



Office National des Forêts

RenDez-Vous techniques

N° 61-62 - HIVER PRINTEMPS 2019

DOSSIER

CHANGEMENTS CLIMATIQUES
ET GESTION DE LA CHÊNAIE
LIGÉRIENNE

MÉTHODES

BIOINDICATION
FAUT-IL DES RELEVÉS
DE FLORE EXHAUSTIFS ?



Directeur de publication

Albert Maillet

Rédactrice en chef

Christine Micheneau

Comité éditorial

Myriam Legay, Patrice Mengin-Lecreulx
(et autres correspondants)

Conception graphique

Agence LINÉAL

Crédit photographique**Page de couverture :**

Romain Perrot, ONF
(en médaillon : François Mouchot, ONF)

Périodicité

4 numéros ordinaires par an
(possibilité d'éditions resserrées en numéros doubles)

Accès en ligne

<http://www.onf.fr>

Renseignements

ONF - documentation technique et générale,
boulevard de Constance, 77300 Fontainebleau
Contact : documentalistes@onf.fr
ou par fax : 01 64 22 49 73

Dépôt légal : Novembre 2019

2 ÉDITO

3 [CONNAISSANCES]

RÉGÉNÉRATION DU CHÊNE EN COMPÉTITION AVEC LA MOLINIE : UN DÉLICAT DOSAGE DES RESSOURCES EN EAU ET EN LUMIÈRE

par Antoine Vernay, Philippe Malagoli, Marine Fernandez, Thierry Améglio, Philippe Balandier
(+ encadré de Xavier Mandret)

11 DOSSIER

[ZOOM]

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET GESTION DE LA CHÊNAIE LIGÉRIENNE

65 [PRATIQUES]

DES SUIVIS POUR PROGRESSER DANS LA SYLVICULTURE DU ROBINIER DANS L'OUEST DE LA FRANCE

par Gilbert Douzon (+ encadré de Joël Conche)

71 [MÉTHODES]

FAUT-IL DES RELEVÉS DE FLORE EXHAUSTIFS POUR CARACTÉRISER ET CARTOGRAPHIER L'ACIDITÉ ET LES PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES DES SOLS ?

par Paulina Pinto, Jean-Luc Dupouey, Jean-Claude Gégout, Jean-Christophe Hervé (+),
Myriam Legay, Pierre Montpied, Christian Piedallu, Noémie Pousse, Stephanie Wurpillot

La gestion durable des forêts à l'épreuve des changements climatiques



© Sylvain Couraud / ONF

Albert MAILLET
Directeur Forêts
et Risques Naturels

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) vient de publier (8 août 2019) un rapport spécial sur le changement climatique et les terres. Plus précisément, ce rapport s'intéresse aux liens entre « *changement climatique, désertification, dégradation des terres, gestion durable des terres, sécurité alimentaire et flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres* ». Il rappelle que nous disposons de connaissances et de stratégies efficaces pour atténuer les changements climatiques et modérer leurs impacts sur les écosystèmes terrestres, en insistant notamment sur la nécessité de préserver les sols qui, par leur couverture végétale et boisée, contribuent à absorber 30 % des émissions de CO₂.

Le GIEC réaffirme aussi l'enjeu crucial d'une gestion durable des forêts et rappelle l'importance du bois dans la lutte contre le changement climatique. L'action de l'ONF au quotidien et ses préoccupations pour l'avenir sont pleinement en phase avec ces orientations, à la fois fortes et nuancées. En témoigne le dossier de ce nouveau numéro des Rendez-Vous techniques, qui retrace les réflexions du séminaire « Changements climatiques et gestion de la chênaie ligérienne » de juin 2018 à Orléans.

Pourquoi le chêne du bassin ligérien ? Parce qu'il est emblématique de la forêt française en plaine, à plusieurs titres ; c'est une production majeure de la filière forêt-bois et une ressource pivot pour notre établissement, donc une ressource qui exige une vigilance maximale. L'enjeu (économique, social, environnemental) est considérable. Ceci étant, la manière de réfléchir et de concevoir des solutions pour l'avenir dépasse largement le cadre des chênaies ligériennes ; nous sommes tous concernés. Partout dans les territoires on réfléchit et on travaille à préparer aujourd'hui les forêts de demain, dans le contexte d'urgence climatique posé par le GIEC : les dépérissements et la crise scolytes qui sévissent ces derniers mois dans l'Est de la France pourraient bien préfigurer ce qui nous attend.

En-dehors du dossier, les autres sujets abordés relèvent peu ou prou des problèmes d'adaptation au changement climatique, sous divers aspects. La question de la régénération du chêne en compétition avec la molinie, si « classique » soit-elle, est plus brûlante que jamais. L'intérêt nouveau pour le robinier dans certaines forêts de l'Ouest porte l'espoir d'une possible diversification pour l'avenir. Enfin les nouvelles approches de bioindication des potentialités forestières par les plantes se démarquent des typologies des catalogues de stations. Ces typologies ont rendu bien des services jusqu'ici, mais comme elles ont été implicitement conçues « à environnement constant » et ne donnent souvent que des caractéristiques qualitatives, elles ne permettent pas les projections dans le temps ni dans l'espace. Ce qui est désormais très pénalisant.

Le climat évolue, nos façons de faire aussi.

RÉGÉNÉRATION DU CHÊNE EN COMPÉTITION AVEC LA MOLINIE : UN DÉLICAT DOSAGE DES RESSOURCES EN EAU ET EN LUMIÈRE

RÉSUMÉ

L'échec de régénération naturelle ou par plantation est un problème récurrent dans les chênaies à molinie où la compétition pour les ressources entre les deux espèces est particulièrement forte.

Un mode de gestion visant à contenir la molinie grâce à l'ombrage des arbres adultes est un moyen de réduire la compétition interspécifique. Cependant, si la compétition avec la molinie diminue, les jeunes chênes sont alors confrontés à une plus forte compétition avec les arbres adultes, notamment pour l'eau dans le sol. Il est donc nécessaire de doser la lumière par le couvert des arbres adultes, pour réduire la croissance de la molinie tout en veillant à ne pas induire une trop forte compétition pour l'eau entre les arbres adultes et les plants de chêne. Selon notre étude expérimentale, une gamme de lumière transmise comprise entre 35 à 45%, correspondant à une surface terrière de 8 à 10 m² par ha, semble permettre ce compromis.

Difficultés de régénération du chêne en contexte à molinie

Les chênaies à molinie bleue (*Molinia caerulea* L.) sont régulièrement le théâtre d'échec de régénération naturelle ou par plantation. Comme ailleurs, la qualité des glandées, le succès de germination, la prédation des jeunes chênes par différents herbivores ou encore la présence de divers pathogènes influencent la régénération. Dans ce contexte particulier, c'est avant tout l'envahissement de la végétation monopoliste du sous-bois qui réduit considérablement les chances de survie des jeunes plants de chêne. Ainsi, de nombreux cas témoignent d'une compétition très forte entre les jeunes sujets de chêne et la molinie. En effet, la molinie dispose de nombreux avantages compétitifs par rapport à l'accès aux ressources du milieu grâce à son système racinaire fasciculé et dense et à sa croissance très rapide, tant pour les parties aériennes que souterraines (Gaudio *et al.*, 2011). Ces propriétés lui permettent, dès qu'elle a assez de lumière, de coloniser rapidement l'espace. Ce faisant, elle accapare une grande partie des ressources du sol (eau et nutriments) au détriment des autres espèces. Le maintien d'une partie du couvert arboré pourrait permettre de réduire la croissance de la molinie en limitant la lumière disponible. Cependant les arbres adultes, très consommateurs en eau, peuvent alors entrer en compétition avec les jeunes plants de chêne pour l'accès à l'eau du sol (Gobin *et al.*, 2015).

Antoine Vernay

Université Clermont Auvergne, INRA, UMR 547 PIAF

Department of Forest Ecology and Management,
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU),
SE-901 83 Umeå, Sweden

Philippe Malagoli

Marine Fernandez

Thierry Améglio

Université Clermont Auvergne, INRA, UMR 547 PIAF

Philippe Balandier

Irstea, Unité de recherche sur les écosystèmes forestiers
(EFNO)

Les gestionnaires sont en tout cas face à un dilemme cornélien : ouvrir le couvert arboré au risque de favoriser le développement de la molinie ou, au contraire, limiter la lumière transmise dans le sous-bois pour diminuer la pression de compétition de la molinie mais en augmentant celle des arbres adultes pour l'eau.

Nous avons donc cherché à évaluer l'impact de la compétition par la molinie sur la régénération du chêne le long d'un gradient de lumière, induit par la création d'une trouée. L'objectif de l'étude est de déterminer un niveau d'ombrage suffisant pour diminuer la croissance de la molinie tout en permettant celle du chêne et en évitant d'induire un stress hydrique pour les jeunes plants. Ce compromis permettrait d'optimiser les chances de succès de la régénération par le dosage de la lumière.

Dispositif expérimental

L'objectif est d'étudier la réponse à court terme de la croissance du jeune chêne à la présence de la molinie le long d'un gradient de lumière transmise ou « transmittance » ; la transmittance est la proportion du rayonnement parvenant en sous-bois par rapport au rayonnement incident au-dessus du couvert arboré (Balandier *et al.*, 2010). Pour s'affranchir des aléas de glandées et de germination et pouvoir observer une réponse spécifique à l'interaction avec la molinie le long du gradient de transmittance, nous avons planté des chênes d'un an, issus de pépinière.

En pratique, une trouée de 2 800 m² a été ouverte dans la chênaie de Paray-le-Frésil (encadré 1 et figure 1), de façon à pouvoir installer un transect d'une soixantaine de mètres de long depuis le cœur de la trouée (ouverture totale du couvert) jusque sous le couvert arboré (figure 2). La transmittance a été évaluée à l'aide de photographies hémisphériques (Canon EOS-5D doté d'un objectif fish-eye SIGMA 1/1) : le gradient mesuré le long du transect s'échelonnait de 17% à 80% de transmittance.

L'expérience a été réalisée deux fois, selon le même protocole, en 2015 et 2016. Le long de ce gradient, 60 plants de chêne sessile ont été plantés en racines nues à l'automne 2014 puis à l'automne 2015 : ces plants d'un an avaient une hauteur de 20 cm en moyenne avec un diamètre au collet de 5 mm. Leur système racinaire consistait en un pivot et quelques racelles. Ces plants ont été installés de façon à former 60 placeaux de 1 m² dont un sur deux a été désherbé à la main toutes les deux semaines (Encadré 1 et figure 3A et 3B). Ce désherbage manuel a permis de limiter fortement la compétition aérienne des herbacées, sans toutefois éliminer complètement la compétition souterraine, les parties racinaires dans le

1 - Le site expérimental au cœur de la chênaie de Paray-le-Frésil (03, Allier)

Nos expérimentations se sont déroulées à Paray-le-Frésil dans le département de l'Allier (46°39' N, 3°36' E) au sein d'une chênaie pédonculée à molinie ; un peuplement de futaie régulière âgé de 85 ans environ, à la densité de 361 tiges.ha⁻¹ et atteignant 23 m de hauteur moyenne (Breyse, 2017). Nous avons cependant choisi d'étudier la réponse du chêne sessile (*Quercus petraea* L.), plus résistant à la sécheresse et qui, dans un contexte de changement climatique, pourrait présenter des avantages écophysologiques. Si le sous-bois est principalement occupé par la molinie bleue, on retrouve un cortège assimilable à un profil intermédiaire entre *Molinio caeruleae-Quercetum roboris* (code CORINE 41.51) et *Peucedano-Quercetum roboris* (code CORINE 41.54) (figure 1). Une étude pédologique du sol a été réalisée en 2011 conduisant à un sol de type luvisol typique-rédoxisol à pseudogley de nappe d'eau perchée à 30 cm, oligosaturé, sablo-limoneux devenant limono sablo-argileux à 50 cm, issu de colluvions de formations sableuses des sables et argiles du Bourbonnais.

Comme beaucoup de stations à molinie bleue, le milieu est caractérisé par des ennoyages récurrents, du fait de nappes d'eau proches de la surface pendant de longues périodes, avec des rabattements de nappes également rapides. La dynamique de la nappe a été enregistrée depuis 2011 avec des piézomètres (Breyse, 2017). Ces mouvements de nappes induisent différents stress pour les arbres alternant entre ennoyage et sécheresse notamment dans les horizons supérieurs du sol, zone de prospection privilégiée des racines fines des jeunes plants de chêne comme de la molinie.

La température moyenne était de 15,5 °C en 2015 pendant la période d'étude (mars-octobre) et 14° C en 2016. Les précipitations durant l'année 2015 ont atteint 467 mm entre mars et Octobre et 532 mm en 2016.



Octobre 2014



Mars 2015

A. Vernay / UMR PIAF-Irstea

Figure 1. La chênaie à Molinie de Paray-Le-Frésil - Noter le développement rapide de la molinie entre l'automne 2014 (A) et le printemps 2015 (B).

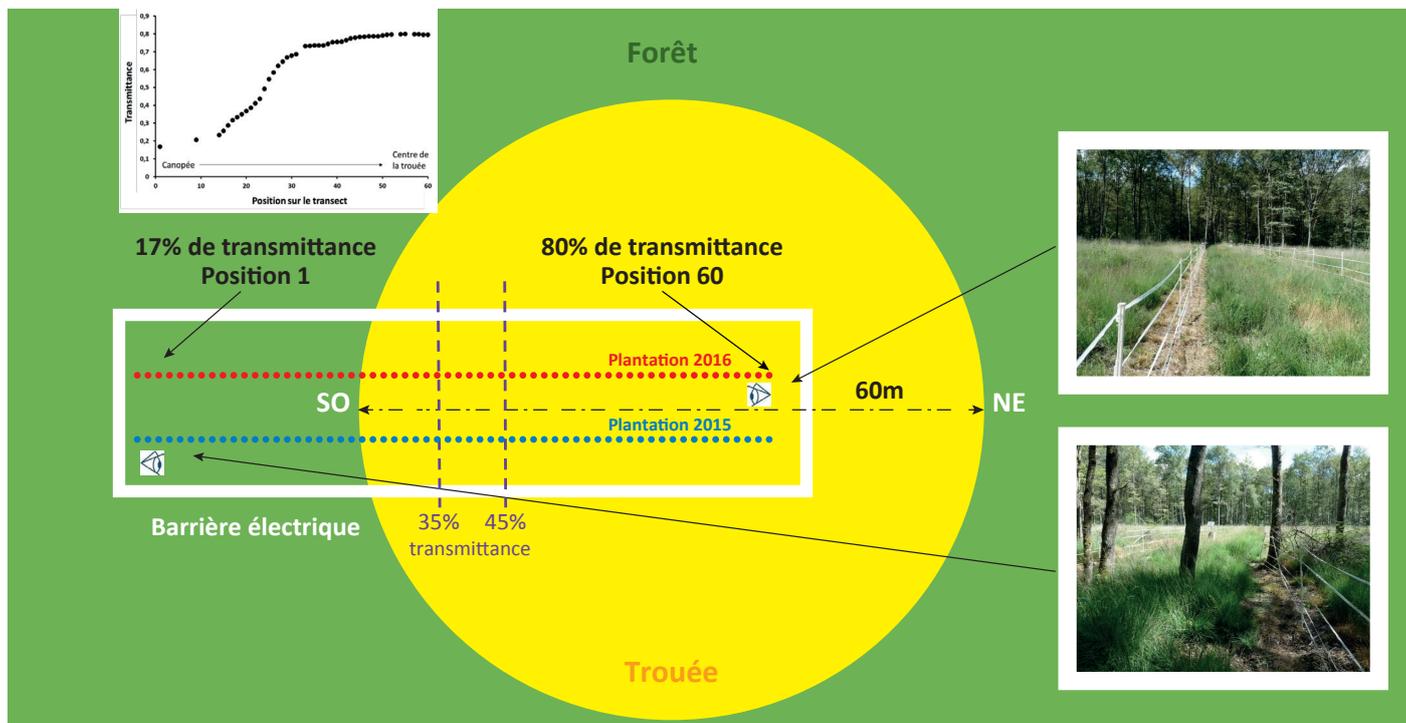


Figure 2. Schéma de la trouée expérimentale établie dans la chênaie - Cette trouée a un diamètre de 60 m et les lignes de plantations sont établies Sud-Ouest – Nord-Est. En médaillon, diagramme de la mesure de la transmittance (pourcentage de lumière mesurée sous le couvert arboré par rapport à la lumière mesurée au-dessus du couvert arboré) le long du transect de plantation. Les points bleus et rouges représentent les 60 plants de chênes plantés respectivement en 2015 et 2016.

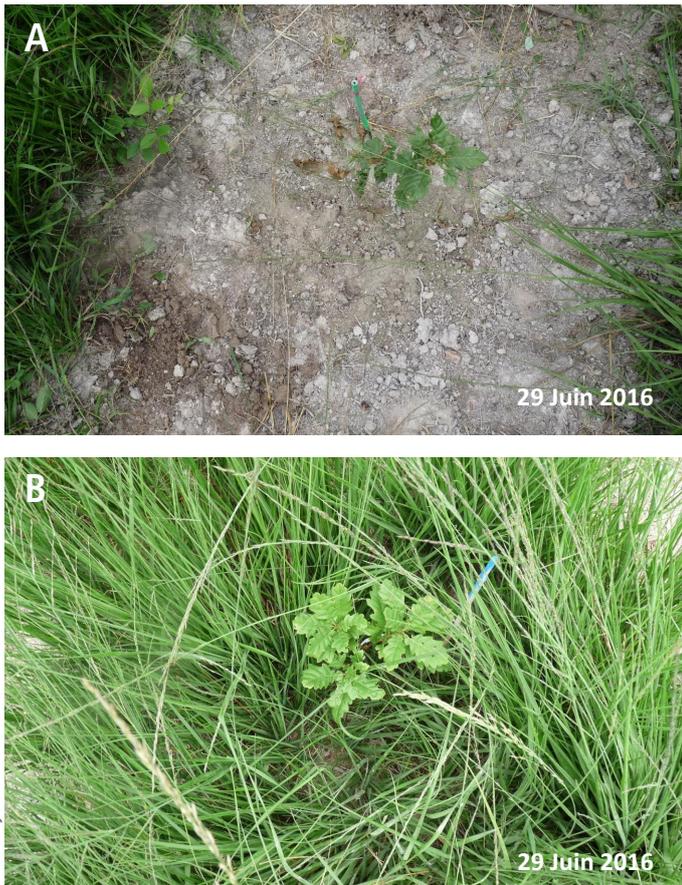


Figure 3. Placeau chêne « seul » (A) ou avec molinie (B) - Pour le placeau chêne « seul », les parties aériennes de la molinie ont été arrachées sur une surface d'environ 1 m².

sol n'ayant pas été excavées. Enfin, deux traitements à base d'Insectobiol (1 g.L⁻¹) ont été appliqués au printemps, lors de l'étalement des feuilles pour éviter l'infestation de la chenille tordeuse verte du chêne (*Tortrix viridana*). De même, nous avons protégé le dispositif des dommages pouvant être causés par des cervidés et/ou des sangliers en l'entourant d'une clôture électrique (figure 2).

Au cours des mois d'octobre en 2015 puis en 2016, nous avons récolté tous les plants de chêne vivants. Les feuilles, les tiges, les racines fines (< 2 mm de diamètre) et grosses racines (> 2mm de diamètre) ont ensuite été séparées, séchées puis pesées. Ces données de biomasse ont permis de caractériser la réponse aux facteurs étudiés, représentant une valeur intégrative du fonctionnement des plants sur l'ensemble de la saison de végétation.

Forte réponse des plants de chêne au gradient de lumière

Quel que soit le compartiment considéré (partie aérienne (feuille + tige), partie racinaire (racines fines)), la croissance en biomasse est très faible en-deçà de 20 % de transmittance. En revanche, cette croissance augmente jusqu'à 40 % de transmittance environ avant d'atteindre un plateau pour les plus fortes valeurs de transmittance (figures 4 et 5), corroborant les résultats d'autres études (Ligot *et al.*, 2013).

Concernant les parties aériennes, la production de biomasse du chêne est marginalement impactée par la présence de la molinie en 2015

(figure 4A et figure 6) et ne l'est pas en 2016 (figure 4B). Au cours des deux années d'expérimentation, la présence de la molinie n'a eu aucun effet statistique sur la croissance des racines fines des jeunes plants de chêne (figure 5A et B).

Une production de biomasse plus forte en 2015 qu'en 2016

Indépendamment de l'effet du rayonnement, la croissance mesurée en 2015 a été significativement plus importante que celle mesurée en 2016 (figure 6). Ainsi, les chênes seuls, c'est-à-dire ceux des placeaux dés herbés, ont produit 9,8 g de biomasse foliaire et 1,1 g de biomasse racinaire en 2015 contre seulement 3,2g et 0,3g respectivement en 2016. La même tendance est observée pour les chênes en compétition avec la molinie, avec une production de biomasse foliaire de 6.8g et biomasse racinaire de 1g contre respectivement 3,2g et 0,2g seulement en 2016 (figure 6).

Si la réponse au rayonnement corrobore celle constatée dans de nombreuses études concernant l'impact de ce facteur sur la croissance des chênes, la réponse à la compétition exercée par la molinie est étonnamment très faible. Une explication plausible à cette observation est que, si nos placeaux « chênes seuls » ont été libérés des parties aériennes de la molinie, ses parties souterraines pouvaient encore être fonctionnelles et exercer une compétition (physique ou chimique) sur les plants de chênes. La plus forte production de biomasse en 2015 qu'en 2016 s'expliquerait alors plutôt par une différence de développement du système racinaire de la molinie, plus faible en 2015 qu'en 2016 et impactant la disponibilité en eau.

Les arbres adultes et la molinie, responsables d'un fort stress hydrique

Les arbres adultes, du fait de leur grande taille, de l'importance de leur surface foliaire et de leur enracinement, prélèvent de grandes quantités d'eau dans le sol. S'ils permettent, en réduisant le niveau de transmittance, de limiter la croissance de la molinie, ils peuvent aussi induire un stress hydrique fort pour les herbacées comme pour les jeunes arbres. Pour évaluer son intensité, nous avons utilisé un indice de stress hydrique (Is) calculé à partir des mesures de teneur en eau du sol réalisées en parallèle des mesures de transmittance (encadré 2).

Nous avons observé un stress hydrique plus important sous la canopée des arbres adultes (très faible transmittance), aussi bien en 2015 qu'en 2016 (figures 4 et 5). Il en résulte que sur les 14 plants qui sont morts en 2015, 11 étaient situés sous la canopée des arbres adultes, dans la zone où le stress hydrique était le plus intense. En 2016, où le stress hydrique était plus faible en durée et en intensité (figure 7), nous n'avons pas constaté de mortalité.

Malgré ce stress hydrique moins prononcé en 2016, la production de biomasse du chêne a été plus faible qu'en 2015, notamment pour les valeurs de transmittance élevées. Ce constat surprenant peut s'expliquer par la répartition du stress hydrique le long du gradient de transmittance. En 2016, nous avons constaté de plus forts indices de stress hydrique qu'en 2015 pour des valeurs de transmittance élevées (au centre de la trouée, figures 4, 5 et 7). Le fort stress hydrique pourrait donc être la cause d'une réduction sévère de production de biomasse des plants de chêne dans cette zone où le rayonnement n'est pas limitant.

2 - Mesure et calcul du stress hydrique

Le stress hydrique a été déterminé grâce à des mesures de teneur en eau du sol (TE) faites à 20 cm de profondeur (c'est dans cet horizon que se retrouve la majeure partie des racines des jeunes plants de chêne), grâce à des sondes réflectométriques TDR (Campbell CS616). Onze sondes ont été positionnées à proximité des chênes, le long du transect, couvrant une large part du gradient et correspondant aux niveaux de transmittance 21 %, 23 %, 32 %, 35 %, 39 %, 49 %, 58 %, 67 %, 73 %, 74 % et 79 %. La réserve utile (RU) en eau est dépendante du type de sol considéré. La réponse des plantes en termes de croissance à cette disponibilité en eau dépend également des stratégies écophysologiques développées par les espèces. Afin de prendre en compte ces différents aspects,

un indice journalier de réserve en eau extractible (RE) a été calculé selon la formule suivante (Granier *et al.*, 2007) :

$$RE = \frac{TE_{mesurée} - TE_{pF4.2}}{TE_{cc} - TE_{pF4.2}}$$

Avec $TE_{mesurée}$ la valeur mesurée par les sondes, $TE_{pF4.2}$ la valeur au point de flétrissement permanent* et TE_{cc} la valeur à la capacité au champ**. $TE_{cc} - TE_{pF4.2} = RU$.

Expérimentalement, il a été montré que pour des valeurs de RE inférieures au seuil de 0,4, la croissance des chênes diminue, l'eau devenant difficilement extractible. Cette valeur seuil a

permis de définir un indice de stress hydrique mensuel, I_s , en sommant l'ampleur relative du stress journalier selon l'équation suivante :

$$I_s = \sum \max \left(0, \frac{0,4 - RE}{0,4} \right)$$

Plus I_s est important plus le stress subi par les plantes est important. Le cumul des valeurs de I_s sont représentées sur la figure 7.

* seuil en deçà duquel l'eau n'est plus extractible par la plante

** capacité maximale de rétention de l'eau dans le sol à saturation

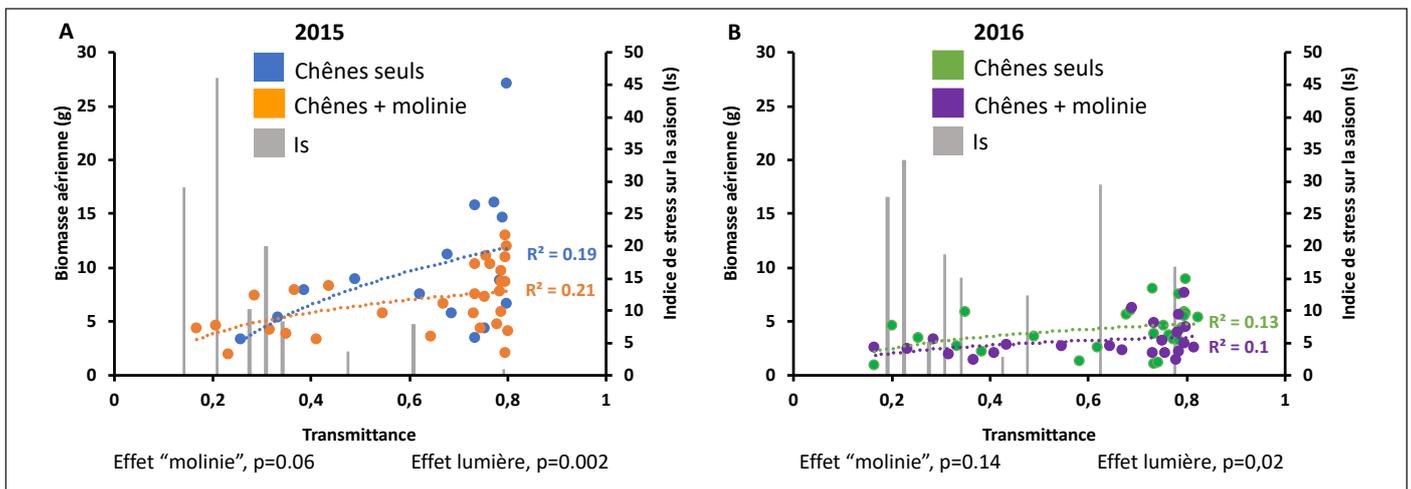


Figure 4. Biomasse aérienne des plants de chêne en fin de saison et indices de stress hydrique cumulé sur la saison de croissance, le long du gradient de rayonnement en 2015 (A) et 2016 (B) - Les valeurs statistiques p indiquent si les différences observées selon les différents facteurs sont significatives ou pas. Une valeur de $p < 0.05$ est considérée comme significative, $0.1 > p > 0.05$ on observe une tendance et si $p > 0.1$ alors on considère que les différentes modalités sont équivalentes.

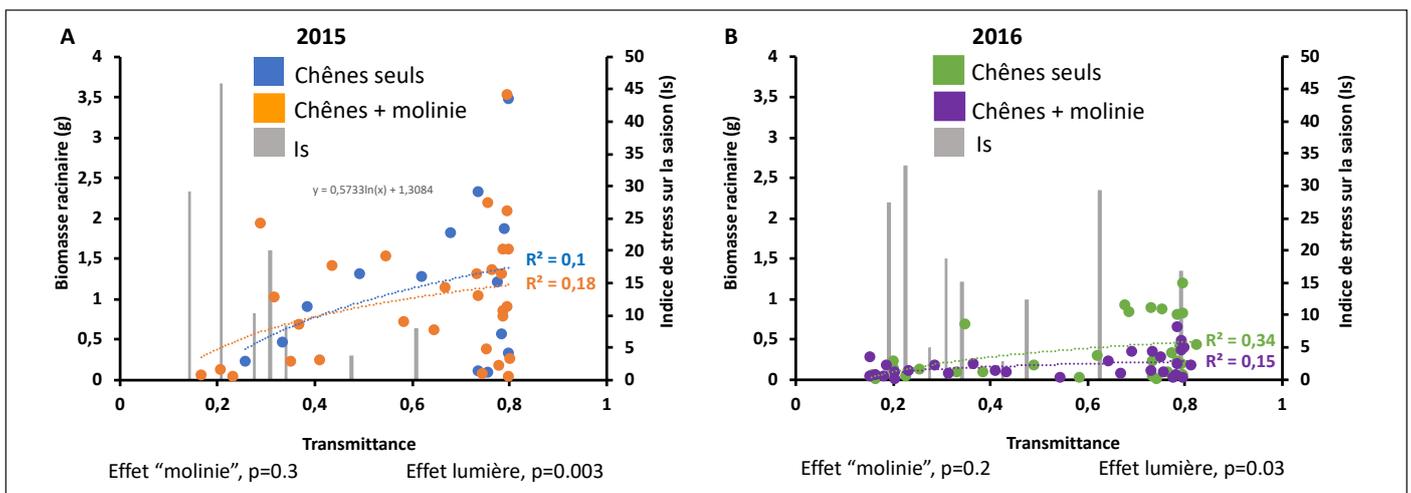


Figure 5. Biomasse souterraine des plants de chêne en fin de saison et indices de stress hydrique cumulé sur la saison de croissance, le long du gradient de rayonnement en 2015 (A) et 2016 (B) - Les valeurs statistiques p indiquent si les différences observées selon les différents facteurs sont significatives ou pas. Une valeur de $p < 0.05$ est considérée comme significative, $0.1 > p > 0.05$ on observe une tendance et si $p > 0.1$ alors on considère que les différentes modalités sont équivalentes.

La molinie, forte consommatrice d'eau

Notre hypothèse pour expliquer ce plus fort stress hydrique au centre de la trouée incrimine directement la molinie. En effet, en 2016, la molinie a bénéficié d'une année supplémentaire de croissance sans ombrage au cœur de la trouée. La biomasse aérienne de la molinie augmente alors fortement le long du gradient de rayonnement (figure 8), ce qui implique un développement considérable de la surface d'échange foliaire conduisant à une forte demande en nutriments et en eau. Il est donc fort probable qu'en 2016 la molinie ait induit un stress hydrique bien plus fort qu'en 2015 pour les chênes, malgré des conditions météo moins contraignantes. Les jeunes plants de chêne n'ont donc pas disposé des ressources hydriques suffisantes pour produire de nouvelles feuilles et/ou racines.

La compétition souterraine indirectement amplifiée par la lumière

Notre étude n'intègre pas les étapes de germination dont la réponse est moins influencée par la lumière et la compétition. Elle ne considère également qu'une seule saison de croissance. Cependant, elle nous a permis de nous focaliser sur la réponse précoce, au stade post-germination, des plants de chêne face à un gradient de lumière avec ou sans espèce interférente. Ce stade est critique pour la survie des plants, durant lequel ils sont le plus vulnérables à la compétition.

La moins bonne croissance des plants de chênes en interaction avec la molinie résulte donc principalement de la compétition pour les ressources souterraines. Une forte transmittance a un effet négatif indirect sur la disponibilité de l'eau et de l'azote du sol pour les chênes en stimulant la captation des ressources souterraines par la molinie (Vernay et al., 2018). Le stress hydrique est plus intense sous le couvert arboré (pouvant induire la mort des plants) tandis qu'au centre de la trouée c'est le développement massif de la molinie qui diminue la disponibilité en eau et en nutriments (figure 9).

