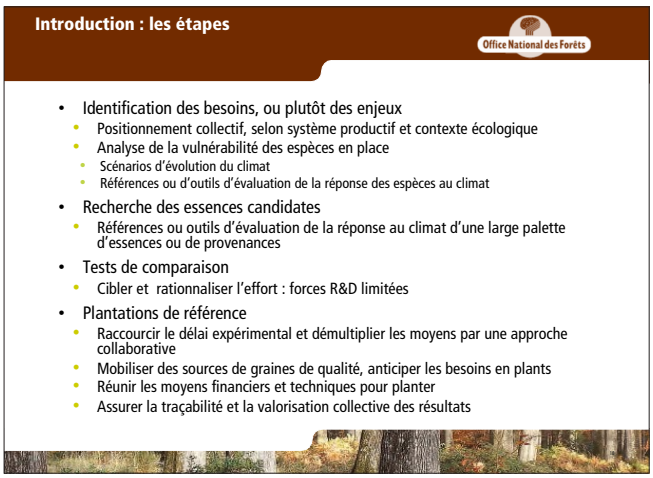
La migration assistée présente des risques et incertitudes

Pour situer un peu les choses, concernant les questions que pose le recours à la migration assistée pour l'adaptation des forêts au changement climatique nous avons esquissé une analyse SWOT (Strengths = forces ; Weaknesses = faiblesses ; Opportunities = opportunités ; Threats = menaces). Rappelons d'abord les forces :

- la marge d'adaptation climatique est assez importante du fait de la diversité génétique des essences ;
- il y a une bonne intégration dans le schéma de diversification/test voulu par le PNFB (Programme national de la forêt et du bois), en cohérence avec le PNACC (plan national d'adaptation au changement climatique) et ça commence à apparaitre dans les aménagements forestiers à l'occasion des révisions ;
- la palette de solutions est très large, eu égard au nombre des espèces existant en Europe ou aux États Unis par exemple.







Mais il y a des faiblesses :
- on a des lacunes en autoécologie : on ne connait pas très bien toutes les espèces et on a parfois des surprises (cf. Pinus radiata) ;
- on manque de moyens en termes d'investissements forestiers ;
- on a aussi un problème de société car plantation et introduction de nouveau matériel sont assez mal vus.

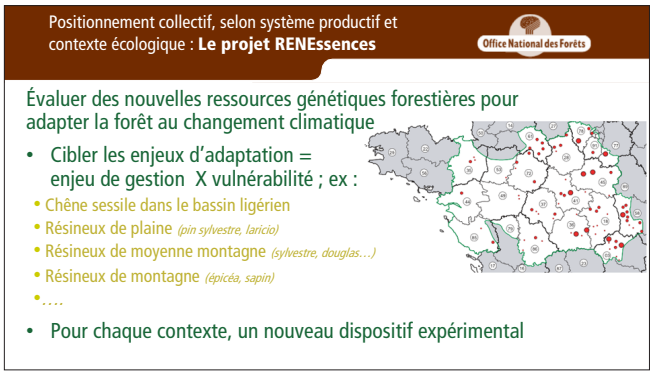
Nous sommes bien conscients de ces faiblesses, ainsi que des risques, notamment :
- des risques techniques : on a peut-être des progrès à faire au niveau des plantations et du sol (les collègues de la R&D y travaillent) ;
- des risques écologiques : il ne s'agit pas d'introduire tout et n'importe quoi, qui puisse se disséminer et envahir complètement la flore locale.

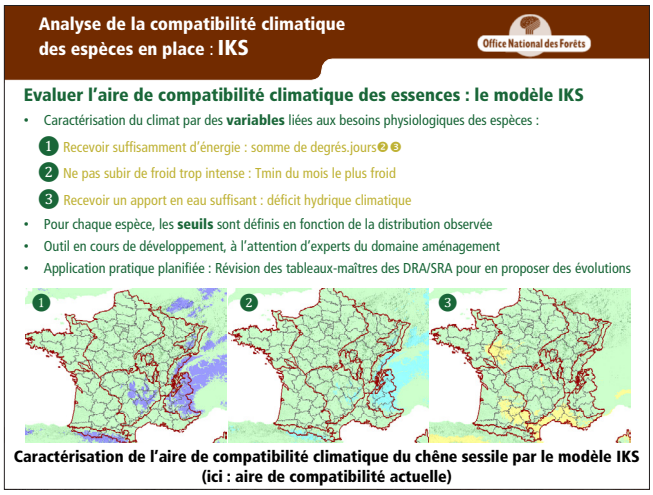
Ce risque, on doit le prendre raisonnablement, car ne rien faire serait la pire des solutions. On a vu précédemment qu'il y a une gradation, selon la distance (écologique) d'introduction. Le risque peut être qualifié d'intermédiaire si on se place en limite d'aire et qu'on fait appel à nos cousins du bassin méditerranéen ; mais si on cherche beaucoup plus loin, chez les chênes voisins nord-américains ou chinois, le risque est beaucoup plus élevé.

Indépendamment des aspects techniques ou sociétaux, le risque inhérent à l'introduction d'une espèce revêt plusieurs aspects. On a des incertitudes sur les capacités d'adaptation de l'espèce et on peut aussi avoir des échecs dus à la compétition interspécifique : on n'est pas sûr de pouvoir réussir. Et puis il y a la question, que l'on nous pose souvent, de l'éventuelle hybridation avec les ressources (les essences) locales : que va-t-il se passer ? Est-ce que les hybrides auront une capacité d'adaptation supérieure ou au moins égale à celle de leurs parents ? Ne risque-t-on pas de perdre les ressources locales ? Mais on pourrait aussi retourner la question : est-ce si grave docteur ? Et est-ce que le jeu (l'enjeu) n'en vaut pas la chandelle ?

Les principes étant posés, parlons stratégie et outils

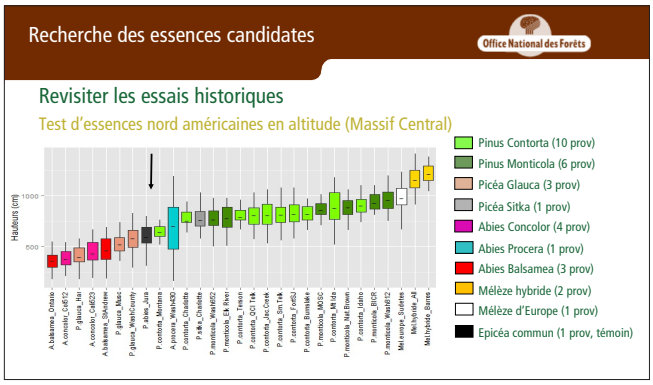
Voyons d'abord les grandes étapes, avant d'entrer dans le détail.
Il faut commencer par identifier les besoins, ou plutôt voir où sont les **grands enjeux d'adaptation**, les enjeux économiques pour toute la filière ; c'est important d'avoir un positionnement collectif sur cette question. Il nous faut aussi cerner la réaction probable des espèces en place, poser des diagnostics de vulnérabilité de la ressource avec des outils qu'on est en train de mettre au point.
Ensuite, il va falloir **rechercher des espèces candidates** pour la migration assistée. On ne part pas de zéro. On va voir ce que les tests anciens (tests génétiques, espèces) peuvent nous enseigner et comment on va pouvoir s'en servir.
Enfin on va amorcer la **mise en œuvre sur le terrain**, en travaillant selon une démarche collaborative. C'est aussi ce qui nous rassemble dans ce séminaire : partager, entre la R&D, le département Forêts et les gestionnaires, cet effort collectif face aux grandes questions que pose le réchauffement climatique. Le partager aussi au-delà de de l'ONF, avec les collègues de la recherche et de la forêt privée ; car les questions qu'on se pose en forêt privée ou en forêt publique sont les mêmes. On y travaille au sein du RMT Aforce (Réseau Mixte Technologique pour l'Adaptation des FORêts au Changement climatiquE) dont la plupart des projets sont maintenant déposés conjointement.

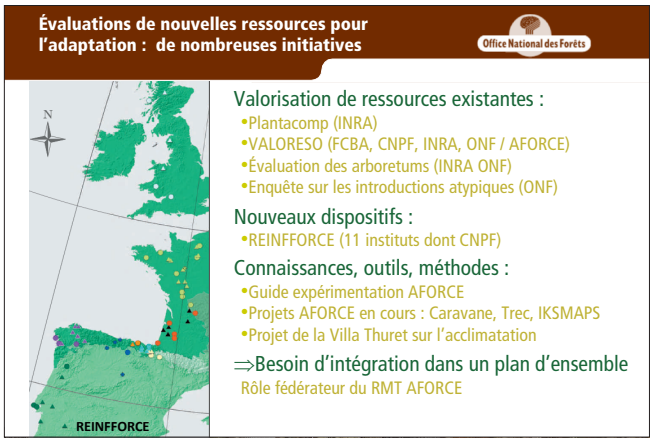




Caractérisation de l'aire de compatibilité climatique du chêne sessile par le modèle IKS (ici : aire de compatibilité actuelle)

En couleur (violet, bleu, jaune), les zones d'incompatibilité (dépassement du seuil) pour la variable climatique considérée





Cibler les grands enjeux d'adaptation, c'est un travail que mène Yves Rousselle avec le projet RENEssences (Réseau d'Evaluation de Nouvelles Essences) du département RDI.
Pour voir quels sont les principaux enjeux d'adaptation, il faut croiser les questions majeures du point de vue de la gestion (importance économique de telle ou telle ressource pour la France, surfaces concernées) avec la vulnérabilité. Un certain nombre d'enjeux économiques ont ainsi été listés, et celui qui ressort en premier, sans surprise, c'est le chêne sessile dans le secteur ligérien. Mais pour ce qui concerne la vulnérabilité, comment approcher la question ?

En pratique, on cherche à estimer l'aire de compatibilité climatique des essences dans le temps, et le modèle IKS que Myriam Legay développe va nous y aider. Ce modèle IKS caractérise le climat par trois variables liées aux besoins des espèces, qui sont :
1/ recevoir assez d'énergie (nombre de degrés.jour) ;
2/ ne pas subir trop de froid intense (température minimum du mois le plus froid) ;
3/ recevoir assez d'eau pour pouvoir continuer à pousser (déficit hydrique climatique).
Pour une espèce donnée, des seuils sont définis en fonction de la distribution observée. En comparant un climat actuel ou futur avec ces seuils, ici pour le chêne sessile, le modèle fournit des cartes de compatibilité climatique pour les 3 critères, soit de gauche à droite : l'énergie, le froid, et l'eau. Dans le secteur ligérien, on voit une tache jaune qui indique que la zone de compatibilité du chêne sessile est déjà limite et risque de se réduire avec le temps, du fait du déficit hydrique.
Dans un premier temps cette démarche a été appliquée au chêne sessile et au hêtre, et maintenant elle est ouverte à une dizaine d'espèces.

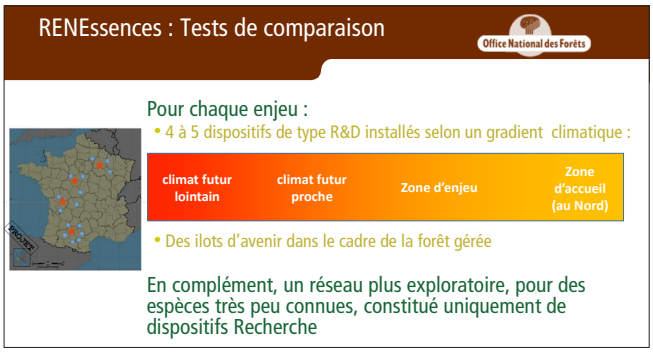
Ensuite, **comment trouver des essences qui conviennent ?** On peut déjà revisiter, avec les collègues de l'INRA notamment, l'ensemble de nos essais anciens (y compris les arboretums) sous un angle nouveau. En voici un exemple parlant (mais qui n'a rien à voir avec la chênaie) : un test d'essences résineuses diverses dans le Massif Central. En noir, c'est l'épicéa, qui pousse localement et sert de témoin, et en couleurs, ce sont les différentes espèces testées (une espèce = une couleur) : des espèces américaines de pins, sapins ou épicéas, et aussi des mélèzes. Le test portait aussi sur la variabilité au sein d'une espèce : voir si (et comment) les diverses provenances expriment des différences. Les résultats sont ordonnés ici selon la performance de croissance en hauteur, et on voit bien que ce dispositif, qui a plus de 20 ans, offrait de ce point de vue des solutions qui pouvaient être bien meilleures que l'épicéa. Ce faisant, il apporte aussi des informations précieuses sur les espèces et, à l'intérieur des espèces, sur la diversité génétique et les provenances.

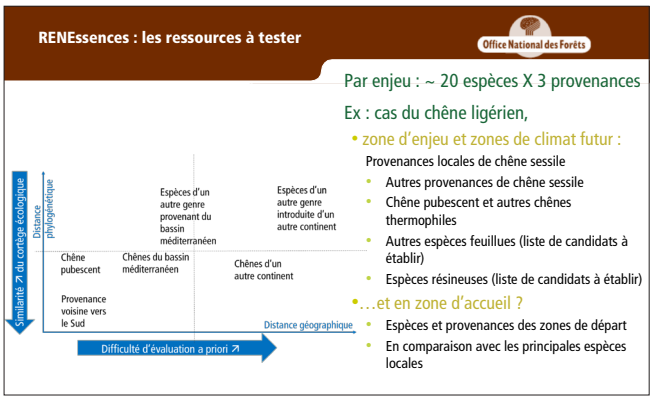
Mais on compte aussi sur de nouveaux dispositifs, comme le réseau REINFFORCE (RÉseau INFrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des FORêts au Changement climatiquE). Ce réseau, représenté sur la carte, consiste en un ensemble d'arboretums et de sites de démonstration pour suivre l'adaptation de 32 espèces forestières au changement climatique : il a été mis en place sur l'arc Atlantique il y a 7-8ans et a déjà fait l'objet de premières analyses à 5 ans. On a donc des connaissances certaines. On a aussi, avec le RMT AFORCE, des outils et méthodes pour aider à passer à l'action : un guide d'expérimentation et des applications en cours de développement. Et on tâche d'intégrer tout ça dans un plan d'ensemble.