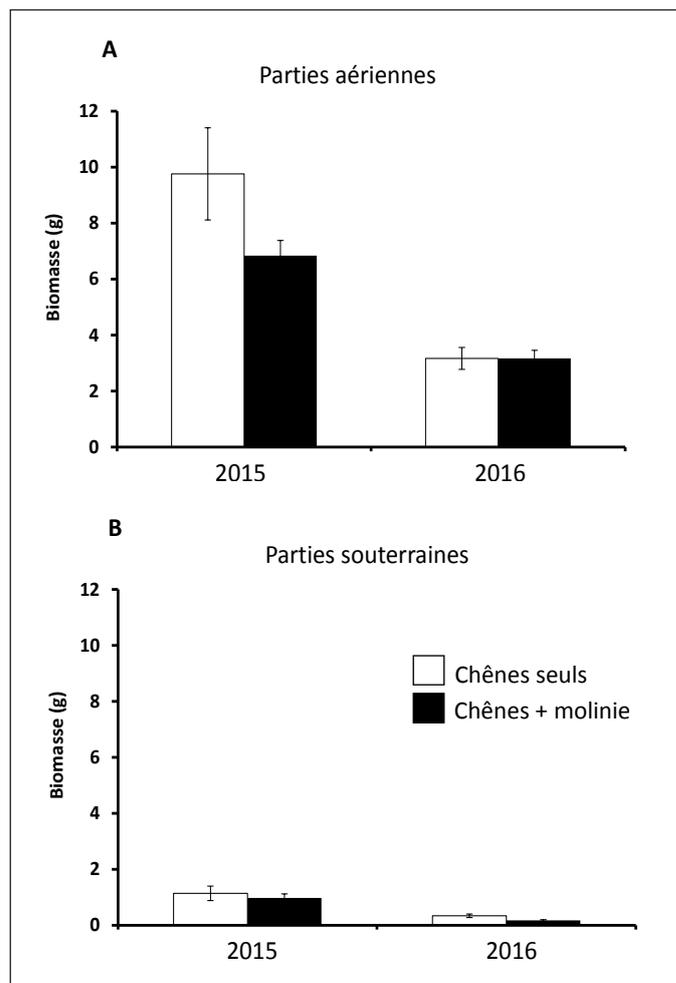


Figure 6. Biomasses aérienne (A) et souterraine (B) des plants de chêne à la fin de la saison de croissance en 2015 et 2016

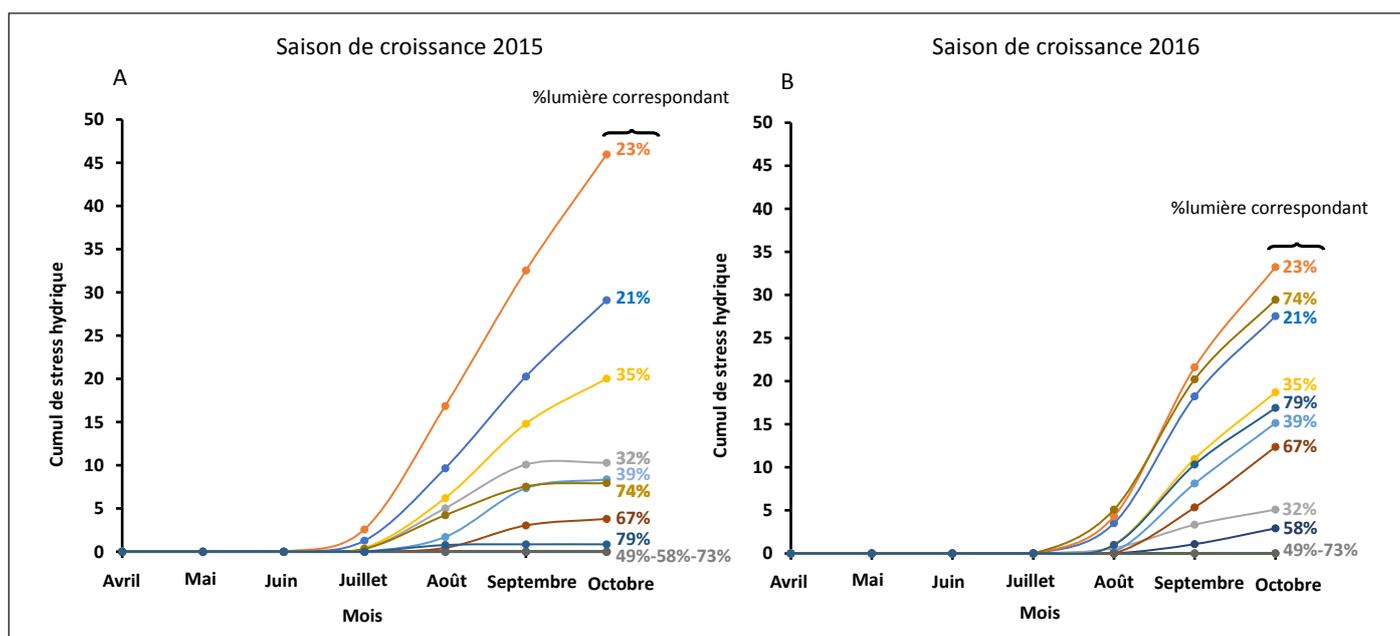


Figure 7. Indice de stress hydrique cumulé mesuré le long du gradient de rayonnement au cours de la saison de croissance en 2015 (A) et 2016 (B) - Plus cet indice est fort plus le stress est intense (voir encadré 2). Chaque courbe correspond à une sonde, et le pourcentage associé indique le niveau de transmittance mesuré à l'emplacement de cette sonde.

APPLICATION PRATIQUE : COUPES DE RÉGÉNÉRATION EN CHÊNAIES ACIDIPHILES HYDROMORPHES

Xavier Mandret, chargé de sylviculture à la DT ONF Centre-Ouest-Aquitaine

Les chênaies acidiphiles hydromorphes, selon la définition des grands ensembles stationnels du « Guide des sylvicultures – Chênaie atlantique »*, sont au cœur de la problématique de régénération du chêne en compétition avec la molinie. Le « Mémento sylvicole » de la chênaie atlantique** (2018) s'applique donc à transposer les résultats de la recherche en indications pratiques.

Préconisations particulières pour les chênaies acidiphiles hydromorphes

« Lors des martelages, le dosage de la lumière doit être une préoccupation essentielle jusqu'à l'acquisition de la régénération ; cela concerne donc généralement les deux premières coupes de régénération. L'objectif est de permettre aux semis de s'installer avant que la molinie devienne trop envahissante.

S'il y a un sous-étage, il est conseillé de ne pas retirer tout le taillis comme cela se fait habituellement, mais de maintenir quelques brins. La surface terrière de taillis à conserver n'a pas fait l'objet d'expérimentation spécifique ; on peut cependant se référer au guide [des sylvicultures pour les] chênaies continentales, qui préconise le maintien de 2 à 3 m²/ha de taillis jusqu'à ce que les semis soient bien installés. Les brins à maintenir sont parmi ceux [qui présentent les] plus faibles diamètres.

Le dosage de la lumière devant guider le martelage, il est également possible d'effectuer un prélèvement à la fois dans le taillis et dans l'étage principal lors des deux premières coupes de régénération. Ce type de martelage est préconisé dans les parcelles relativement pauvres en taillis. L'hétérogénéité des diamètres récoltés [n'est pas à voir comme une] difficulté particulière. Ces coupes sont en effet destinées à être exploitées en régie, la maîtrise de la période d'exploitation étant nécessaire à la bonne installation des semis. Une fois l'ensemencement acquis, il est recommandé de mener les coupes successives à un rythme soutenu, comme dans les autres contextes de la chênaie atlantique. On veillera cependant à ne pas faire la coupe définitive avant que les semis soient bien installés, c'est-à-dire avant qu'ils aient une hauteur moyenne de 50 cm ».

Actions initiées pour « mettre à l'épreuve » les recommandations concernant le relevé de couvert

Deux expérimentations ont été lancées en DT Centre-Ouest-Aquitaine, pour tester/préciser les pratiques de relevé de couvert sur les stations acides hydromorphes, dans le cadre plus large du réseau expérimental Régébloc sur les facteurs de blocage de la régénération naturelle (et les itinéraires techniques pour lever ces contraintes).

La première est située en forêt domaniale (FD) de Vierzon, l'autre en FD d'Orléans où deux modalités ont été installées dans la même parcelle sur des zones distinctes : intervention (témoin) en relevé de couvert « classique », d'une part, et dosage fin de l'éclaircissement, d'autre part. Noter que, pour le dosage de l'éclaircissement, l'équipe de l'unité territoriale concernée en FD d'Orléans a pu reproduire l'intervention de Vierzon (voir ci-après), sans mise en concordance préalable. Partant du même principe, elle arrive à un résultat comparable, avec le même niveau et la même structure de prélèvement, ce qui donne à penser que la méthode pourra être transférée de manière simple.

La parcelle choisie pour l'expérimentation en FD de Vierzon possède un peu de sous-étage de hêtre, et la zone d'étude présente très peu de molinie : on la dit « à l'état latent » car, dans cette même parcelle ainsi qu'aux alentours, elle explose et couvre le sol dès qu'il y a un fort apport de lumière.

Le martelage a été réalisé par anticipation début 2017, bien avant la glandée, et l'exploitation en régie s'est déroulée sur l'hiver 2018-2019 afin de profiter des semis qui se sont installés après les glandées partielles de 2017 et 2018. L'opération, destinée à favoriser la germination et la survie des semis, a consisté à prélever des tiges dans le sous étage en prenant en priorité les plus grosses, mais aussi dans l'étage principal en prélevant des chênes qui étaient trop serrés localement, ou n'étaient pas en capacité de se reproduire. Mais les tiges de sous-étage ont été conservées autant que nécessaire pour favoriser le rôle de pompe ainsi que le dosage et la qualité de de l'éclaircissement par l'étagement des ligneux.

Des placettes de mesure ont été installées selon un protocole rigoureux. Nous surveillerons en particulier le développement des semis par la longueur de la pousse annuelle. Si elle fait moins de 20 cm, nous interviendrons à nouveau en martelage pour augmenter la quantité de lumière disponible.

Ce travail demande énormément de réactivité pour les martelages et la commercialisation. Il est possible dans un cadre expérimental, mais devra ensuite être rationalisé (calendrier type, logistique) pour pouvoir donner des consignes claires et généralisables. L'enjeu est de permettre au semis d'avoir une longueur d'avance sur la molinie à l'installation, et d'éviter ainsi des plantations couteuses et des travaux du sol lourds.

* Jarret P., 2004. Guide des sylvicultures. Chênaie atlantique. Lavoisier – Office National des Forêts. 335 p.

** Delord P., Mandret X., 2018. Chênaie atlantique - Futaie régulière et conversion en futaie régulière - Mémento sylvicole de conduite des peuplements. Office national des forêts - 45 p.

Quel compromis entre disponibilité en eau et en lumière ?

D'après notre étude, il semble nécessaire de protéger les jeunes plants de chêne du stress hydrique notamment en début de saison jusqu'au début de l'été, période critique pour la survie des plants. La gamme de transmittance s'échelonnant de 35% à 45% semble être le meilleur compromis pour permettre la croissance des jeunes chênes tout en limitant le stress hydrique induit par les arbres adultes ou la molinie (figure 9). Cela correspond en chênaie à environ 8 à 10 m² de surface terrière (G), si l'on se réfère à la loi entre la surface terrière et la transmittance établie par Balandier *et al.* (2006). L'ouverture du couvert doit être synchronisée avec les différents stades de croissance du chêne dont la demande en lumière, en nutriment et en eau augmente au cours des différents stades mais elle doit aussi être guidée par la croissance de la molinie, comme le montre cette étude (compétition plus forte de la molinie en 2016 qu'en 2015).

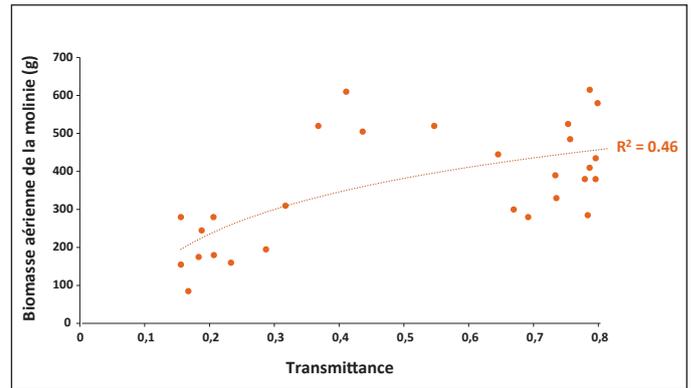


Figure 8. Biomasse aérienne de la molinie, récoltée sur les placeaux de 1m² non désherbés en octobre 2016

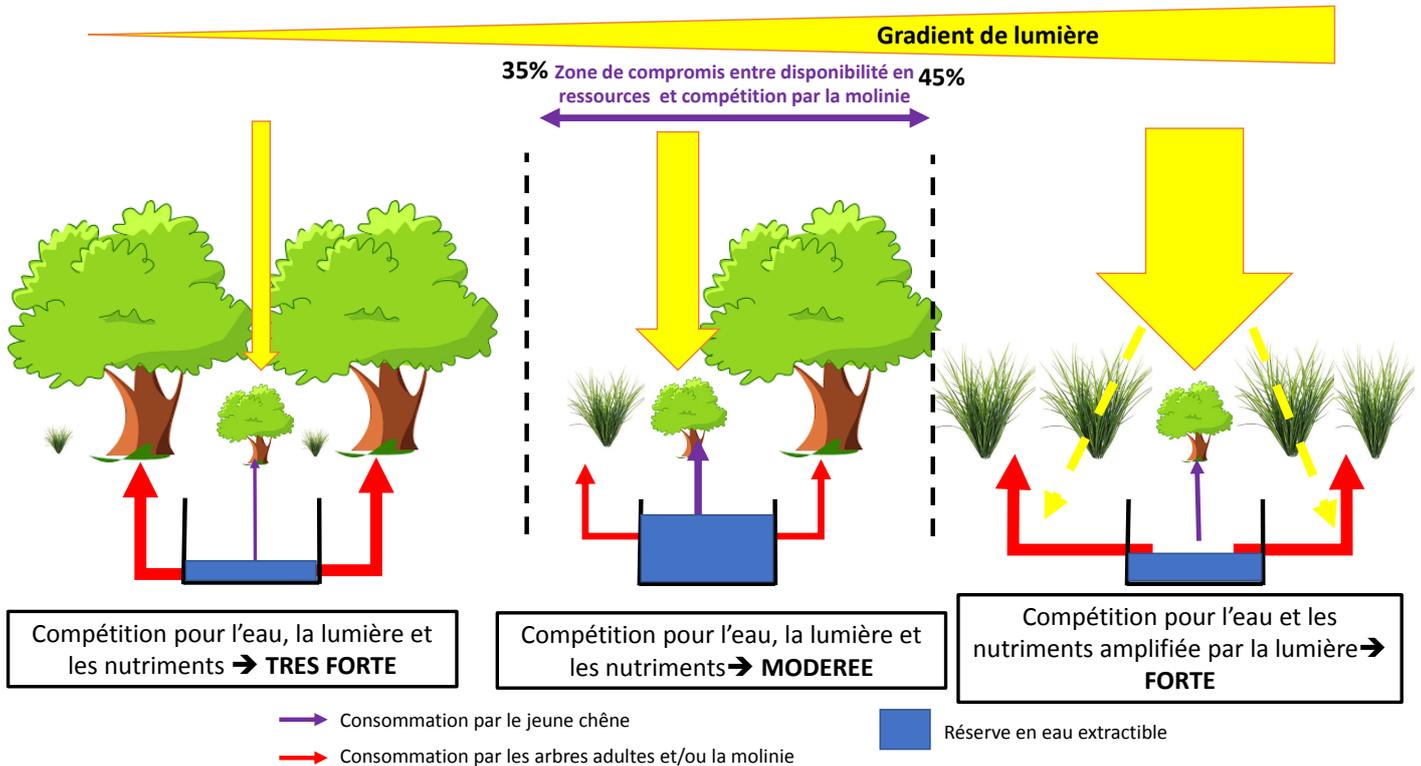


Figure 9. Bilan schématique des interactions pour les ressources entre plants de chêne, arbres adultes et molinie le long du transect et identification du/des facteurs limitant la croissance du plant de chêne - Sous le couvert arboré, la principale compétition vis-à-vis des jeunes chênes vient des arbres adultes induisant un fort stress hydrique, alors qu'au centre de la trouée le stress hydrique est induit par la molinie dont la croissance est favorisée par la lumière.



© Giada Connetari / ONF

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse d'Antoine Vernay financée par le Ministère de la Recherche avec l'aide financière du programme européen FEADER et du département de l'Allier (03). Les auteurs remercient André Marquier, Christophe Serre, Brigitte Saint-Joanis, Marc Vandame et Pascal Walsler pour leur aide précieuse lors des mesures. Ils remercient également Mr Charrier, propriétaire, pour la mise à disposition de la parcelle forestière et la préparation du site expérimental (création de la trouée).

Références

- Balandier P., Marquier A., Perret S., Collet C., Courbaud B., 2010. Comment estimer la lumière dans le sous-bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ? *Rendez-vous techniques ONF* n° 27-28, pp. 52–58
- Balandier P., Sonohat G., Sinoquet H., Varlet-Grancher C., Dumas Y., 2006. Characterisation, prediction and relationships between different wavebands of solar radiation transmitted in the understorey of even-aged oak (*Quercus petraea*, *Q. robur*) stands. *Trees* vol. 20, pp. 363-370. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0049-3>
- Breyse B., 2017. Dépérissement des chênaies et changements climatiques en Sologne Bourbonnaise, Auvergne, Allier. Mémoire EPHE, 96 p.
- Gaudio N., Balandier P., Dumas Y., Ginisty C., 2011. Régénération naturelle du pin sylvestre sous couvert : contrainte de la végétation monopoliste de sous-bois en milieu acide. *Rendez-vous techniques ONF* n° 33-34 pp.18-24
- Gobin R., Balandier P., Korboulesky N., Dumas Y., Seigner V., Richter C., 2015. Une strate herbacée monopoliste : quelle concurrence vis-à-vis de l'eau pour le peuplement adulte ? *Rendez-vous Techniques ONF* n° 48–49, pp. 17–22
- Granier A., Reichstein M., Breda N., Janssens I.A., Falge E., Ciais P., Grunwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Kerónen P., Knohl A., Kostner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors E., Papale D., Peiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufert G., Tenhunen J., Vesala I., Wang Q., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agric. For. Meteorol.* vol; 143, pp. 123–145. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.004>
- Ligot G., Balandier P., Fayolle A., Lejeune P., Claessens H., 2013. Height competition between *Quercus petraea* and *Fagus sylvatica* natural regeneration in mixed and uneven-aged stands. *Forest Ecology and Management* vol. 304, pp. 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.050>
- Vernay A., Malagoli P., Fernandez M., Perot T., Améglio T., Balandier P., 2018. Improved *Deschampsia cespitosa* growth by nitrogen fertilization jeopardizes *Quercus petraea* regeneration through intensification of competition. *Basic and Applied Ecology* vol. 31, pp. 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.06.002>

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET GESTION DE LA CHÊNAIE LIGÉRIENNE

DOSSIER

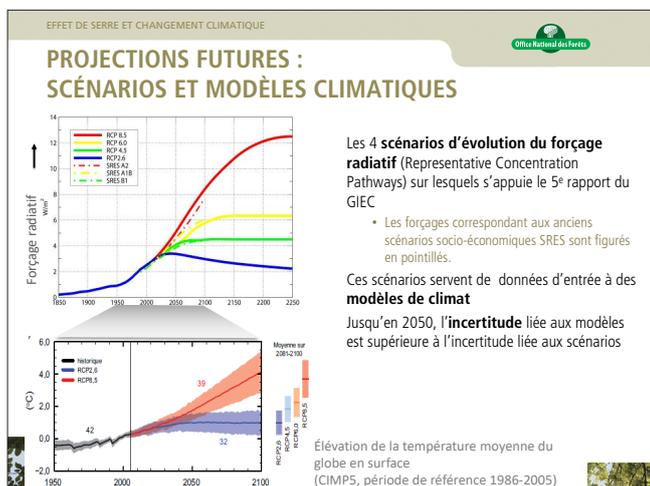
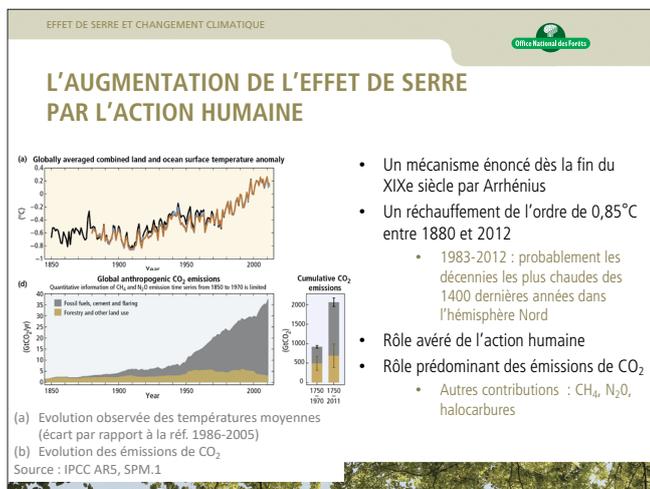
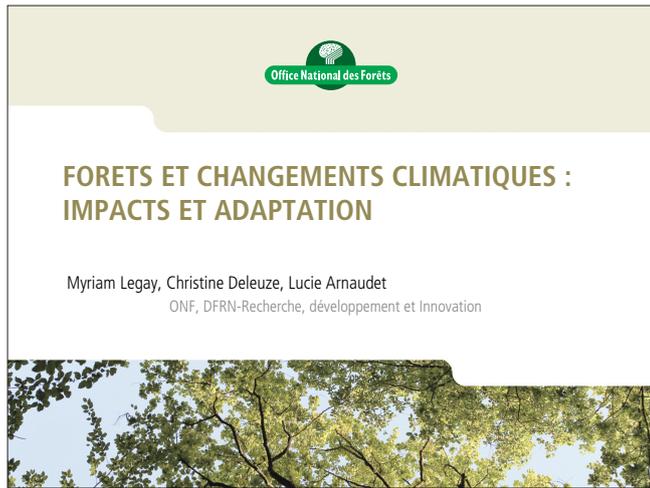
Quels seront les impacts du changement climatique sur les emblématiques chênaies ligériennes ? Comment pourront-elles s'adapter, prendre part à l'atténuation de l'effet de serre ? Ce dossier restitue le séminaire du 28 juin 2018 organisé par la direction territoriale Centre-Ouest-Aquitaine pour faire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



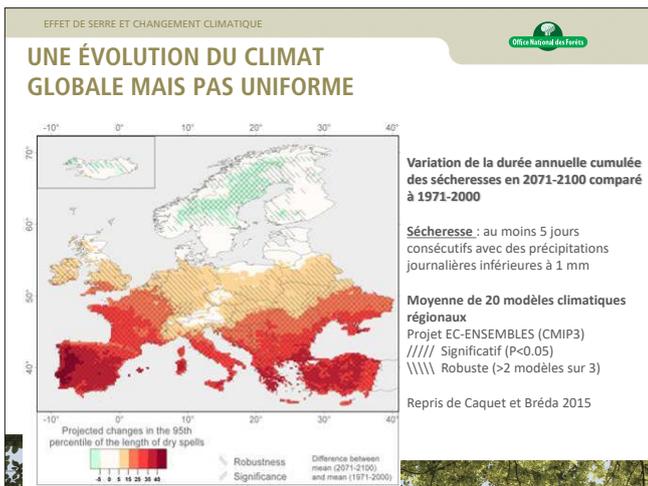
Pour commencer, plantons le décor avec un panorama général de la question « forêt et changement climatique ». Posons les repères avant d'approfondir les réflexions.

Le changement climatique : caractérisation

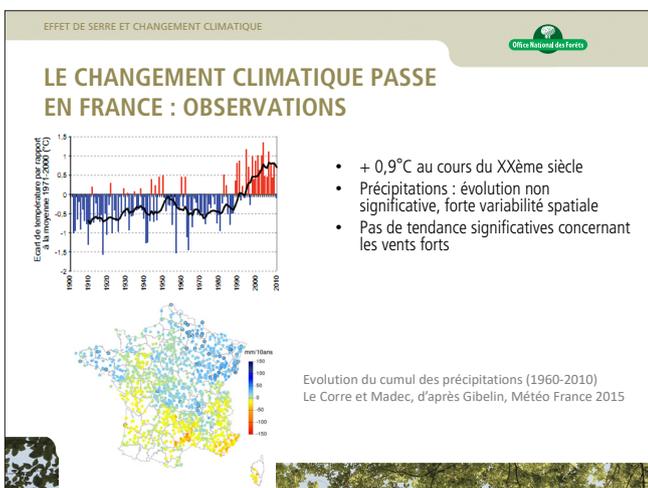
Comme vous le savez, le changement climatique est dû à l'augmentation de l'effet de serre induite par l'activité humaine. L'effet de serre est un phénomène naturel indispensable à la vie sur terre. Mais l'activité humaine, en émettant d'énormes quantités de gaz à effet de serre (GES) comme le montre 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 19^e siècle et les premières mesures mettant en évidence l'augmentation du CO₂ 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 20^e 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.

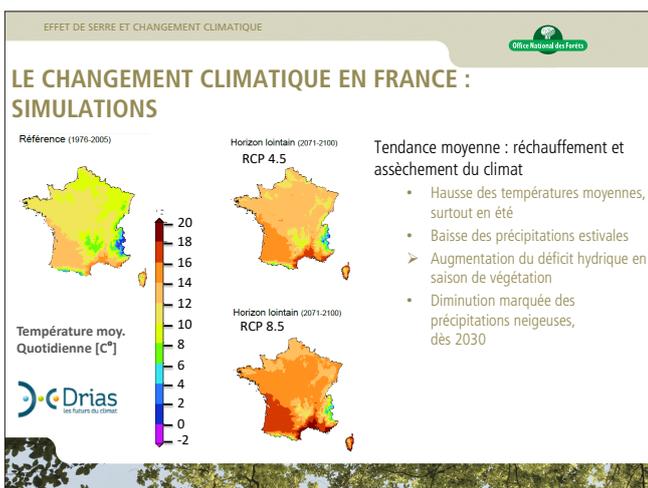
On fait tourner les modèles de climat avec les valeurs de l'effet de serre prédit par ces scénarios, ce qui permet de simuler l'évolution du climat, représentée sur le graphique du bas pour les deux scénarios extrêmes : RCP 2,6 et RCP 8,5. Remarquez le halo autour des courbes : il correspond à l'incertitude 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.



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 20^e 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.

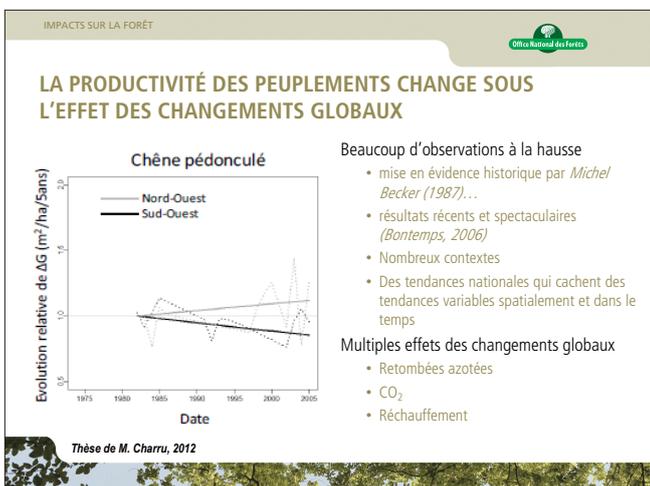
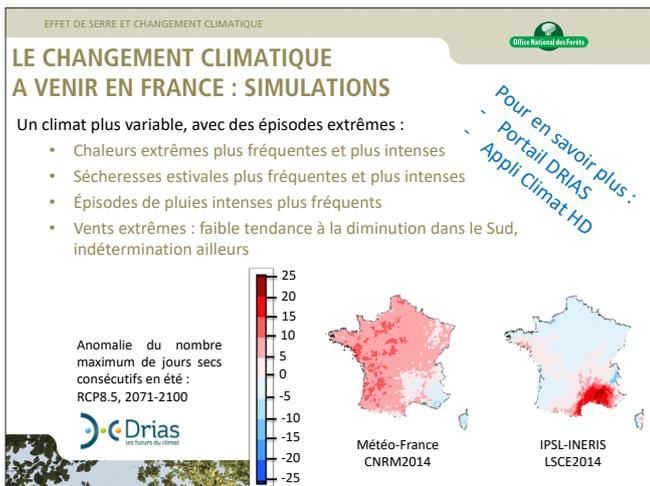


En ce qui concerne **les projections futures**, on prévoit bien sûr un réchauffement représenté ici par des cartes de températures moyennes quotidiennes (en valeur absolue) : à gauche le climat de référence ; à droite le climat en fin de siècle d'après le scénario le moins pessimiste (RCP 4.5, en haut) 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'expliquer. 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.



© Élise Perrouault / ONF



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.

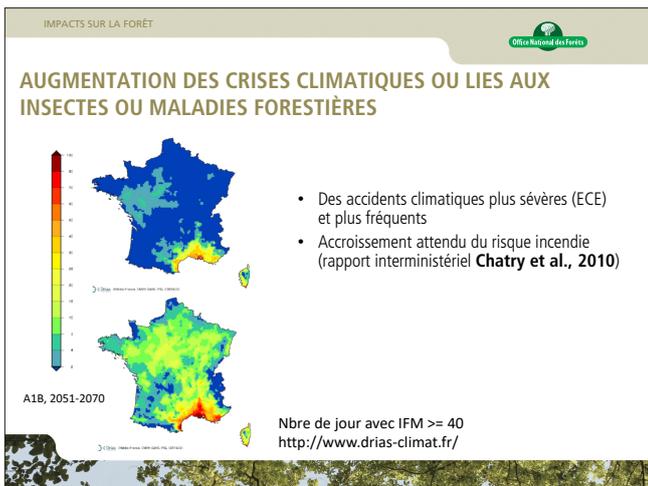
L'effet le plus immédiat concernant la forêt et son fonctionnement, c'est **la modification de la phénologie** : comme la phénologie répond au climat d'une année sur l'autre, elle répond forcément aux évolutions.

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.

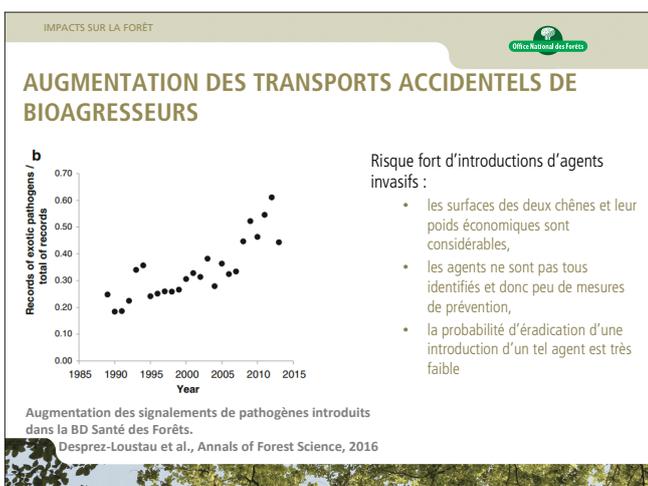
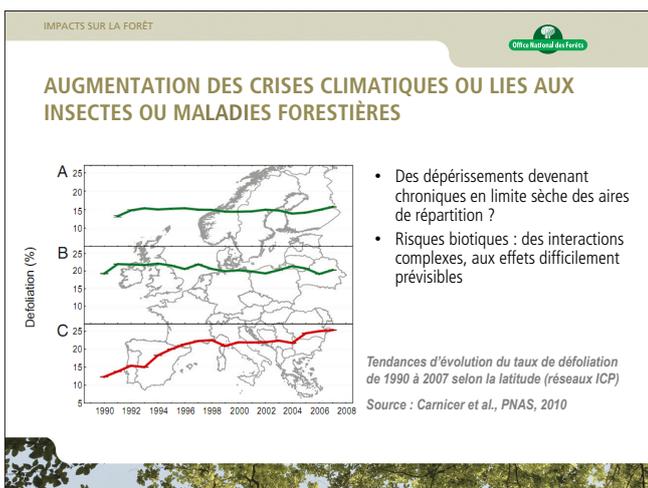
En forêt, on n'est pas encore en mesure de voir ça. Malgré l'apparente simplicité des observations, c'est compliqué de constituer des séries chronologiques fiables parce qu'il faut assurer une constance dans les observations, les observateurs et les arbres observés. Le réseau RENECOFOR a des séries chronologiques 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

IMPACTS SUR LA FORÊT

Office National des Forêts

CHANGEMENTS OBSERVÉS DE RÉPARTITION DES ESPÈCES

Un changement de répartition bien décrit et lié au réchauffement : progression vers le Nord de la processionnaire du pin

4 km/an vers le nord au cours des 10 dernières années

D'après les travaux de C. Robinet et A. Roques
Illustration : www.developpement-durable.gouv.fr/Front-d-expansion-de-la-chenille.html

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 20^e 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

IMPACTS SUR LA FORÊT

Office National des Forêts

ETAT DE LA CHENAIE LIGERIEENNE

Etat de la chênaie dans le secteur ligérien : **satisfaisant et stable** (même suite à la canicule de 2003).

Pédonculé : des houppiers généralement plus dégradés que le sessile (inadéquation de la station, plus forte sensibilité à certains agents biotiques ?)

Des événements locaux de dépérissement, multifactoriels :

- Contraintes stationnelles
- Défoliateurs (bombyx disparate), collybie, oïdium, bupreste du chêne...
- Décapitalisation trop forte, tassement des sols ?

Bombyx disparate

SITUATION CHENAIE LIGERIEENNE

Office National des Forêts

ETAT DE LA CHENAIE LIGERIEENNE

Difficultés de reprise des plantations de chêne

IMPACTS SUR LA FORÊT

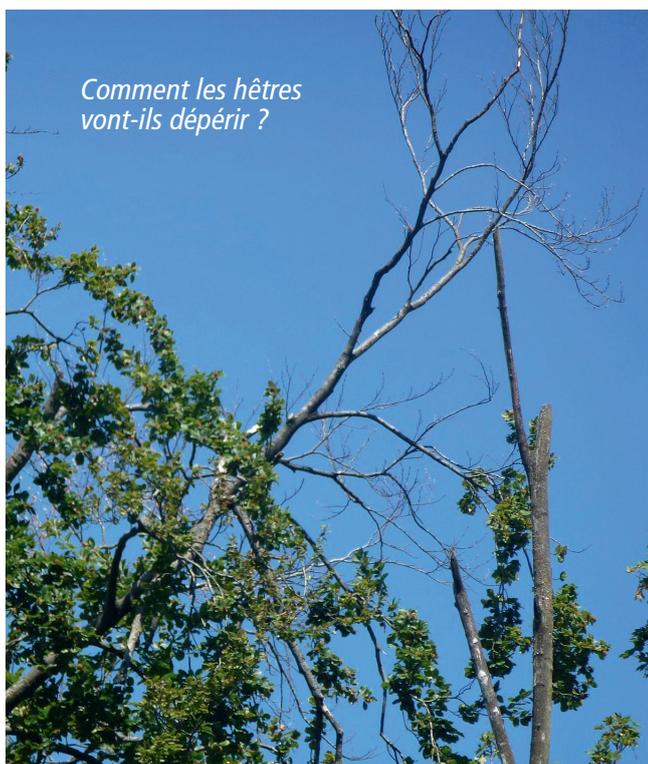
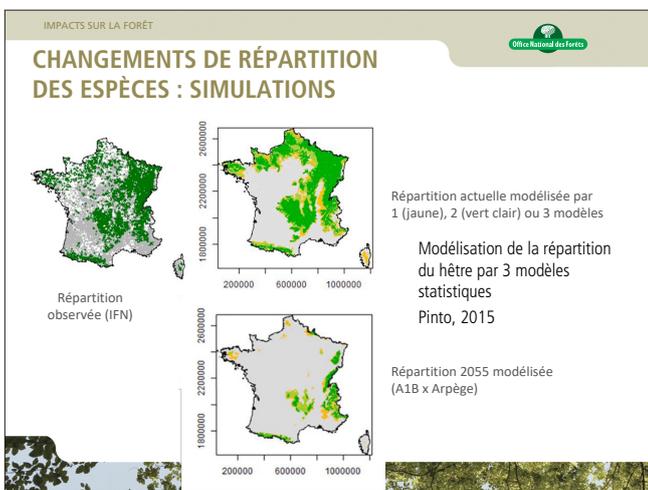
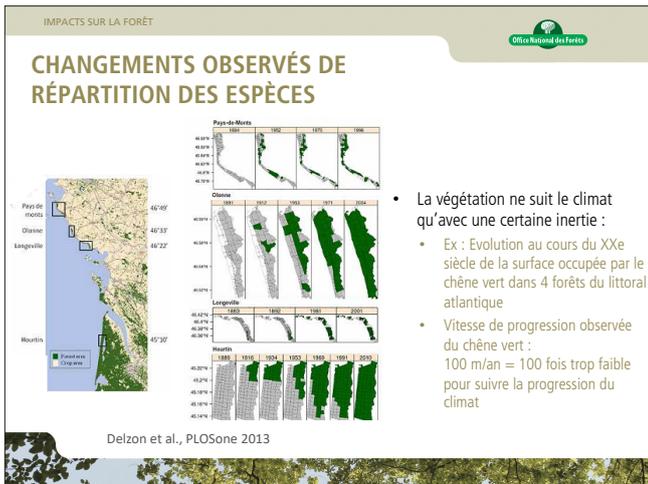
Office National des Forêts

CHANGEMENTS OBSERVÉS DE RÉPARTITION DES ESPÈCES

Des évolutions encore discrètes :

- Ex : remontée de l'altitude moyenne de présence des espèces dans les massifs montagneux (Lenoir & al., Science, 2008)

Photo : P Behr

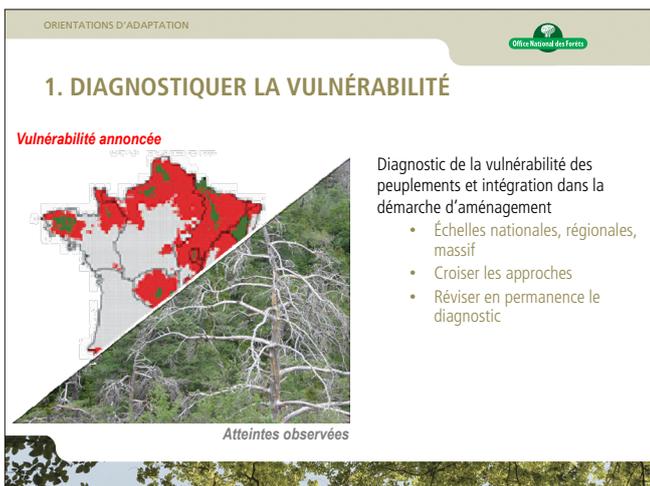
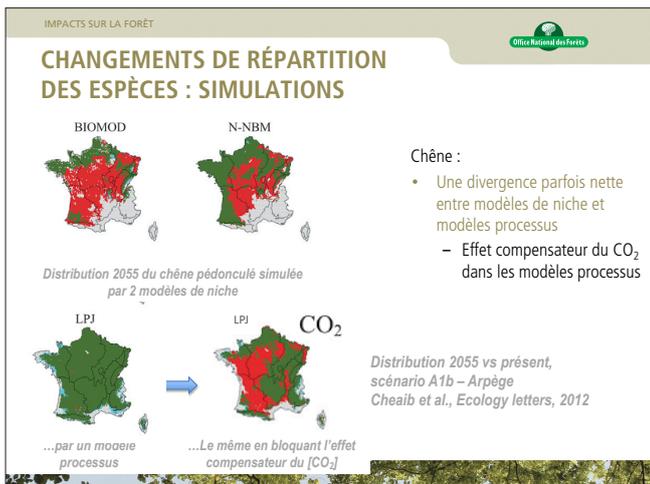


deuxième période. Ils ont comparé les deux séries d'optimums, et le décalage observé est en moyenne de 66 m vers le haut. C'est une observation, mais une observation indirecte, car on ne voit évidemment pas les plantes migrer : il faut des analyses statistiques pour mettre en évidence ce genre de chose.

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 de 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 1^{er} 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 CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂ 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

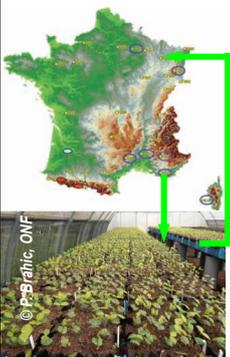
Pour autant, on ne peut pas rester indifférent à ces projections et, à partir de 2005-2006, on a commencé à réfléchir à ce que l'on pourrait faire pour adapter la gestion face au changement climatique. Cela a débouché sur 5 recommandations d'adaptation, que l'on continue à faire évoluer car elles sont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

ORIENTATIONS D'ADAPTATION

Office National des Forêts

2. FAIRE ÉVOLUER LA COMPOSITION DES PEUPEMENTS



Choisir des essences adaptées

- Remplacer les essences les plus vulnérables dans les stations les plus critiques
 - Progressivement
 - Un choix raisonné *in fine* à l'échelle du massif, au fil des renouvellements
 - En combinant les solutions
 - Pm : adaptation *in situ* lors de la régénération naturelle
 - Dosage de la composition des essences en place
 - Apport de nouveau matériel végétal par plantation

Favoriser le mélange des essences

© P. Batiac, ONF
Projet GIONO

ORIENTATIONS D'ADAPTATION

Office National des Forêts

3. DYNAMISER LA SYLVICULTURE



Prendre en compte les augmentations de productivité
Diminuer l'exposition aux aléas :

- Vent fort
 - récolter plus tôt (hauteur totale des peuplements)
- Stress hydrique
 - contrôler la surface foliaire
- Vulnérabilité globale
 - gérer la distribution des âges

Accélérer l'adaptation

- Spontanée *in situ*, en régénération naturelle
- Active, par changement d'essence

Contribuer à l'effort d'atténuation :

- Effet de substitution
- Protection du stock de carbone sur pied contre les aléas

Expérimentation en FD de Picaussel :
modalité éclaircie forte
Crédit ONF/Ladrier

ORIENTATIONS D'ADAPTATION

Office National des Forêts

4. MAÎTRISER LES RISQUES OU LEURS IMPACTS



Limiter les facteurs de vulnérabilité supplémentaire :

- Préserver le capital sol :
 - Éviter le tassement
 - Préserver la fertilité minérale
- Contrôler les populations de cervidés
- [Éviter l'introduction de nouveaux insectes ou maladies : veuille sanitaires]

Améliorer la culture de gestion de crise

- Outils de gestion de crise :
 - 1999, retour d'expérience tempête : classeur « Gérer la crise chablis » et réseau des correspondants crise
 - 2010 : Guide de gestion des forêts en crise sanitaire

Préserver les sols du tassement : porteur 3 routes et chenilles souples
© Ulrich / ONF

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).

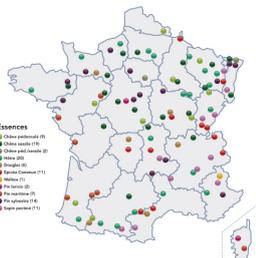
Quatrième recommandation : **maîtriser les risques ou leurs impacts**. En matière d'adaptation en général, c'est souvent un aspect qui est très développé ; mais en forêt, hélas, les capacités de maîtrise des risques sont faibles. Ce que l'on peut faire c'est d'abord limiter les facteurs de vulnérabilité 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.

ORIENTATIONS D'ADAPTATION

Office National des Forêts

5. SUIVRE EN CONTINU LES EFFETS DES CHANGEMENTS GLOBAUX



Esences

- Chêne-petrales (16)
- Chêne sessile (16)
- Chêne-vert (16)
- Pin sylvestre (16)
- Pin maritime (16)
- Pin d'Alep (16)
- Pin d'Hainaut (16)
- Pin de France (16)
- Pin de Corse (16)
- Pin de Hongrie (16)
- Pin de Laricio (16)
- Pin de Noé (16)
- Pin de Taurin (16)
- Pin de Tschouli (16)
- Pin de Turquie (16)
- Pin de Corse (16)
- Pin de France (16)
- Pin de Noé (16)
- Pin de Taurin (16)
- Pin de Tschouli (16)
- Pin de Turquie (16)

Le réseau RENECOFOR : 102 placettes de suivi à long terme des écosystèmes forestiers

Des dispositifs nationaux à différentes résolutions & objectifs :

- Inventaire forestier national (IGN)
- Réseau 16 X 16 (ICP 1) et correspondants observateurs
- Réseau RENECOFOR (ICP 2)
- SOERE Forêt (Recherche)

Enjeux :

- Capter les évolutions des écosystèmes :
 - Compréhension / représentativité
- Indicateurs de gestion durable adaptés aux enjeux du CC

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 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

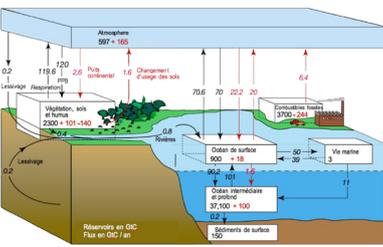
Enfin on peut parler de « forêt et changement climatique » sous un angle tout à fait différent, celui de la contribution à l'atténuation du changement climatique. De quoi s'agit-il ?

Office National des Forêts

LA FORÊT PEUT CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Office National des Forêts

LA FORET, PARTIE PRENANTE DU CYCLE DU CARBONE



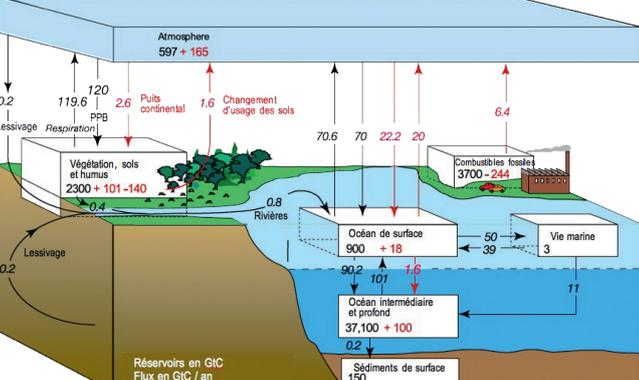
Notion de « **puits forestier** » : les forêts de la planète capturent du carbone en rétroaction aux activités humaines

La filière forêt-bois peut permettre d'agir sur le bilan carbone : notion d'**atténuation** du changement climatique

Une problématique distincte de celle de l'adaptation et influencée par la CCNUCC

GIEC 2007

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.



Atmosphère 597 + 165

119,6 | 120 | Puits continental | 1,6 | Changement d'usage des sols | 6,4

0,2 | Lessivage | Respiration | 2,6 | Combustibles fossiles 3700 - 244

70,6 | 70 | 22,2 | 20

0,8 | Rivières | 0,4

0,2 | Lessivage

Végétation, sols et humus 2300 + 101 - 140

Océan de surface 900 + 18

Océan intermédiaire et profond 37.100 + 100

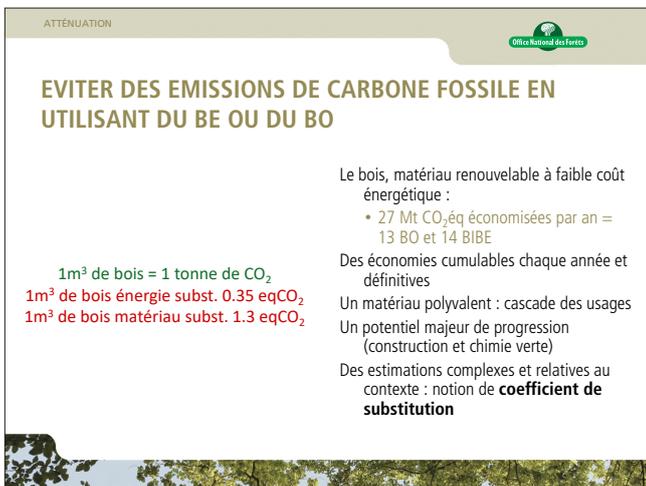
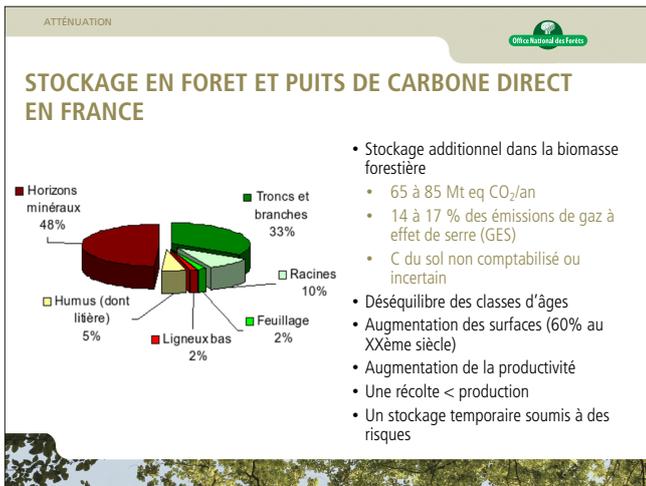
Sédiments de surface 150

50 - 39 | Vie marine | 3

Réservoirs en GtC Flux en GtC / an

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 CO₂. 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.



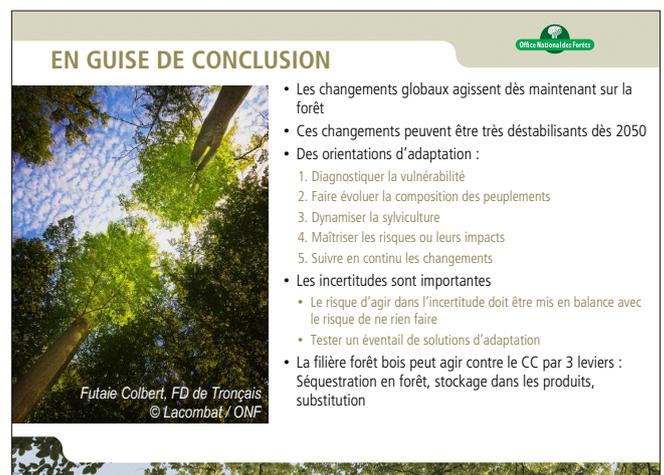
Pour la France, le puits forestier, c'est-à-dire le stockage additionnel de carbone (ou séquestration), est tout à fait conséquent ; il correspond en gros à 14 à 17% des émissions des gaz à effet de serre de la France. Il est dû au déséquilibre des classes d'âges, au fait que la forêt française est une forêt en cours de maturation, notamment parce que les surfaces forestières ont augmenté de façon considérable au cours du 20^e 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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂/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.



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

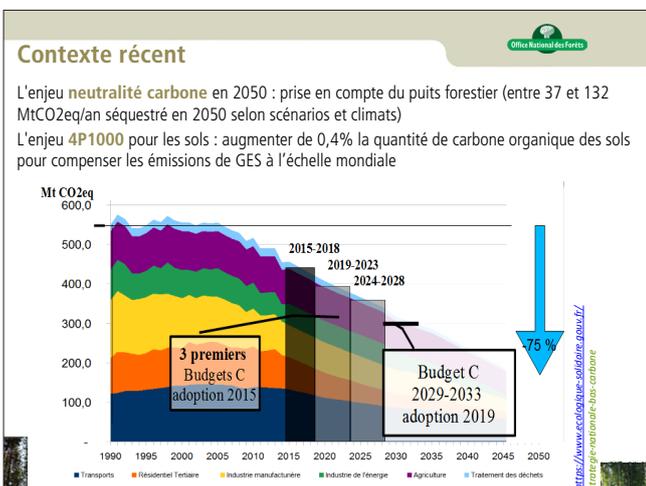
Rappelons d'abord les ordres de grandeur actuels des trois leviers d'action pour l'atténuation, les « 3 S » :

- la **séquestration en forêt** représente environ 15 % de nos émissions de GES ; ça correspond à l'augmentation de la biomasse forestière, au CO₂ 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 CO₂ 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

évités 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.

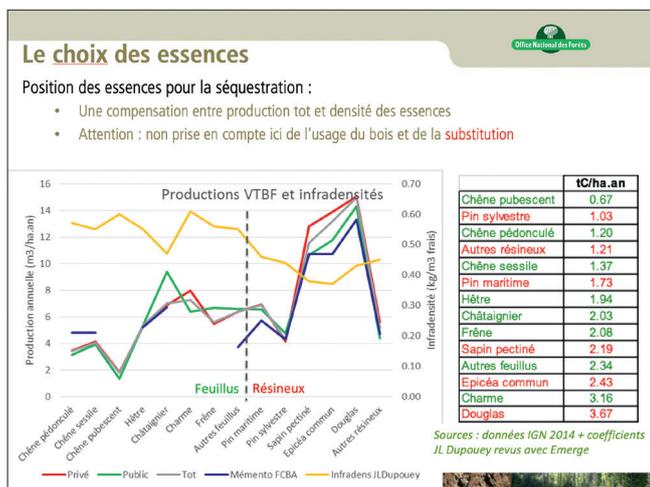
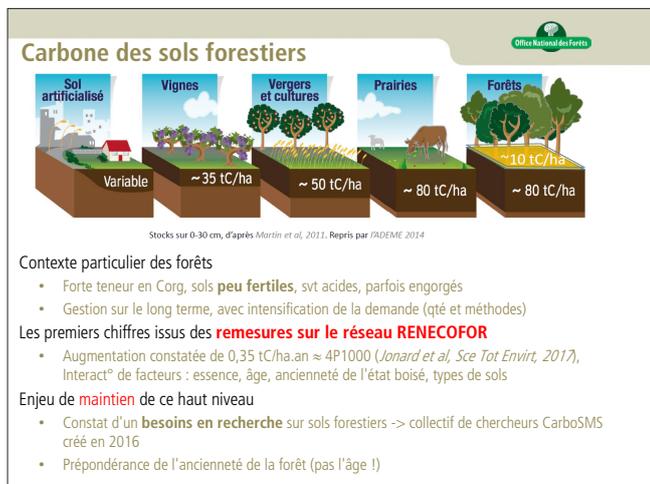
Quelques éléments de compréhension

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 (2^e campagne « sols » environ 15 ans après la 1^{re}) 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 ?

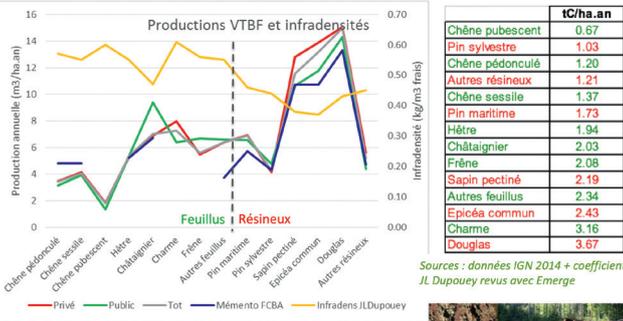
Je propose de comparer les essences sur la base des quantités de carbone fixé par hectare et par an. Sur ce graphique, j'ai reporté les informations de croissance annuelle (en m³/ha/an) pour les différentes essences indiquées « en abscisses » : les informations de l'inventaire forestier (extraction 2014), 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.



Le choix des essences

Position des essences pour la séquestration :

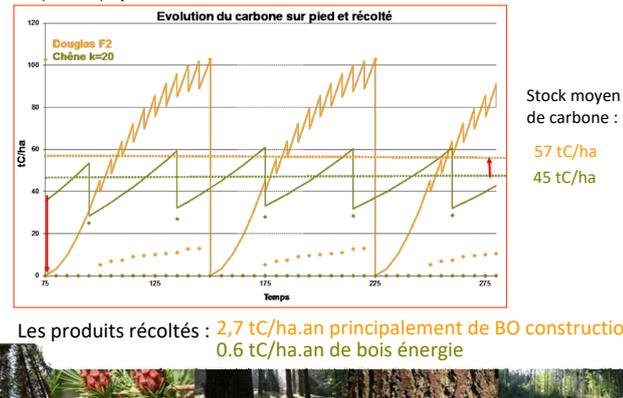
- Une compensation entre production tot et densité des essences
- Attention : non prise en compte ici de l'usage du bois et de la substitution



Sources : données IGN 2014 + coefficients J.L Dupouey revus avec Emerge

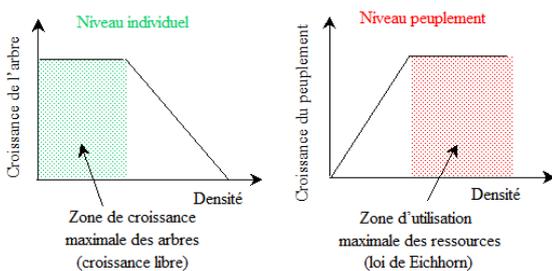
Le temps forestier sur une parcelle

Exemple d'un projet "carbone" : "dette" ou "investissement" C



Arbre vs. peuplement ?

Les vieux arbres continuent à séquestrer, mais le bilan est à faire au niveau du peuplement !



©Jean-François Dhôte, INRA

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 1^{re} 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 CO₂ c'est arriver au maximum de la production.

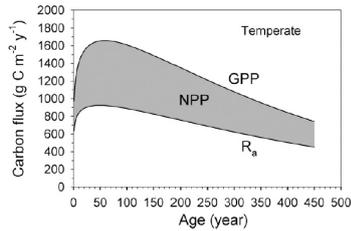
Arbre vs. peuplement ?

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

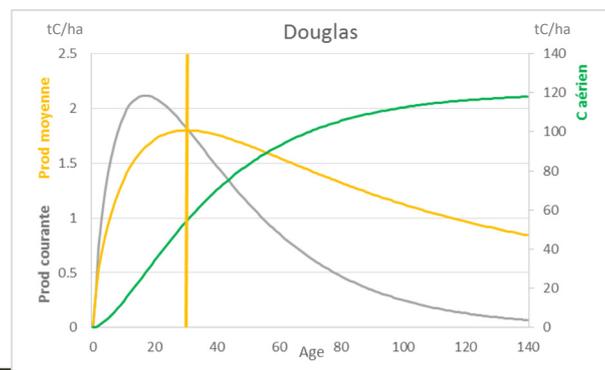
Attention à certaines études biaisées sur la croissance des vieilles forêts

- "oubli" des sites détruits
- effet fertilisant des dépôts azotés et du CO₂



Tang et al., 2014, PNAS

Maximum de production et GdS



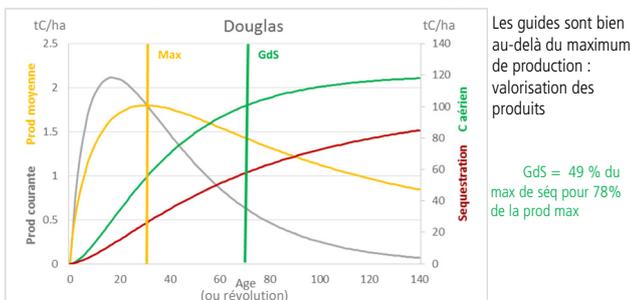
À l'échelle peuplement, la productivité potentielle évolue avec l'âge. C'est quelque chose qui se mesure sur les sites de suivi intensif très instrumentés. La productivité primaire brute (GPP), c'est-à-dire la masse de carbone assimilée par unité de temps, passe par un maximum puis décline progressivement. 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 vieillissent 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 CO₂, 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.

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

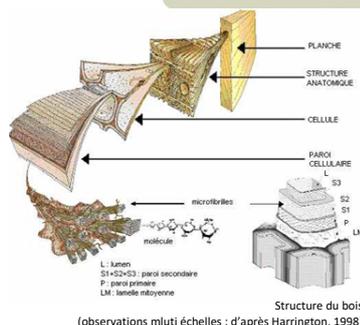
Compromis entre un haut niveau de séquestration et une production forte
Diminuer la production réduit le stockage et la substitution
Réfléchir la production en terme d'effets de substitution des produits
Accroître la séquestration augmente l'exposition des peuplements et diminue leur résilience

L'enjeu de substitution

Le bois, un matériau polyvalent

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

Substitution BO > BI > BE mais...



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

L'enjeu de substitution

Substitution BO > BI > BE mais...

Enjeu de la bioéconomie :

le bois comme usine à molécules carbonées longues

- extractibles, lignine pour les phénols
- nano-cristaux et nano-fibrilles de cellulose
- polyamides et polyesters d'hémicellulose pour la chimie des plastiques

Des enjeux de masse :

énergie (chaleur & électricité), papeteries, fibres pour les biocomposites, biocarburants

-> enjeu de récolte durable



INNOVER POUR LA CHIMIE DU BOIS

<https://www6.inra.fr/extraforest>



L'enjeu de substitution

Un matériau réutilisable : l'usage en cascade

- BE lié au BO et pertes sciages
- Distribution d'usages et durées de vie variables des produits
- Recyclages
- Fin de vie : en décomposition ou combustion

Un gain dans la durée de vie en utilisation

Un cumul des effets de substitution

"structure puis panneau puis énergie"

Des quantités de C dans les produits du même ordre de grandeur qu'en forêt pour certains résineux

La substitution cumulative et définitive



Photo : INRA (2018) F.D. Bellème (Orne)

INRA SCIENCE & IMPACT
IGN

Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?

Coord. Roux A., Dhôte J.-F., Schmitt B.

Étude INRA-IGN réalisée pour le MAA

Docs FR et EN + vidéo restitution sur : <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article876>
<http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Forets-filiere-foret-bois-francaises-et-attenuation-du-changement-climatique>

Photo : FCBA (2015) Mathons (Aube)

Commande MAA : leviers d'atténuation via BO-BI-BE, sols, adaptation au CC et risques

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

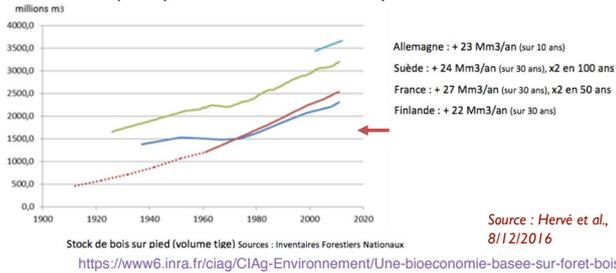
Maintenant que le contexte et les notions fondamentales sont bien précisés, je vais présenter les grandes lignes d'une étude commandée par le ministère de l'Agriculture (MAA) à l'INRA et l'IGN : une étude prospective sur le potentiel d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre par la filière 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 RENEFOFOR), 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.

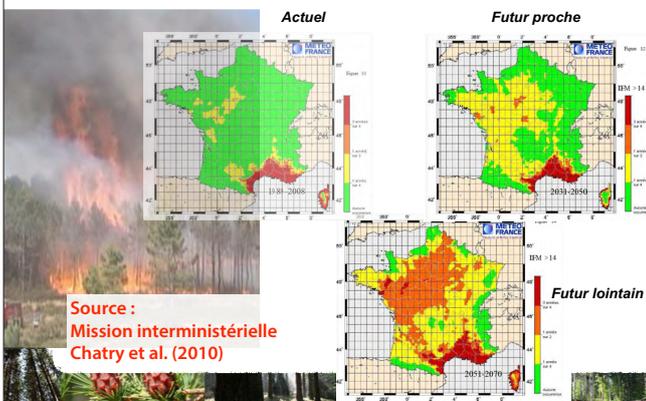
Ce que disent les inventaires : les forêts européennes ont de fortes marges de récolte

Les quatre premiers stocks forestiers européens en très forte croissance



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.

Émergence, extension & aggravation des risques (cf incendies)



Pour ce qui est de la **dimension « risques forestiers »** de cette prospective sur le 21^e 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...

Des comportements de gestion très variés



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 m ³ /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 %

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.

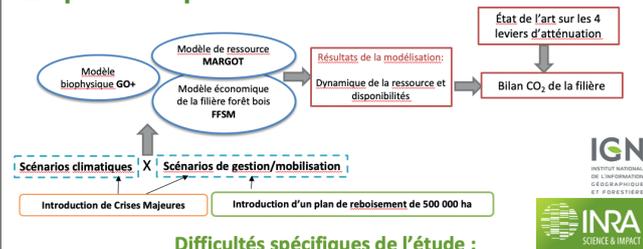
Dispositif de l'étude et résultats essentiels

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 avons 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.

Étapes et dispositif de l'étude



Difficultés spécifiques de l'étude :

- ◆ Horizon 2050
- ◆ Simuler des niveaux très # d'intensité de gestion
- ◆ Effets du changement climatique sur ressource/disponibilité
- ◆ Imaginer des crises multiformes (abiotiques/biotiques) de très grande ampleur

LES OUTILS DE SIMULATION

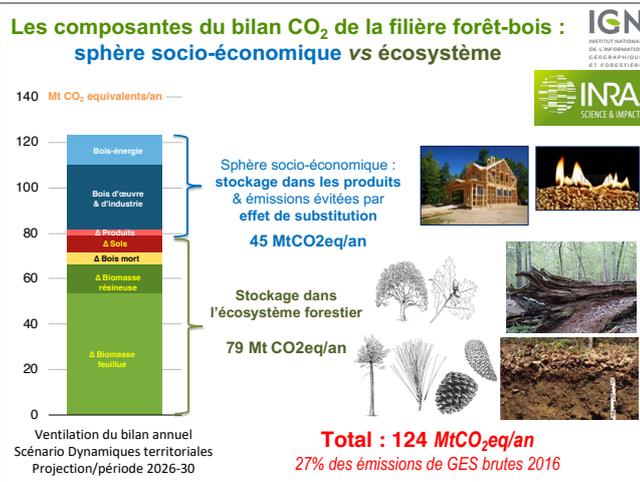
MARGOT (MAtrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale) : placé au cœur du dispositif, ce modèle de ressource de l'IGN permet d'obtenir, par période quinquennale (de 2016 à 2050), l'évolution des stocks sur pied, les volumes annuels de bois mort ainsi que les volumes récoltés 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.

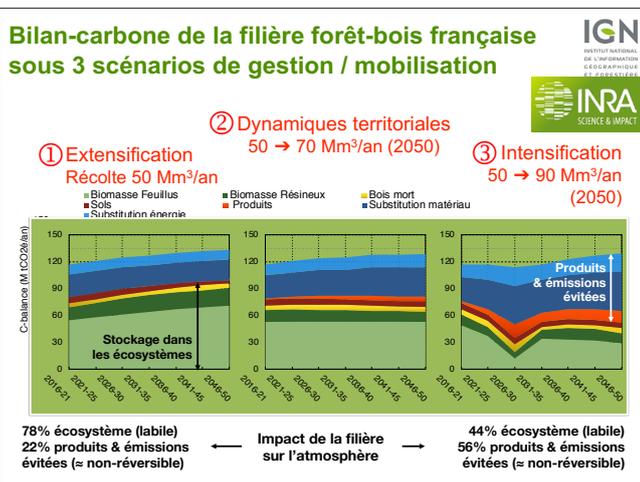
Voyons d'abord le mode d'emploi des résultats qui vont suivre, la façon de **représenter le bilan CO₂ complet de la filière forêt-bois**. En bas, c'est le stockage de carbone dans l'écosystème forestier (la séquestration), qui comprend bien sûr la biomasse feuillue et la biomasse résineuse (en vert clair 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 socio-économique : 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 CO₂ 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...