Le RMT AFORCE – Adaptation des forêts au changement climatique

AFORCE est un réseau mixte technologique (RMT) qui a pour objectif d'accompagner les forestiers dans l'adaptation des forêts aux changements climatiques tout en renforçant leur capacité d'atténuation. https://www.reseau-aforce.fr/

Un RMT est une forme de partenariat née de la loi d'orientation agricole de janvier 2006 et qui vise à développer des relations de travail approfondies entre acteurs Recherche – Formation – Développement agricole ou forestier sur des thèmes d'intérêt commun à vocation nationale, et constituer ainsi des groupements de compétences visibles et reconnus sur une thématique de développement.





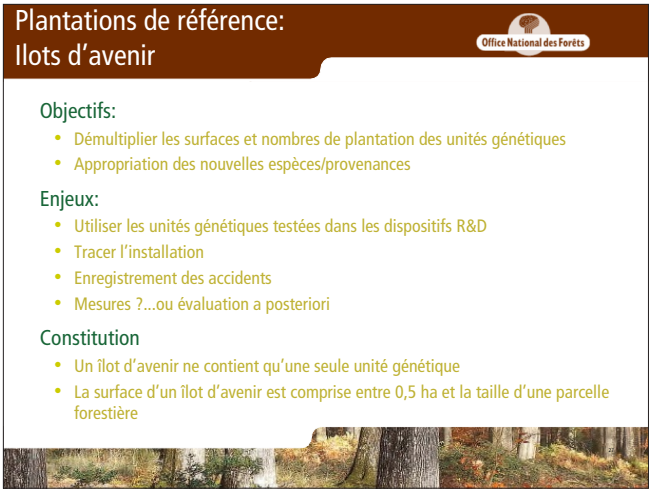
Le choix des essences est loin d'être évident, et c'est pour le guider que nous avons conduit, sous l'égide du RMT AFORCE (voir encadré), le projet CARAVANE (CAtalogue RAisonné des VAriétés Nouvelles à Expérimenter). Le travail a consisté tout d'abord à collecter toute la bibliographie et toutes les informations disponibles (données terrain, données d'anciens dispositifs) sur plus d'une centaine d'espèces. Tout cela a été compilé dans des fiches essences et transposé sous la forme d'une base de données interrogeable à distance, où ces informations sont organisées selon 37 critères : le type de sol sur lequel pousse l'essence, la productivité, la qualité du bois, la résistance à la sécheresse, etc. La base donne accès pour certaines espèces aux cartes de compatibilité et graphes de facteurs limitants d'IKS, et fournit une cartographie des références (sites des essais expérimentaux incluant l'essence considérée). Toutes ces informations vont être accessibles grâce à l'application Caravaniks (nom provisoire) qui verra le jour, en test dans un premier temps, début 2019.

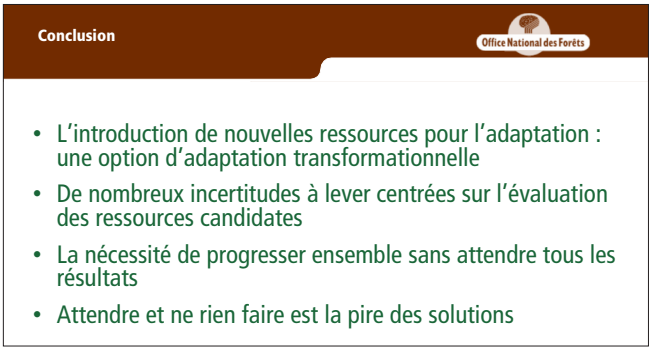
Ceci dit, l'information de terrain disponible provient de dispositifs qui avaient été mis en place pour trouver la meilleure espèce/provenance au meilleur endroit. En conséquence, ces dispositifs ne répondent que très partiellement à ce qui nous intéresse aujourd'hui : le comportement des espèces/provenances en limite d'aire et non pas au cœur de l'aire. Il va donc falloir **installer de nouveaux tests de comparaison** dans des conditions un peu extrêmes. C'est ce proposent le projet RENEssences de l'ONF (département RDI) et plus largement le projet multipartenaire ESPERENSE.

Prenons le cas de la chênaie ligérienne : quelle essence pour maintenant et pour le futur, dans 30 ans et dans 50 ans ? Comme on ne peut pas se déporter dans le temps, on va chercher, à travers la projection des scénarios climatiques, où trouver actuellement les conditions du futur : c'est par exemple dans les Charentes ou, encore plus drastique, dans le Sud-Ouest. Nous allons donc implanter dans ces différents endroits les mêmes dispositifs avec les mêmes espèces. De même, on peut chercher des zones d'accueil plus au nord pour le chêne de Bercé ; des zones de repli pour notre production. Et parce que ça ne suffit pas, parce qu'on n'a pas le temps d'attendre les résultats, nous vous proposons de **compléter ces dispositifs R&D par des îlots d'avenir**, les petits satellites bleus sur la carte.

En pratique, pour chacun des grands enjeux, nous voulons prospecter le plus largement possible : une vingtaine d'espèces et 3 provenances pour chacune, soit une soixantaine d'unités génétiques. Pour la chênaie, l'idée est de tester :

- deux ou trois provenances de chêne sessile (migration assistée simple) ;
- d'autres essences de chênes : chêne pubescent et autres chênes thermophiles, que l'on pourrait aller chercher autour du bassin méditerranéen ;
- d'autres essences de feuillus voire peut-être aussi des essences résineuses pour parer à toute éventualité (situations très contraignantes) ;
- et, en zone d'accueil, nos provenances de chêne ligérien.





Nous allons rechercher des terrains pour l'installation de ces dispositifs R&D, qui représentent quelque 4 300 nouveaux plants sur 4 à 5 ha. Nous essaierons de les caractériser de la manière la plus fine possible à travers le climat, le sol, et un suivi sanitaire. Et nous y ferons des mesures périodiques (tous les 5 ans par exemple) de survie, de hauteur, de croissance, etc.
Dans le même temps, nous comptons sur les services de gestion pour implanter des îlots d'avenir qui viendront compléter cet effort nécessaire et considérable, mais forcément limité. L'objectif c'est de démultiplier en surface et en nombres de plantation les unités génétiques, afin d'explorer le plus possible de conditions pédoclimatiques. L'avantage est aussi d'**avancer ensemble, R&D et services de gestion**, car la rapidité des changements climatiques ne permet plus d'attendre une réponse ferme de la recherche avant de se lancer : il faut tester des choses avec une prise de risque aussi pour le gestionnaire.

L'idée c'est d'utiliser les mêmes unités génétiques, celles qui auront été définies pour l'enjeu concerné (en l'occurrence pour la chênaie du bassin ligérien), et de bien tracer l'installation, enregistrer les accidents. Il y a là un gros challenge : être capable de faire remonter l'information et de la stocker correctement pour pouvoir ensuite l'analyser. Enfin, pour nous, un îlot d'avenir n'est constitué que d'une seule unité génétique (mais c'est encore en tractation) et sa surface est au minimum de 0,5 ha pour avoir suffisamment d'individus et qu'on puisse en tirer quelque chose, aussi en termes de sylviculture.

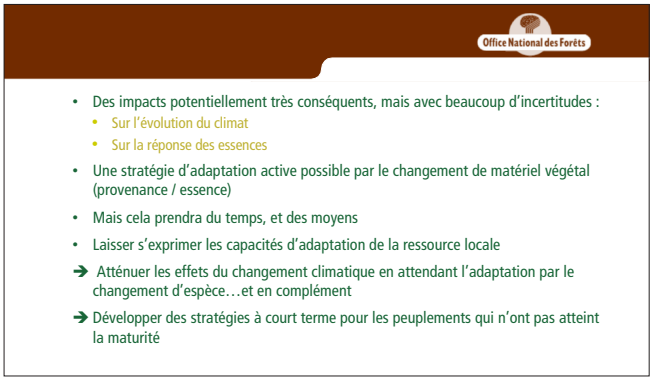
J'en arrive à la conclusion

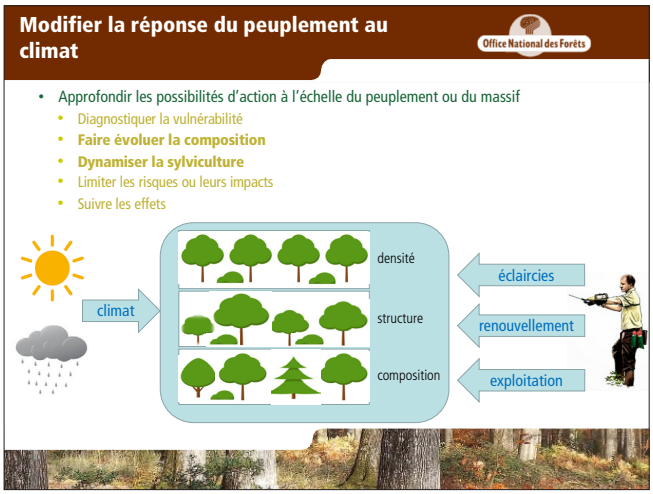
L'introduction d'une nouvelle ressource pour l'adaptation, c'est une option mais une option qui nécessite de transformer les choses. Or ce n'est pas facile de transformer, de changer la façon dont on fonctionnait jusqu'à présent. On a de nombreuses incertitudes, mais il va falloir s'habituer à vivre avec. Et il y a vraiment une nécessité impérieuse de travailler tous ensemble : au-delà de la recherche en forêt publique / forêt privée avec les organismes de recherche, on a besoin pour ces nouvelles actions de travailler aussi avec les gestionnaires. Encore une fois, attendre et ne rien faire serait la pire des solutions ; il faut diversifier nos approches et nos méthodes.

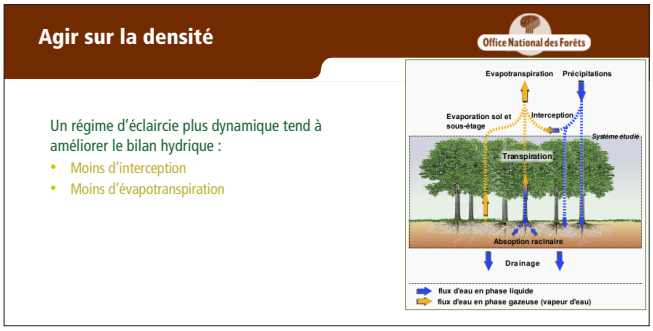
Merci pour votre attention.

QUELS LEVIERS D'ADAPTATION DANS LA SYLVICULTURE ?

Myriam Legay
ONF, cheffe du département recherche, développement et innovation (RDI)







Last but not least, il y a des leviers d'adaptation dans la sylviculture, à mettre en œuvre avec discernement.

Cet exposé a été préparé avec Lucie Arnaudet, qui a fait tout le travail de lien entre les questionnements du terrain, dûment recueillis en prévision du séminaire, et les travaux scientifiques.

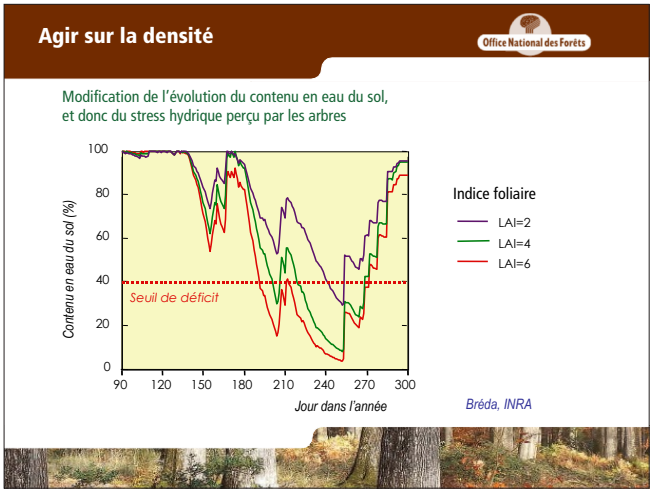
Nous avons a vu que le changement climatique met en perspective des impacts potentiellement très importants, avec beaucoup d'incertitudes sur l'évolution du climat comme sur la réponse des essences. Et vous avez pu percevoir que Jean-Francois Dhôte, Brigitte Musch et moi-même sommes convaincus que l'option la plus décisive pour l'adaptation, c'est le changement de matériel génétique. Cependant ça demande du temps et des moyens, on ne pourra pas le faire partout et il n'est d'ailleurs pas souhaitable de le faire partout : il est nécessaire aussi de laisser s'exprimer tout le potentiel d'adaptation de la ressource locale, dont a parlé Antoine Kremer.
Il faut donc rechercher des solutions pour amortir les effets du changement climatique en attendant ce changement de matériel génétique et pour le compléter. Et développer des stratégies à court terme pour les peuplements qui n'ont pas atteint la maturité.

Parmi les 5 orientations d'adaptation qui concluaient ma précédente intervention, je vais me concentrer ici sur les points 2 et 3, qui se jouent à l'échelle du peuplement : faire évoluer la composition – avec les ressources en place – et dynamiser la sylviculture.
L'idée, c'est que par la sylviculture et les éclaircies, par les travaux de renouvellement mais aussi par les techniques d'exploitation mises en œuvre pour réaliser tout ça, le forestier agit sur le peuplement et notamment sur ses caractéristiques de **densité, structure et composition.** Ces caractéristiques influencent la réponse que le peuplement va avoir au climat ; nous allons donc les considérer comme des leviers.

Agir sur la densité du peuplement

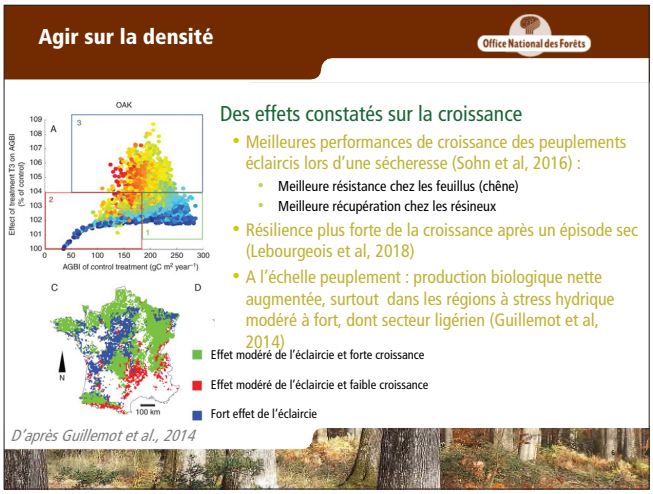
Pour commencer, voyons en quoi, en modifiant la densité, le forestier peut modifier la réponse du peuplement au climat.