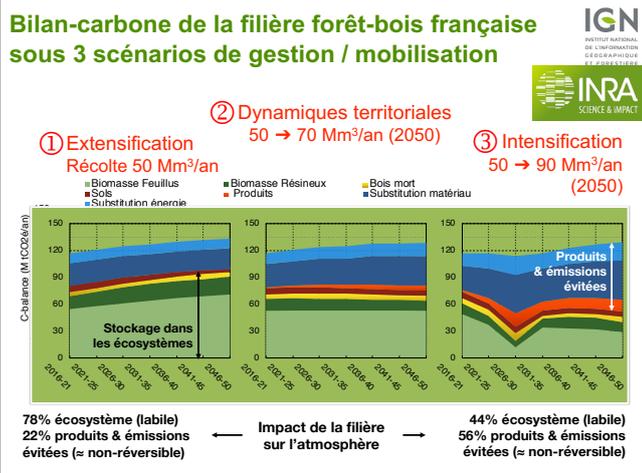
De gauche à droite, on a les trois scénarios de gestion/mobilisation de la ressource, et je dois donner d'emblée une précision sur le scénario 3 que nous avons appelé « intensification », car le terme est ambigu et génère beaucoup de malentendus et controverses.

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 ». Quoiqu'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 maîtrise de populations d'ongulés, etc.



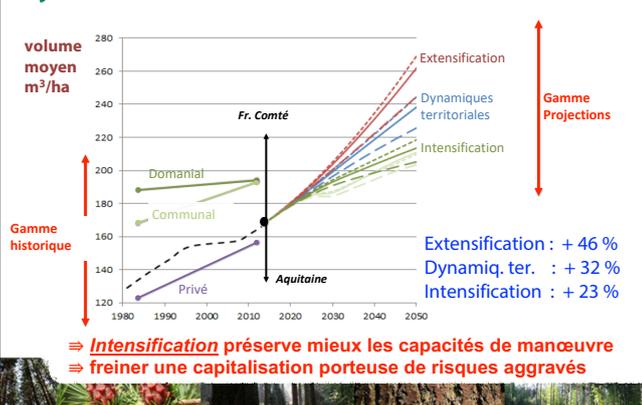
[NDLR : (i) le bilan est présenté ici à climat constant ; l'effet des scénarios climatiques sur la disponibilité en bois est évoqué plus loin ; (ii) la réduction du stockage forestier jusqu'en 2030 dans le scénario 3 correspond aux coupes rases du plan de reboisement de 500 000 ha associé à ce scénario]



© 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 la valorisation énergétique des co-produits (chutes et autres "connexes")

Un critère essentiel de viabilité et résilience : trajectoire du volume/ha



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 apparaître 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 CO₂ 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 d'efficacité du processus 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 événements de dommages généralisés comme on a pu en connaître 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.

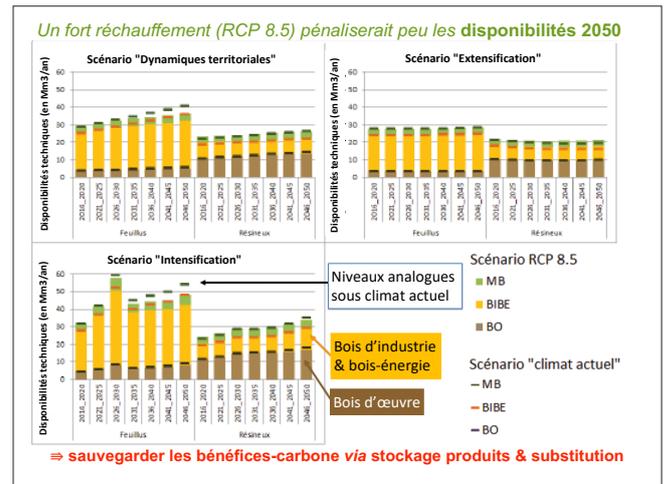
Un autre aperçu important : l'évolution du volume par hectare, toutes propriétés confondues, dans les différents scénarios. Nous avons ici les scénarios 1, 2 et 3 respectivement en rouge, bleu et vert, avec pour chacun plusieurs courbes liées aux différentes versions du modèle MARGOT ; la version qui 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 événement 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 m³.

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'enchaînent 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 m³ 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 Mm³ de dégâts pour l'ensemble de la crise jusqu'en 2050. Les flux annuels correspondants pendant la crise vont de 3 à 23 Mm³/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 Mm³ on s'approche de la taille de la crise du dendroctone en Amérique du Nord, qui a dégagé 1 milliard de m³ 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 paraît 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.

Quels leviers forestiers d'atténuation



❓ Le puits forestier devrait se maintenir à moyen-terme, puis diminuer (> 2050) ▼ le scénario climatique :

- tendances : diminution de la productivité, crises + fréquentes/graves
- la forêt publique est globalement plus mature et vers l'équilibre, mais aussi plus vulnérable (capital sur pied, dominance chêne)

❖ Comment raisonner l'atténuation via la gestion forestière :

- raisonner à l'échelle du massif, diversifier les choix à adapter selon les zones
- protéger / augmenter le stockage dans les sols ?
- articuler ≠ horizons temporels : ne pas handicaper les possibilités de substitution de demain par la séquestration d'aujourd'hui
- amont-aval liés : soutenir les capacités de la filière industrielle nationale à écouler de grandes quantités de produits accidentels
- Quel soutien de la filière pour diversifier et enrichir nos peuplements ?

❖ Pour contribuer à la décarbonation rapide de l'économie :

- raisonner les itinéraires pour des produits à plus forte valeur de substitution
- massification, gestion groupée et gestion multi-échelle des forêts



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 m³/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 m³/ha... Cela n'a pas de sens ; 190 m³/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.

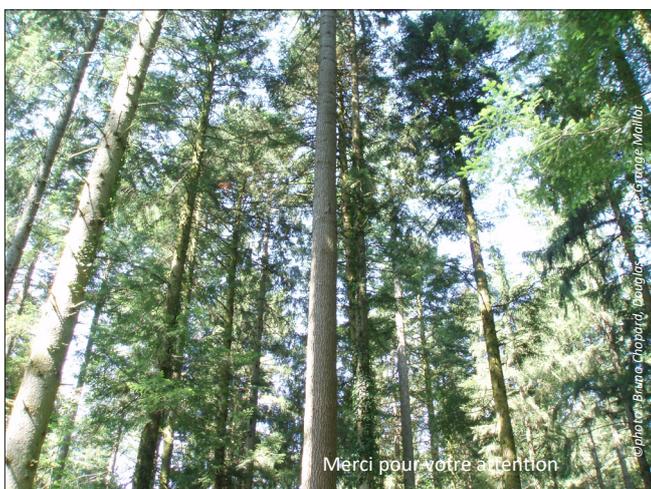
Comment raisonner l'atténuation par la gestion ? Christine a montré que le minimum pour raisonner carbone, c'est l'échelle parcelle ou peuplement, dans le cadre de projets. Mais plus généralement, il faut **raisonner au niveau du massif** parce que c'est celui de l'aménagement forestier ; c'est à cette 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.

Quelques messages « à rapporter à la maison » pour faire face au changement climatique

- ❖ La forêt doit et **va changer** sous incertitude :
 - ❖ **espèces/situations comptent** : tempérament, besoins écolo.
 - ❖ **les connaissances évoluent** : R&D, formation, experts/climat
 - ❖ un **levier essentiel** : choix des ressources génétiques
 - ❖ une **opportunité** : essor de la bioéconomie
- ❖ Les points forts d'une **transformation pro-active des forêts** :
 - ❖ **choix** des essences et **du matériel végétal** (diversification)
 - ❖ **réduire** les âges et dimensions d'exploitabilité + **capital/pied**
 - ❖ **concentrer** le travail sur : organisation, logistique, anticipation-crisis, évaluation & retour d'expérience, interaction gestion/R&D
 - ❖ **solidifier le modèle économique** : maîtrise des coûts, contrats d'appro., mix-produits, taxe-carbone, fiscalité, rémunération des aménités



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 pourrions 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 gènes, 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.

CHANGEMENTS ÉVOLUTIFS CHEZ LES CHÊNES AU COURS DE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Antoire Kremer

Chercheur à l'INRA Bordeaux

UMR Biodiversité, Gènes et
Communautés (BIOGECO)

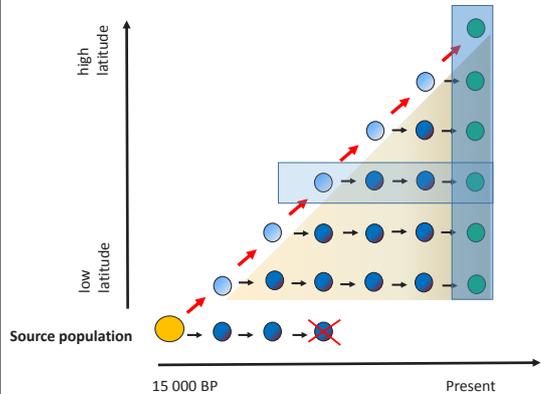
CHANGEMENTS ÉVOLUTIFS CHEZ LES CHÊNES AU COURS DE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Séminaire ONF Orléans 28 Juin 2018
« Changements climatiques et gestion
de la chênaie ligérienne »

Antoine Kremer



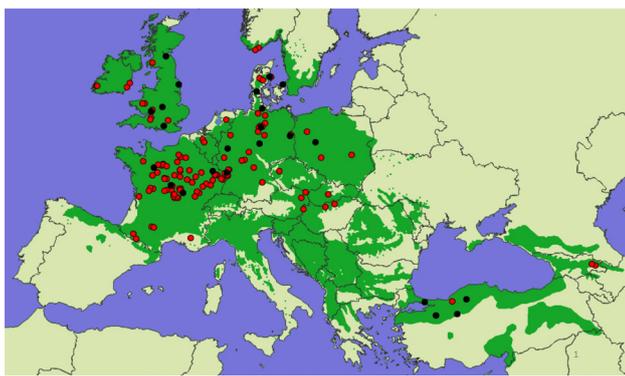
TRAJECTOIRES ÉVOLUTIVES DEPUIS LE DERNIER ÂGE GLACIAIRE



2

APPROCHES SYNCHRONIQUES

Retour sur les tests de provenances



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

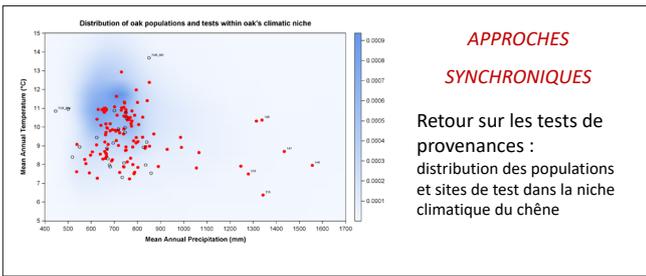
On s'interroge depuis quelques années sur les possibilités d'adaptation biologique des espèces au changement climatique. Les arbres, en particulier les espèces très longévives comme les chênes, recèlent une diversité génétique très élevée par rapport aux autres organismes. Or la diversité est le fuel 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

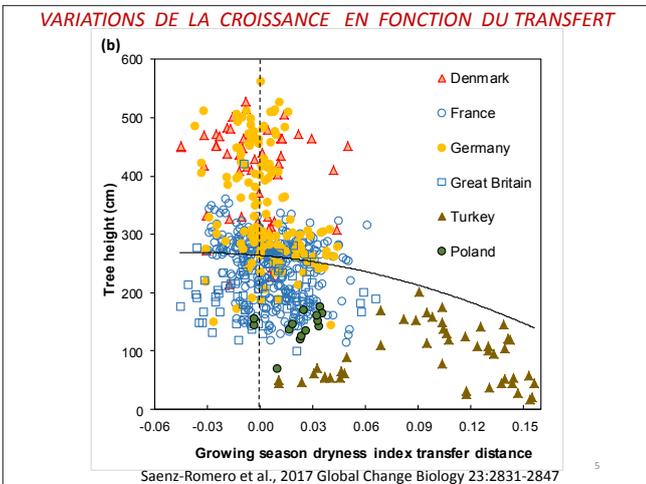
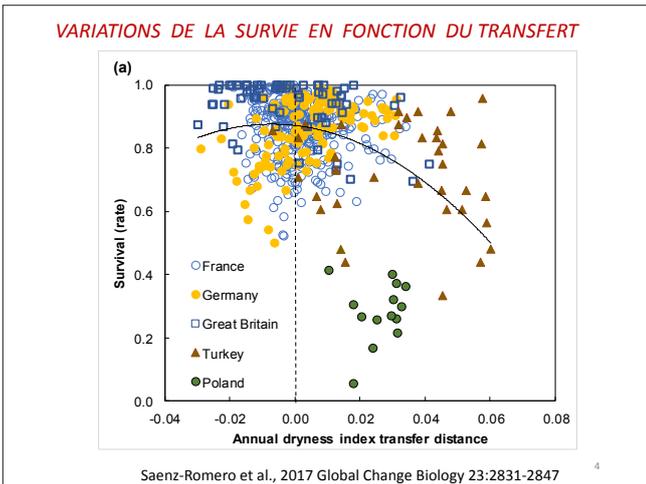
Commençons par les résultats les plus récents des tests de provenances (approche synchronique donc). Les points rouges sur la carte correspondent aux provenances de chêne sessile échantillonnées et les points noirs aux sites de test où ces populations ont été installées. Dans les années 80 et début des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



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).

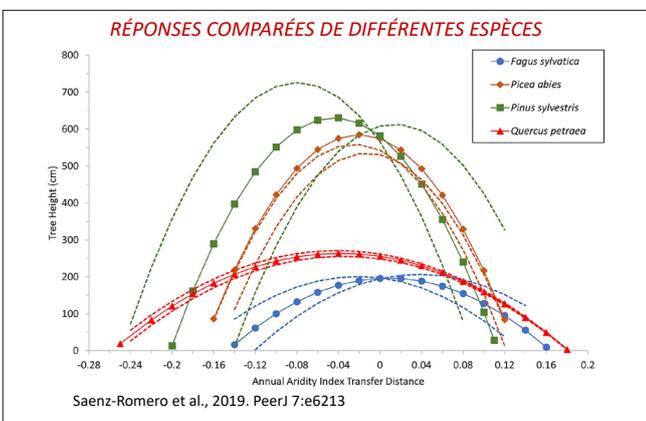
L'idée est de voir comment réagissent les populations transférées d'un climat à l'autre, d'une région à l'autre. On essaye d'exprimer la réponse d'une population à un transfert climatique spatial ; cette information peut aider à comprendre comment la population pourrait changer avec le changement climatique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



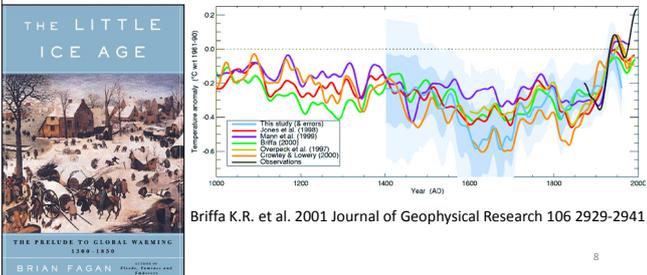
CHANGEMENTS EVOLUTIFS A DIFFERENTES ECHELLES DE TEMPS

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

7



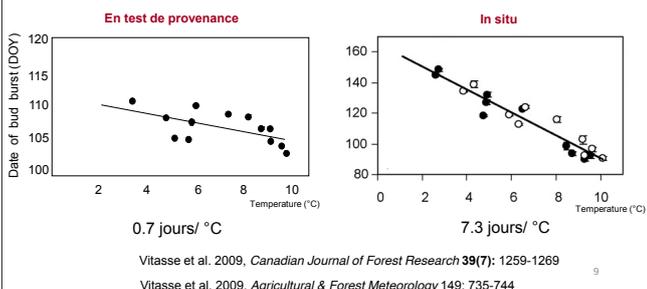
CHANGEMENTS EVOLUTIFS DURANT L' ANTHROPOCENE (depuis le petit âge glaciaire)



8

Différenciation génétique le long de gradients de température

2°C to 12°C
température moyenne du printemps



9

L'approche diachronique (projet Treepeace 2014-2019)

Voyons maintenant la deuxième approche, qui est une approche diachronique : on essaie de suivre les mêmes populations¹ 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 petit âge glaciaire, une période comprise entre 16^e et le 19^e 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 débournement 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 débournement 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 débournement (nombre de jours depuis le 1^{er} 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 débournement 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

DIFFERENCIATION GENETIQUE DE LA DATE DE DEBOURREMENT ENTRE PROVENANCES

Test de provenances de la Petite Charnie

0.7 Jour / °C



Bertranges Klostermarienberg (à l'est de l'Autriche)



Nagybatony (Hongrie) Fontainebleau

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.

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 (17^{ème} siècle, Première moitié du 19^{ème} siècle)
- DES EFFETS DOCUMENTES SUR LES ARBRES

11

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 17^{ème} siècle et la première moitié du 19^{ème} 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.

PETIT AGE GLACIAIRE



1850-1860

Glacier d'Argentièr

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

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



1966

12

PETIT AGE GLACIAIRE

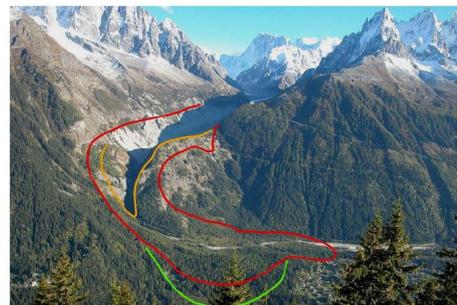
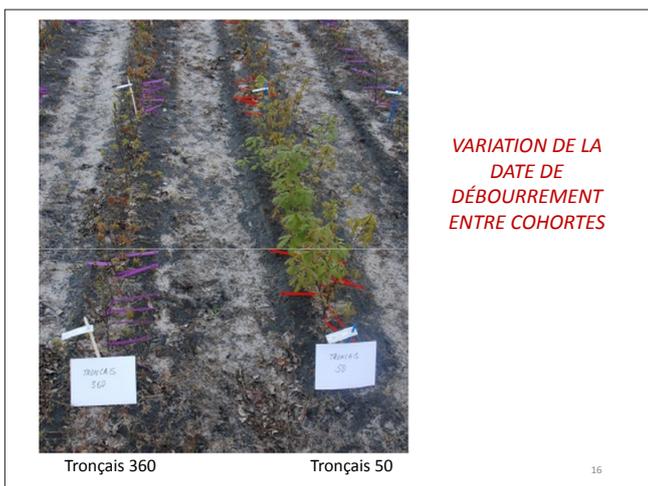
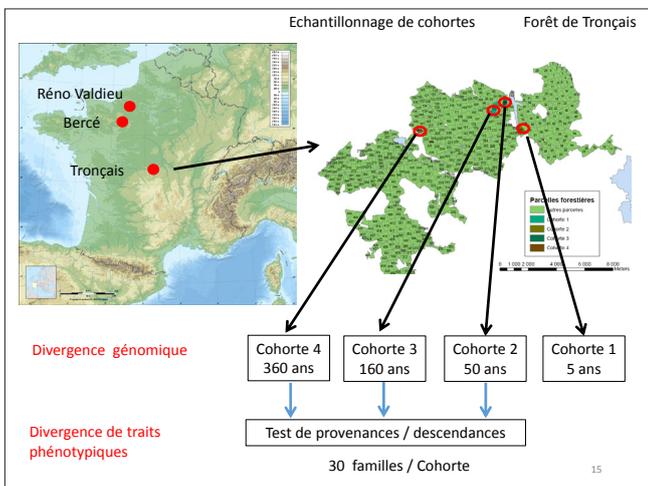
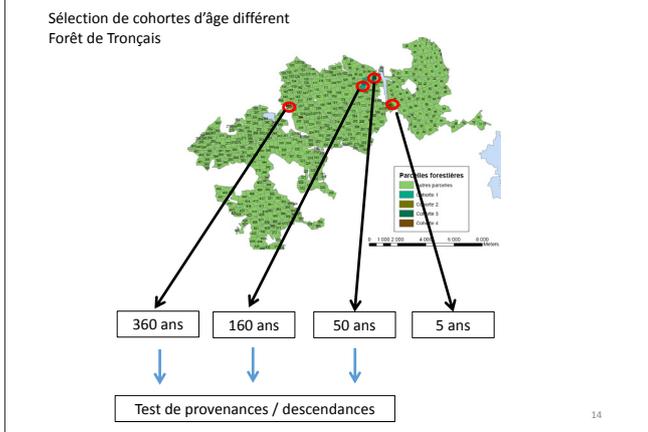


Figure 6: Variation du front du glacier de la Mer de Glace: en 1644 (vert), 1821 (rouge) et 1895 (orange). ©: S. Nussnaumer/FNS

In Duloutre S, Ce que nous peut nous apprendre l'étude du Petit Age Glaciaire 13

COMMENT ETUDIER LES CHANGEMENTS EVOLUTIFS DEPUIS LE PAG ??



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.

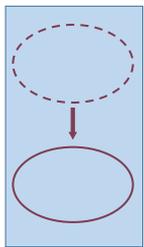
En test de provenances/descendances, on peut observer le débourrement dès la deuxième saison de végétation : nous savons que c'est un critère extrêmement stable génétiquement donc relativement peu dépendant de l'âge.

À Tronçais, pour les cohortes *in situ*, les mesures ont été faites 3 années de suite (2015, 2016, 2017). La cohorte 4 (\approx 360 ans) débourre en général plus tardivement que la cohorte 3 (\approx 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)



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



1990 – 2000
≈ 100 ans



2014-2016
14 à 24 ans

Parcelle 26 de la FD Petite Charnie ¹⁷

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 2^e 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).

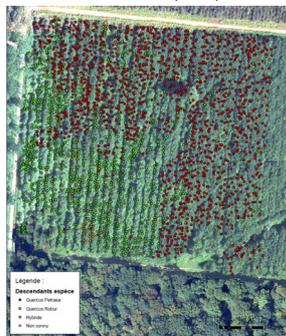
PARCELLE 26 FD PETITE CHARNIE

Génération 1 (1996)



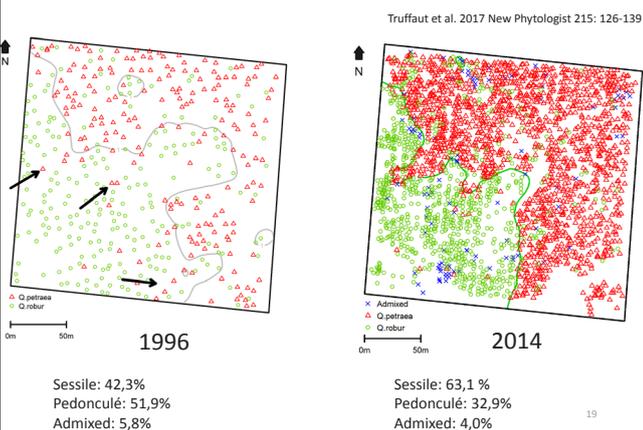
262 Arbres adultes
(échantillonnage exhaustif)

Génération 2 (2014)



2500 descendants
(échantillonnage systématique) ¹⁸

CHANGEMENTS DEMOGRAPHIQUES

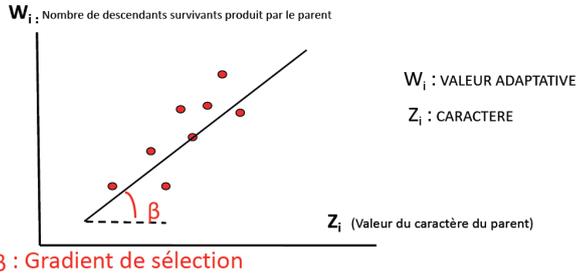


CHANGEMENTS D'AIRE D'OCCUPATION



QUELS CARACTERES VONT CHANGER D'UNE GENERATION A LA SUIVANTE SOUS L'EFFET DE LA SELECTION ?

Mesure des gradients de sélection



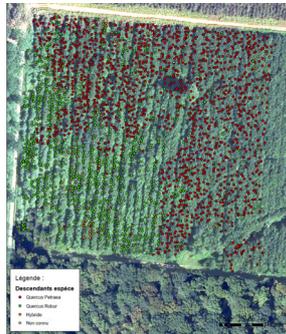
RECHERCHE DE PARENTE

Génération 1 (1996)



262 Arbres adultes
(échantillonnage exhaustif)

Génération 2 (2014)



2500 descendants
(échantillonnage systématique)

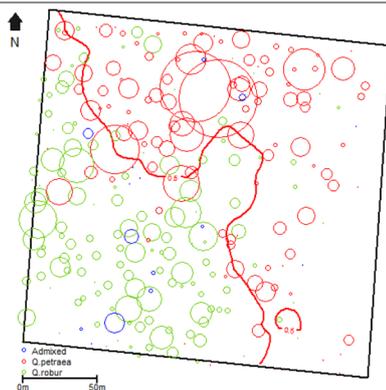
SUCCES REPRODUCTEUR DE L'ARBRE 101



47 Offspring of tree 101

23

DISTRIBUTION DU SUCCES REPRODUCTEUR



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

0m 50m

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 W_i . Ce nombre de descendants survivants est exprimé en fonction d'un caractère du parent (comme par exemple le débournement) : c'est la valeur Z_i en axe des X (ex : date de débournement 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 W_i) de chaque parent, pour les 2 espèces, et d'autre part un certain nombre de caractères des parents (Z_i) qui sont de natures très différentes (croissance, débournement, densité, etc.). Tout ça pour détecter une éventuelle relation linéaire entre W_i et Z_i , 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, débournement, 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'efficacité 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'efficacité 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'efficacité de l'utilisation de l'eau, ce qui va dans le sens d'une meilleure efficacité. 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, dép^t 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'efficacité 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 avons 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 a 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 AFORCE², 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 sylvocynégégique ; 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

Office National des Forêts

Outils pour l'adaptation de la forêt aux changements climatiques : migration assistée et substitution d'essences

Brigitte MUSCH, Yves ROUSSELLE et Myriam LEGAY, DFRN-Département RDI

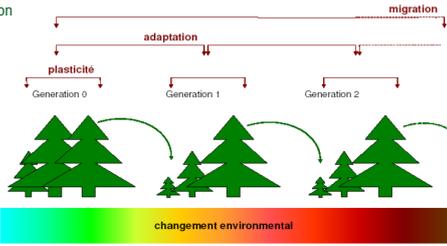
Séminaire « Changements climatiques et gestion de la chênaie ligérienne »
Jeudi 28 juin 2018, ARDON



Office National des Forêts

Quelles évolutions possibles pour une population d'arbre face à un nouveau climat ?

- **Rester :**
 - S'acclimater en modifiant son phénotype dans le nouvel environnement subi (plasticité phénotypique)
 - Evoluer grâce à la sélection naturelle et retenir les individus les mieux adaptés
- **Partir :** migrer/coloniser de nouveaux habitats plus favorables
- **Disparaître :** extinction de populations locales

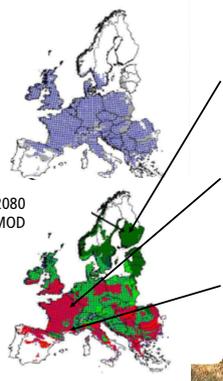



Office National des Forêts

Quelles conséquences à l'échelle de l'aire de l'espèce ?

Répartition observée

Répartition 2080 d'après BIOMOD



- **Nord de l'aire :**
 - Colonisation ?
 - Compétition avec les espèces présentes ?
- **Cœur d'aire :**
 - Dépérissement ?
 - Flux de gènes et adaptation ?
 - Fragmentation des populations ?
- **Sud de l'aire :**
 - Dépérissement ?
 - Isolement en altitude et différenciation génétique ?

Thuillier, GCB 2003



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 ?

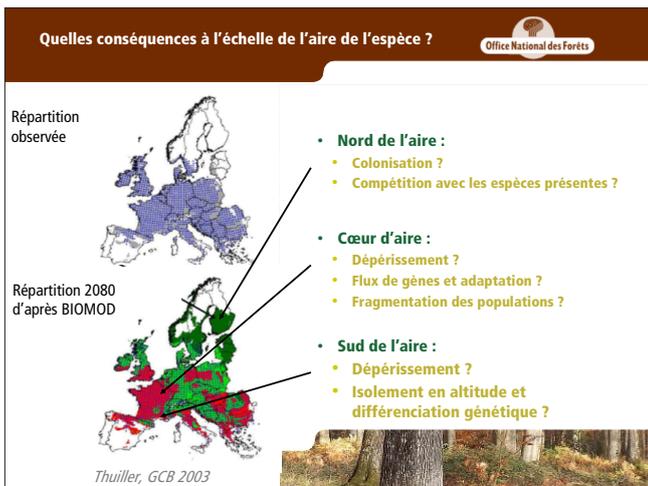
Lorsque leur environnement change, la première solution pour les arbres forestiers, qui ne sont pas des êtres très mobiles, est de s'adapter sur place aux nouvelles conditions. C'est ce que les généticiens appellent la plasticité. Comme l'a dit Antoine Kremer, il y a une grande diversité au sein des 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 disparaître. 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...

Les enjeux pour la gestion forestière

- Les forêts s'adaptent progressivement, de façon autonome, mais elles risquent de ne pas maintenir leur état actuel et de cesser de fournir les mêmes ressources et services à la société.
- La foresterie exige de la planification à long terme - les décisions prises aujourd'hui ont des effets sur la forêt de demain.
- La foresterie est basée sur des connaissances historiques mais on ne peut plus appliquer l'expérience passée aux conditions futures.
 - Nécessité d'une adaptation active, notamment par transfert d'espèces et de provenances
 - Besoin d'outils pour mettre en œuvre cette adaptation active

Le concept de Migration Assistée englobe des pratiques à plusieurs échelles

	Migration assistée des populations	Le mouvement, assisté par l'humain et en réponse aux changements climatiques, de populations (génotype) à l'intérieur de l'aire de distribution de l'espèce
	Expansion assistée de la distribution	Le mouvement, assisté par l'humain et en réponse aux changements climatiques, d'espèces juste à l'extérieur de l'aire de distribution actuelle de façon à faciliter ou mimer l'expansion naturelle de la distribution.
	Migration assistée sur de longues distances	Le mouvement, assisté par l'humain et en réponse aux changements climatiques, d'espèces à l'extérieur de l'aire de distribution actuelle, sur des distances supérieures à celles accessibles par dispersion naturelle.

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 périront 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.

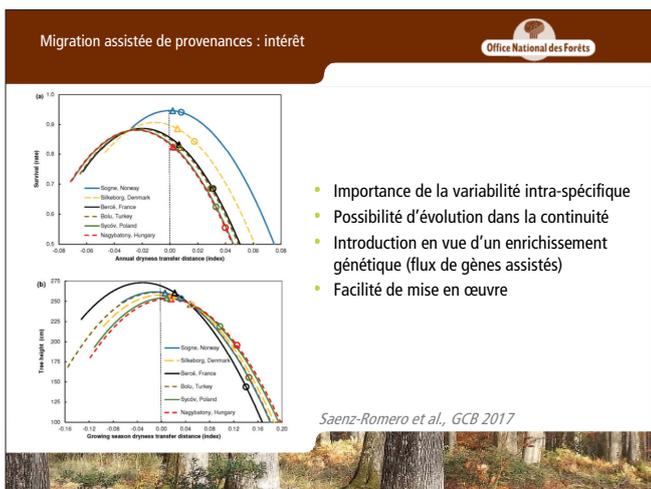
Les enjeux pour la gestion forestière

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.