Pour cela, il faut d'abord parler de bilan hydrique, schématisé dans le dessin. On y voit les flux d'eau dans un peuplement, en bleu pour les flux en phase liquide et en jaune pour les flux en phase gazeuse. Il y a des flux sortants, à commencer par l'évapotranspiration de l'étage principal, du sous-étage et du sol. D'autre part il y a le flux entrant des précipitations, dont une partie est interceptée et s'évapore sans aller jusqu'au sol, une partie traverse et alimente le sol, et la fraction en excès ressort (drainage). Le bilan hydrique c'est la résultante de de l'ensemble. L'idée, c'est qu'un régime d'éclaircie plus dynamique tend à améliorer le bilan hydrique parce qu'un peuplement un peu moins dense occasionne moins d'interception des pluies et suscite aussi moins d'évapotranspiration.



Indice foliaire : *indice de surface foliaire (Leaf area index) = LAI ; c'est la surface de toutes les feuilles du peuplement ramenée à la surface du sol. Le lien avec la densité du peuplement n'est pas direct et pas très simple, surtout chez les feuillus, mais il y a quand même un lien : plus c'est dense, plus il y a de feuilles et plus la surface foliaire est élevée.*

Seuil de déficit : *seuil d'entrée en stress hydrique ; l'idée un peu dure à admettre mais il semble bien que, quel que soit le réservoir en eau du sol, les arbres sont stressés quand ils commencent à descendre en dessous de 40% de la réserve utile.*



Les zones de la carte en vert, rouge et bleu correspondent respectivement aux cadres vert (numéroté 1), rouge (numéroté 2) et bleu (numéroté 3) du graphique

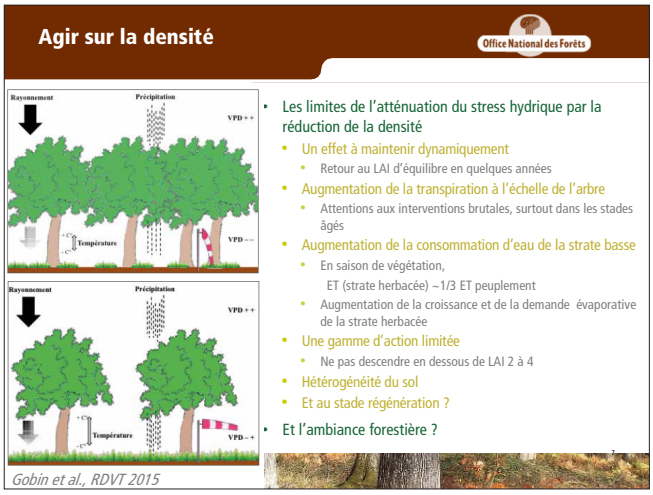
La sécheresse perçue par les arbres, c'est avant tout la sécheresse dans le sol, et pas directement l'absence de pluie. Donc un peuplement moins dense, qui est évapotranspirant mais qui laisse mieux pénétrer l'eau sous le couvert, c'est un peuplement dont l'histoire du réservoir du sol au fil de l'année n'est pas du tout la même. C'est ce que représente ce graphique, issu du travail de Nathalie Bréda (INRA). C'est un schéma théorique obtenu par modélisation ; il indique le pourcentage de remplissage du réservoir en eau du sol, en fonction des jours de l'année. Les courbes en couleurs représentent l'évolution du remplissage de ce réservoir pour trois peuplements de densités et donc de surfaces foliaires (LAI) différentes : en violet, c'est un peuplement très clair, comme un verger ; en rouge, c'est un peuplement forestier dense. On voit que le sol du peuplement le plus dense se vide beaucoup plus vite, qu'il se recharge moins en eau de pluie et passe donc beaucoup plus tôt sous le seuil critique de 40% (ligne pointillée) qui marque l'entrée en stress hydrique. En fin de compte, le peuplement très clair subit un stress beaucoup plus limité que le peuplement dense. Le stress hydrique ce n'est pas que du climat, ni même du climat et du sol ; c'est du climat, du sol et du peuplement.

Cette idée reste cependant assez théorique ; on n'est pas encore capable d'évaluer une sylviculture ou de dire que si on suit tel itinéraire sylvicole, le stress hydrique sera diminué de tant par rapport à tel autre itinéraire. Une des difficultés, c'est de faire le lien entre les paramètres dendrométriques facilement mesurés par un forestier et le LAI qui n'est pas une donnée simple. Néanmoins on peut simuler les effets de ce genre de chose dans un certain nombre de modèles, dont les modèles écophysiologiques, basés sur les processus (cf. exposé introductif).

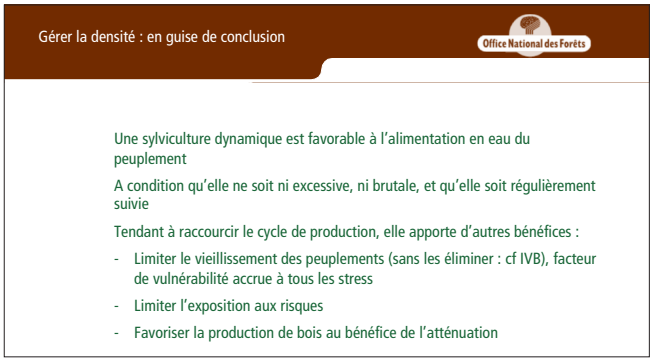
Ici je donne l'exemple d'une étude à l'échelle de la France avec le modèle CASTANEA, un modèle basé sur les processus (pour le chêne, le hêtre et le sapin notamment) dont les simulations sont particulièrement crédibles. On a ici pour le chêne des représentations de la productivité et de l'effet des éclaircies suivant les conditions climatiques. Sur le graphique du haut on a, en abscisses, un gradient de productivité et, en ordonnées, un gradient d'efficacité des éclaircies sur la productivité. Il est intéressant de constater que les éclaircies améliorent la production biologique, mais que cet effet est variable au plan bioclimatique. Et il se trouve que le secteur ligérien est dans la zone où la sylviculture est en quelque sorte la plus efficace. Dans des zones de productivité faible comme au voisinage du bassin méditerranéen, ou à l'inverse dans les zones de productivité très forte comme le Grand Est, la sylviculture est moins efficace que dans les zones de productivité intermédiaire. Donc actuellement cet effet des éclaircies est très fort dans le type de domaine écologique où se trouve le secteur ligérien.

Il y a par ailleurs d'autres résultats, établis selon des approches très différentes, qui montrent que dans un peuplement éclairci on a une meilleure résilience de la croissance après un épisode sec. Ça a été montré par des approches de type dendrochronologie ; plus généralement, c'est montré dans de nombreux travaux et il y a même eu des méta-analyses, comme celle de Sohn *et al.* (2006) qui montre d'ailleurs que ça se manifeste de façon un peu différente chez les feuillus et chez les résineux. Chez les feuillus, les peuplements éclaircis ont une meilleure résistance à la sécheresse (la productivité chute moins lors de la sécheresse), tandis que chez les résineux, ils ont une meilleure récupération. Ce qui est assez logique quand on prend en compte le comportement de ces espèces par rapport à la sécheresse.

L'effet de l'action sur la densité a évidemment des limites.
La première, c'est qu'il faut maintenir dynamiquement cet effet : si on fait une éclaircie et qu'on laisse le peuplement évoluer, le LAI se rééquilibre rapidement avec les potentialités de la station. Pour maintenir constamment l'effet éclaircie, il faut avoir **une sylviculture soutenue et régulière.**
La deuxième limite c'est que la transpiration diminue à l'échelle du peuplement mais qu'elle augmente à l'échelle de l'arbre : le houppier de chaque arbre est plus isolé. Comme l'a dit Christine Deleuze, selon qu'on observe à l'échelle de l'arbre ou à celle du peuplement, on ne voit pas la même chose. Ça signifie qu'il faut faire **attention aux interventions brutales**, surtout dans les stades âgés. On a vu notamment, dans des essais sylvicoles de type détourage, des mortalités ou des apparitions de gourmands que l'on peut sans doute relier à ça : l'arbre est brusquement soumis à des conditions différentes, il doit rééquilibrer ses allométries, notamment le rapport entre ses racines et son houppier, et ça peut être assez nuisible pour les arbres âgés.
La troisième limite, c'est que **trop abaisser la densité profite à la strate basse**. En saison de végétation, la strate basse représente une part de l'ordre du tiers de l'évapotranspiration du peuplement, ce qui n'est pas négligeable (c'est bien sûr très variable selon le contexte). En faisant des éclaircies fortes, on augmente la demande évaporative, on augmente la chaleur et la lumière reçues par la strate basse qui, par conséquent, grandit et transpire plus. On ne peut donc pas aller très loin dans la réduction de la densité ; on ne peut pas espérer sauver les peuplements de sécheresses extrêmes avec simplement des éclaircies qui seraient très fortes. En gros, il faut faire une sylviculture dynamique et le guide en vigueur actuellement est, je pense, tout à fait dans la gamme de LAI qu'il faut rechercher.



Gobin et al., RDVT 2015



Ensuite, il y a des réserves de nature un peu différente. Derrière la préconisation sur la densité, il y a l'idée que tous les arbres boivent dans un même réservoir -la réserve utile du sol- et qu'avec moins d'arbres le niveau baisse moins. Mais le sol n'est pas une cuve où les flux seraient sans frein ; il y a des hétérogénéités. On connait le réservoir de façon théorique mais sans pouvoir vraiment l'appréhender.
Par ailleurs, la recommandation n'est pas à mettre en œuvre de façon homogène sur tous les types de peuplement. En particulier, il faut faire **attention au stade de la régénération, car c'est là que se jouent tous les phénomènes de pression de sélection** dont Antoine Kremer a parlé. Il est bon de conserver un grand nombre de jeunes semis, exposés à une pression de sélection qui conduira à une élimination forte ; c'est essentiel pour que les sujets stabilisés soient de préférence les moins gourmands en eau. La préconisation de diminution de la densité concerne les stades plus avancés qui relèvent des coupes d'éclaircie.

Que dire enfin de **la fameuse ambiance forestière ?** C'est une affaire de point de vue : ça n'existe pas au niveau de la canopée ; ça ne vaut que pour le sous étage et un peu pour la strate basse. Oui, le sous-étage va avoir moins d'ambiance forestière ; pour acquérir une régénération, il est possible que ça change le climat hydrique ; il est possible qu'en futaie irrégulière, un abaissement trop fort de la densité dans certains systèmes rende plus difficile l'acquisition de certaines espèces. Mais en futaie régulière, les arbres dominants ont toujours la tête au soleil et ne connaissent pas l'ambiance forestière. À la marge, certains auront peut-être trop de soleil mais dans des gammes d'éclaircie raisonnable, je pense que ça ne joue pas.

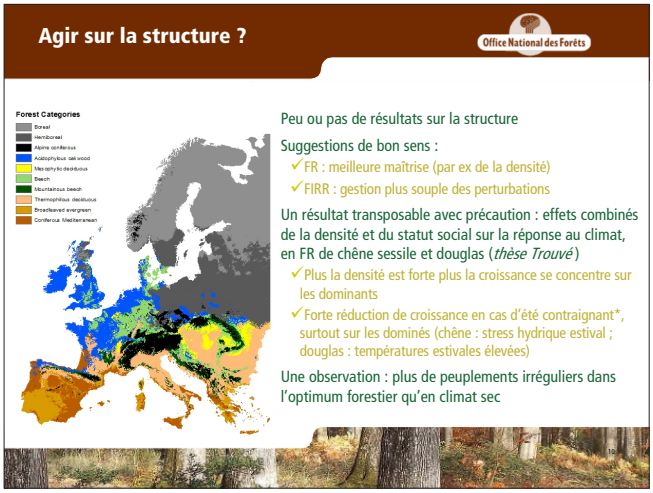
Pour conclure sur ce point, une sylviculture dynamique est favorable à l'alimentation en eau du peuplement à condition qu'elle ne soit ni excessive, ni brutale et qu'elle soit régulièrement suivie. Globalement, elle tend à raccourcir le cycle de production ce qui apporte d'autres bénéfices évoqués dans l'exposé introductif, comme de limiter le vieillissement des peuplements (facteur de vulnérabilité), limiter l'exposition aux risques et favoriser la production de bois au bénéfice de l'atténuation.

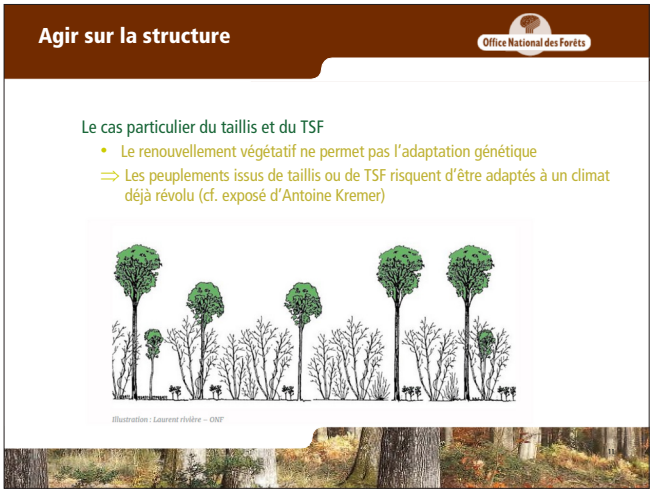
Cela ne veut pas dire qu'il faille éliminer tous les peuplements vieux et jeter aux orties tout le travail sur les îlots de vieux bois et le maintien des vieux stades. Si globalement on raccourcit les cycles, on a plus que jamais besoin de ce type de dispositif pour la préservation de la biodiversité liée aux stades âgés.