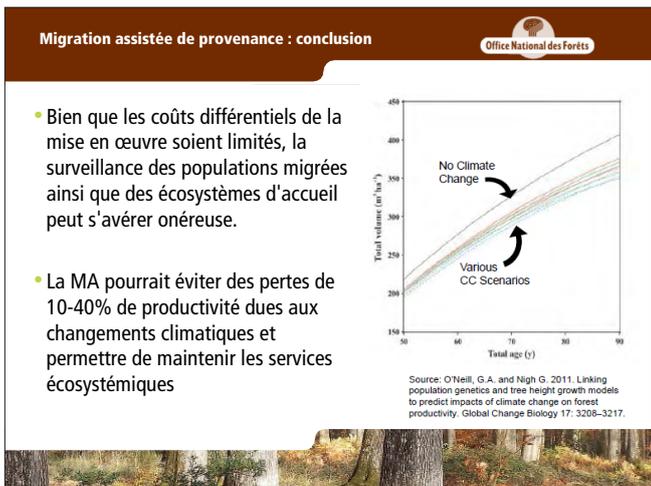


[NDLR : les signes ° et Δ sur les courbes sont sans rapport avec la présentation]

Aspects réglementaires : conseils d'utilisation des MFR

Office National des Forêts

SDCO	Zone	Région d'origine des matériels	Matériels conseillés	Autres matériels utilisables
A Grand Ouest	101 Bretagne et pays de Poitou	101 Bretagne et pays de Poitou	SP101	SP101, SP102, SP103, SP104, SP105, SP106, SP107, SP108, SP109, SP110, SP111, SP112, SP113, SP114, SP115, SP116, SP117, SP118, SP119, SP120, SP121, SP122, SP123, SP124, SP125, SP126, SP127, SP128, SP129, SP130, SP131, SP132, SP133, SP134, SP135, SP136, SP137, SP138, SP139, SP140, SP141, SP142, SP143, SP144, SP145, SP146, SP147, SP148, SP149, SP150, SP151, SP152, SP153, SP154, SP155, SP156, SP157, SP158, SP159, SP160, SP161, SP162, SP163, SP164, SP165, SP166, SP167, SP168, SP169, SP170, SP171, SP172, SP173, SP174, SP175, SP176, SP177, SP178, SP179, SP180, SP181, SP182, SP183, SP184, SP185, SP186, SP187, SP188, SP189, SP190, SP191, SP192, SP193, SP194, SP195, SP196, SP197, SP198, SP199, SP200, SP201, SP202, SP203, SP204, SP205, SP206, SP207, SP208, SP209, SP210, SP211, SP212, SP213, SP214, SP215, SP216, SP217, SP218, SP219, SP220, SP221, SP222, SP223, SP224, SP225, SP226, SP227, SP228, SP229, SP230, SP231, SP232, SP233, SP234, SP235, SP236, SP237, SP238, SP239, SP240, SP241, SP242, SP243, SP244, SP245, SP246, SP247, SP248, SP249, SP250, SP251, SP252, SP253, SP254, SP255, SP256, SP257, SP258, SP259, SP260, SP261, SP262, SP263, SP264, SP265, SP266, SP267, SP268, SP269, SP270, SP271, SP272, SP273, SP274, SP275, SP276, SP277, SP278, SP279, SP280, SP281, SP282, SP283, SP284, SP285, SP286, SP287, SP288, SP289, SP290, SP291, SP292, SP293, SP294, SP295, SP296, SP297, SP298, SP299, SP300, SP301, SP302, SP303, SP304, SP305, SP306, SP307, SP308, SP309, SP310, SP311, SP312, SP313, SP314, SP315, SP316, SP317, SP318, SP319, SP320, SP321, SP322, SP323, SP324, SP325, SP326, SP327, SP328, SP329, SP330, SP331, SP332, SP333, SP334, SP335, SP336, SP337, SP338, SP339, SP340, SP341, SP342, SP343, SP344, SP345, SP346, SP347, SP348, SP349, SP350, SP351, SP352, SP353, SP354, SP355, SP356, SP357, SP358, SP359, SP360, SP361, SP362, SP363, SP364, SP365, SP366, SP367, SP368, SP369, SP370, SP371, SP372, SP373, SP374, SP375, SP376, SP377, SP378, SP379, SP380, SP381, SP382, SP383, SP384, SP385, SP386, SP387, SP388, SP389, SP390, SP391, SP392, SP393, SP394, SP395, SP396, SP397, SP398, SP399, SP400, SP401, SP402, SP403, SP404, SP405, SP406, SP407, SP408, SP409, SP410, SP411, SP412, SP413, SP414, SP415, SP416, SP417, SP418, SP419, SP420, SP421, SP422, SP423, SP424, SP425, SP426, SP427, SP428, SP429, SP430, SP431, SP432, SP433, SP434, SP435, SP436, SP437, SP438, SP439, SP440, SP441, SP442, SP443, SP444, SP445, SP446, SP447, SP448, SP449, SP450, SP451, SP452, SP453, SP454, SP455, SP456, SP457, SP458, SP459, SP460, SP461, SP462, SP463, SP464, SP465, SP466, SP467, SP468, SP469, SP470, SP471, SP472, SP473, SP474, SP475, SP476, SP477, SP478, SP479, SP480, SP481, SP482, SP483, SP484, SP485, SP486, SP487, SP488, SP489, SP490, SP491, SP492, SP493, SP494, SP495, SP496, SP497, SP498, SP499, SP500, SP501, SP502, SP503, SP504, SP505, SP506, SP507, SP508, SP509, SP510, SP511, SP512, SP513, SP514, SP515, SP516, SP517, SP518, SP519, SP520, SP521, SP522, SP523, SP524, SP525, SP526, SP527, SP528, SP529, SP530, SP531, SP532, SP533, SP534, SP535, SP536, SP537, SP538, SP539, SP540, SP541, SP542, SP543, SP544, SP545, SP546, SP547, SP548, SP549, SP550, SP551, SP552, SP553, SP554, SP555, SP556, SP557, SP558, SP559, SP560, SP561, SP562, SP563, SP564, SP565, SP566, SP567, SP568, SP569, SP570, SP571, SP572, SP573, SP574, SP575, SP576, SP577, SP578, SP579, SP580, SP581, SP582, SP583, SP584, SP585, SP586, SP587, SP588, SP589, SP590, SP591, SP592, SP593, SP594, SP595, SP596, SP597, SP598, SP599, SP600, SP601, SP602, SP603, SP604, SP605, SP606, SP607, SP608, SP609, SP610, SP611, SP612, SP613, SP614, SP615, SP616, SP617, SP618, SP619, SP620, SP621, SP622, SP623, SP624, SP625, SP626, SP627, SP628, SP629, SP630, SP631, SP632, SP633, SP634, SP635, SP636, SP637, SP638, SP639, SP640, SP641, SP642, SP643, SP644, SP645, SP646, SP647, SP648, SP649, SP650, SP651, SP652, SP653, SP654, SP655, SP656, SP657, SP658, SP659, SP660, SP661, SP662, SP663, SP664, SP665, SP666, SP667, SP668, SP669, SP670, SP671, SP672, SP673, SP674, SP675, SP676, SP677, SP678, SP679, SP680, SP681, SP682, SP683, SP684, SP685, SP686, SP687, SP688, SP689, SP690, SP691, SP692, SP693, SP694, SP695, SP696, SP697, SP698, SP699, SP700, SP701, SP702, SP703, SP704, SP705, SP706, SP707, SP708, SP709, SP710, SP711, SP712, SP713, SP714, SP715, SP716, SP717, SP718, SP719, SP720, SP721, SP722, SP723, SP724, SP725, SP726, SP727, SP728, SP729, SP730, SP731, SP732, SP733, SP734, SP735, SP736, SP737, SP738, SP739, SP740, SP741, SP742, SP743, SP744, SP745, SP746, SP747, SP748, SP749, SP750, SP751, SP752, SP753, SP754, SP755, SP756, SP757, SP758, SP759, SP760, SP761, SP762, SP763, SP764, SP765, SP766, SP767, SP768, SP769, SP770, SP771, SP772, SP773, SP774, SP775, SP776, SP777, SP778, SP779, SP780, SP781, SP782, SP783, SP784, SP785, SP786, SP787, SP788, SP789, SP790, SP791, SP792, SP793, SP794, SP795, SP796, SP797, SP798, SP799, SP800, SP801, SP802, SP803, SP804, SP805, SP806, SP807, SP808, SP809, SP810, SP811, SP812, SP813, SP814, SP815, SP816, SP817, SP818, SP819, SP820, SP821, SP822, SP823, SP824, SP825, SP826, SP827, SP828, SP829, SP830, SP831, SP832, SP833, SP834, SP835, SP836, SP837, SP838, SP839, SP840, SP841, SP842, SP843, SP844, SP845, SP846, SP847, SP848, SP849, SP850, SP851, SP852, SP853, SP854, SP855, SP856, SP857, SP858, SP859, SP860, SP861, SP862, SP863, SP864, SP865, SP866, SP867, SP868, SP869, SP870, SP871, SP872, SP873, SP874, SP875, SP876, SP877, SP878, SP879, SP880, SP881, SP882, SP883, SP884, SP885, SP886, SP887, SP888, SP889, SP890, SP891, SP892, SP893, SP894, SP895, SP896, SP897, SP898, SP899, SP900, SP901, SP902, SP903, SP904, SP905, SP906, SP907, SP908, SP909, SP910, SP911, SP912, SP913, SP914, SP915, SP916, SP917, SP918, SP919, SP920, SP921, SP922, SP923, SP924, SP925, SP926, SP927, SP928, SP929, SP930, SP931, SP932, SP933, SP934, SP935, SP936, SP937, SP938, SP939, SP940, SP941, SP942, SP943, SP944, SP945, SP946, SP947, SP948, SP949, SP950, SP951, SP952, SP953, SP954, SP955, SP956, SP957, SP958, SP959, SP960, SP961, SP962, SP963, SP964, SP965, SP966, SP967, SP968, SP969, SP970, SP971, SP972, SP973, SP974, SP975, SP976, SP977, SP978, SP979, SP980, SP981, SP982, SP983, SP984, SP985, SP986, SP987, SP988, SP989, SP990, SP991, SP992, SP993, SP994, SP995, SP996, SP997, SP998, SP999, SP1000

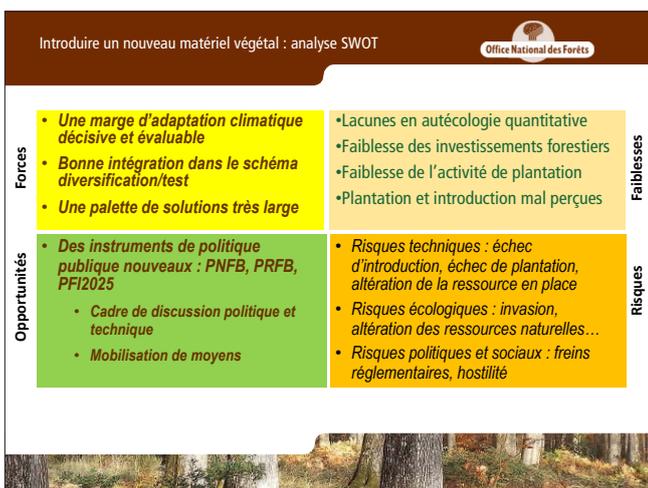
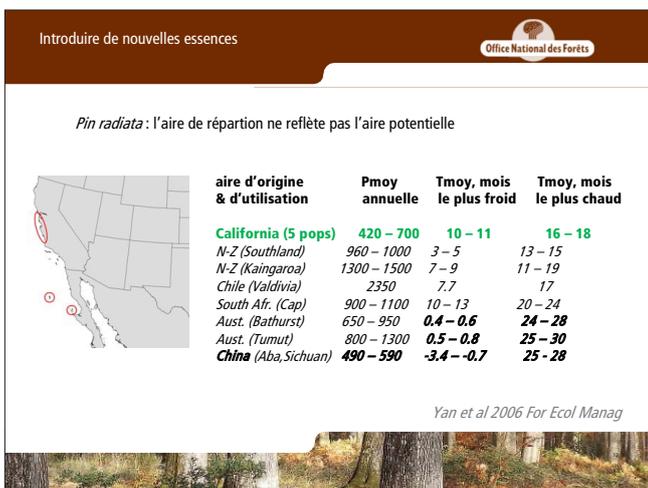
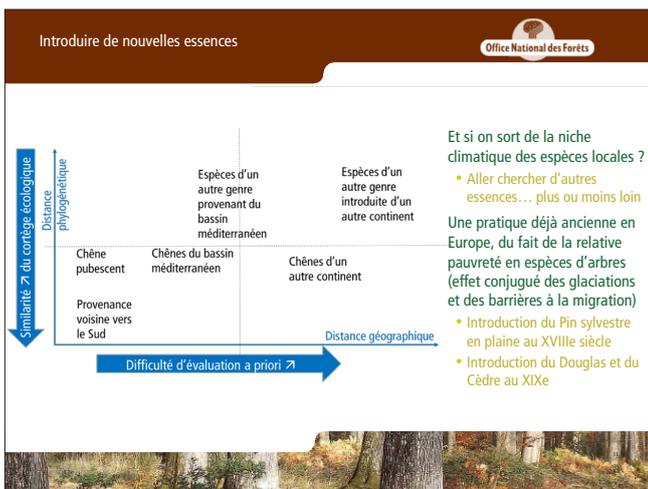


On peut ensuite installer l'essence en limite de son aire de distribution, juste un peu au-delà, dans des conditions un peu limitantes, en tout cas au début. On prend donc des risques plus importants. Enfin, la dernière forme de migration assistée se fait à très longue distance, complètement en dehors 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 récapitulatifs 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 de tests de provenance de La Petite Charrie.

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 pédo-climatiques, 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 éloquent. 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 apparaître 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 connaît 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.

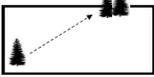
Il faut commencer par identifier les besoins, ou plutôt voir où sont les **grands enjeux d'adaptation**, les enjeux économiques pour toute la filière ; c'est important d'avoir un positionnement collectif sur cette question. Il nous faut aussi cerner la réaction probable des espèces en place, poser des 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 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.

Des risques gradués Office National des Forêts

Le risque dépend de la distance (écologique) d'introduction

	Expansion assistée de la distribution	Le mouvement, assisté par l'humain et en réponse aux changements climatiques, d'espèces juste à l'extérieur de l'aire de distribution actuelle de façon à faciliter ou mimer l'expansion naturelle de la distribution.	Risque intermédiaire
	Migration assistée sur de longues distances	Le mouvement, assisté par l'humain et en réponse aux changements climatiques, d'espèces à l'extérieur de l'aire de distribution actuelle, sur des distances supérieures à celles accessibles par dispersion naturelle.	Risque relatif élevé

Des risques de natures différentes Office National des Forêts

- Incertitude quant à la capacité d'acclimatation de l'espèce
- Lors de la migration assistée : la sélection et restriction de la diversité génétique peut limiter la capacité d'adaptation future de l'espèce
- Échec de la migration assistée due à la compétition interspécifique
- Hybridation intraspécifique et interspécifique avec une espèce locale
 - Est-ce grave ?

Introduction : les étapes Office National des Forêts

- Identification des besoins, ou plutôt des enjeux
 - Positionnement collectif, selon système productif et contexte écologique
 - Analyse de la vulnérabilité des espèces en place
 - Scénarios d'évolution du climat
 - Références ou d'outils d'évaluation de la réponse des espèces au climat
- Recherche des essences candidates
 - Références ou outils d'évaluation de la réponse au climat d'une large palette d'essences ou de provenances
- Tests de comparaison
 - Cibler et rationaliser l'effort : forces R&D limitées
- Plantations de référence
 - Raccourcir le délai expérimental et démultiplier les moyens par une approche collaborative
 - Mobiliser des sources de graines de qualité, anticiper les besoins en plants
 - Réunir les moyens financiers et techniques pour planter
 - Assurer la traçabilité et la valorisation collective des résultats

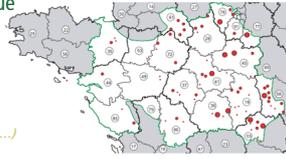
Positionnement collectif, selon système productif et contexte écologique : **Le projet RENEssences**



Évaluer des nouvelles ressources génétiques forestières pour adapter la forêt au changement climatique

- Cibler les enjeux d'adaptation = enjeu de gestion X vulnérabilité ; ex :

- Chêne sessile dans le bassin ligérien
- Résineux de plaine (*pin sylvestre, laricia*)
- Résineux de moyenne montagne (*syllvestre, douglas...*)
- Résineux de montagne (*épicéa, sapin*)
-



- Pour chaque contexte, un nouveau dispositif expérimental

Analyse de la compatibilité climatique des espèces en place : IKS



Évaluer l'aire de compatibilité climatique des essences : le modèle IKS

- Caractérisation du climat par des **variables** liées aux besoins physiologiques des espèces :

- 1 Recevoir suffisamment d'énergie : somme de degrés.jours ☀️
- 2 Ne pas subir de froid trop intense : Tmin du mois le plus froid
- 3 Recevoir un apport en eau suffisant : déficit hydrique climatique

- Pour chaque espèce, les **seuils** sont définis en fonction de la distribution observée
- Outil en cours de développement, à l'attention d'experts du domaine aménagement
- Application pratique planifiée : Révision des tableaux-maîtres des DRA/SRA pour en proposer des évolutions



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

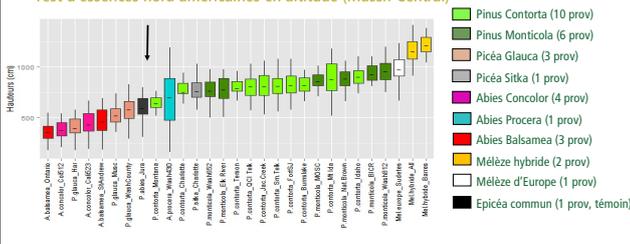
En couleur (violet, bleu, jaune), les zones d'incompatibilité (dépassement du seuil) pour la variable climatique considérée

Recherche des essences candidates

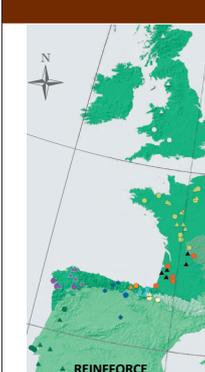


Revisiter les essais historiques

Test d'essences nord américaines en altitude (Massif Central)



Évaluations de nouvelles ressources pour l'adaptation : de nombreuses initiatives



Valorisation de ressources existantes :

- Plantacom (INRA)
- VALORESO (FCBA, CNPF, INRA, ONF / AFORCE)
- Évaluation des arboretums (INRA ONF)
- Enquête sur les introductions atypiques (ONF)

Nouveaux dispositifs :

- REINFORCE (11 instituts dont CNPF)

Connaissances, outils, méthodes :

- Guide expérimentation AFORCE
- Projets AFORCE en cours : Caravane, Trec, IKSMAAPS
- Projet de la Villa Thuret sur l'acclimatation

⇒ Besoin d'intégration dans un plan d'ensemble
Rôle fédérateur du RMT AFORCE

Cibler les grands enjeux d'adaptation, c'est un travail que mène Yves Rousselle avec le projet RENEssences (Réseau d'Évaluation 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 limitée 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 REINFORCE (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 7-8 ans 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.

Caravane : outil pour choisir les essences 

Compatibilité climatique

Facteurs limitants

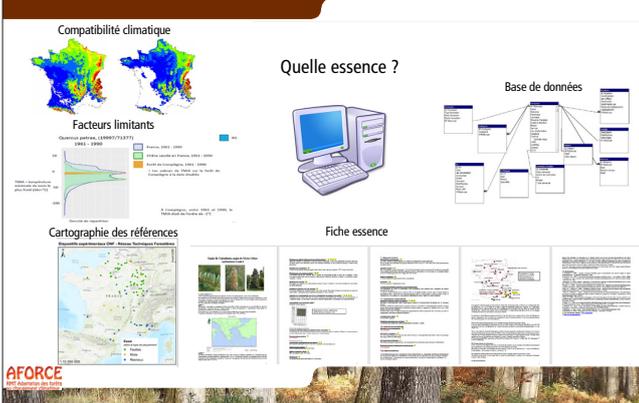
Quelle essence ?

Base de données

Cartographie des références

Fiche essence

AFORCE



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.

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.

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.

RENEssences : Tests de comparaison 

Pour chaque enjeu :

- 4 à 5 dispositifs de type R&D installés selon un gradient climatique :



climat futur lointain	climat futur proche	Zone d'enjeu	Zone d'accueil (au Nord)
-----------------------	---------------------	--------------	--------------------------

- Des îlots d'avenir dans le cadre de la forêt gérée

En complément, un réseau plus exploratoire, pour des espèces très peu connues, constitué uniquement de dispositifs Recherche

RENEssences : les ressources à tester 

Par enjeu : ~ 20 espèces X 3 provenances

Ex : cas du chêne ligérien,

- **zone d'enjeu et zones de climat futur :**
 - Provenances locales de chêne sessile
 - Autres provenances de chêne sessile
 - Chêne pubescent et autres chênes thermophiles
 - Autres espèces feuillues (liste de candidats à établir)
 - Espèces résineuses (liste de candidats à établir)
- **...et en zone d'accueil ?**
 - Espèces et provenances des zones de départ
 - En comparaison avec les principales espèces locales



RENEssences : installation et suivi envisagé 

Dispositifs R&D : installation

- 24 plants * 3 blocs * 60 unités génétiques = 4320 plants
- Avec une densité de 1000 plants / ha : 4 à 5 ha
- Mêmes unités génétiques testées dans la zone d'enjeu et les zones de climat analogue au climat futur
- Caractérisation pédologique
- Caractérisation climatique (stations météo ?)
- Suivi sanitaire

Dispositifs R&D : suivi

- Mesures périodiques : tous les ans, puis tous les 5 ans



Plantations de référence: Ilots d'avenir 

Objectifs:

- Démultiplier les surfaces et nombres de plantation des unités génétiques
- Appropriation des nouvelles espèces/provenances

Enjeux:

- Utiliser les unités génétiques testées dans les dispositifs R&D
- Tracer l'installation
- Enregistrement des accidents
- Mesures ?...ou évaluation a posteriori

Constitution

- Un îlot d'avenir ne contient qu'une seule unité génétique
- La surface d'un îlot d'avenir est comprise entre 0,5 ha et la taille d'une parcelle forestière



Conclusion 

- L'introduction de nouvelles ressources pour l'adaptation : une option d'adaptation transformationnelle
- De nombreuses incertitudes à lever centrées sur l'évaluation des ressources candidates
- La nécessité de progresser ensemble sans attendre tous les résultats
- Attendre et ne rien faire est la pire des solutions



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 nombre de plantation les unités génétiques, afin d'explorer le plus possible de conditions pédo-climatiques. 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)

Office National des Forêts

Quels leviers d'adaptation dans la sylviculture ?

Myriam LEGAY et Lucie ARNAUDET, réseau RDI (resp. DFRN et Pôle RDI de la DT COA)
Séminaire Changements climatiques et gestion de la chênaie ligérienne »
Jeudi 28 juin 2018, ARDON

Office National des Forêts

- Des impacts potentiellement très conséquents, mais avec beaucoup d'incertitudes :
 - Sur l'évolution du climat
 - Sur la réponse des essences
- Une stratégie d'adaptation active possible par le changement de matériel végétal (provenance / essence)
- Mais cela prendra du temps, et des moyens
- Laisser s'exprimer les capacités d'adaptation de la ressource locale
- Atténuer les effets du changement climatique en attendant l'adaptation par le changement d'espèce... et en complément
- Développer des stratégies à court terme pour les peuplements qui n'ont pas atteint la maturité

Office National des Forêts

Modifier la réponse du peuplement au climat

- Approfondir les possibilités d'action à l'échelle du peuplement ou du massif
 - Diagnostiquer la vulnérabilité
 - Faire évoluer la composition
 - Dynamiser la sylviculture
 - Limiter les risques ou leurs impacts
 - Suivre les effets

Office National des Forêts

Agir sur la densité

Un régime d'éclaircie plus dynamique tend à améliorer le bilan hydrique :

- Moins d'interception
- Moins d'évapotranspiration

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 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-François 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.

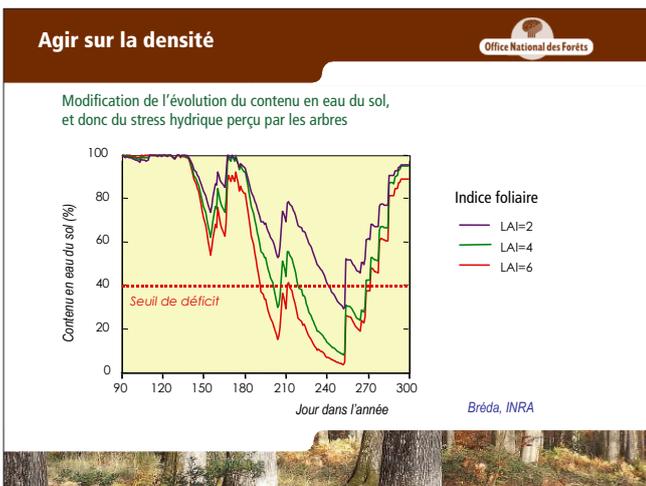
Parmi les 5 orientations d'adaptation qui concluaient ma précédente intervention, je vais me concentrer ici sur les points 2 et 3, qui se jouent à l'échelle du peuplement : faire évoluer la composition – avec les ressources en place – et dynamiser la sylviculture.

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

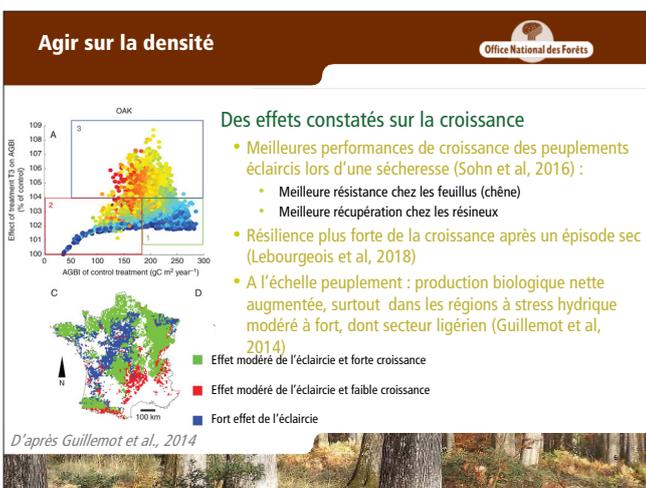
Pour commencer, voyons en quoi, en modifiant la densité, le forestier peut modifier la réponse du peuplement au climat.

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 écophysologiques, 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 détournement, 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.

Agir sur la densité Office National des Forêts

- Les limites de l'atténuation du stress hydrique par la réduction de la densité
 - Un effet à maintenir dynamiquement
 - Retour au LAI d'équilibre en quelques années
 - Augmentation de la transpiration à l'échelle de l'arbre
 - Attentions aux interventions brutales, surtout dans les stades âgés
 - Augmentation de la consommation d'eau de la strate basse
 - En saison de végétation, ET (strate herbacée) ~1/3 ET peuplement
 - Augmentation de la croissance et de la demande évaporative de la strate herbacée
 - Une gamme d'action limitée
 - Ne pas descendre en dessous de LAI 2 à 4
 - Hétérogénéité du sol
 - Et au stade régénération ?
- Et l'ambiance forestière ?

Gobin et al., RDVT 2015

Gérer la densité : en guise de conclusion Office National des Forêts

Une sylviculture dynamique est favorable à l'alimentation en eau du peuplement

A condition qu'elle ne soit ni excessive, ni brutale, et qu'elle soit régulièrement suivie

Tendant à raccourcir le cycle de production, elle apporte d'autres bénéfices :

- Limiter le vieillissement des peuplements (sans les éliminer : cf IVB), facteur de vulnérabilité accrue à tous les stress
- Limiter l'exposition aux risques
- Favoriser la production de bois au bénéfice de l'atténuation

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 connaît 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.

Agir sur la structure ?

Office National des Forêts

Forest Categories

- Boreal
- Temperate
- Adapted to cold
- Adapted to moderate
- Adapted to warm
- Adapted to hot
- Adapted to very hot
- Adapted to very warm
- Adapted to very cold
- Adapted to very hot
- Adapted to very cold

Peu ou pas de résultats sur la structure

Suggestions de bon sens :

- ✓ FR : meilleure maîtrise (par ex de la densité)
- ✓ FIRR : gestion plus souple des perturbations

Un résultat transposable avec précaution : effets combinés de la densité et du statut social sur la réponse au climat, en FR de chêne sessile et douglas (*thèse Trouvé*)

- ✓ Plus la densité est forte plus la croissance se concentre sur les dominants
- ✓ Forte réduction de croissance en cas d'été contraignant*, surtout sur les dominés (chêne : stress hydrique estival ; douglas : températures estivales élevées)

Une observation : plus de peuplements irréguliers dans l'optimum forestier qu'en climat sec

Agir sur la structure

Office National des Forêts

Le cas particulier du taillis et du TSF

- Le renouvellement végétatif ne permet pas l'adaptation génétique
- ⇒ Les peuplements issus de taillis ou de TSF risquent d'être adaptés à un climat déjà révolu (cf. exposé d'Antoine Kremer)

Illustration : Laurent Rivière - ONF

Faire évoluer l'équilibre des essences en présence : sessile versus pédonculé

Office National des Forêts

Le chêne pédonculé jugé plus vulnérable à la sécheresse

- Résultat principalement fondé sur l'analyse de dépérissements
- Des différences ténues en conditions contrôlées

↑ Becker, RFF 1983

↑ Efficacité d'utilisation de l'eau de semis (Ponton & al., 2002)

← Vulnérabilité à la cavitation (Bréda & al., 1993)

QP = *Quercus petraea* = chêne sessile
 QR = *Quercus 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.

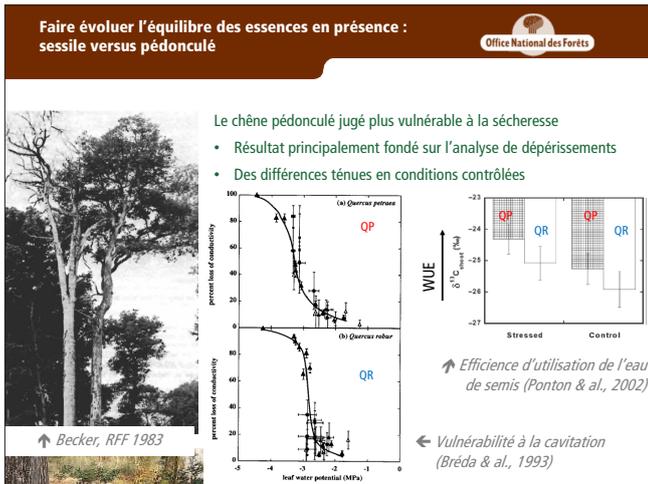
Le dernier argument pour dire qu'à mon avis la structure n'offre pas de solution à l'atténuation du stress hydrique, c'est que si on considère les choses d'un point de vue bioclimatique à large échelle (cf. carte des types forestiers européens), les peuplements à structure irrégulière se concentrent 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).

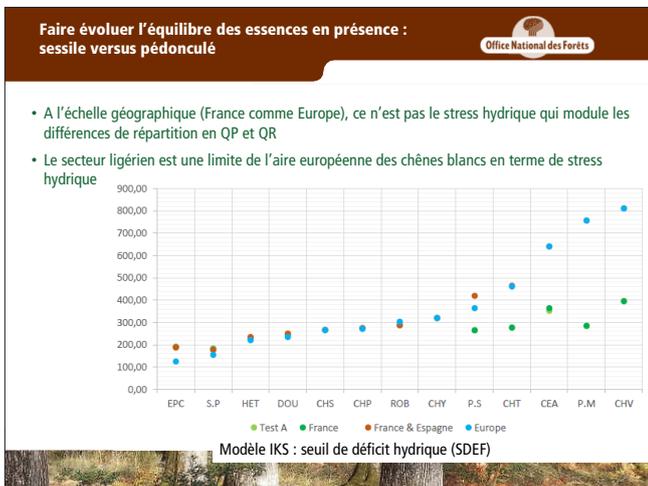
Agir sur la composition : essence objectif

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.**

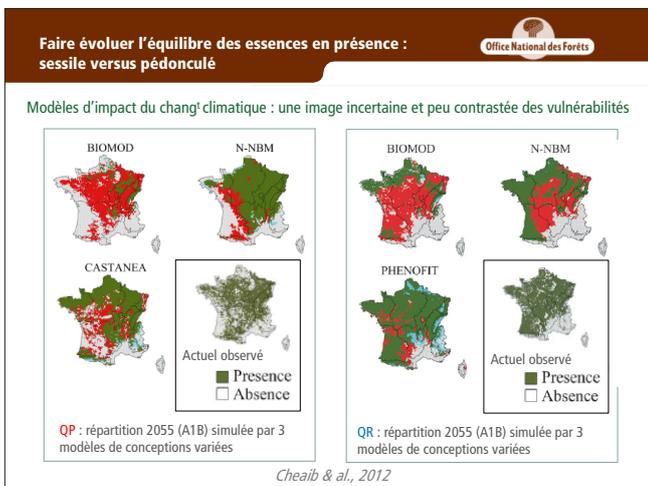
Nous avons tous appris que le chêne pédonculé est réputé plus vulnérable à la sécheresse. Ça vient en grande partie des travaux de Michel Becker, qui a beaucoup marqué la foresterie française, et c'est un résultat fondé beaucoup sur l'analyse des dépérissements. Michel Becker a pris cette photo en forêt 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 = *Quercus 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*

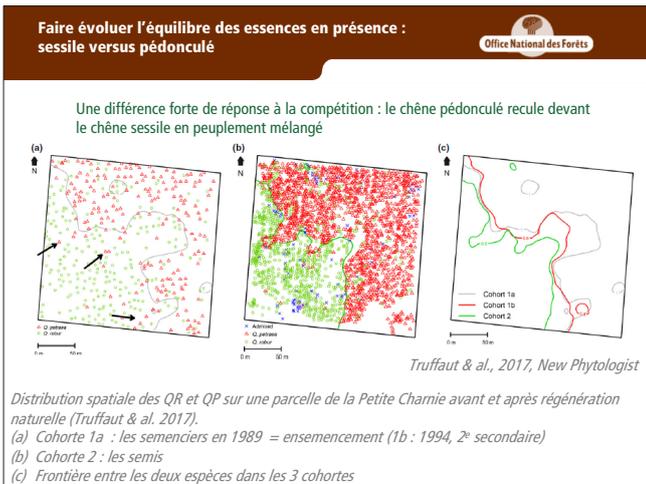


QP = *Quercus petraea* = chêne sessile
 QR = *Quercus robur* = chêne pédonculé
 Le rouge représente les zones où l'aire devient supposée impropre à l'essence en 2055 avec le scénario A1B ; en vert, ce sont les zones où l'espèce se maintient et, en bleu, celles où l'espèce pourrait voir son aire climatique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

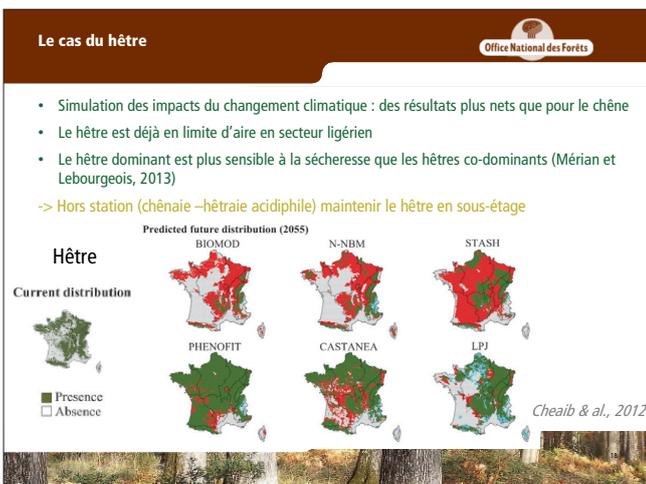
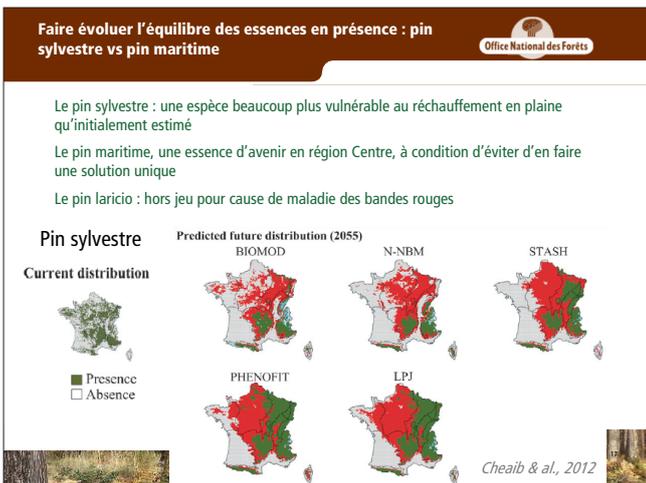
Le premier concerne les courbes d'embolie des deux chênes (au centre). Ces courbes représentent la perte de conductivité hydraulique lorsque le stress hydrique (le potentiel hydrique des feuilles) augmente : il y a des nuances dans la forme de la courbe mais le point d'inflexion est quasiment le même pour le sessile (en haut) et le pédonculé (en bas). L'autre exemple (graphique de droite) concerne l'efficacité d'utilisation de l'eau, d'après une étude de Stéphane Ponton portant sur les semis (il y en a 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.



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 2^e 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/épicéa, 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 hêtraie-sapinière-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 écouilles 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 grande consommation d'eau.

Quoi qu'il en soit, voici une carte qui schématise les résultats d'une étude menée 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

Agir sur la composition : effets positif du mélange Office National des Forêts

Au premier ordre : effet de composition

Au-delà de la composition des réponses des espèces, effet généralement positif sur la croissance, mais :

- Pas au profit de toutes les espèces
- Dépendant des espèces en présence
- Dépendant de la station
- Les mécanismes :
 - Compétition interspécifique < intraspécifique
 - Facilitation (ex Robinier fixateur d'azote et peuplier)

Effet théorique de stabilisation des accidents de croissance si les espèces n'ont pas le même comportement à la sécheresse (Morin & al., 2014)

- Chêne + pin sylvestre → résultats plutôt négatifs obtenus par IRSTEA à Orléans
- Chêne + hêtre

Toigo et al., J. of Ecology, 2014

Agir sur la composition : effets positif du mélange Office National des Forêts

Le mélange à deux ne profite pas également aux membres du couple

Toigo et al., J. of Ecology, 2014

Agir sur la composition : limites du mélange Office National des Forêts

- Pas d'effet général positif sur la résistance à la sécheresse
- Une productivité plus importante du mélange, au prix d'un LAI plus élevé et donc d'une consommation d'eau plus élevée ?
- Grossiord et al. : à l'échelle de l'Europe : le mélange n'est pas toujours favorable à la résistance à la sécheresse de l'écosystème
- Cela dépend essentiellement des espèces
- Effet plutôt favorable dans les forêts tempérées et thermophiles-décidues ?

Interactions compétitives

Pas d'effet de la diversité

facilitation

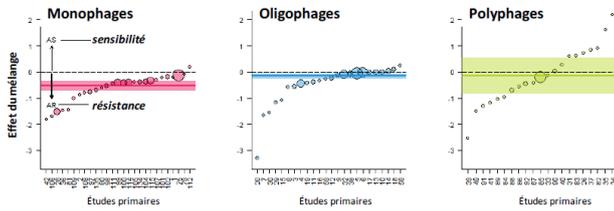
Pas d'effet de la diversité

D'après Grossiord et al., RFF, 2015

Agir sur la composition: intérêts du mélange

Office National des Forêts

- Intérêt du mélange par rapport à la prise de risque et aux bioagresseurs spécialistes



Nombre d'études montrant une différence de dégâts d'insectes herbivores sur une espèce gérée en peuplement pur vs en mélange avec une autre espèce (Castagnérol, Jactel & al. 2014)

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 accroît 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.

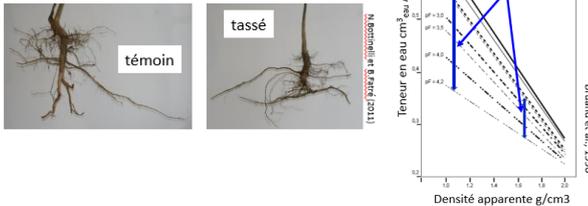
Merci de votre attention.

Exploitation : gérer durablement les sols

Office National des Forêts

- Eviter le tassement des sols et mettre en place des cloisonnements
 - Montré sur sols agricoles : la réserve utile diminue quand la densité augmente (quand il y a un tassement)
 - Impact du tassement sur les racines

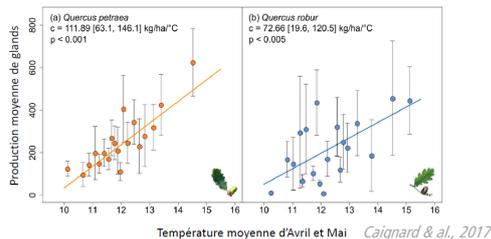
Systèmes racinaires de chênes sessiles



Impact du CC sur la glandée

Office National des Forêts

- En France, augmentation de la production de glands des chênes tempérés au cours de la dernière décennie (Caignard & al. 2017)
- Augmentation de la production de glands avec la température de printemps



- Quel effet sur les glandées massives ? étude en cours

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 deuxième éclaircies, qu'est-ce qu'on fait ?**

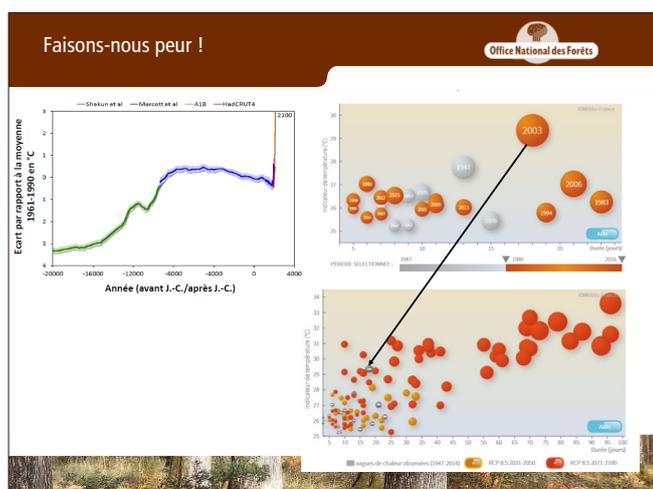
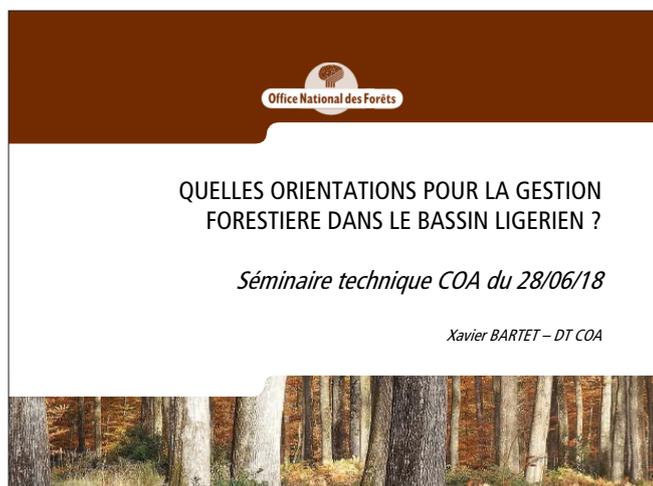
Xavier Bartet – Effectivement c'est un problème. Dans le guide de la chênaie atlantique et le mémento coupes, on insiste pour dire qu'il y a tout un scénario, un itinéraire sylvicole, et si on rate les premières étapes, il y a ensuite des retards qu'on n'arrivera jamais à rattraper. Le service de commercialisation 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



Quelle stratégie adopter ?

La plus grande **certitude** : Nous sommes face à une grande **incertitude** sur l'avenir !

- Mais la **R&D investit massivement ce domaine de recherche**
- Il nous faut explorer, tester et agir **rapidement** car l'évolution du changement climatique, quelques soient les scénarios, va être très rapide au regard de ce qu'on a connu par le passé

La **palette d'essences** sur lesquelles on peut compter actuellement sur le bassin ligérien est très **limitée**

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 CO₂ 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, apparaît 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-François 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.

Les axes proposés aux gestionnaires/aménagistes



- Recommandations/Informations sur les principes à adopter au moment de l'élaboration de l'aménagement (anticipation)
- Recommandations/Informations à intégrer au niveau de la gestion (adaptation)
- Outils ou démarches prévus pour améliorer la connaissance et aider les gestionnaires
- La contribution attendue pour faire progresser la R&D sur les questions de CC

Recommandations pour ANTICIPER l'impact du CC



Stratégie de renouvellement / régénération

- Garder la **prédominance de la régénération naturelle**
- Initier **une démarche de migration assistée** (provenances et espèces) par plantation
- **Pas de conclusions claires sur l'avantage FR/FIR** par rapport à la résistance au CC
- **Place grandissante du pin maritime**
- **Le pin sylvestre restera-t-il adapté ?**
- **Quel avenir pour le pin laricio ?**

Recommandations pour ANTICIPER l'impact du CC



Anticiper la gestion des risques

- **Augmentation des risques d'incendie** → Adapter notre dispositif de surveillance-alerte-intervention
- Développement des attaques biotiques + lié à **l'intensification des échanges commerciaux** qu'à l'évolution du CC. Mais attaques **d'autant plus fortes que les peuplements seront affaiblis**
- Risque le plus fort lié au **flétrissement du chêne**
- **Accélérer le renouvellement des TSF** vieilliss → brassage génétique et meilleure adaptation du futur peuplement + prévention vis-à-vis du risque de ces peuplements à priori moins fructifères
- **Diminuer le Ø d'exploitabilité des pins** → limitation des risques chablis et adaptation aux besoins de la filière

Recommandations pour GERER l'impact du CC



Tenir compte de la résistance à la sécheresse et de la compétition pour l'eau

- **Pas de résultats de recherche probants sur l'intérêt du mélange** par rapport à la résistance au CC
- **Meilleure récupération des peuplements sur stations séchardes** → acclimatation des peuplements
- Dans les stations à forte concurrence herbacée → compromis entre baisse de la densité du peuplement et maintien d'une couverture arborée
- Sauf sur chênaie -hêtraie acidiphile, **ne maintenir le hêtre qu'en sous-étage**
- **Effet de sélection naturelle dans le jeune âge / critère « résistance à la sécheresse »** → intérêt de garder des densités + fortes dans le jeune âge
- Favoriser le CHS par rapport au CHP, mais **si CHP bien venant et fortement majoritaire** → **éviter une transformation systématique en CHS**
- **Limiter le tassement du sol** / réserve utile en eau + développement des racines



Recommandations pour GERER l'impact du CC



Maintenir une sylviculture dynamique

- **Modèles de croissance n'intègrent pas l'impact du CC** sur la croissance et l'évolution des peuplements
- **Impact des éclaircies favorable à la croissance des arbres et à leur résistance aux CC**
- **Evolution de la productivité du chêne** → tendance à la hausse en France mais des **observations variables voire inverses selon les contextes**
- La contrainte de **sécheresse diminue la croissance** du chêne sessile mais de manière moindre que la densité. La **période de végétation augmente**. La croissance diminue **plus en hauteur qu'en diamètre**. Les chênes sessiles **dominés sont plus sensibles aux effets de la sécheresse**
- **Itinéraires développés dans nos guides de sylviculture** → **compromis** entre une optimisation de l'effet « puits de carbone » de la forêt et les risques de dépérissement et chablis
- **La diminution de l'âge d'exploitabilité / Ø donné limite les risques de perte économique**
- **Accélérer le rythme de renouvellement des peuplements augmente les capacités d'adaptation**
- **Le CC semble favoriser la production de glands** mais études en cours



Principales conclusions



- La confirmation de l'intérêt d'une **sylviculture dynamique du chêne**
- La réflexion sur **la place des différents pins** et l'adaptation de leur révolution
- **Une stratégie pour régénérer nos vieux TSF**, cible privilégiée du dépérissement lié au CC
- L'accompagnement du renouvellement naturel de nos peuplements par la **migration assistée de provenances/essences mieux adaptées au CC**

→ Nécessité de **communiquer** sur ces messages auprès des collègues ONF, des partenaires, de la filière, du grand public...



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 pourrions 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 liés au CC d'aide à la gestion

Office National des Forêts

RENEssences



- Objectif de mettre en place des expérimentations d'évaluation de Ressources Génétiques Forestières (provenances et Essences) dans le contexte du changement climatique (cf ppt de B. Musch)
- **Priorisation d'enjeux au niveau national** en croisant 3 critères :
 - le poids économique, social ou environnemental important pour l'ONF
 - les zones où la variation de climat est la plus forte
 - les situations où nous supposons que l'espèce en place ne va pas réussir à s'adapter à ces changements climatiques
- Contexte n° 1 au niveau national retenu officiellement= **la ressource chêne en secteur ligérien**
- **Création d'un groupe « Chlorofil Renaissance »** (réseau interne ONF par thématique) le 29/06/18 à 15 h

chlorofil
le réseau qui progresse

Les outils liés au CC d'aide à la gestion

Office National des Forêts

La révision des DRA/SRA



- Rédaction pour les DRA/SRA **d'une note de synthèse qui fera le point sur les impacts du changement climatique attendus sur cette zone bio-géographique**, et sur les sources de données climatiques mobilisables, mais aussi sur les règles d'utilisation des tableaux-maître (limites d'utilisation liées aux approches expérimentales, aux stations marginales...)
- **Mise à jour des tableaux maîtres**
- Introduction d'un **Ø maximum pour définir la contrainte de vieillissement** (notamment JCC)
- Prise en compte de **la fertilité, des risques et de l'origine des peuplements (TSF) sur les stations défavorables**
- **Liste des essences et provenances possibles à planter sur la zone ligérienne** (élargissement du panel /situation actuelle)



Les outils liés au CC d'aide à la gestion

Office National des Forêts

CARAVANE (CAtalogue Raisonné des Variétés Nouvelles à Expérimenter)



- Pour guider le choix des essences à planter en intégrant le CC → **site internet à destination des gestionnaires**
- L'information aura aussi vocation à guider les choix en matière **d'expérimentation de nouvelles essences**.
- Le gestionnaire pourra intégrer comme variables :
 - la zone géographique
 - le contexte stationnel
 - le scénario climatique futur (parmi un choix des scénarios GIEC)
 - d'autres informations
 et il aura accès à une **liste d'essences conseillées** avec les caractéristiques autécologiques détaillées de chaque essence
- **CRPF et ONF sur Orléans** ont été retenus comme **« testeurs »** de ce nouvel outil



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 pourrions 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 pourrions 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.

La contribution des gestionnaires attendue Office National des Forêts

Les îlots d'avenir inscrits dans le projet ESPERENSE

- Des plantations expérimentales dans le cadre de projets de plantations ou régénérations naturelles qui accompagneront RENEssences (ce qui permettra de les tester dans d'autres contextes stationnel mais même contexte climatique)
- Cahier des charges de l'installation (0,5 ha mini) et de suivi (light 1) en cours de finalisation
- Liste des provenances/essences à planter en cours de finalisation
- Etude avec le PNRGF (pépinières de Guéméné et Peyrat) des plants disponibles pour les plantations d'îlots d'avenir prochains (11 îlots possibles dont 6 QPE et 3 QRO)

MACCLIF (prise en compte des Mesures d'Adaptation au Changement Climatique par les gestionnaires Forestiers)

- Questionnaire Web transmis à l'ensemble des gestionnaires, communes forestières, experts, techniciens CRPF, Coop...
- 2 stagiaires (ONF sur AURA) et (CRPF sur CVL) chargés d'approfondir l'enquête auprès des gestionnaires/aménagistes sur leur perception et mesures éventuellement prises
- Bilan des mesures d'adaptation à partir des documents d'aménagement des forêts

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 des gestionnaires attendue Office National des Forêts

Enquête Essences Atypiques

- Repérer des îlots de peuplements d'essences originales sur la zone et se portant relativement bien
- Éventuellement en retenir certains pour être peuplements portes graines (adaptation de l'essence au climat local)
- Relance de cette enquête via Canopée V5, prochainement déployé

Projet Robinier

- Enrichir le panel restreint des essences adaptées au CC sur le BL avec un potentiel de valorisation important à tous les stades (+ essence de classe 4)
- Expertiser 2 itinéraires sylvicoles préconisés sur Taillis de 25 ans pour produire du BO (FD Fontevraud)
- Test de 3 itinéraires de plantation
- Comment contrôler extension/concurrence dans régénération chêne prévues ou engagées ?

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

La contribution des gestionnaires attendue

Office National des Forêts

Etude et suivi de la dynamique des glandées

- PotenChêne a montré 2 résultats intéressants :
 - La production fruitière des chênes s'est accrue, en moyenne, au cours des dernières années en France, parallèlement à l'augmentation de la température printanière.
 - La dynamique des glandées dépend fortement de la quantité de ressources que les arbres allouent à la production de pollen d'une année à l'autre, ainsi que des conditions météorologiques printanières qui affectent la diffusion de ce pollen.

Sources : Caignard et al., Scientific Report, 2017
Thèse Eliane Schermer (en cours)

La contribution des gestionnaires attendue

Office National des Forêts

Etude et suivi de la dynamique des glandées (suite)

- Si l'on pouvait prédire les bonnes glandées à l'avance → Très intéressant dans le cadre des coupes de régé sur stations acidiphiles hydromorphes (cf mémento coupe)
- Dispositif en collaboration avec le réseau « Graines & Plants » ONF et l'université de Grenoble (S. Venner) pour étudier les facteurs d'influence des glandées et conforter les 1ers résultats

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 au 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

DES SUIVIS POUR PROGRESSER DANS LA SYLVICULTURE DU ROBINIER DANS L'OUEST DE LA FRANCE

Gilbert Douzon

ONF, DT Centre-Ouest-Aquitaine,
pôle RDI de Boigny

Face aux menaces que font peser les changements globaux sur les principales essences de production dans l'ouest de la France, le robinier offre dans certaines situations une possibilité de diversification qui mérite attention. Le projet Robinier de la direction territoriale ONF Centre-Ouest-Aquitaine aborde la question de façon pragmatique et raisonnée.

Les effets du changement climatique, ou plus largement des changements globaux, pourraient entraîner des modifications importantes de la composition des forêts dans l'ouest de la France. Les chênes sessile et pédonculé voient leur état se détériorer, en particulier le chêne pédonculé qui a subi des mortalités notables dans certains contextes pédoclimatiques. Le pin sylvestre a subi ces dernières décennies des attaques biotiques et des atteintes au niveau physiologique (nécroses cambiales) qui ont entraîné localement des mortalités importantes ; de plus, des questionnements émergent sur sa capacité à résister aux fortes chaleurs. Le pin laricio, essence plus récente dans le paysage, voit chuter sa productivité à cause du fort développement de la maladie des bandes rouges ; son renouvellement et son extension s'en trouvent brutalement stoppés. Le pin maritime, espèce sur laquelle se reporte l'effort de renouvellement, n'est pas sans risque : le fomes et l'éventuelle arrivée du nématode du pin, que le réchauffement climatique favoriserait, sont deux agents de mortalité.

Face à ces menaces, l'enjeu est de diversifier le panel d'essences productives en forêts publiques afin de limiter les risques liés aux changements globaux. C'est aussi d'agir pour l'adaptation des forêts au changement climatique en testant des sylvicultures pour des essences présentes sur le territoire, mais peu ou pas valorisées. De ce point de vue, le robinier est un bon candidat, pour plusieurs raisons :

- sa plasticité lui permet dans une certaine mesure de supporter un réchauffement du climat et une baisse de la pluviométrie durant la saison de végétation ;
- sa révolution est plus courte (exploitabilité \approx 40 ans) que celles des essences actuelles, ce qui limite l'exposition aux événements extrêmes ;
- son bois, imputrescible (classe d'emploi 4), peut se substituer aux bois exotiques importés et lui assurer un potentiel de valorisation important.

Actuellement, le robinier est surtout présent en forêt privée, où il est expérimenté en sylviculture depuis une vingtaine d'années. En forêt publique, il reste anecdotique mais il mérite d'être testé, du moins dans certaines conditions.

C'est pourquoi la Direction territoriale (DT) Centre-Ouest-Aquitaine de l'ONF a décidé d'installer des placettes de démonstration et de suivi sur trois thèmes, pour commencer : valoriser les taillis existants ; évaluer la propension à l'envahissement en contexte forestier ; installer un peuplement. Notre propos est de présenter cette démarche : questions sylvicoles prioritaires et dispositifs mis en place.



© Bernard Lacombar / ONF



© Nadège Caillault / ONF

Estacade, caillebotis, mobilier, le bois de robinier est un réel atout en extérieur

Questions sylvicoles à traiter et choix des sites

Le robinier supporte des sols pauvres et secs, mais ne fera évidemment pas de prodige dans ces situations ingrates. Pour produire du bois d'œuvre, l'espèce a besoin d'un sol à structure aérée et d'un minimum de richesse chimique, mais aussi d'une sylviculture qui lui permette d'exprimer la vigueur de ses premières années de croissance et son tempérament héliophile. Cependant sa forte propension à rejeter et drageonner interpelle les forestiers sur le risque d'envahissement des peuplements voisins. Nous avons donc commencé à décliner des tests sur trois thèmes en 2017.

1/ Éclaircie dans des taillis avec objectif de production de bois d'œuvre. Actuellement, sur le territoire de la DT, le robinier est au mieux valorisé en piquets. Dès la fin du 19^e siècle, le robinier était installé sur des délaissés agricoles pour fournir en piquets les vignobles à reconstituer suite à l'attaque du phylloxera (Poitou, 2008). Les piquets d'*acacia* sont très appréciés pour leur durabilité, mais c'est bien peu au regard des potentialités du bois de cette essence. Pour ce type d'opération, on cherche d'abord à identifier, parmi les peuplements existants, ceux qui répondent à des critères à la fois dendrométriques et stationnels permettant d'obtenir du bois d'œuvre à 45 ans ; ce sont donc plutôt des peuplements âgés de 15-20 ans. Les taillis répondant à ces critères sont peu nombreux car ils sont souvent installés sur des sols pauvres chimiquement et qu'ils sont souvent déjà trop âgés.

2/ Méthodes d'installation du robinier. Le regain d'intérêt que suscite le robinier depuis une dizaine d'années a conduit à de nouvelles introductions dans les forêts et bois privés. Mais les modes d'installation (plantation ou semis), la densité optimum, l'intérêt du recépage ou de l'élagage, la période pour réaliser ces travaux sont encore des sujets exploratoires.

3/ Évaluation de l'envahissement par le robinier d'un peuplement forestier attenant, lors d'une éclaircie ou d'une coupe rase des robiniers. Cette capacité à envahir des zones ouvertes est un frein à l'introduction du robinier en forêt.

Présentation des dispositifs de démonstration et suivi

Placette démonstration d'éclaircie de taillis

Le robinier est traditionnellement conduit en taillis et exploité vers 25 ans pour produire des piquets. L'objectif est de réaliser, à l'échéance, non pas une coupe rase mais une éclaircie forte qui doit permettre au peuplement d'atteindre les critères d'exploitabilité pour le bois d'œuvre (soit 35 cm de diamètre à 45 ans en fertilité moyenne). Y a-t-il redémarrage de la croissance ? Y a-t-il risque de chablis ? Observe-t-on une dégradation sanitaire des arbres ?

Une première placette a été installée en mars 2017 en forêt de Fontevraud (aux confins de l'Anjou, de la Touraine et du Poitou) sous la forme d'une éclaircie retirant 2 tiges sur 3 dans un taillis de 25 ans, dense pour son âge (840 tiges/ha). La station est moyennement fertile, classe 3 des classes de fertilité du robinier en Aquitaine (photo 1). Le diamètre moyen des arbres conservés est de 20 cm. La rectitude des troncs est moyennement satisfaisante. Ces caractéristiques sont probablement un peu « limite » pour produire du bois d'œuvre, mais ce choix est représentatif d'un grand nombre de taillis dans le secteur ligérien et répond aussi à la motivation du gestionnaire local pour améliorer la récolte de bois d'œuvre dans une forêt qui en fournit peu (forêt domaniale affectée au ministère de la Défense, sujette à multiples contraintes, et sans gros enjeu de production).

La récolte de bois d'œuvre est espérée 20 ans après l'éclaircie. La réaction en termes de croissance et d'altération des arbres sera suivie. Le suivi annuel sera réalisé par le personnel de terrain selon le protocole prédéfini. La placette pourra périodiquement (5 ans) faire l'objet d'un relevé avec le service de recherche-développement. Les données sont enregistrées dans la base de suivi de l'essai au pôle recherche-développement.

L'objectif à terme est de multiplier ce type de placette, facile à installer et suivre, pour prendre en compte la diversité des caractéristiques de milieu et de peuplement.

Itinéraires d'installation

D'une façon générale, les introductions de robinier de ces dernières années ont connu des fortunes diverses, parfois jusqu'à l'échec total (enquête DSF 2018). Au-delà des difficultés d'installation, la conduite de jeunes peuplements pour obtenir des tiges bien conformées est encore balbutiante.

Nous avons mis en place trois modalités d'installation du robinier sur une parcelle en FD d'Orléans, dans le massif des Bordes. Cela correspond à la disponibilité d'un terrain représentatif de situations d'échecs de régénération de chêne en station oligotrophe sur sable plus ou moins drainé, et à la recherche d'espèce de production nouvelle sur des stations limites pour la production de chêne (fertilité 3 du guide de la chênaie atlantique).

Conserver la végétation ligneuse préexistante nous semblait important pour plusieurs raisons : protéger latéralement les robiniers contre les extrêmes climatiques, aider ensuite à l'éducation des tiges, mais aussi obtenir *in fine* un peuplement mélangé, autre sujet d'intérêt. Nous nous sommes appuyés sur les cloisonnements sylvicoles existants pour installer le dispositif. La végétation préexistante, recru de genêt, de bouleau et de charme essentiellement, a été broyée sur une largeur modulée selon sa hauteur, qui diffère de part et d'autre d'un fossé collecteur traversant la parcelle. À l'ouest, où elle atteint 5 m de haut, une bande sur deux a été broyée complètement, libérant un espace de 8 m de large ; à l'est du fossé où la hauteur varie entre 1 m et 2,5 m la moitié de la bande a été broyée libérant un espace de 5 m de large (en réalité de 3,5 à 5m) (photo 2).



Surface de la placette : 1436 m ²	Surface terrière (G, en m ²)		Nombre de tiges (N)	
	G _{placette}	G/ha	N _{placette}	N/ha
Caractéristiques avant éclaircie	2,88	20,0	121	843
Objectif visé	1,31	9,1	36	250
Caractéristiques après éclaircie	1,33	9,3	40	279

Photo 1. Placette « éclaircie de taillis » en forêt de Fontevraud (parcelle 40) : peuplement après la coupe (mars 2017)

Dans l'espace ainsi préparé, nous cherchons donc à tester :

- Un itinéraire consistant en une plantation à faible densité (833 plants/ha) suivie d'un recépage précoce. L'objectif est d'obtenir des rejets et drageons plus vigoureux et d'augmenter la densité, pour améliorer l'élagage des tiges. En revanche, on craint un envahissement plus important des espaces contigus. Cela est à vérifier.
- Un itinéraire consistant en une plantation plus dense (1*2m en quinconce soit une densité locale de 3750 plants/ha correspondant à 1250 plants/ha cadastral) suivie d'une taille de formation « en queue de billard ». Le principe est de couper l'ensemble des branches latérales quand la hauteur des plants sera de 2 à 3 m. C'est une alternative à la taille de formation classique, coûteuse et peu probante ; mais il reste à confirmer que cette technique économe et un peu brutale, qui ne demande ni formation spécifique ni temps de réflexion sur la branche à couper, convient bien au robinier.
- Un itinéraire de semis en poquet sur ligne. L'objectif est de densifier très localement les tiges de robinier pour que l'élagage naturel s'opère. Après une préparation mécanique du sol pour enlever toute concurrence végétale (photo 3), un grattage localisé de la surface du sol et un dépôt de 6 à 8 graines avec une canne à semer (photo 4) ont été réalisés tous les mètres sur une ligne.

Pour les plantations, il s'agit de plants d'un an à racines nues, de provenance Roumanie K2 Carei. Pour le semis, la graine est de provenance hongroise Pusztavac (voir aussi encadré). L'ensemble du dispositif a été clôturé pour éviter les dégâts des cervidés et du sanglier, le robinier étant une essence appréciée dans son jeune âge.

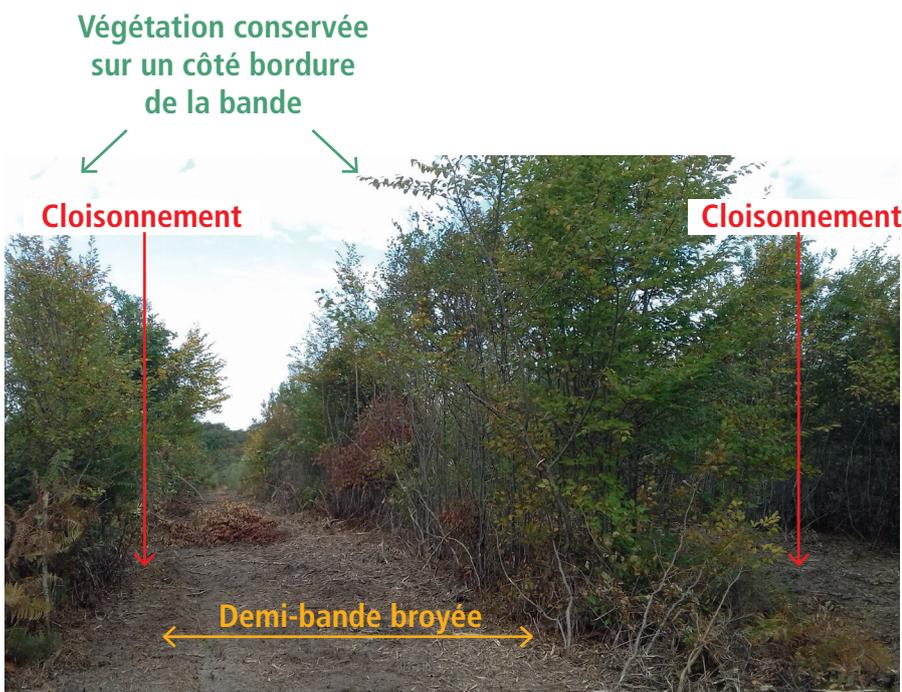


Photo 2. Dispositif « installation » : broyage de la moitié d'une bande dans une zone de recru ≤ 2, 5m



Photo 3. Dispositif « installation » : pour le semis, la surface du sol doit être préparée pour enlever toute concurrence végétale



Photo 4. Canne à semer (1m de haut), présentée ici à côté d'un poquet de semis déjà levés

Quels matériels forestiers de reproduction pour le robinier faux acacia ?