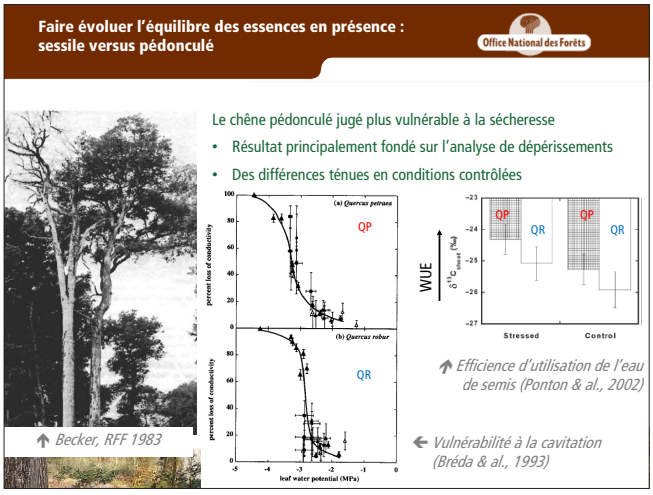
Agir sur la structure du peuplement ?

En ce qui concerne la structure, je vais passer plus vite parce qu'on a beaucoup moins de résultats à présenter.

Rappelons pour commencer que **la futaie régulière et la futaie irrégulière** ont toutes les deux des propriétés intéressantes et différentes face à des phénomènes comme ceux qu'on risque de connaître avec le changement climatique. La futaie régulière permet une meilleure maîtrise de l'ensemble des paramètres forestiers, en particulier de la densité, tandis que la futaie irrégulière peut permettre une gestion plus souple des perturbations. Un régime de crise avec des mortalités, ça peut devenir déstabilisant pour la gestion de la futaie régulière alors qu'il est peut-être plus facile de s'en accommoder en futaie irrégulière.







QP = Quercus petraea = chêne sessile
QR = Quecus robur = chêne pédonculé

Du côté des résultats scientifiques, il y a surtout la thèse de Raphaël Trouvé qui a étudié, en futaie régulière de chêne sessile et de Douglas, les effets combinés de la densité et du statut social (résultat établi en futaie régulière, donc à adapter avec précaution à la futaie irrégulière). Ce travail montre d'une part que plus la densité est forte, plus la croissance se concentre sur les dominants et, d'autre part, que la réduction de croissance liée à un stress (en particulier une sécheresse pour le chêne) est plus forte sur les dominés. On peut résumer ça en une phrase : sur les peuplements de chêne sessile étudiés dans cette thèse, la sécheresse a un effet qui tend à régulariser le peuplement.

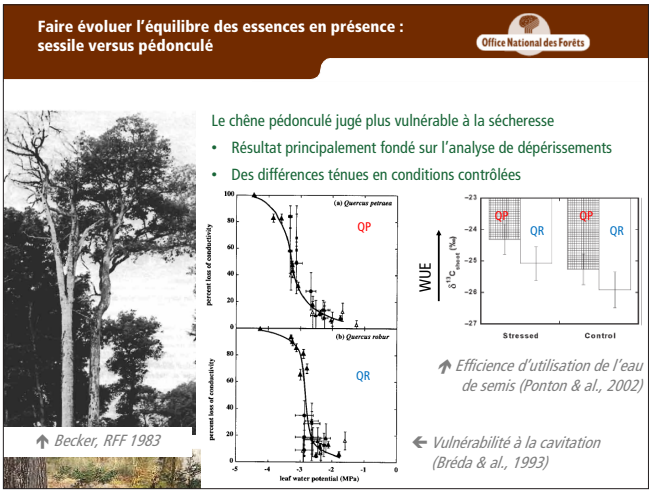
Le dernier argument pour dire qu'à mon avis la structure n'offre pas de solution à l'atténuation du stress hydrique, c'est que si on considère les choses d'un point de vue bioclimatique à large échelle (cf. carte des types forestiers européens), les peuplements à structure irrégulière se concentrent essentiellement dans les zones de montagne, avec notamment le mélange phare épicéa-sapin-hêtre. Autrement dit, ils se concentrent finalement dans des zones où le régime hydrique est optimal pour la forêt. L'irrégulier ne se rencontre pas dans le secteur méditerranéen, jusqu'à preuve du contraire.

Le cas des anciens taillis-sous-futaie est intéressant à considérer. C'est un cas particulier de structure, mais qui demande de raisonner plutôt sur l'origine, le traitement ancien de TSF. C'est un traitement qui a eu massivement recours à la reproduction végétative et, si on fait le lien avec ce qu'a présenté Antoine Kremer, on peut penser que dans les TSF, les vieilles futaies, notamment, risquent de provenir de plusieurs renouvellements végétatifs et de ne pas avoir suivi l'évolution du climat au sens de l'adaptation génétique. Pour les anciens taillis-sous-futaie, il y a donc une forte présomption que la ressource génétique ne se soit pas adaptée au climat de façon aussi fine qu'en futaie régulière (où la reproduction est sexuée, avec croisement des gènes et élimination par la pression de sélection).

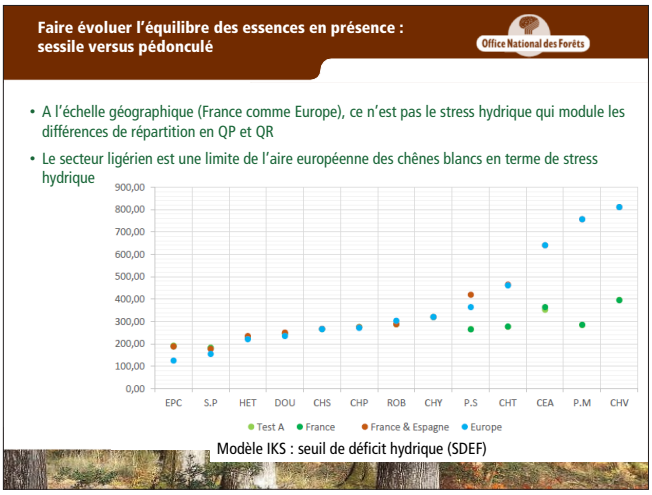
Agir sur la composition : essence objectif

On en arrive à la composition, par le jeu des essences en place, en commençant bien sûr par la fameuse question sensible, **la question du chêne sessile et du pédonculé.**

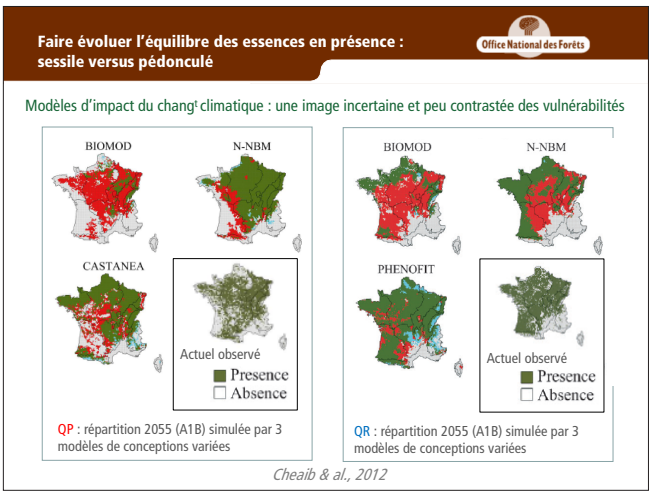
Nous avons tous appris que le chêne pédonculé est réputé plus vulnérable à la sécheresse. Ça vient en grande partie des travaux de Michel Becker, qui a beaucoup marqué la foresterie française, et c'est un résultat fondé beaucoup sur l'analyse des dépérissements. Michel Becker a pris cette photo en forêt de Tronçais, au moment des grands dépérissements : elle oppose de façon très emblématique un houppier de pédonculé tout à fait mort à celui d'un sessile en pleine forme (il avait le sens des messages forts !) et l'article correspondant, dans la RFF (1983), est très assertif sur la différence sessile / pédonculé. Depuis, on a connu d'autres épisodes et, plus récemment, le dépérissement de Vierzon, où c'était quand même beaucoup moins net. Si on regarde de près les papiers des écophysiologistes qui se penchent sur les différences de fonctionnement des deux chênes en conditions contrôlées, force est de constater que les différences sont très ténues. J'en ai retenu deux parmi d'autres.



QP = Quercus petraea = chêne sessile
QR = Quecus robur = chêne pédonculé



Liste des essences, de gauche à droite : EPC = épicéa commun ; S.P = sapin pectiné ; HET = hêtre ; DOU = Douglas ; CHS = chêne sessile ; CHP = chêne pédonculé ; ROB = robinier ; CHY = chêne pubescent ; P.S = pin sylvestre ; CHT = châtaignier ; CEA = cèdre de l'Atlas ; P.M = pin maritime ; CHV = chêne vert

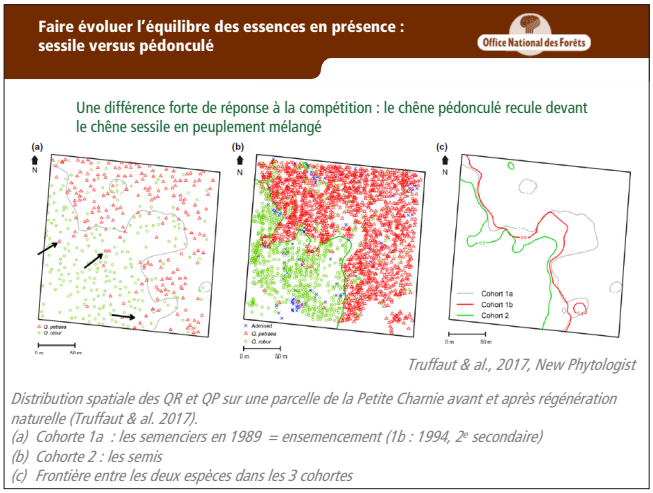


QP = Quercus petraea = chêne sessile
QR = Quecus robur = chêne pédonculé
Le rouge représente les zones où l'aire devient supposée impropre à l'essence en 2055 avec le scénario A1B ; en vert, ce sont les zones où l'espèce se maintient et, en bleu, celles où l'espèce pourrait voir son aire climatique s'étendre.

Le premier concerne les courbes d'embolie des deux chênes (au centre). Ces courbes représentent la perte de conductivité hydraulique lorsque le stress hydrique (le potentiel hydrique des feuilles) augmente : il y a des nuances dans la forme de la courbe mais le point d'inflexion est quasiment le même pour le sessile (en haut) et le pédonculé (en bas). L'autre exemple (graphique de droite) concerne l'efficience d'utilisation de l'eau, d'après une étude de Stéphane Ponton portant sur les semis (il y en d'autres pour des peuplements adultes). En général on observe une différence, et c'est bien le cas ici, mais à chaque fois les différences sont à la limite de la significativité ; de plus, on considère souvent des chênes sessiles et pédonculés d'une même parcelle donc on n'embrasse pas l'ensemble de la variabilité des deux espèces.

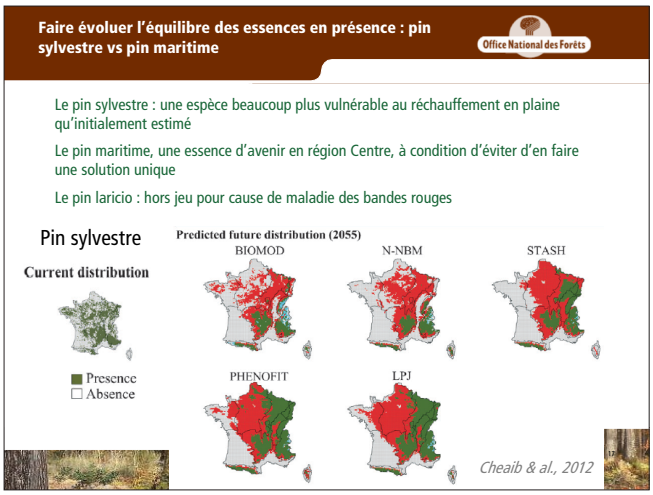
Je prends un autre point de vue en me plaçant cette fois à l'échelle géographique, à l'échelle de l'ensemble des aires de répartition du chêne sessile et du pédonculé. En France, ce n'est absolument pas le stress hydrique qui module les différences de répartition entre chêne sessile et chêne pédonculé ; les deux espèces ont le même seuil de stress hydrique. Voici un graphique qui est issu du modèle IKS dont vous a parlé Brigitte Musch. Sur l'axe des abscisses, on voit les 13 essences qui sont déjà implémentées dans IKS et on a en ordonnées l'échelle de la variable de stress hydrique d'IKS : plus on va vers le haut, plus les essences sont capables de supporter un déficit hydrique élevé d'après le modèle IKS, ou plutôt plus leur seuil constaté sur les limites de l'aire de répartition correspond à un déficit hydrique élevé. Selon que l'on a calé ce seuil sur la France, sur l'ensemble France + Espagne ou sur l'Europe, le point correspondant est respectivement vert, marron ou bleu (le point vert est parfois caché par le bleu ou le marron). Pour les essences tempérées, à gauche, le seuil est le même quelle que soit l'entité géographique sur laquelle il est calé : ça veut dire que leurs limites sèches sont rencontrées en France. En particulier, on chercherait vainement des chênes sessiles qui poussent en conditions plus sèches qu'en France (si vous en trouvez, ça m'intéresse !). La mauvaise nouvelle, c'est que ça se passe à peu près ici : les chênes sessiles du secteur ligérien sont au seuil ; grosso modo on est aux limites des 2,5% des chênaies les plus sèches de toute l'aire de répartition du chêne sessile.
Vers la droite du graphique, on passe aux essences plus méditerranéennes et les seuils ne coïncident plus : par exemple, les pins maritimes qui se trouvent dans les conditions les plus sèches en France sont loin d'être ceux qui connaissent les conditions des plus sèches en Europe.