(Joël Conche, expert *Graines et Plants* à l'ONF)

Parmi toutes les semences d'arbres forestiers utilisées en France, celles du robinier faux acacia sont probablement les plus résistantes. Elles peuvent se conserver sur de très longues périodes, soit probablement plus de 30 ans. On dénombre entre 42 000 et 50 000 graines au kg avec un taux de germination généralement supérieur à 90%.

En Hongrie et en Roumanie, les graines sont collectées par tamisage de la litière en forêt. Ce procédé mécanisé, très lourd à mettre en œuvre, permet de récupérer jusqu'à 10 années de fructification (plusieurs centaines de kg/ha), sans altération pour les semences. Les graines de robinier faux-acacia sont affectées d'une profonde dormance tégumentaire qui peut être brisée artificiellement soit par scarification, soit par ébouillantage. Les fournisseurs hongrois, roumains et bulgares récoltent plusieurs tonnes de semences par an qu'ils exportent ensuite dans les pays d'Europe. Les marchands de semences français commercialisent annuellement entre 500 et 700 kg de ces semences importées. Une partie importante est utilisée en semis direct (semis d'avril à juin à une densité de 3 kg/ha) et une centaine de kg sont semés en pépinière.

Avec 650 000 plants commercialisés annuellement depuis quelques années, le robinier est devenu la troisième essence feuillue plantée en France après le chêne sessile (3,5 millions) et les peupliers (800 000) (réf. enquête nationale 2016/2017).

Depuis 2003, la France a admis le robinier faux acacia au titre des matériels forestiers de reproduction réglementés. Une seule région de provenance a été retenue pour la France (RPS 900) avec une limite altitudinale de 1600 mètres mais aucun peuplement n'a été sélectionné. Les récoltes de graines ne concernent donc que la catégorie « identifiée ». Un essai de récolte sur arbres exploités a été conduit par l'ONF en 2004 mais cette méthode n'est absolument pas reproductible pour des raisons économiques.

Depuis 1995, le CNPF a sélectionné une vaste collection de clones en Aquitaine dans un premier temps, puis sur la France entière (Cf. Forêt-Entreprise n°226-janvier 2016). Plus de 300 individus représentant 160 peuplements situés dans des contextes pédoclimatiques très variés ont été sélectionnés sur des critères de vigueur, de rectitude du fût, d'écart à la verticalité, d'absence de fourchaison, d'absence de fibre torse et de déviations en forme de baionnette. Ce matériel végétal a ensuite été multiplié par voie de bouturage herbacé ou de bouturage de racines puis installé dans des dispositifs d'évaluation.

Cet important travail de sélection sera valorisé par l'installation de verger à graines de clones prévue dans le département du Lot. Une première tranche de 3 à 4 ha devrait être plantée en automne 2020 à partir d'une large base génétique. Son concept sera innovant de façon à rationaliser au maximum la gestion de l'entretien du verger et des récoltes de graines. Ces dernières seront ramassées en fin de saison sur un film étalé de façon permanente. Un second verger sera installé dans une dizaine d'années. Ses composants seront choisis en fonction des performances clonales mesurées dans les tests d'évaluation en y intégrant les critères de floribondité. Les expériences de gestion acquises avec le premier verger permettront d'ajuster les modalités techniques éprouvées.

Ce projet de verger à graines de robinier faux acacia représente un véritable défi. Des expériences similaires existent dans d'autres pays mais l'enjeu principal de la réussite réside dans le fait qu'il est indispensable de concevoir des modalités d'exploitation économiquement supportables.

Dispositif d'évaluation de l'envahissement

Enfin pour évaluer les conséquences d'une coupe dans le robinier en matière d'envahissement des peuplements limitrophes, plus ou moins fermés et composés d'autres essences, nous mesurerons la densité et la vitesse de propagation des dragons.

Pour ce faire, nous avons trouvé en forêt de Fontevraud un taillis de robinier jouxtant un peuplement composé de chênes chevelu et pédonculé de diamètre moyen 35-40 cm avec en sous-étage du noisetier, du sureau et de l'aubépine. Le taillis de robinier a été éclairci durant l'hiver 2016-2017 (photo 5). Le peuplement « d'accueil », dont la surface terrière initiale se situe entre 23 et 33 m²/ha (photo 6), a été martelé et exploité durant l'hiver 2017-2018 pour créer deux zones différentes. Dans la première, la surface terrière a été ramenée vers 17m²/ha, valeur décrite dans la littérature comme seuil avant envahissement par le robinier ; pour la seconde, la surface terrière a été abaissée jusque vers 13 m²/ha, valeur (après coupe) généralement indiquée pour un traitement irrégulier dans la chênaie. Entre temps, le peuplement situé au sud du taillis de robinier a été exploité en coupe rase. Ce dernier contenait du robinier. Cette situation imprévue nous a obligés à ajouter une nouvelle modalité (voir le schéma, figure 1).

La limite de présence du robinier a été précisément repérée sur le terrain et relevée au GPS en juin 2017. Chaque année, un inventaire sera effectué au-delà de ce front et géo référencé par le service recherche-développement.

Un premier bilan est prévu au bout de 5 ans afin d'évaluer l'évolution de la surface terrière et de la réajuster si nécessaire. Des premières conclusions seront tirées sur la progression du robinier. Le suivi pourrait durer une dizaine d'années.



Photo 5. Dispositif d'évaluation de l'envahissement : le peuplement « source » de robinier éclairci



Photo 6. Dispositif d'évaluation de l'envahissement : le peuplement « arrivée » (état initial), une chênaie chevelu/pédonculé avec sous-étage de noisetier, sureau, aubépine

Conclusion

En tant qu'essence alternative potentielle, le robinier doit être installé (ou mis en valeur) avec discernement afin d'éviter les échecs sylvicoles, économiques ou écologiques. Les dispositifs que nous mettons en place devraient contribuer modestement, comme d'autres expérimentations en particulier en forêt privée, à construire des prescriptions de gestion pour développer une approche raisonnée de son introduction et de sa gestion.

Dans le secteur ligérien, la place à lui consacrer devrait être réduite, car les meilleures fertilités sont réservées au chêne et, en attendant d'en savoir plus sur son comportement invasif et son impact sur la biodiversité, son installation au cœur des forêts anciennes est à éviter. Dans les autres secteurs géographiques de la direction territoriale, d'autres questions se posent. Par exemple, sur le littoral atlantique, dans un contexte arrière dunaire, doit-on conforter sa position ? Prévoir un traitement irrégulier ? Comment gérer les peuplements mélangés avec l'érable sycomore dans un contexte d'évolution du climat ? Dans le Limousin, la question serait plutôt celle de l'introduction du robinier, et de son acceptabilité sociale, en tant qu'essence de production dans des régions potentielles telles que Châtaigneraie limousine ou Combrailles (Sylvoécotégions 11 et 12).

Enfin, le robinier pourrait s'inscrire dans le projet RENEssences piloté par le département RDI (Réseau d'Évaluation de Nouvelles Essences dans le cadre des changements climatiques), et le dispositif d'installation décrit plus haut pourrait être intégré dans le réseau d'îlots d'avenir de la Direction territoriale.

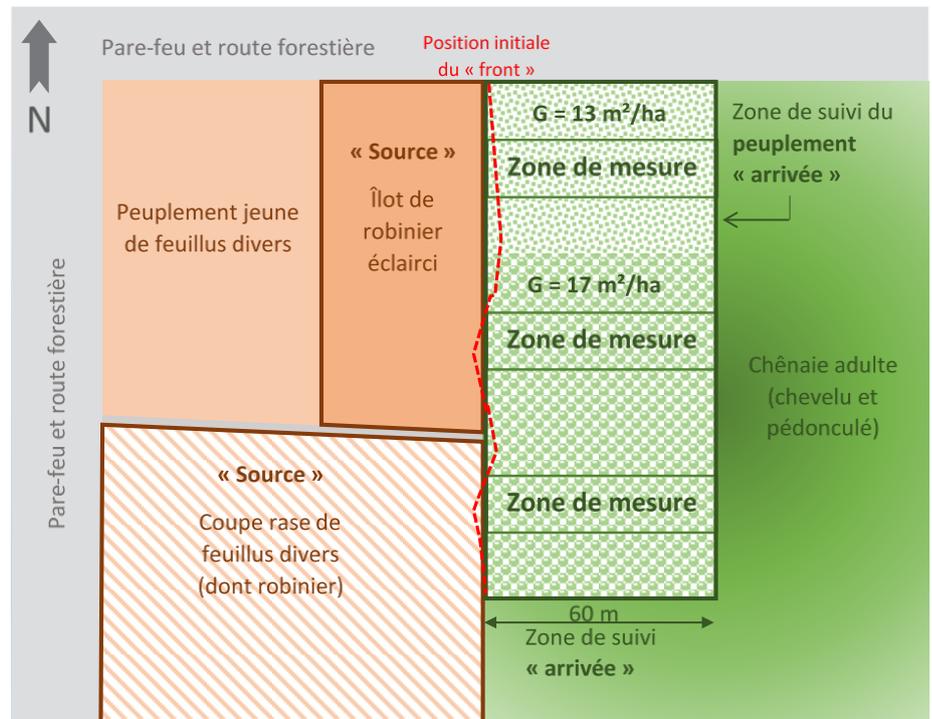


Figure 1. Schéma d'installation du dispositif d'évaluation de l'envahissement en forêt de Fontevraud, parcelle 39 (partie)

Au sein de la zone de suivi, les zones de mesure sont séparées par des espaces tampon. Au sud, l'état de la chênaie n'a pas permis de tester la modalité $G = 13 \text{ m}^2$

Références

- Poitou C., 2008. Vignerons de l'Orléanais et du Gâtinais, du XVIIIe siècle à nos jours. Auto-édition, Orléans. 334p.
- Merzeau D., Coquillas V., Bazas S., 2008. Croissance du robinier en Aquitaine : les classes de fertilité Forêt Entreprise n°182, pp.49-52
- Benistand-Hector L. Saintonge F.-X., 2019. Bilan et analyse de l'enquête sur les retours de plantations de robiniers menée par le DSF en 2018. DSF, 4p.

FAUT-IL DES RELEVÉS DE FLORE EXHAUSTIFS POUR CARACTÉRISER ET CARTOGRAPHIER L'ACIDITÉ ET LES PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES DES SOLS ?

RÉSUMÉ

Les caractéristiques nutritionnelles des sols peuvent être évaluées par des approches de bioindication souvent basées sur des inventaires floristiques complets des espèces présentes dans une placette. La durée de ces inventaires floristiques a limité l'utilisation, au-delà des catalogues de station, de la bioindication dans la gestion des forêts et d'autres milieux naturels. Dans le cadre de l'estimation et de la cartographie des propriétés des sols, nous avons cherché à déterminer s'il était possible de réduire le temps d'acquisition des données flore sur le terrain en vue d'estimer l'acidité, la disponibilité en éléments minéraux et en azote du sol par bioindication. Un dispositif de 470 relevés chronométrés, répartis à échelle nationale et dans trois forêts du nord-est de la France, a permis de mettre en évidence que 80 % de la précision maximale de prédiction est obtenue après 4-5 minutes d'inventaire floristique (6-12 espèces inventoriées) pour les trois variables étudiées.

La bioindication des potentialités forestières par la flore

Un bioindicateur est un substitut biologique à la mesure directe, qui renseigne sur l'état ou le fonctionnement d'un paramètre de l'écosystème. Parmi tous les êtres vivants susceptibles de cet office, les plantes occupent une place importante. Leur présence/absence est l'un des paramètres les plus utilisés comme bioindicateur. Cette approche présente plusieurs avantages par rapport aux mesures directes, qui exigent en général une logistique assez lourde : (i) le faible coût des observations floristiques (présence d'espèces) ; (ii) la capacité de prédire des facteurs écologiques variés (sol, climat) à partir d'un même relevé ; (iii) le fait que la communauté végétale représente l'expression intégrée de caractéristiques abiotiques extrêmement variables dans le temps et l'espace (comme la disponibilité en azote) et permet d'en connaître l'effet moyen et l'évolution globale, à l'échelle d'un site (Ponette *et al.* 2014).

La gestion forestière a largement fait appel, pour l'analyse des contraintes environnementales, à la bioindication de l'humidité et de la fertilité chimique des sols par les espèces végétales présentes (Duchauffour, 1948). Dans le contexte français, la démarche a été mise en œuvre via les catalogues de stations, outils classiques de gestion pour la caractérisation des potentialités forestières et le choix des essences. Pour une région naturelle donnée, le catalogue établit une typologie des milieux rencontrés (stations forestières) qu'il décrit de façon qualitative (topographie, type de sol, flore particulière...), et fournit des clés synthétiques d'identification de terrain. Il est assorti d'un guide de choix des essences qui donne à

Paulina Pinto ^(a)
 Jean-Luc Dupouey ^(b)
 Jean-Claude Gégout ^(a)
 Jean-Christophe Hervé (†) ^(c)
 Myriam Legay ^(d)
 Pierre Montpied ^(b)
 Christian Piedallu ^(a)
 Noémie Pousse ^(d)
 Stephanie Wurpillot ^(e)

^(a) AgroParisTech Nancy, UMR Silva

^(b) INRA Champenoux, UMR Silva

^(c) IGN, Laboratoire d'inventaire forestier

^(d) ONF, Département RDI

^(e) IGN, Service de l'Inventaire forestier et environnemental

dire d'expert une liste d'essences conseillées, possibles ou à proscrire pour chaque type de station mais ne fait pas directement le lien entre station et production (à quelques exceptions près ; e.g. Becker & Le Goff, 1988). Pour préciser la production attendue de l'essence choisie, les forestiers s'appuient par ailleurs sur des modèles liant indices de productivité d'une essence et conditions de milieu. Dans un contexte d'évolution rapide du climat et des caractéristiques de sol, ce système implicitement conçu « à environnement constant », stable dans le temps, présente plusieurs limites : (i) les caractéristiques stationnelles, de type qualitatif, ne sont pas reliées explicitement à des variables directement responsables de la distribution et de la croissance des plantes et/ou se modifiant dans le cadre des changements environnementaux à long terme comme l'acidité, la disponibilité en azote ou la température ; (ii) procédant par partition en petites régions climatiquement homogènes, les typologies ne permettent pas d'explicitement les effets du climat sur la station, de projeter les effets de son évolution, ou de spatialiser à large échelle les zones favorables aux essences.

Valeurs indicatrices (VI) : nouvelles approches sur des bases objectives et quantifiées

Aujourd'hui, les gestionnaires confrontés au choix des essences et aux estimations de potentialités forestières à différents niveaux ont besoin que la caractérisation de la station à fine échelle spatiale puisse être reliée à des échelles régionales et nationale (Legay *et al.* 2007). Ils ont aussi besoin d'une approche analytique qui permette de différencier les variables agissant sur la croissance et la survie des essences et qui intègre les éléments clés des changements environnementaux (climat, niveau d'azote, d'acidité). Et il leur faut en outre une méthode de caractérisation rapide et à faible coût.

Parmi les systèmes de bioindication, les plus utilisés jusqu'ici dans le contexte de la gestion forestière sont les valeurs indicatrices (VI) d'Ellenberg (Ellenberg *et al.*, 1992) ou, en France, les écogrammes de Rameau (Rameau *et al.*, 1989) et l'outil Ecoflore (Bartoli *et al.* 2000), basés sur l'optimum écologique des plantes. Plus récemment, le développement de grandes bases de données a ouvert la possibilité d'établir de nouvelles approches de bioindication sur des bases objectives et quantifiées. Ainsi, en France des VI ont été calculées à partir de la base de données phytoécologiques EcoPlant (Gégout *et al.*, 2005, 2006). Ces VI ont été utilisées entre autre pour produire des cartes nationales, à résolution kilométrique, de l'acidité

(Gégout, 2008) et de la disponibilité en azote des sols ainsi que pour établir des modèles de la distribution spatiale des essences aux échelles régionale et nationale (Pinto & Gégout, 2005 ; Coudun *et al.*, 2006 ; Piedallu *et al.*, 2016). Ces approches ont également été validées par des modèles de croissance des essences (Seynave *et al.*, 2004) permettant de prédire la productivité des peuplements. En permettant de relier les conditions environnementales d'un site aux potentialités des essences estimées par les modèles de distribution et de productivité, ces approches ouvrent la possibilité de mettre au point des méthodes d'aide au choix des essences plus adaptées au climat futur.

Comment optimiser la réalisation des relevés floristiques ?

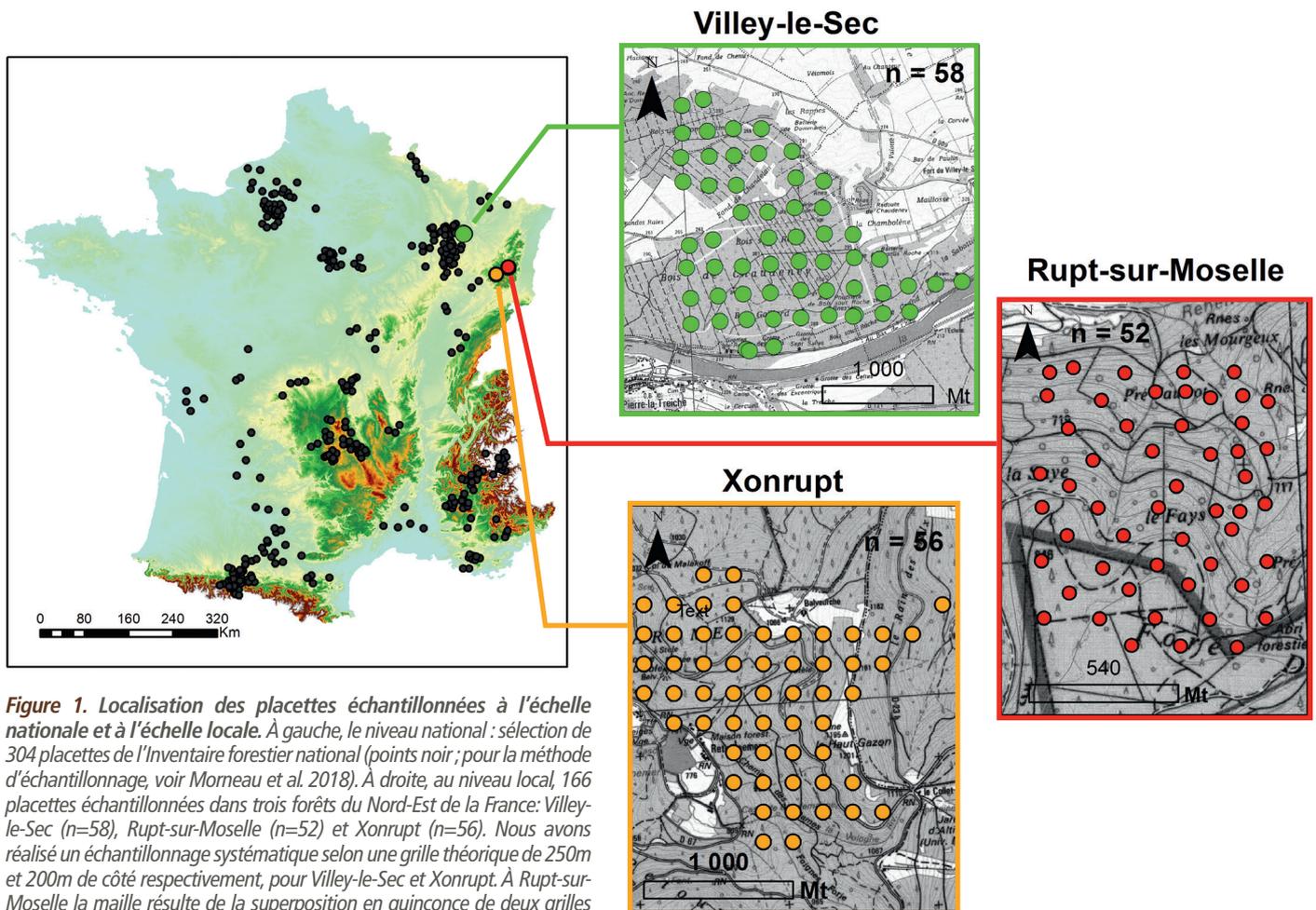
Cependant, la bioindication basée sur les plantes repose *a priori* sur un inventaire floristique complet des espèces présentes sur chaque point de relevé. Cela nécessite un effort important en temps d'acquisition (30 à 60 min/relevé en général), et implique un niveau d'expertise en botanique qui n'est pas toujours à la portée des gestionnaires de terrain, ce qui a limité son utilisation dans l'aménagement des forêts et d'autres écosystèmes naturels. C'est pourquoi nous avons cherché à optimiser la réalisation des relevés floristiques destinés à bioindiquer les qualités nutritionnelles des sites (acidité, richesse minérale et azotée), pour rendre la méthode plus simple et donc plus utilisable en routine

pour l'aménagement et la gestion forestière. Nous avons étudié en particulier l'impact de la réduction du temps d'inventaire sur la qualité de la bioindication. D'autre part, nous avons cherché à déterminer si l'échelle spatiale à laquelle les prédictions sont réalisées a un effet sur la qualité des résultats. L'idée est que des conditions locales particulières liées à la gestion, l'histoire, la dynamique des populations en interaction avec les conditions du milieu pourraient modifier le cortège floristique et conduire à des biais ou à une précision moindre dans les estimations à échelle locale. Pour aborder cette thématique, nous avons comparé la relation entre temps d'observation et qualité de bioindication aux échelles nationale et locale. Cette analyse a permis de tester l'applicabilité des résultats obtenus à des échelles spatiales, pratiques de gestion et à des types de peuplements variés.

Méthode d'étude

Les données nécessaires, échantillonnage et acquisition

À l'échelle nationale, 304 placettes de 700 m² ont été réparties sur l'ensemble du territoire français à partir d'une sélection de placettes de l'Inventaire Forestier National, distribuées dans cinq grandes régions, et inventoriées par des opérateurs de l'IFN, de mai à septembre 2013.



À l'échelle locale, 166 placettes de 400 m² ont été installées selon un échantillonnage systématique (grille de 200 à 250 m de côté), dans trois forêts du nord-est de la France (figure 1) : forêt de Villey-le-Sec (58 placettes) sur les côtes de Lorraine, forêts de Rupt-sur-Moselle (52 placettes) et Xonrupt (56 placettes) aux étages montagnard et subalpin du massif des Vosges. La première est une forêt collinéenne de feuillus à dominance de Hêtre, Chêne sessile et Charme, ancien taillis sous futaie et aujourd'hui en conversion vers la futaie régulière. Les deux autres sont des forêts mélangées feuillus-résineux à dominance de Sapin, Hêtre, Epicéa et Erable sycomore, gérées en futaie régulière. Elles couvrent des substrats géologiques très variés qui conduisent à de larges gammes d'acidité des sols, équivalentes, à l'échelle des trois massifs, à celles rencontrées à échelle nationale (tableau 1).

Chaque placette a fait l'objet d'un prélèvement de sol pour analyse en laboratoire et d'un inventaire floristique chronométré le plus complet possible (par 1 seul opérateur). L'opérateur a noté le rang et l'heure précise de recensement de chaque nouvelle espèce rencontrée (plantes vasculaires de sous-bois et bryophytes terricoles) ; à la fin du recensement, il a évalué visuellement l'abondance-dominance de chaque espèce présente selon la méthode de Braun Blanquet (1932). Pour le sol, il a systématiquement prélevé 5 carottes de 5 cm de profondeur de façon à constituer un échantillon composite de l'horizon organo minéral. C'est le laboratoire INRA d'Arras qui a fait les analyses et fourni les mesures de P_{H₂O}, rapport C/N (carbone sur azote) et taux de saturation S/T (somme des teneurs en cations liés à la nutrition sur capacité d'échange totale). Ces trois variables caractérisent respectivement le niveau d'acidité, de nutrition azotée et de nutrition minérale de chaque placette.

Bioindication des variables du sol et évaluation des prédictions

Pour chaque placette, le pH et les rapports C/N et S/T ont été prédits à partir des **VI EcoPlant** (voir figure 2a). La méthode consiste normalement à calculer, pour chacune des variables considérées, la moyenne arithmétique

des VI de toutes les espèces présentes dans la placette (voir figure 2b). L'objectif étant d'étudier l'efficacité de la bioindication à partir d'un relevé partiel, les valeurs sur chaque placette ont ici été calculées, d'une part, avec un nombre croissant d'espèces du relevé (en partant de la première espèce inventoriée) et, d'autre part, pour un effort d'échantillonnage croissant en temps d'acquisition. Les valeurs ainsi prédites ont été comparées avec les valeurs mesurées, et la performance des prédictions à l'échelle locale ou nationale a été évaluée par : (i) la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (REQM) et (ii) le carré de la corrélation linéaire (R²) entre les valeurs mesurées et prédites de la variable. La REQM caractérise la « précision » de la bioindication : plus elle est faible, plus l'estimation est précise. Le R², qu'on cherche à maximiser, indique la force de la relation entre mesures et estimations ; il présente aussi l'avantage de permettre la comparaison de la qualité de la bioindication entre différentes variables.

Résultats à l'échelle nationale et discussion

Effet du nombre d'espèces et du temps de relevé sur la qualité de la bioindication

Le nombre d'espèces nouvelles recensées décroît régulièrement avec le temps d'observation, ce qui n'est pas surprenant. Au bout de 10 minutes d'inventaire, on arrive en moyenne à 20 espèces par placette (figure 3a). Le rythme d'acquisition de nouvelles espèces décroît rapidement dans les relevés les plus pauvres en espèces, et reste au contraire très élevé dans les relevés les plus riches, ce qui suggère que ces relevés sont peut-être incomplets. Nous avons observé la même évolution pour les trois forêts du Nord-Est et pour l'ensemble à l'échelle de la France. Ce résultat est en accord avec les travaux d'Archaux *et al.* (2006), qui ont montré dans deux forêts du Centre de la France que le recensement des nouvelles espèces est rapide en début d'inventaire et ralentit considérablement après 10 minutes.

Jeux de données	Nbre de placettes	Minimum	Premier quartile	Mediane	Troisième quartile	Maximum
France	304					
pH		3,7	4,8	5,9	7,3	8,5
S/T (%)		9,0	62,9	98,7	99,8	100,0
C/N		11,1	14,6	16,2	18,3	43,4
Altitude (m.s.n.m)		16	193	372	822	2231
Température moyenne annuelle (°C)		4,6	9,5	10,5	11,3	15,2
Precipitation annuelle (mm)		472	774	922	1046	2189
Villey-le-Sec	58					
pH		4,4	5,4	6,1	6,8	8,0
S/T (%)		40,0	96,1	99,0	99,4	99,9
C/N		10,4	15,0	16,0	17,3	18,9
Altitude (m.s.n.m)		219	273	283	293	309
Rupt-sur-Moselle	52					
pH		3,6	4,1	4,4	5,1	6,1
S/T (%)		9,6	22,2	38,5	84,1	99,7
C/N		11,9	14,8	16,7	19,1	23,5
Altitude (m.s.n.m)		569	686	785	838	880
Xonrupt	56					
pH		3,5	3,9	4,0	4,2	4,7
S/T (%)		8,9	15,3	22,2	35,3	76,7
C/N		13,2	15,5	17,1	18,0	22,2
Altitude (m.s.n.m)		789	896	1018	1100	1185

Tableau 1. Synthèse des principales caractéristiques édaphiques et climatiques pour les trois forêts étudiées et le jeu de données national. Données climatiques obtenues à partir des normales climatiques spatialisées Aurelhy 1981-2010 (Météo-France). Le taux de saturation du sol (S/T) a été calculé à partir du rapport entre cations échangeables selon la formule : $(Ca+Mg+K)/(Ca+Mg+K+Al+H)$, la concentration en cations échangeables étant déterminée au pH du sol. Plus les valeurs sont élevées et plus le sol est pourvu en éléments minéraux et moins en éléments acides, ce qui conduit à des sols fertiles pour des S/T et des pH élevés (S/T > 50% et pH > 5.0) ; à l'opposé un rapport S/T faible est indicateur de sol peu pourvu en éléments minéraux et à forte acidité et toxicité aluminique (S/T < 30% ; pH < 4.0). Le rapport C/N est un indicateur de disponibilité en azote du sol. Celle-ci est bonne pour des C/N < 15, moyenne pour des C/N compris entre 15 et 25 et mauvaise pour des C/N > 25.

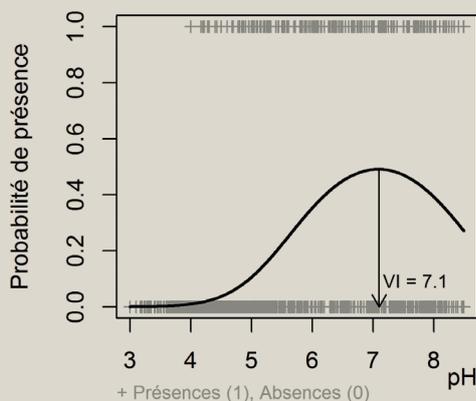
METHODE DE CALCUL DES VI

ESTIMATION D'UNE VARIABLE SUR UN SITE AVEC LES VI



Plus de 3000 relevés avec inventaire floristique complet et analyses chimiques ont été utilisés pour calculer les VI des espèces les plus fréquentes en France (3835, 2670, 3547 relevés répartis sur tout le territoire français ont été utilisés respectivement pour déterminer les VI pH, S/T et C/N).

Modélisation de la courbe de réponse d'une espèce (ici l'Erable champêtre) à partir du pH et des présences/absences de cette espèce sur 3835 placettes

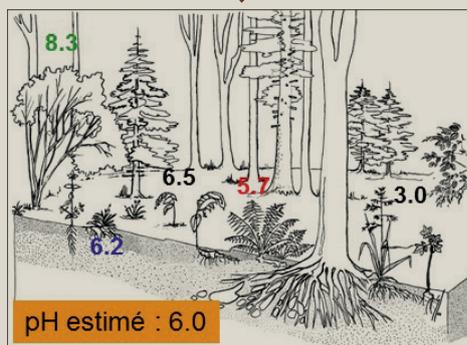


La valeur indicatrice correspond à l'optimum de l'espèce : la valeur du gradient pour laquelle sa probabilité de présence est maximale.
→ VI pH de l'Erable= 7.1

Généralisation de la méthode à 510 espèces communes de la flore forestière française et à d'autres variables du sol

Espèce	pH	S/T	C/N
Abies alba	3.0	0	21.3
Acer campestre	7.1	100	10.0
Acer monspessulanum	8.5	100	7.0
Acer opalus	8.5	100	10.0
Acer platanoides	7.7	95	10.0
Acer pseudoplatanus	8.4	100	10.0
Achillea millefolium	7.1	100	10.0
Aconitum lycoctonum	7.1	100	10.0
Actaea spicata	6.9	100	10.0
...			

Prédiction de la variable dans un site à partir de sa flore



L'estimation d'une variable dans un site correspond à la moyenne arithmétique des VI pour cette variable des espèces présentes dans la placette.

Figure 2. Schéma simplifié du principe de la bioindication avec les Valeurs indicatrices (VI) d'EcoPlant

(a) Méthode de calcul des VI à partir de la base de données EcoPlant et (b) estimation de l'acidité d'un site à partir des valeurs indicatrices.

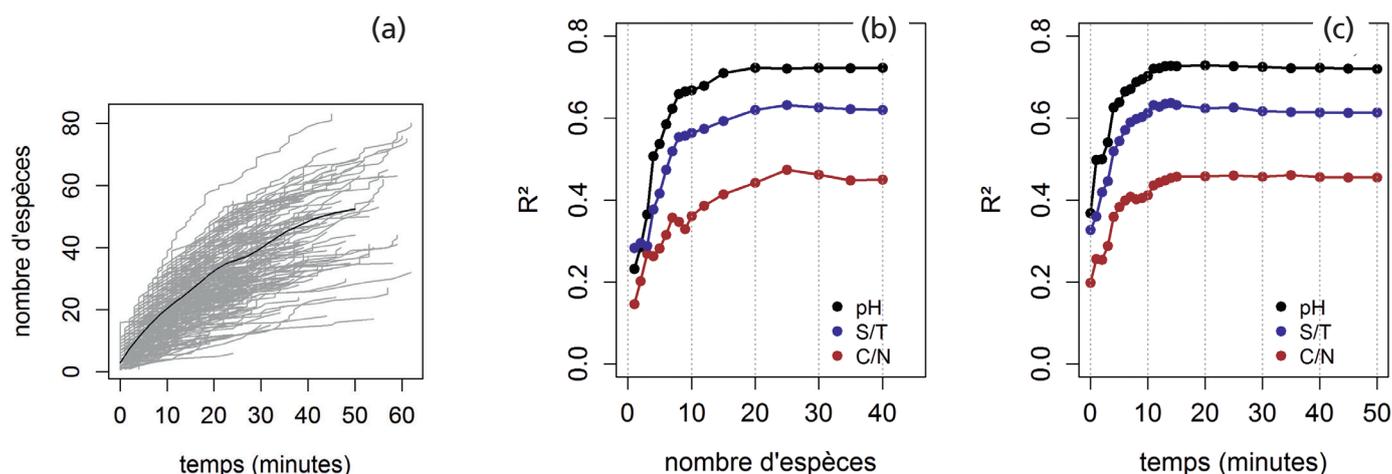


Figure 3. Vitesse d'acquisition de la flore lors des relevés (a) et qualité de la bioindication selon le nombre d'espèces utilisées par placette (b) ou le temps d'inventaire (c), à l'échelle nationale - (a) Chaque ligne grise représente l'évolution du nombre d'espèces relevées en fonction du temps pour un des 304 relevés étudiés. La courbe noire représente le nombre moyen d'espèces relevées en fonction du temps d'inventaire. (b, c) La qualité de la bioindication est donnée par le coefficient de détermination (R^2) de la régression linéaire entre les valeurs de pH, C/N et S/T mesurées et bioindiquées.