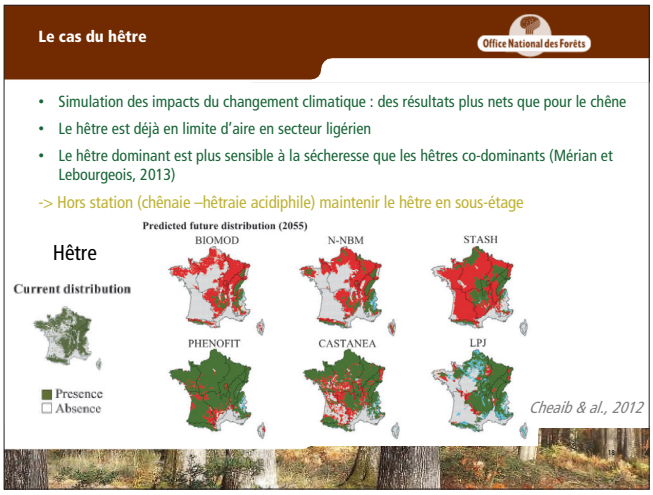
Considérons maintenant les modèles d'impact du changement climatique sur le chêne : pavé de gauche pour le chêne sessile, pavé de droite pour le pédonculé. Pour chacun, vous avez les simulations de trois modèles et, en bas à droite, la répartition observée. Les deux modèles du haut sont des modèles de niche donc des modèles qui mettent en relation statistiquement la répartition et le climat ; celui du bas est un modèle basé sur les processus, mais ce n'est pas le même pour le sessile et le pédonculé.
On observe d'abord que les modèles de niche, qui convergent bien dans le cas du hêtre (cf. exposé introductif), ne sont pas du tout d'accord pour le chêne alors qu'ils partent de la même conception. Pour ma part, je fais plutôt confiance à BIOMOD, produit par Vincent Badeau avec qui j'ai travaillé plusieurs années ; il a fini par me convaincre [rires]. On doit l'autre (N-NBM) à un chercheur réputé mais qui a une vision moins forestière : ses modèles sont très ajustés, ils reproduisent finement l'aire de répartition actuelle mais au risque de prendre en compte des choses qui en fait ne jouent pas.



Distribution spatiale des QR et QP sur une parcelle de la Petite Charnie avant et après régénération naturelle (Truffaut & al. 2017).
(a) Cohorte 1a : les semenciers en 1989 = ensemencement (1b : 1994, 2e secondaire)
(b) Cohorte 2 : les semis
(c) Frontière entre les deux espèces dans les 3 cohortes

Sur l'image de droite, les lignes représentent la « frontière » entre sessile et pédonculé dans le peuplement parent après coupe d'ensemencement (en gris) et après la 2e secondaire (en rouge), et dans le peuplement fils (en vert)

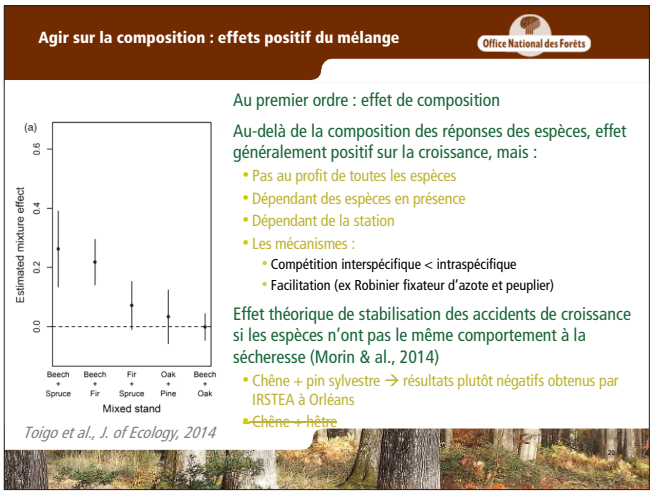


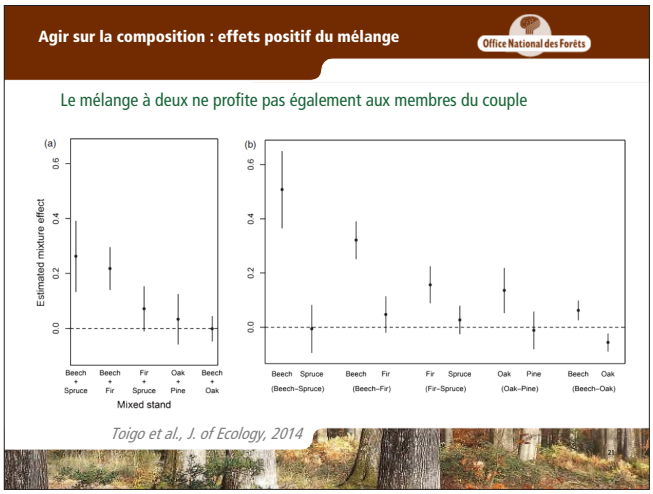


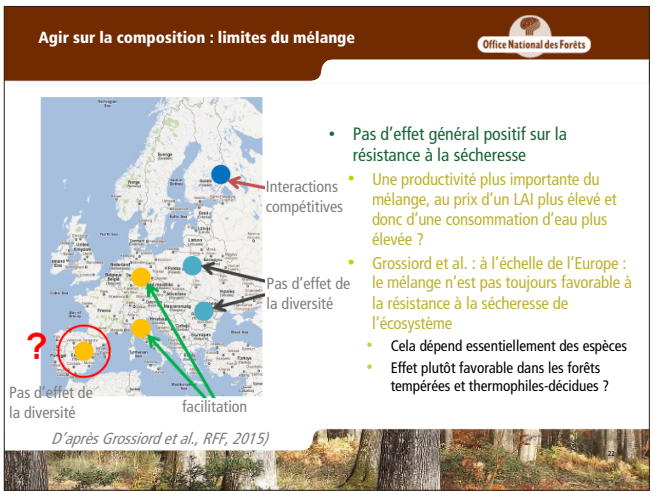
Mais ce qui ressort surtout, c'est que les modèles d'impact sont globalement très incertains sur l'issue concernant la vulnérabilité du chêne et, en second ordre, qu'on ne perçoit pas de différence très nette entre chêne sessile et chêne pédonculé, en tout cas certainement pas aussi tranchée que ce qu'on pensait au départ en recommandant de miser sur le chêne sessile plutôt que sur le pédonculé.
Cela veut-il dire qu'on a changé d'avis ? Non ; en science on ne change pas d'avis, on change de point de vue ! [rires].

La différence écologique la plus certaine entre sessile et pédonculé c'est la réaction à la compétition ; lorsqu'ils sont en compétition l'un avec l'autre, le pédonculé perd. Cela a été démontré très finement à l'échelle de la parcelle dans les travaux qu'a présentés Antoine Kremer. On y voit en action comment le chêne pédonculé se fait éliminer, d'abord démographiquement, par le chêne sessile. Et je pense que ça éclaire aussi l'interprétation des phénomènes de dépérissement : en situation de dépérissement, celui qui est le moins à son aise pour des questions de compétition ou d'écologie est évidemment le premier à être éliminé. À mon avis on a surinterprété ça comme une élimination par la sécheresse ; mais c'est plutôt la promotion par la sécheresse d'une élimination progressive du pédonculé qui de toute façon était prévue par l'histoire. Dans la compétition avec le chêne sessile, dynamiquement le pédonculé est voué à être éliminé. Ce qui ne veut pas dire que le sessile n'est pas atteint ; à Vierzon, le sessile a aussi eu des morts, mais plus tard et en bien moindre proportion que le pédonculé.
Alors, faut-il remplacer le pédonculé à grands coûts de travaux ? Ma réponse est plus nuancée que ce qui a été dit dans un premier temps. Quand on est en présence d'un peuplement mélangé sessile / pédonculé, c'est sûr, il faut travailler au profit du chêne sessile. Quand on a affaire à un peuplement pur ou presque de chêne pédonculé, sans signe de dépérissement et sur une station riche, je ne pense pas que les résultats scientifiques justifient de dépenser beaucoup d'énergie et de travaux à le transformer. Cependant si on a de grandes surfaces d'un seul tenant tout en pédonculé, il faut diversifier pour éviter de trop gros dégâts le jour où il y aura un problème, car ça viendra d'un coup.

Au-delà des deux chênes, passons rapidement en revue les autres essences du cru.
Le pin sylvestre est une essence sur laquelle on a été très optimiste au départ mais vous voyez sur les simulations qui le concernent qu'il y a beaucoup de rouge. Je dois dire que les modèles climatiques du pin sylvestre sont assez mauvais parce que la répartition du pin sylvestre en France n'est pas régie au premier ordre par le climat ; il a été introduit dans les plaines du nord et il n'a pas saturé sa niche écologique potentielle. Cependant tous les modèles sont d'accord sur son cas ; en particulier on voit qu'en plaine, il est *a priori* vulnérable au changement climatique. C'est assez logique si considère son aire bioclimatique : le pin sylvestre est une essence circumboréale, ce n'est pas une essence qui aime la chaleur.
Le pin maritime, par contre, est à coup sûr une essence d'avenir en région Centre (je ne l'ai pas illustré car il n'a pas fait l'objet de simulations dans la même série que ce que j'ai déjà présenté). Mais attention à l'effet essence unique : il faut éviter d'en faire la solution unique de l'adaptation. Quant au *pin laricio*, quel qu'eût été son intérêt potentiel pour l'adaptation, il est mis entre parenthèses par la maladie des bandes rouges.
Le hêtre, enfin, j'en ai déjà parlé dans l'exposé introductif. C'est une essence dont le lien au climat est très étroit, et qui est déjà en limite d'aire en secteur ligérien. *A priori* l'avenir du hêtre en secteur ligérien est plutôt en sous-étage qu'en essence principale.







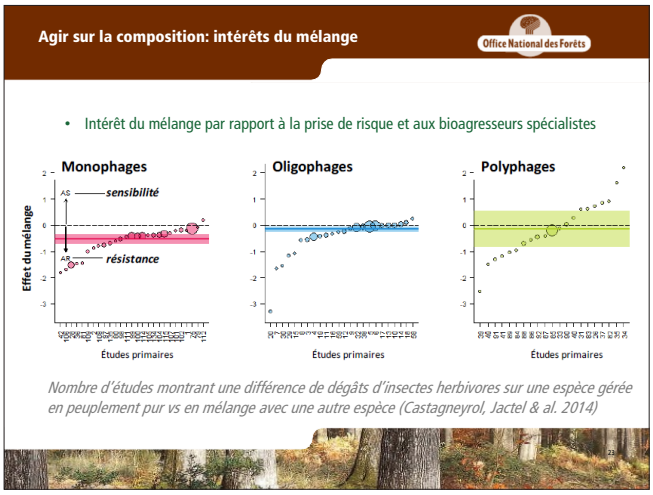
Agir sur la composition : peuplements mélangés

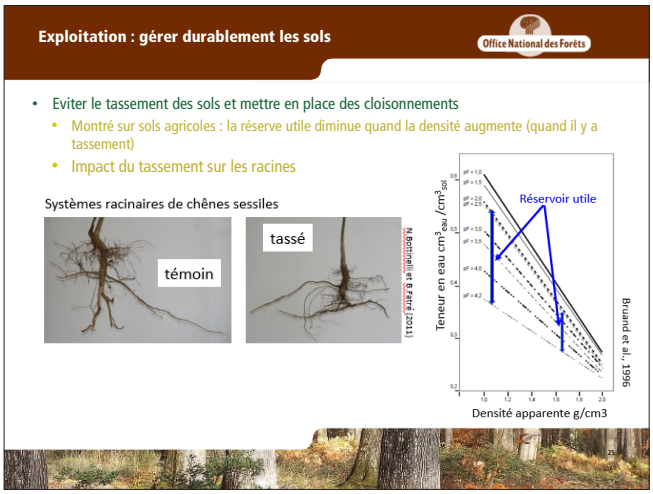
Maintenant, me direz-vous, ne peut-on pas faire quelque chose en mélangeant les espèces ?

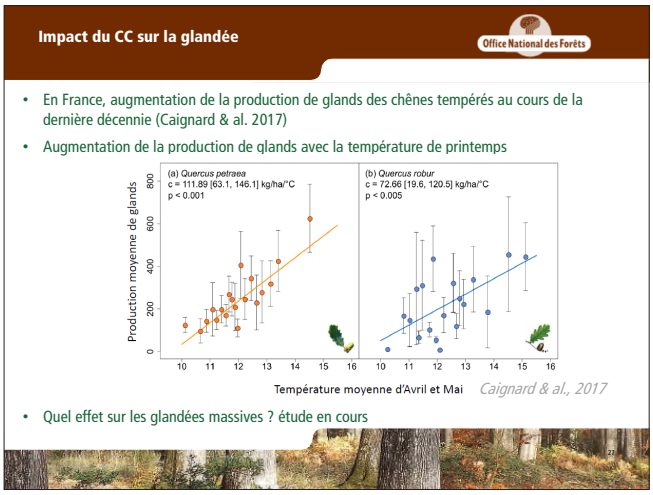
Le mélange a des propriétés intéressantes, des propriétés additionnelles par rapport à celles de chaque essence. Au premier ordre, quand on a des incertitudes sur une essence, c'est un intérêt en soi d'en avoir une autre en mélange. Mais au-delà de cet effet purement additif, il existe un effet supplémentaire aujourd'hui bien connu sur la productivité. Seulement le **surcroît de production en mélange**, qu'on appelle overyielding, ne concerne pas tous les mélanges. Sur ce graphique, on a différents mélanges de gauche à droite : hêtre/épicéa, hêtre/sapin, sapin/épicea, chêne/pin et hêtre/chêne. Et en ordonnée, on a l'effet surproduction dû au mélange. Cet effet est très fort pour les mélanges bien connus du point de vue sylvicole, ceux de la hétraie-sapinère-pessière ; par contre, il est très faible voire inexistant pour les mélanges du secteur ligérien.
On peut penser que c'est quand même intéressant de mélanger des espèces comme le chêne et le pin parce qu'ils n'ont pas le même comportement vis-à-vis de la sécheresse. Le chêne est une espèce résistante, qui continue à pousser quand la sécheresse intervient ; ses stomates restent ouverts et continuent à fonctionner alors que le pin, lui, ferme les écoutilles et attend que ça se passe pour se remettre à pousser. Théoriquement, ça peut donc donner un effet de compensation des accidents de croissance. Irstea étudie très finement la question : jusqu'ici son constat était plutôt négatif (peu ou pas d'effet), mais selon les derniers résultats il y aurait quand même quelques effets positifs suivant le moment auquel intervient la sécheresse.

Il faut aussi savoir que cet effet de surproduction est très dissymétrique. En général il ne profite pas aux deux essences du couple, et le hêtre est souvent le « coucou », celui qui s'approprie tout le bénéfice du mélange. Mais pour le mélange chêne / pin, c'est plutôt le chêne qui tire son épingle du jeu.

Pour ce qui est de **l'effet du mélange sur la résistance à la sécheresse**, le panorama des travaux de recherche est relativement clair : il n'y a pas d'effet positif sur la résistance à la sécheresse en général.
Il pourrait presque y avoir l'effet inverse, qui serait lié à la relative surproduction du mélange. On peut le comprendre intuitivement par le fait que les houppiers s'imbriquent beaucoup plus en peuplement mélangé qu'en peuplement pur, même irrégulier (parce que la compétition entre espèces est généralement moins forte que la de compétition intra spécifique). Un peuplement mélangé arrive donc souvent à produire plus, simplement parce qu'il arrive à mettre en place plus de surface foliaire, donc de photosynthèse… mais avec comme conséquence une plus gande consommation d'eau.
Quoi qu'il en soit, voici une carte qui schématise les résultats d'une étude mené à l'échelle de l'ensemble de l'Europe. Une véritable étude sur le terrain avec tout un gradient de mélanges du sud au nord de l'Europe, où on a étudié ces phénomènes de réponse du mélange à la sécheresse. Il en ressort qu'il n'y a pas de résultat général. Au nord, le mélange n'est pas intéressant vis-à-vis de la sécheresse, il a même des effets négatifs. Au sud, on aurait pu penser, avec une vision écologique optimiste, que les espèces vont s'entraider pour surmonter la sécheresse ; mais non, il n'y a pas d'effet de la diversité. C'est seulement aux latitudes intermédiaires (celles qui nous concernent) qu'il pourrait y avoir quelques effets de facilitation. Mais ce qu'il faut retenir en premier ordre, c'est que







le fonctionnement des mélanges tient avant tout aux caractéristiques des espèces. Par exemple, l'effet négatif des mélanges dans le nord vient de ce qu'il y a du bouleau et que le bouleau consomme toute l'eau.

Par contre je rappelle ici, s'il en était besoin, que **le mélange a d'autres intérêts**, en particulier par rapport aux risques liés aux bioagresseurs. Il a un intérêt du moins par rapport aux espèces spécialistes. Un peuplement mélangé est beaucoup moins sensible aux espèces spécialistes qu'un peuplement pur. Voici les résultats d'une méta-analyse, c'est-à-dire l'analyse de nombreux travaux scientifiques, qui montrent que dans le cas des peuplements soumis à un insecte monophage (qui ne mange qu'une seule espèce) le mélange accroit la résistance. Alors que s'il s'agit d'espèces oligophages ou plus polyphages, le mélange n'a pas d'effet.

L'effet des exploitations

Enfin je rappelle très rapidement que les exploitations que l'on réalise pour mener la sylviculture ont un effet sur le sol, et que cet effet sur le sol n'est pas neutre par rapport au risque climatique.
Globalement, ça n'a pas été montré en forêt mais ça a été montré sur des sols agricoles, le tassement tend à diminuer la réserve utile. Le tassement limite aussi le développement racinaire donc la capacité d'approvisionnement en eau du sol ; ça, on le voit très bien en forêt, sur les dispositifs suivis par le département RDI.

Et quid du renouvellement ?

En matière de renouvellement, pour conclure, est ce que l'on peut espérer continuer à faire de la régénération naturelle sous l'effet du changement climatique ?

En tout cas, il n'y a pas de raison *a priori* de penser qu'on va manquer de glands. Globalement le réchauffement est plutôt favorable à la production de glands et, de fait, on constate en France une augmentation de la fructification des chênes tempérés au cours de la dernière décennie, en lien significatif avec les températures de printemps.

Par contre, on ne sait pas encore ce que ça va donner quant au rythme des glandées.

Merci de votre attention.

Questions / Réponses

Bertrand Dugrain, Directeur agence Berry-Bourbonnais – Merci pour les éclairages sylvicoles ; finalement le risque est assez équivalent entre le chêne sessile et le chêne pédonculé. Mais c'est difficile pour le gestionnaire d'être confronté à ce genre de « changement de point de vue » de la recherche, parce que derrière il y a un gros paquebot avec un aménagement forestier et des décisions de gestion sur plusieurs années. On ne va pas revenir sur les décisions pour les parcelles dont le renouvellement est engagé, mais on peut s'interroger pour celles qui ne sont pas encore ouvertes. Je m'interroge aussi beaucoup sur le cas du pin sylvestre, qui est aujourd'hui l'essence majeure qu'on utilise pour les transformations en stations difficiles, notamment à Vierzon, mais dont on sait maintenant qu'il est menacé en plaine. Je suis assez inquiet parce que le spectre des essences possibles se réduit : le hêtre, on oublie ; le pin sylvestre, vulnérable ; le chêne sessile ou pédonculé, on ne sait pas trop, ce n'est pas simple. Le spectre des essences possibles, on ne le connaît pas. Or nous avons des aménagements à faire, des décisions à prendre au quotidien, et nous ne voulons pas jouer les apprentis sorciers à notre niveau : il y a une vraie courroie de transmission à améliorer pour que, entre la recherche et les gestionnaires, on trouve quand même des moyens d'agir. Aujourd'hui, j'ai l'impression que les décisions qu'on prend ne sont pas si bien fondées par rapport à ce qu'on a entendu ici.

Brigitte Musch – Xavier Bartet va reparler du projet RENEssences ; si je n'ai pas aujourd'hui une liste d'essences possibles en bonne et due forme, je lui ai quand même donné quelques billes à ce sujet. D'autre part, j'ai surtout cherché à faire passer l'idée que la première chose sur laquelle on peut jouer c'est la diversité à l'intérieur de l'espèce. Il est possible tout de suite de changer de provenance ; on prendra un risque, mais un risque mesuré. Pour le cas du pin sylvestre, on a des variétés améliorées, de nouveaux vergers à graines actuellement en production. On voit dans les tests qu'ils ne réagissent pas tous de la même façon au changement climatique, qu'ils n'ont pas la même plasticité (c'est un des principes qu'A. Kremer a montré, avec les courbes en cloche), etc. Là encore, la première chose à faire est tout simplement de changer de provenance, de prendre des provenances plus méridionales ; c'est le moindre risque.

Syvain Ducroux, DT adjoint Seine – Nord. Pour les îlots d'avenir, les différentes essences ou provenances à tester dans différents contextes climatiques, à quel niveau est intégré le contexte stationnel ? Il y aura des forestiers volontaires pour tester des espèces allochtones, mais il y a fort à parier qu'ils vont être tentés de le faire dans les stations où les espèces indigènes sont en difficulté, dans les sols les plus ingrats qui soient…

Brigitte Musch – En effet, c'est souvent ce qui se passe, mais on va essayer d'éviter ça. L'objectif n'est pas de chercher à valoriser les stations marginales où on est dans l'impasse : il n'y a pas de raison qu'il existe une essence miracle qu'on n'aurait pas encore repérée susceptible d'une forte productivité dans des conditions particulièrement ingrates. Ce qu'on cherche à savoir, c'est : si le chêne sessile ou le pin sylvestre disparaît, que puis-je mettre à la place ? Donc il faut se mettre dans les mêmes conditions que le chêne sessile ou le pin sylvestre. C'est ce que dit le protocole, le cahier des charges des îlots d'avenir : mettre toutes les chances de notre côté. Si on voulait savoir ce que va donner le remplaçant du chêne sessile en le mettant sur un terrain de pin sylvestre, on aura une réponse… impossible à interpréter.

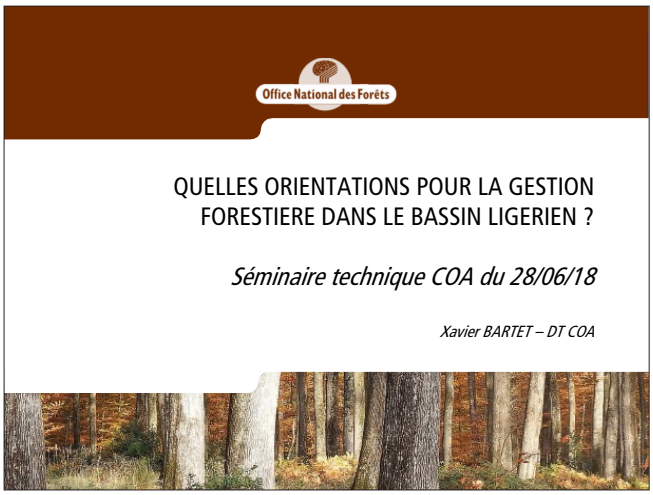
Patrick Leroy, agence Berry-Bourbonnais – Petite synthèse concernant la sylviculture : c'est bien beau de parler de sylviculture dynamique, mais quand on ne peut pas vendre les premières et deuxièmes éclaircies, qu'est-ce qu'on fait ?

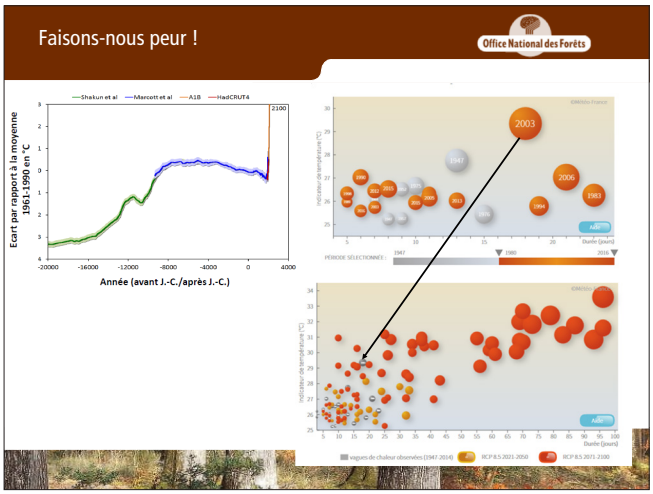
Xavier Bartet – Effectivement c'est un problème. Dans le guide de la chênaie atlantique et le mémento coupes, on insiste pour dire qu'il y a tout un scénario, un itinéraire sylvicole, et si on rate les premières étapes, il y a ensuite des retards qu'on n'arrivera jamais à rattraper. Le service de commercialisation des bois (Claire Quinones) fait tout son possible, justement dans le cas Berry-Bourbonnais, sur ces premières éclaircies pour trouver des débouchés. Mais effectivement c'est compliqué : si on n'arrive pas à évacuer le bois on n'arrive pas à faire les coupes suivantes.

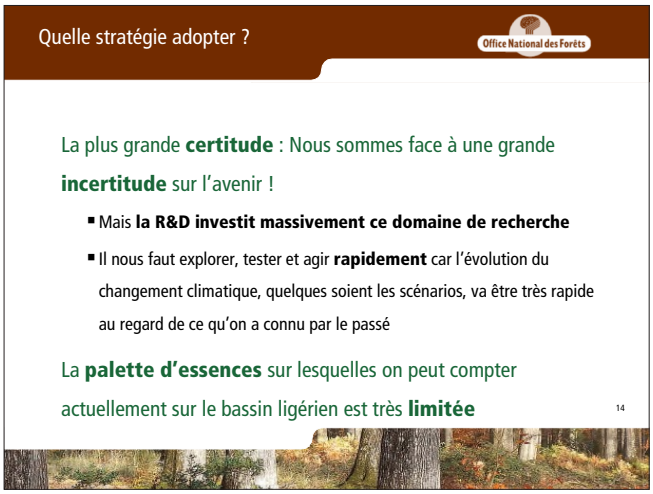
Eric Sevrin – Je voudrais revenir sur le chêne sessile, le chêne pédonculé et les dépérissements qu'on observe plutôt sur le pédonculé que sur le sessile, du moins en forêt privée. C'est aussi un problème de sylviculture. En forêt privée, on a constaté des dépérissements aux confins des régions Centre, Poitou-Charentes et Pays de Loire, et on s'est aperçu que, dans ce territoire, ce sont d'anciens taillis-sous-futaie. Ce traitement convenait bien au chêne pédonculé puisqu'il y a une concurrence très faible, beaucoup de lumière… Aujourd'hui ces peuplements ne sont plus travaillés depuis très longtemps et on se retrouve avec 25 ou 30 m² de surface terrière, ce qui est absolument inadapté au chêne pédonculé qui supporte mal la concurrence de ses voisins ; en plus il y a des questions de statut social, etc. Donc on a des histoires de dépérissement qui sont dues au sol, mais aussi à la gestion (ou la non-gestion) des peuplements. Mais quand on insiste sur le fait qu'il faut faire de la sylviculture, et en forêt privée c'est bien plus prégnant qu'à l'ONF, vu la diversité des propriétaires et du terrain, ce n'est pas toujours simple.

QUELLES ORIENTATIONS POUR LA GESTION FORESTIÈRE DANS LE BASSIN LIGÉRIEN ?

Xavier Bartet
ONF, adjoint au directeur territorial
Centre-Ouest-Aquitaine







Exercice de synthèse, pour terminer : tirer les conclusions pratiques du séminaire pour la gestion des forêts du bassin ligérien.

Je parle ici en tant qu'animateur du réseau d'appui technique et de développement (RATD) de la DT, qui est une courroie de transmission privilégiée entre la recherche et les gestionnaires. Transmission dans les deux sens : pour vulgariser les acquis de la recherche et les déployer sur le terrain et, réciproquement, pour recenser et « pousser » les questions que se posent les gestionnaires.

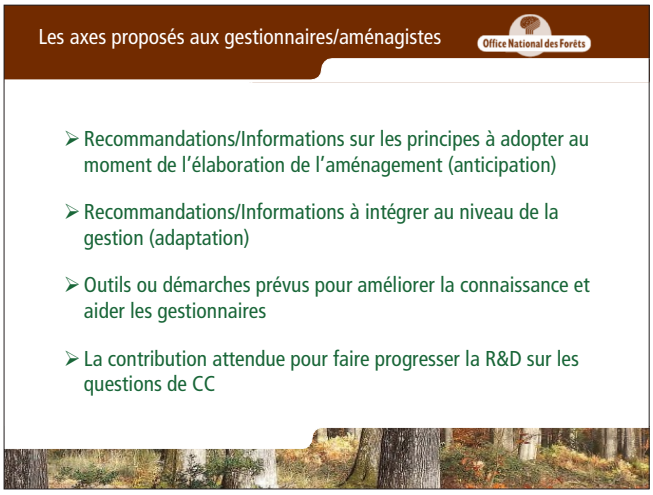
Faisons-nous peur… pour bien réagir !

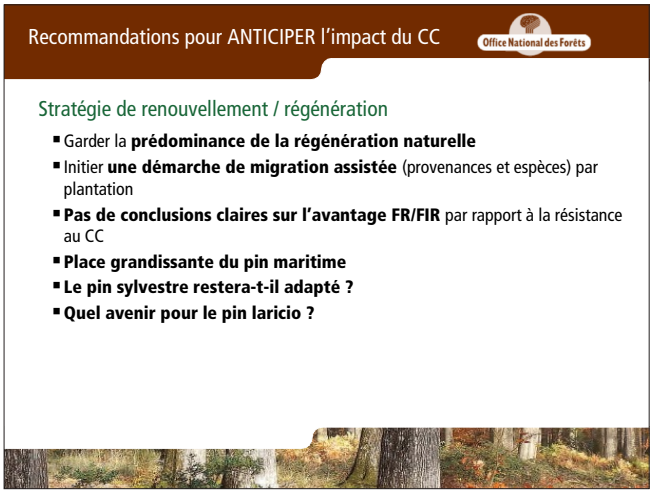
Petit rappel sur le réchauffement climatique en deux graphiques. Le premier, à gauche, illustre la rapidité du changement : il représente l'évolution des températures à l'Holocène, depuis 20 000 ans av. J.C., en écart à la moyenne observée sur la période de référence 1961-1990. Il y a eu globalement une augmentation des températures, avec des variations. On voit notamment, depuis la fin de la dernière grande glaciation (courbe bleue), l'inflexion qui correspond au petit âge glaciaire et, dans la période actuelle, la courbe qui monte quasiment à la verticale et se poursuit ainsi (par simulation, courbe orange) jusqu'en 2100 au moins. En gros, on risque de vivre en même pas 100 ans l'équivalent du réchauffement que la terre a connu sur 20 000 ans.
Le deuxième groupe de graphiques, à droite, illustre l'ampleur des modifications. En haut, les vagues de chaleur répertoriées par Météo France sur les 70 dernières années (1947-2016) sont représentées par des boules grises pour la période d'avant 1980 et des boules orange pour les années suivantes. Le graphique indique en abscisse la durée de la vague de chaleur et en ordonnée la température moyenne. On retrouve les épisodes bien connus de 2003, 1976 et 1947 mais on voit surtout que les vagues de chaleur sont bien plus nombreuses dans la période récente qu'avant 1980. Le graphique du bas nous projette dans le futur avec le scénario RCP 8.5, le plus catastrophique : en gris, les canicules d'avant 2018, dont celle de 2003 (flèche) ; en jaune, les canicules 2021-2050, qui *a priori* seront surtout plus longues mais peut-être pas plus chaudes ; et en rouge, ce qui nous attend pour 2070-2100… Le scénario est exagéré, et j'espère que nos politiques feront en sorte de ne pas en arriver là, mais il y a tout de même un peu péril en la demeure.

Cependant la plus grande certitude qu'on ait actuellement, c'est d'être face à une grande incertitude. D'autant que, vous l'avez vu au fil des exposés, un grand nombre de facteurs interagissent : entre l'augmentation de la teneur en CO_2 et des dépôts azotés, les différents mécanismes qui interviennent, etc., c'est un peu compliqué d'isoler l'aspect changement climatique et de dire ce que cela va provoquer pour la forêt et, par ricochet, en matière de sylviculture. Mais de toute façon, vu l'enjeu, il faut qu'on bouge et qu'on s'y mette rapidement, avec la R&D qui investit

massivement dans ce domaine de recherche. C'est pourquoi nous nous appliquons à mettre en place un certain nombre de projets… et vous allez être mis à contribution, j'y reviendrai.
Enfin, une spécificité du bassin ligérien c'est que la palette d'essences sur laquelle on peut compter est actuellement très limitée et qu'elle se restreint. Donc il n'y a pas trente-six solutions, il va aussi falloir tester d'autres essences, d'autres provenances.

Je vais aborder successivement :
- les recommandations et informations (difficile d'être normatif) sur les principes à adopter au moment de l'élaboration de l'aménagement. Il s'agit là d'anticipation : comment se préparer aux vingt prochaines années, en se projetant autant que possible dans une perspective plus lointaine ;
- les éléments à intégrer d'ores et déjà dans la gestion ; les divers intervenants en ont bien parlé, je ne ferai que quelques focus ;
- les outils et les démarches qui commencent à se mettre en place en partenariat entre forêt privée, forêt publique et recherche ;
- la contribution qu'on attend de vous, gestionnaires de terrain, pour aider la recherche à progresser à travers la mise à disposition de parcelles pour implanter des dispositifs, mais pas seulement.

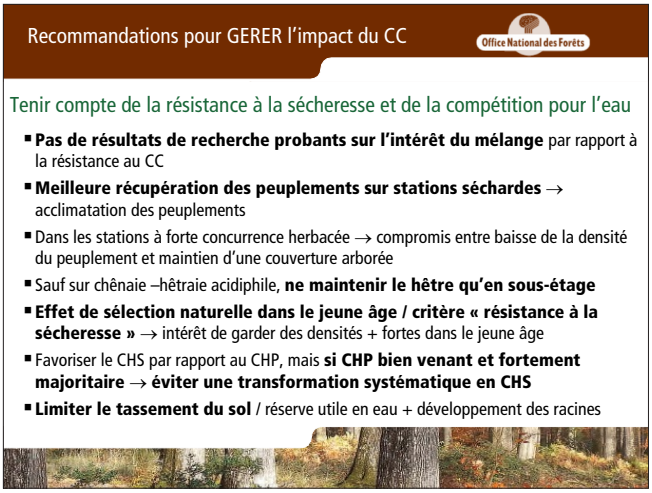


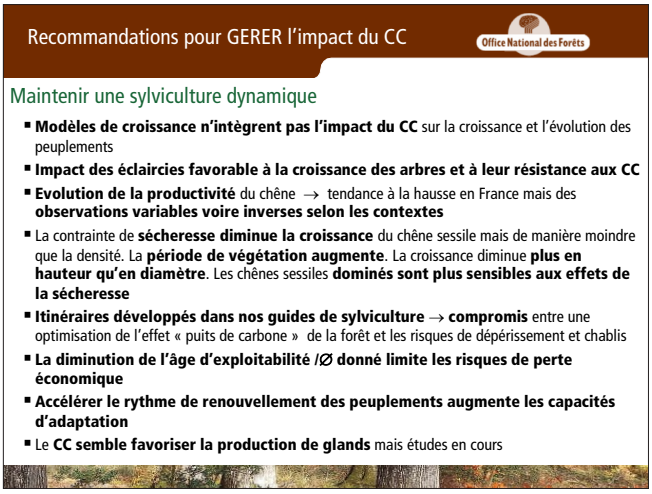


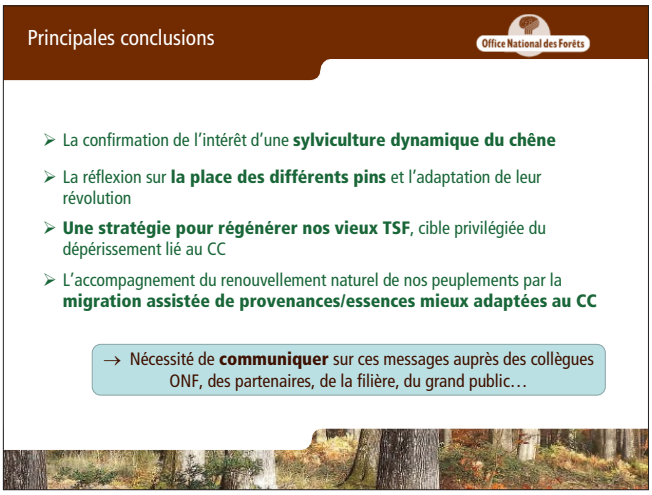
Les recommandations pour anticiper l'impact du changement climatique

Je passe vite sur l'adaptation des essences à la station (en climat changeant) et sur la stratégie de renouvellement, parce que l'essentiel a déjà été dit. Mais je veux souligner un point.
En secteur ligérien, on maîtrise globalement bien la sylviculture du chêne, avec un guide qui a été bien construit. Et on a eu tendance à faire beaucoup de chêne, peut-être trop. Même dans des stations un peu limite où on sait maintenant que le chêne va avoir des difficultés tandis que le pin, notamment le pin maritime, apparait comme plutôt bien adapté. Je pense donc que sur ces stations limites il faut prendre le parti de favoriser le pin plutôt que de s'acharner pour le chêne. J'ai vu des parcelles où les chênes font moins de 3 m au bout de 30 ans et sur lesquelles il y a eu des investissements considérables en travaux… Ce n'est pas raisonnable.

Pour ce qui est d'anticiper la gestion des risques, Myriam Legay et Jean-François Dhôte ont déjà bien traité la question. J'ajoute simplement deux remarques.
Sur le risque sanitaire, d'abord. Dans une étude de l'INRA (pour le DSF), nos chênes sessile et pédonculé ont été importés aux USA où on leur a inoculé à 15 ans le champignon responsable du flétrissement du chêne : 2 ans après il y avait 100 % de mortalité. Cela signifie que si le flétrissement du chêne arrive en France, où il pourrait être rapidement propagé par des insectes (scolyte intriqué notamment), le scénario catastrophe dont parlait Jean-Francois Dhôte est quasiment certain. On croise les doigts, mais le risque est bien réel.
Ma deuxième remarque concerne le renouvellement des taillis sous futaie. Comme l'a dit Myriam, le brassage génétique a été très restreint dans les TSF (arbres pour la plupart issus de rejet), donc ils sont génétiquement plutôt adaptés à des climats plus froids. Il se trouve aussi, les agents de terrain l'ont constaté, que ces peuplements sont moins fructifères. Il faut donc faire attention à ne pas trop les faire durer, éviter que les réserves commencent à souffrir et à produire moins de glands, au risque de compliquer ou compromettre le renouvellement.







Recommandations pour gérer l'impact du changement climatique

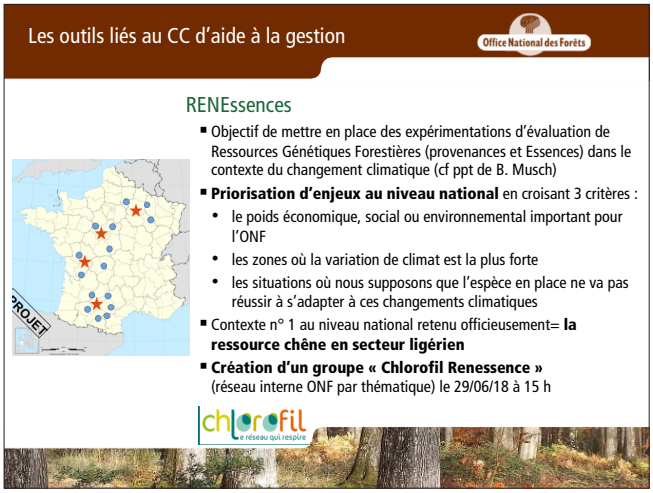
Tout a été dit sur les questions de sécheresse et de compétition pour l'eau. J'ai récapitulé ici les recommandations, mais je ne détaille pas. De même, Myriam s'est fait l'apôtre de la sylviculture dynamique et je ne peux que souscrire, sans m'y arrêter en détail.

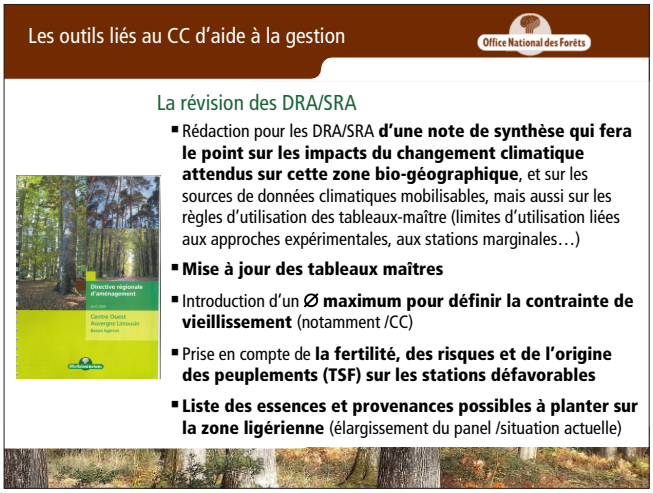
J'ai essayé de synthétiser les principales conclusions en quatre points, parce qu'il y a eu énormément d'informations. Quatre points auxquels j'ajoute, pour commencer, un espoir : la plasticité du chêne. J'aime bien l'expression d'Antoine Kremer disant [dans la discussion] que « le chêne est obèse de diversité », et nous allons donc nous accrocher à cet espoir : si ça se trouve le chêne parviendra à s'adapter assez rapidement et nous pourrons peut-être continuer à gérer et à vendre du chêne de qualité à grain fin…

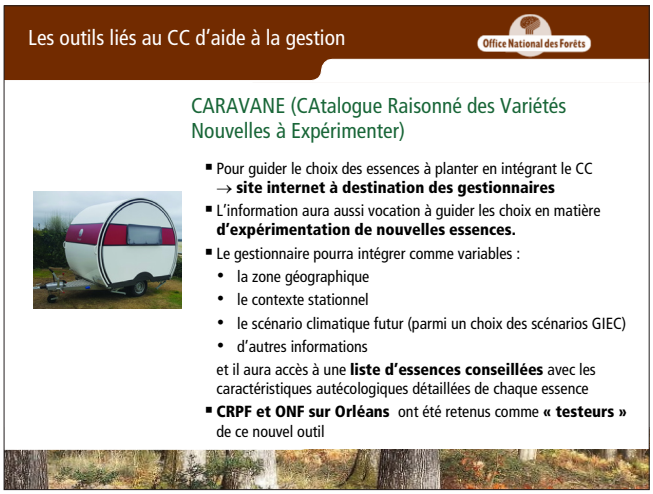
Pour le reste, voici ce qu'on peut retenir :

- La confirmation de **l'intérêt de la sylviculture dynamique du chêne.**
- La nécessaire **réflexion sur la place des différents pins**. Tant qu'on n'a pas de recul sur la maladie des bandes rouges, il n'est pas question de planter du pin laricio ; mais on ne lui ferme pas définitivement la porte pour autant. Le pin sylvestre est actuellement l'essence de substitution dans le bassin ligérien (stations limite pour le chêne), mais est en train de passer l'arme à gauche dans le Sud. Il nous faut donc réfléchir maintenant à la place du pin maritime. L'idée n'est pas de faire de la forêt d'Orléans une forêt de chêne et pin maritime, mais de surmonter la réticence (compréhensible) qu'on rencontre quand on essaie d'introduire une dose de pin maritime alors que pin sylvestre est encore assez beau, assez bien adapté. Il faut vraiment se projeter dans un avenir plus lointain.
- Une **stratégie pour régénérer nos vieux TSF**. Je crois que ce sont actuellement les peuplements prioritaires, nous avons eu tout l'argumentaire. Il faut définir une stratégie pour régénérer rapidement nos derniers TSF, alors même que les futaies sont en train d'arriver à maturité. Nous avons sous le pied un « trésor de guerre » que nous laissons plutôt à nos successeurs, car la priorité ce sont les vieux TSF.
- L'accompagnement du renouvellement naturel des peuplements par **la migration assistée d'essences/provenances.** Brigitte Musch a fort bien présenté la problématique.

Un dernier point encore : il va falloir communiquer beaucoup autour des réflexions et conclusions de ce séminaire. Ce n'est pas facile parce que, dans l'esprit des gens, le changement climatique c'est un peu tout et n'importe quoi. Mais il y a eu des messages forts, qu'on peut faire ressortir. [NDLR : voir le Flashinfo Centre-Ouest-Aquitaine de juillet 2018]







Les outils d'aide à la gestion

Voyons maintenant les outils d'aide à la gestion en climat changeant.

Il y a d'abord le projet RENEssences que Brigitte a exposé de façon approfondie. J'ajoute simplement à titre officieux que l'enjeu numéro 1 est bien le chêne en secteur ligérien et j'espère donc que nous pourrons mettre en place le projet dans très peu de temps. Yves Rousselle, responsable de ce projet au département RDI, signale la création imminente d'un groupe «RENEssences » sur le réseau social interne Chlorofil, avec les premières personnes impliquées dans la démarche, dont les adjoints aux directeurs territoriaux.

Par ailleurs nous allons lancer, suite aux discussions du Programme Régional de la Forêt et du Bois (PRFB), toute une réflexion sur les directives régionales d'aménagement et schémas régionaux d'aménagement (DRA/SRA). Il y a beaucoup de choses à mieux prendre en compte dans ces documents cadre, eu égard en particulier à l'impact du changement climatique. Cela implique la mise à jour de ce que nous appelons les tableaux maîtres en cohérence avec le guide de sylviculture, mais aussi :

- l'introduction de diamètres maximum pour que les aménagistes puissent évaluer la **contrainte de vieillissement**. Actuellement ils ne disposent que d'un âge maximum (230 ans pour le chêne sessile, par exemple), mais pour les anciens TSF, l'âge est une notion inopérante et l'aménagiste doit décider à dire d'expert : « cet ex-TSF a l'air un peu plus en forme, je ne vais pas l'inclure dans la contrainte de vieillissement » (c'est-à-dire dans la surface à renouveler impérativement au cours de la période, sous peine de graves inconvénients). Or nous avons vu que le cas des anciens TSF est particulièrement sensible. Avec un diamètre maximum, on donne un élément objectif.
- la prise en compte des fertilités et de l'origine des peuplements de TSF sur les stations défavorables : peut-être que l'on ne recommandera pas la même chose partout.
- l'élargissement de la liste des essences/provenances possibles à planter, car nous n'avons actuellement qu'une palette d'essences limitée.

Nous pourrons nous appuyer pour cela sur le projet CARAVANE, que Brigitte a également présenté, sachant que le CRPF et l'ONF en Région Centre Val-de-Loire ont été désignés comme pilotes pour tester l'outil (interface utilisateurs) dès qu'il sortira, début 2019. Nous serons (et vous serez) mis à contribution pour cet exercice : saisir nos critères stationnels, se placer dans un scénario moyen, et demander quelles seront les essences compatibles dans 100 ans par exemple. La réponse sera du genre : pas de risque pour telle essence, telle autre est un peu incertaine et telle autre encore est franchement problématique.

AURA *= (région) Auvergne Rhône-Alpes*

CVL *= (région) Centre Val-de-Loire*

CRPF *= Centre régional de la propriété forestière*

PNRGF *= pôle national des ressources génétiques forestières ; ensemble des ex pépinières de l'Etat, intégrées depuis 2013 à l'ONF*

Sylvoportail *= Plateforme web interne ONF permettant de consulter facilement les données liées à la gestion des forêts publiques*

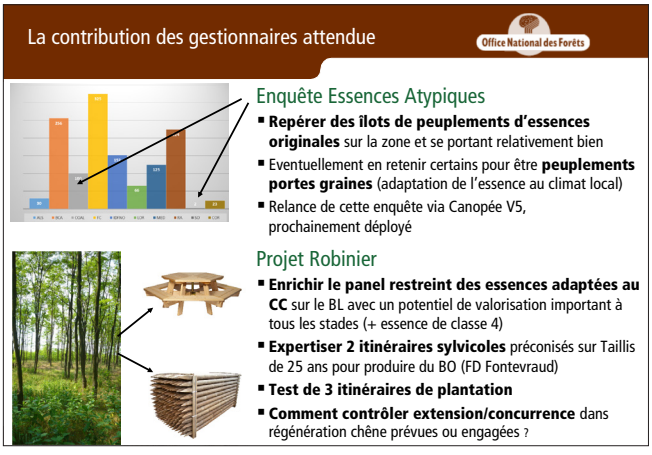
LES OBJECTIFS DU PROJET MACCLIF (sous l'égide du RMT AFORCE - octobre 2016 – décembre 2018)

1. Approfondir l'appréciation de la perception du changement climatique par les gestionnaires et conseillers forestiers de la forêt publique et de la forêt privée, ainsi que des propriétaires forestiers publics et privés, à travers la réalisation d'enquêtes.

2. Faire le bilan des mesures d'adaptation citées dans les documents d'orientation régionaux et d'aménagement et recueillies dans les enquêtes réalisées auprès des forestiers.

3. Mettre en lumière la prise en compte du changement climatique dans les documents d'orientation et d'aménagement de la forêt publique et privée, grâce à une analyse approfondie du vocabulaire ayant trait au changement climatique.

4. À partir du bilan des résultats de MACCLIF, tirer des enseignements sur les messages à adresser aux gestionnaires et propriétaires forestiers pour les inciter à mettre en œuvre des mesures d'adaptation des forêts au changement climatique.



La contribution attendue des gestionnaires

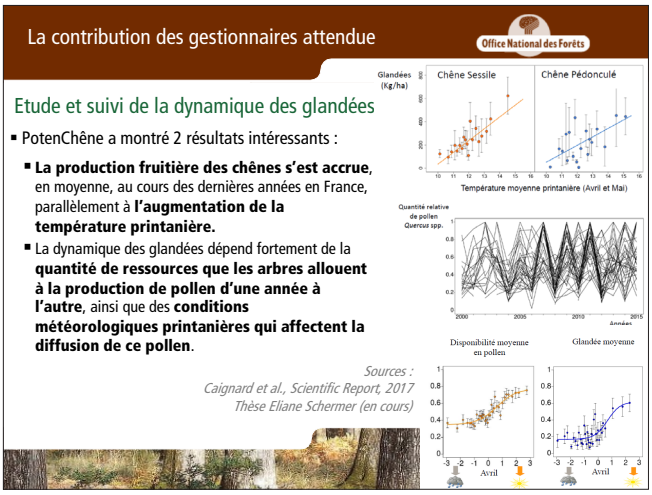
La notion d'îlots d'avenir est clairement en train de s'officialiser avec le projet ESPERENSE (≈ RENEssences élargi aux partenaires externes avec l'appui du ministère). Ce sont des îlots destinés à tester l'évolution de certaines provenances/essences dans le contexte du changement climatique, et pour lesquels deux cahiers des charges vont nous être fournis : un pour l'installation des îlots, l'autre pour le suivi. Pas d'inquiétude : ce sera un suivi *light*, adapté à la gestion. Par contre il est nécessaire de centraliser les informations, en mobilisant le RATD. Nous sommes en train d'y réfléchir : l'idée est d'utiliser les fonctionnalités de l'onglet R&D désormais disponible dans le Sylvoportail*, pour localiser et référencer précisément les îlots d'avenir, histoire de ne pas les perdre au gré des mutations de forestiers.

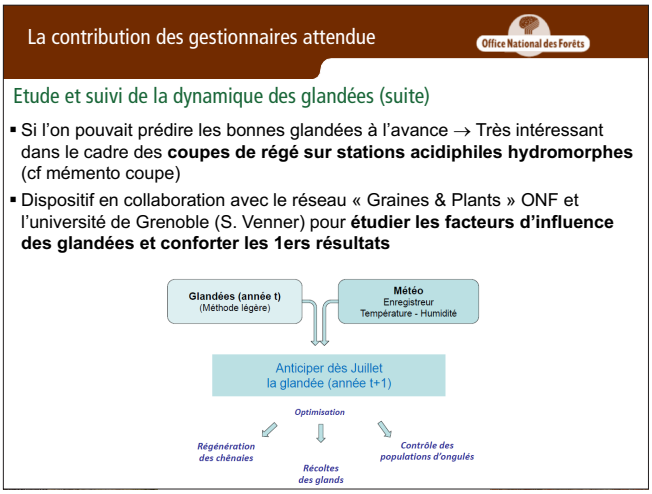
Nous allons pouvoir engager rapidement les travaux de terrain, puisque la pépinière de Guéméné a de quoi installer l'année prochaine onze îlots d'avenir d'au moins 0,5 ha : six îlots de chênes sessiles de différentes provenances du sud, trois de chêne pédonculé, et deux autres pour *Fagus orientalis* et *Pinus radiata*. Si vous avez des plantations prévues, ou même dans les régénérations naturelles, voyez si vous pouvez réserver un petit carré pour installer ces îlots : vous ferez progresser la recherche. Ce seront les petits points bleus du schéma, destinés à compléter et conforter les résultats des dispositifs R&D figurés par les 4 étoiles rouges. Ces dispositifs R&D fourniront des résultats expérimentaux solides (avec répétition) mais dans un contexte stationnel donné. Et comme on ne peut pas les multiplier ces dispositifs, on a besoin des îlots d'avenir pour avoir des informations sur la façon dont l'essence/provenance réagit dans d'autres contextes.

Dans un autre registre, vous avez été sollicités dans le cadre du projet MACCLIF orienté sur la communication et l'information (voir encadré) pour répondre à un questionnaire web : les acteurs forestiers sont-ils au courant des changements climatiques ? Comment les intègrent-ils à leur gestion : attendent-ils des consignes ; y a-t-il parmi eux des géo-trouve-tout qui auraient commencé à semer des choses nouvelles en se disant qu'il faut se préparer ? Etc. En complément de cette enquête, Valentin Lucas (accueilli par le CRPF Centre-Val de Loire) doit conduire une série d'entretiens plus approfondis sur le terrain ou au bureau. Nous espérons que ce travail apportera des éclairages intéressants.

D'autre part, qu'en est-il de l'enquête sur les essences atypiques, lancée en 2015 par le département RDI ? Comme on le voit sur le graphique du haut, qui donne le nombre de réponses par DT, l'ex DT COAL avait été assez peu réactive (100 réponses), et l'ex DT Sud-Ouest encore bien moins (2 réponses seulement). Maintenant que les territoires de ces ex DT sont en grande partie fusionnés dans la DT COA, nous allons relancer l'enquête à l'occasion du déploiement de l'application Canopée version 5, un outil qui permet justement de remonter ce genre d'information. Si on déploie un outil sans sollicitation particulière, il risque fort de n'être pas utilisé. En demandant de faire remonter le recensement des îlots d'essences atypiques, on fait coup double : les intéressés s'approprient l'outil et on complète l'information sur ces essences originales que des forestiers ont jadis implantées dans des situations *a priori* incongrues, et qui ont pu donner des résultats intéressants.

Je veux évoquer aussi le projet Robinier de la DT. Le robinier est en effet une essence qui a des qualités intéressantes et sur laquelle nous nous interrogeons beaucoup : ne pourrait-elle pas intégrer la palette des essences possibles en secteur ligérien ? C'est Gilbert Douzon, au pôle RDI de Boigny, qui assure la coordination de cette action. Dans les





peuplements de robinier existants, et dans certaines conditions, on pourrait tester différents itinéraires sylvicoles visant à faire du bois d'œuvre plutôt que du piquet uniquement. Nous cherchons aussi à tester l'installation de cette essence, dont la plantation n'est pas évidente.

J'en arrive enfin programme PotenChêne que conduit Samuel Venner, de l'Université de Lyon (Laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive) sur la dynamique des glandées, en collaboration avec l'ONF ; plusieurs d'entre vous sont d'ailleurs impliqués dans la mise en place de placettes de suivi. Les premiers résultats sont intéressants : comme la déjà dit Myriam Legay, la production des glands s'est plutôt accrue et cela pourrait être lié à l'augmentation des températures printanières avec le changement climatique. D'autre part, la dynamique des glandées dépend énormément de la dynamique pollinique, qui elle-même dépend des conditions météo du printemps mais aussi de l'effort de floraison -et niveau de glandée- de l'année précédente. C'est cette corrélation entre facteurs de l'année n-1, météo et bonne glandée qui nous intéresse, pour rechercher une méthode simple qui permettrait d'anticiper une bonne glandée (dès juin-juillet, plutôt que de devoir attendre jusqu'en septembre). C'est important, notamment, pour le renouvellement des chênaies dans les stations acidiphiles hydromorphes, où on a des difficultés de régénération. Pour limiter les problèmes, il ne faut engager la régénération qu'avec l'assurance d'une bonne glandée, mais c'est alors une course contre la montre pour enclencher le processus et obtenir que le relevé de couvert puisse être fait en temps opportun. Pouvoir anticiper de deux ou trois mois, ce serait toujours ça de gagné. Nous collaborons donc à cette étude, nous réfléchissons à la possibilité d'étoffer un peu le dispositif et là aussi je serai peut-être amené à vous mettre à contribution. Cependant l'étude est un peu contradictoire avec ce qui remonte du terrain : il y aurait globalement plus de glands, mais j'entends plutôt qu'on a de plus en plus de mal avec les régénérations, que les glandées sont compliquées pas forcément très régulières…

C'est donc intéressant de croiser les remontées du terrain avec les résultats de la recherche. Et ce sera ma conclusion !

© Nathalie Petrel / ONF