La qualité de la bioindication mesurée par le R^2 augmente fortement avec les 10-15 premières espèces et se stabilise au-delà de 20 espèces (figure 3b). Ce qui revient à dire qu'on atteint, au bout de 10 mn d'inventaire, une qualité de bioindication proche de celle observée avec toutes les espèces du relevé pour la prédiction de l'acidité et celle de la nutrition azotée et minérale (figure 3c). La meilleure corrélation est obtenue pour le pH (R^2 maximum = 0.72 ; REQM minimum = 0.75) et le taux de saturation S/T (R^2 = 0.63 ; REQM = 17.0), et elle est atteinte avec un nombre d'espèces (20) inférieur à celui qu'on observe pour le rapport C/N (25 espèces, R^2 = 0.47 et REQM = 4.0). La moindre qualité de prédiction du C/N provient probablement de la mesure de disponibilité en azote du sol pour les plantes, et de la difficulté d'interprétation de cet indicateur, qu'il soit mesuré ou bioindiqué. Cette difficulté s'illustre par exemple dans les travaux d'Andrianarisoa *et al.* (2009) dans 50 hêtraies du nord-est de la France : les auteurs ont mis en évidence que la corrélation du taux de nitrification mesuré dans le sol était plus forte avec le C/N estimé par les VI d'EcoPlant qu'avec le C/N mesuré dans le sol.

Le nombre d'espèces et le temps d'inventaire qu'il faut atteindre pour maximiser simultanément la qualité de la prédiction (R^2) des trois variables sont respectivement de 25 espèces et 14 minutes (contre 28 minutes en moyenne pour un inventaire complet) (figure 3bc). Cependant, après 4-5 minutes d'inventaire (6-12 espèces inventoriées), la précision des prédictions atteint 80% de la précision maximale, et cela pour les trois variables étudiées.

Effet de l'ordre des espèces sur la qualité de la bioindication

Nous avons cherché à déterminer si l'effet du temps d'inventaire sur la qualité de la bioindication était uniquement lié au nombre d'espèces enregistrées ou si l'ordre d'apparition des espèces dans l'inventaire pouvait jouer un rôle, les espèces les plus indicatrices étant peut-être relevées en premier. Pour ce faire, nous avons analysé les performances

de la bioindication obtenues pour un nombre fixe d'espèces, choisies selon trois ordres différents dans chaque relevé : ordre aléatoire, ordre observé lors de l'inventaire et ordre inverse de l'inventaire. La figure 4a montre que les premières espèces vues (cf. ordre observé) ne contribuent pas plus que les autres (c'est-à-dire les espèces en ordre aléatoire) à la qualité de la bioindication. Par contre, les dernières espèces vues apportent une contribution négative à la qualité de la bioindication. Pour expliquer cela, nous avons exploré la relation entre l'abondance moyenne (recouvrement moyen) et l'ordre des espèces dans l'inventaire : la figure 4b montre une relation négative significative. Les dernières espèces inventoriées ont un recouvrement faible, presque toujours inférieur à 5% de la surface de la placette. Ces travaux mettent en évidence que les espèces les moins abondantes, recensées en dernier, sont les moins informatives ou pertinentes pour la bioindication. Il est donc possible d'optimiser le temps de réalisation des relevés floristiques en vue de déterminer les caractéristiques nutritionnelles des sites forestiers.

Résultats de la bioindication optimisée à l'échelle du massif forestier

Nous avons testé l'applicabilité de nos résultats : (1) dans différents contextes d'acidité des sols et (2) en passant de l'échelle nationale à l'échelle du massif.

Dans un premier temps, à partir du jeu de données national ($n = 304$), nous avons comparé l'évolution de la qualité de la bioindication du pH en fonction du temps d'inventaire pour l'ensemble du jeu de données et pour quatre niveaux d'acidité différents, représentatifs de substrats géologiques différents : substrats siliceux ($pH < 4.5$) à calcaires ($pH > 7$). La figure 5 montre d'une part qu'une très bonne précision d'estimation (REQM bas, proche de son minimum) est obtenue dans tous les cas, après 10 minutes d'inventaire (pour les sites acides et très acides) ou 15 minutes (pour les sites neutres et calcaires), et d'autre part que le niveau de précision atteint est meilleur en sites neutres et calcaires qu'en

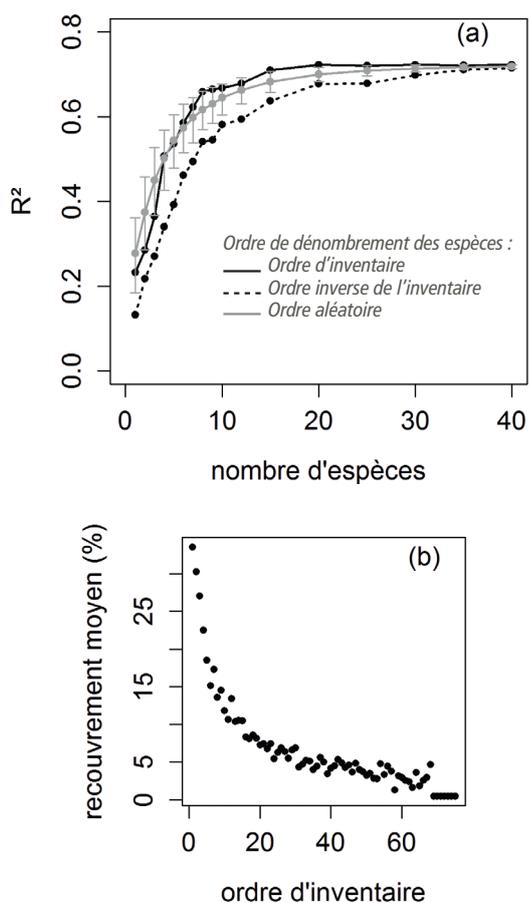


Figure 4. Effet de l'ordre d'inventaire des espèces sur la qualité de la bioindication du pH - (a) Qualité de la prédiction (R^2) en fonction du nombre d'espèces par placette utilisées pour la prédiction, les espèces étant sélectionnées (i) dans l'ordre d'inventaire sur le terrain ou (ii) dans l'inverse de l'ordre d'inventaire ($n = 304$ placettes), ou (iii) dans un ordre aléatoire (moyenne de 1000 choix aléatoires avec les intervalles de confiance à 95%). - (b) Abondance moyenne des espèces (% recouvrement) en fonction de leur ordre d'inventaire dans la placette ($n=304$).

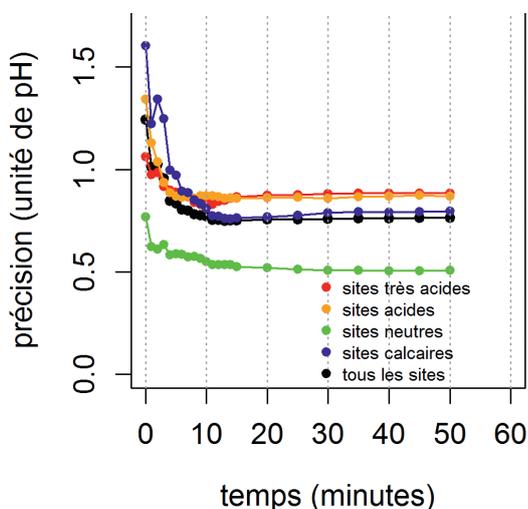


Figure 5. Précision de la prédiction du pH par bioindication (REQM, en points de pH) à l'échelle nationale pour quatre niveaux d'acidité du sol - Sites très acides \leftrightarrow $pH \leq 4.5$ ($n=48$); sites acides \leftrightarrow $4.5 < pH \leq 5.5$ ($n=86$); sites neutres \leftrightarrow $5.5 < pH \leq 7.0$ ($n=88$); sites calcaires \leftrightarrow $pH > 7.0$ ($n=82$).

sites acides et très acides. En pratique, dans n'importe quel contexte géologique une estimation de l'acidité (avec une précision inférieure à 1 point de pH) est possible à partir d'un relevé floristique de 5 minutes (10-12 espèces inventoriées) ce qui permet la description quantitative des gradients d'acidité à l'échelle de la forêt.

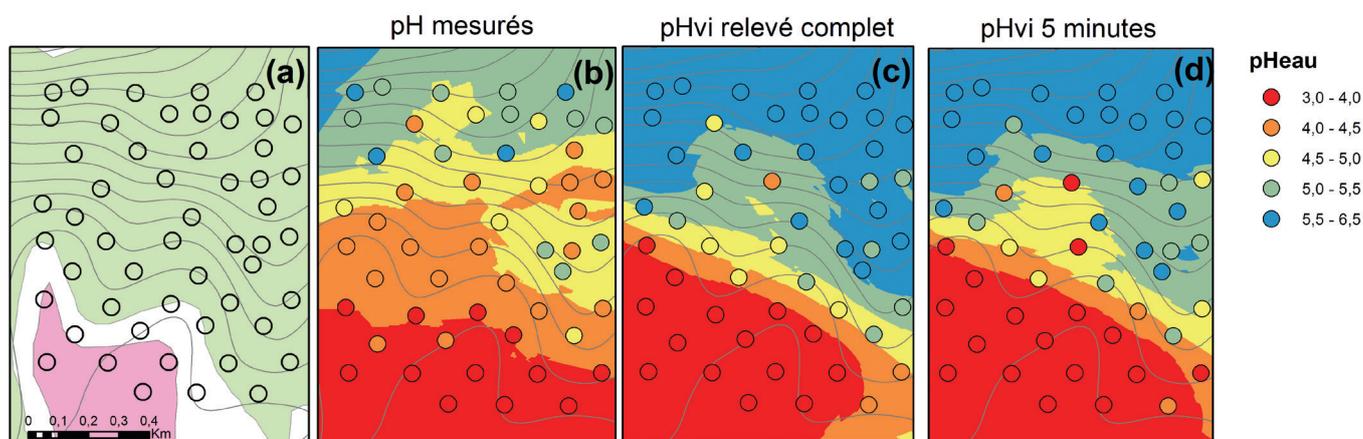
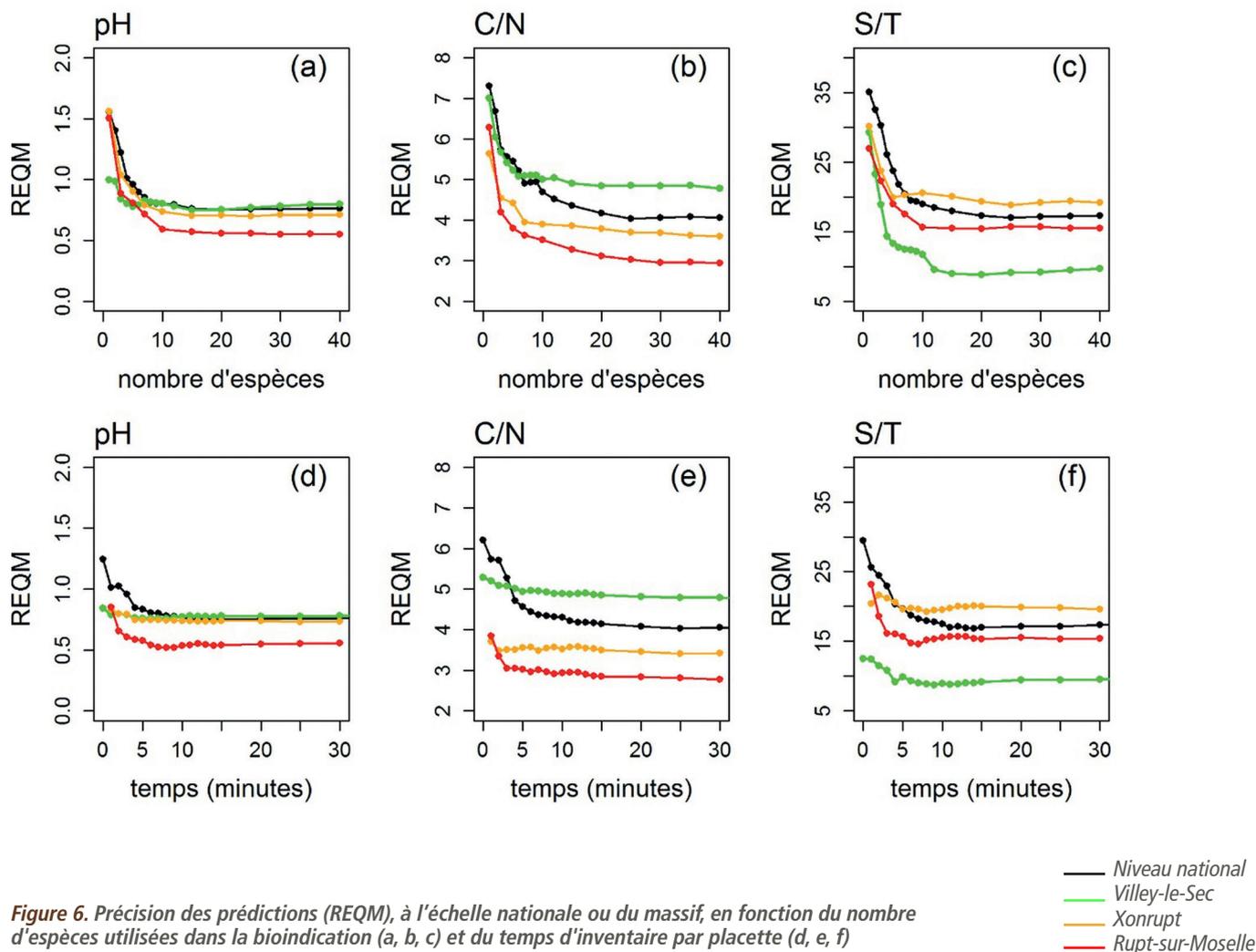
Dans un deuxième temps, afin d'analyser l'effet de l'échelle spatiale, nous avons comparé les performances nationales des prédictions du pH, C/N et S/T avec celles qu'on obtient sur les données collectées à échelle locale, dans les trois forêts étudiées (figure 6). La précision des prédictions (REQM), calculée à partir des valeurs mesurées et bioindiquées à l'échelle des forêts, montre la même tendance à l'amélioration que la courbe nationale lorsque le nombre d'espèces utilisées pour la bioindication augmente (figure 6). Mais le niveau général des courbes varie selon les massifs, avec une tendance à une meilleure bioindication du pH à l'échelle locale qu'à l'échelle nationale. En pratique, nos résultats nationaux sur le temps de relevé floristique nécessaire pour atteindre une qualité de bioindication optimale restent stables et peuvent être appliqués à l'échelle locale.

Nous avons également cherché à tester la pertinence locale de la méthode optimisée de bioindication en cartographiant le pH du sol à l'échelle de la forêt de Rupt-sur-Moselle (figure 7). À partir de relevés de végétation et des analyses de sol, nous avons produit la carte des pH mesurés, et celles des valeurs bioindiquées d'après les relevés complets ou tronqués à 5 minutes (figure 7bcd). La bioindication basée sur l'inventaire floristique complet (figure 7c) ou tronqué à 5 minutes (figure 7d) permet bien de reproduire le gradient d'acidité mesuré (figure 7b ; $3.0 < pH < 6.5$), en sous-évaluant cependant la quantité de placettes à pH intermédiaire. Elle permet aussi de reproduire la cohérence spatiale de ce gradient : les situations les plus acides sont prédites sur les grès Vosgiens, connus pour leur acidité, et les sites neutres sont prédits en versant et bas de versant, sur des granites riches (figure 7a). Nous observons une forte cohérence spatiale entre la bioindication basée sur les inventaires floristiques tronqués à 5 minutes et les inventaires complets qui ont nécessité en moyenne 27 minutes.

La méthode s'avère robuste et pertinente à l'échelle de la forêt

Dans ce travail, grâce à un ensemble de données combinant les échelles nationale et locale, nous avons pu constater que la performance de la bioindication à l'échelle locale de la forêt est comparable à celle obtenue à l'échelle nationale. Il ne semble donc pas y avoir d'homogénéisation de la flore à l'échelle locale, qui serait liée à un pool d'espèces restreint ou à des phénomènes de dispersion d'espèces entre stations proches. Les résultats montrent également que la différence de taille des placettes entre les deux jeux de données, national (700 m^2) et local (400 m^2), n'a pas modifié la qualité des prédictions. Nos résultats sont donc indépendants de la taille de relevé, entre 400 et 700 m^2 . Ceci est en accord avec ce qu'a montré Otypková (2009) pour l'estimation de paramètres édaphiques avec les valeurs indicatrices d'Ellenberg. L'auteur met en évidence l'absence de différence entre les valeurs prédites dans des placettes emboîtées de différentes tailles, incluant les dimensions de nos placettes d'étude.

La bioindication optimisée avec les VI d'EcoPlant s'avère donc une méthode robuste, qui repose sur un nombre minimum d'espèces nécessaires (plutôt que sur la taille de la placette) pour atteindre une estimation



suffisamment précise des paramètres conditionnant la nutrition des plantes. Notre étude montre que la bioindication basée sur une approche quantitative peut être utilisée de façon pertinente à l'échelle de la forêt à des fins de gestion forestière.

Utilisation de la méthode sur le terrain

La méthode optimisée de bioindication a été utilisée dans plusieurs contextes en partenariat avec des gestionnaires dans le cadre du projet FORMANCLIM soutenu par le Labex ARBRE (Pinto *et al.*, 2016). Ce protocole, que nous récapitulons ici pour fournir une première base pratique de mise en application, repose sur un relevé floristique de 5 minutes.

Le relevé floristique est réalisé sur un rayon de 11 m (400 m²) ou 15 m (700 m²) en cas de nombre limité d'espèces sur la placette (voir ci-après). Il est effectué après avoir positionné le centre de la placette et visualisé ses limites. L'opérateur commence du centre vers l'extérieur et parcourt de façon systématique la placette.

Le relevé chronométré concerne l'ensemble des végétaux toutes strates confondues. Le relevé est réalisé sans interruption pendant 5 minutes durant lesquelles l'opérateur y consacre tout son temps. Les espèces ligneuses, herbacées ou muscinales sont notées en présence/absence dans l'ordre où elles sont rencontrées. Il ne faut pas commencer systématiquement par une catégorie d'espèces, par exemple mousses, ligneux ou herbacées. Si le nombre d'espèces est faible (<10 espèces au bout de 3 mn), le relevé est élargi à un rayon de 15 m. Le relevé est fait directement sur fiche papier ou ordinateur terrain. La bioindication étant réalisée en présence/absence, aucune notation d'abondance n'est nécessaire. En cas d'espèces non déterminées immédiatement, la plante n'est pas notée ni intégrée à l'inventaire. Son identification peut se faire en fin de relevé pour augmenter le niveau de l'opérateur en botanique. La liste actuelle des VI n'inclut qu'une trentaine d'espèces de mousses (voir en annexe). Il n'est pas utile d'en relever d'autres pour la suite des calculs.

Les relevés réalisés sont ensuite couplés avec les valeurs indicatrices de la base de données EcoPlant pour estimer la valeur des paramètres du sol par la moyenne des VI des espèces présentes sur la placette (voir Fig. 2b). Dans un objectif d'utilisation pratique de ces valeurs indicatrices, les gestionnaires forestiers sont essentiellement concernés par l'évaluation des niveaux d'acidité (pH) et de disponibilité en azote (C/N) qui permettent une bonne évaluation de la fertilité nutritionnelle des sols. Les VI de ces deux variables pour les espèces fréquentes de la flore forestière française sont fournies en annexe et téléchargeables via le dataverse de l'UMR SILVA (<https://data.inra.fr/silva>).

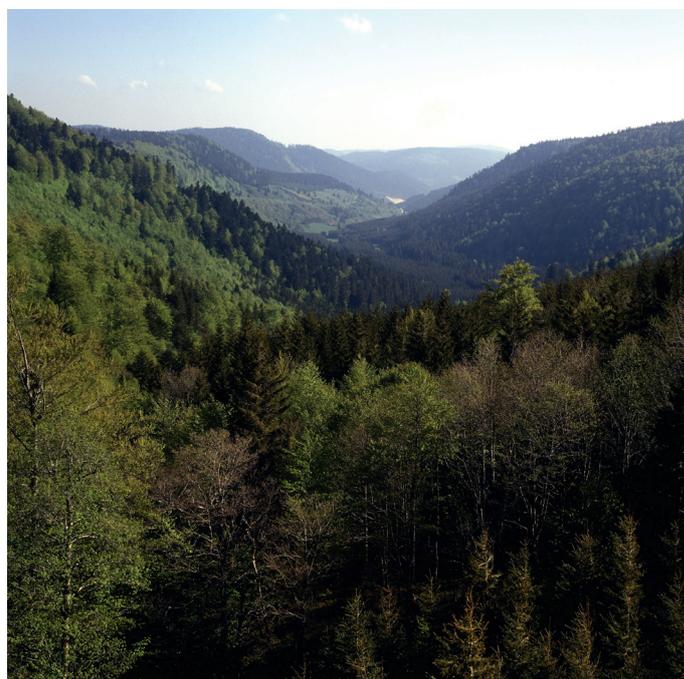
Ce protocole a été testé avec succès par des gestionnaires dans une forêt de la Région Ile de France (Marly-le-Roi) et trois forêts de la région grand Est en Argonne (Neuvilly, Aubreville et Cierges) (Dietz, 2017).

Conclusion

On n'a pas toujours besoin de faire des relevés de flore qui soient exhaustifs. Lorsque l'objectif est d'estimer les ressources nutritionnelles du sol par bioindication avec les plantes, et en particulier de les cartographier, il peut être judicieux de réduire le temps consacré aux relevés floristiques afin de diminuer les coûts associés. Naturellement, si l'objectif concerne la détermination d'espèces à enjeu patrimonial ou d'autres indicateurs de biodiversité ou de suivi des écosystèmes, l'exhaustivité reste nécessaire.

Dans le cadre de l'évaluation des conditions stationnelles, les résultats de notre étude, qui conduisent à une simplification du relevé floristique, devraient rendre les méthodes de bioindication plus facilement accessibles aux forestiers pour évaluer la fertilité des sites forestiers d'après les espèces végétales observées.

Dans un contexte environnemental changeant, l'utilisation à l'échelle locale des méthodes quantitatives de bioindication, qui relie la qualité du site aux modèles de distribution et de productivité des essences, pourrait être utile aux décideurs forestiers. Elle aidera au choix des essences à cultiver, en tenant compte des effets attendus du changement climatique sur les essences en place. Ces applications à différentes échelles (du niveau de la forêt au niveau national) renouvellent l'utilité des méthodes de bioindication pour la gestion des forêts.



Paysage forestier des Vosges

© Alain André / ONF

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet Interface ONF-INRA « Milieux, distribution, productivité et choix des essences en contexte environnemental changeant » soutenu par les départements EFPA de l'INRA et RDI de l'ONF. Ce projet a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence n° ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE). Les auteurs remercient vivement les équipes de l'IGN, l'INRA (Patrick Behr, Sébastien Daviller) et d'AgroParisTech (Fabien Spicher, Erwin Thirion, Gabriela Riofrio, Lucie Dietz) et de l'ONF (Agences Ile-de-France-Ouest et Verdun). Nous remercions Jean Ladier (RDI-ONF) pour ses commentaires et contributions qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

Bibliographie

- Andrianarisoa K.S., Zeller B., Dupouey J.L., Dambrine, E., 2009. Comparing indicators of N status of 50 beech stands (*Fagus sylvatica* L.) in northeastern France. *Forest Ecology and Management*, vol. 257, pp. 2241-2253
- Archaux F., Gosselin F., Berges L., Chevalier R., 2006. Effects of sampling time, species richness and observer on the exhaustiveness of plant censuses. *Journal of Vegetation Science*, vol. 17, pp. 299-306
- Bartoli M., Tran-Ha M., Largier G., Dumé G., Larrieu L., 2000. Ecoflore, un logiciel simple de diagnostic écologique. *Revue Forestière Française*, vol. 52-6, pp. 530-547
- Braun-Blanquet J., 1932. *Plant sociology, the study of plant communities*. McGraw Hill Books, New York.
- Becker M., Le Goff N., 1988. Diagnostic stationnel et potentiel de production. *Revue Forestière Française*, vol. 40 pp. 29-43
- Coudun C., Gégout J.C., Piedallu C., Rameau J.-C., 2006. Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography* vol. 33 pp.1750-1763
- Dietz L., 2017. Validation de nouveaux outils de caractérisation stationnelle et de choix des essences en contexte de changement climatique. Application à des forêts d'Argonne et d'Ile de France. Rapport de fin d'étude AgroSup Dijon. Spécialité Agronomie - Dominante Agronomie et Environnement. 45p + Annexes et Livret de cartes
- Duchaufour P., 1948. Recherches écologiques sur la chênaie atlantique française. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts*, vol. 11, pp. 7-332.
- Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W., Pauliflen D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta geobotanica XVIII*, 248 p.
- Gégout J.C., Coudun C., Bailly G., Jabiol B., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science*, vol. 16 pp. 257-260
- Gégout J.C., 2006. Distribution et caractère bio-indicateur des espèces végétales forestières françaises vis-à-vis du sol et du climat. Mémoire du diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, ENGREF.
- Gégout J.C., 2008. Validation de bioindicateurs floristiques pour la surveillance de l'état nutritionnel des sols forestiers français à partir des données de l'Inventaire Forestier National. Rapport final – Programme « Bioindicateurs de qualité des sols ». AgroParisTech-Inventaire Forestier National. 48 p.
- Legay M., Mortier F., Mengin-Lecreux P., Cordonnier T., 2007. La gestion face aux changements climatiques : tirons les premiers enseignements. *RDV techniques de l'ONF, hors-série n°3* pp. 95-102
- Matheron G., 1962. *Traité de géostatistique appliquée, tome I*. In E. Technip (ed.), *Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières, n° 14*. Paris.
- Morneau F., Wurpillot S., Duprez C., Bontemps J.-D., Hervé, J.-Ch., 2018. Le dispositif statistique de l'inventaire forestier national français – Echantillonnage spatial d'un objet complexe – 13es Journées de méthodologie statistique de l'INSEE. 12-14 juin 2018. Paris, France
- Otýpková Z., 2009. The influence of sample plot size on evaluations with Ellenberg indicator values. *Biologia* vol. 64 (6) pp.1123-1128
- Piedallu C., Gégout J.C., Lebourgeois F., Seynave I., 2016. Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science*, vol. 27 pp. 387-399
- Pinto P.E., Gégout J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. *Annals of Forest Science* vol. 62 (7), pp. 761-770
- Pinto P.E., Legay M., Pousse N., Ponette Q., Gégout J.C., Lacombe E., Piedallu Ch. *Projet FORMANCLIM. New tools for ecological site classification and tree species selection – Application to FORest MANAgement decision-making in the context of CLIMatic changes. 2016-2018.*
- <en ligne : http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/?page_id=9609&lang=fr>
- Ponette Q., Bispo A., Brêthes A., Dupouey J.L., Feix I., Gégout J.-C., Jabiol B., Pousse N., Ranger J., 2014. Fertility indicators in temperate forest soils: issues, approaches and prospects. *Revue Forestière Française* vol. 66 (5) pp. 501-515
- Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., 1989. *Flore Forestière Française – guide écologique illustré – Tome 1 : Plaines et collines*. Paris : Institut pour le développement forestier, 1974 p.
- Seynave I., Gégout J.C., Hervé J.C., Dhôte J.F., Drapier J., Bruno E., Dumé G., 2004. Etude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN. *Revue Forestière Française* vol. 66 (6), pp.537-550

Annexe : valeurs indicatrices (VI) EcoPlant

Espèce	pH_VI	C/N_VI	Espèce	pH_VI	C/N_VI
Abies alba	3.0	21	Betula pubescens	3.0	40
Acer campestre	7.1	10	Blechnum spicant	4.1	25
Acer monspessulanum	8.5		Brachypodium pinnatum	8.5	10
Acer opalus	8.5	10	Brachypodium retusum	8.5	
Acer platanoides	7.7	10	Brachypodium sylvaticum	6.9	10
Acer pseudoplatanus	8.4	10	Brachythecium rutabulum	6.4	10
Achillea millefolium	7.1	10	Briza media	8.0	11
Aconitum lycoctonum subsp. vulparia	7.1	10	Bromus benekenii	6.5	12
Actaea spicata	6.9	10	Bromus erectus	8.5	
Adenostyles alliariae	5.8	10	Bromus ramosus	7.1	11
Adenostyles alpina	6.8	18	Bryonia dioica	6.0	18
Adoxa moschatellina	6.6	10	Bupleurum falcatum	8.2	11
Aegopodium podagraria	7.5	10	Buxus sempervirens	7.3	10
Agrimonia eupatoria	6.8	13	Calamagrostis epigejos	4.7	22
Agrostis capillaris	5.1		Calamagrostis varia	7.4	
Agrostis capillaris subsp. castellana	4.9	19	Calamintha grandiflora	6.5	
Agrostis curtisii	4.6	25	Calluna vulgaris	3.3	33
Agrostis stolonifera	6.3		Caltha palustris	6.2	10
Ajuga reptans	6.1	10	Calypogeia fissa	4.8	
Alliaria petiolata	6.7	10	Campanula medium	7.6	
Allium ursinum	7.6	10	Campanula rhomboidalis	6.5	13
Alnus glutinosa	6.4	10	Campanula rotundifolia	8.5	
Alnus incana	8.5		Campanula trachelium	7.1	10
Amelanchier ovalis	8.5		Campylopus fragilis		28
Anemone nemorosa	6.2	10	Cardamine flexuosa	5.9	10
Angelica sylvestris	6.6	10	Cardamine heptaphylla	6.8	10
Anthericum liliago	8.5		Cardamine impatiens	6.5	13
Anthericum ramosum	6.8	10	Cardamine pentaphyllos	6.7	13
Anthoxanthum odoratum	5.3		Cardamine pratensis	6.2	10
Anthriscus sylvestris	6.5	10	Carex acutiformis	8.5	10
Anthyllis vulneraria	8.5		Carex alba	8.5	
Aphyllanthes monspeliensis	8.5		Carex arenaria	4.8	38
Aquilegia vulgaris	7.7	14	Carex brizoides	4.8	10
Arabis hirsuta	7.5	13	Carex digitata	6.7	
Arabis pauciflora	7.4		Carex echinata	5.6	17
Arbutus unedo		40	Carex elongata	5.5	10
Arctostaphylos uva-ursi	8.5		Carex ferruginea subsp. tenax	7.7	
Arenaria montana	4.7	26	Carex flacca	7.5	10
Arrhenatherum elatius	8.0		Carex halleriana	8.5	
Arum italicum	6.4	10	Carex humilis	8.1	
Arum maculatum	6.9	10	Carex montana	7.2	
Aruncus dioicus	6.7	13	Carex ornithopoda	8.0	40
Asarum europaeum	7.3	10	Carex pallescens	5.3	16
Asparagus acutifolius	8.5		Carex paniculata		14
Asphodelus albus	5.1	20	Carex pendula	6.3	10
Asplenium adiantum-nigrum	6.7		Carex pilosa	5.7	
Asplenium scolopendrium	7.4	10	Carex pilulifera	4.2	24
Asplenium trichomanes	7.9	10	Carex remota	5.8	10
Aster bellidiastrum	6.8		Carex riparia	8.3	10
Athyrium filix-femina	5.2	10	Carex sempervirens	7.5	
Atrichum undulatum	5.2	11	Carex strigosa	6.2	10
Bazzania trilobata	3.3	27	Carex sylvatica	6.4	10
Berberis vulgaris	8.5		Carex umbrosa	5.3	12
Betula pendula	3.0	32	Carex vesicaria	5.5	11

Espèce	pH_VI	C/N_VI	Espèce	pH_VI	C/N_VI
<i>Carpinus betulus</i>	6.0	10	<i>Epilobium angustifolium</i>	6.2	
<i>Castanea sativa</i>	4.4	26	<i>Epilobium hirsutum</i>	6.6	
<i>Cephalanthera damasonium</i>	8.0	10	<i>Epilobium montanum</i>	6.1	10
<i>Cephalanthera longifolia</i>	8.2		<i>Epipactis atrorubens</i>	7.4	
<i>Cephalanthera rubra</i>	7.1		<i>Epipactis helleborine</i>	7.1	10
<i>Chaerophyllum hirsutum</i>	6.3		<i>Epipactis purpurata</i>	6.3	
<i>Chiloscyphus cuspidatus</i>	3.0	40	<i>Equisetum hyemale</i>	8.5	10
<i>Chrysosplenium alternifolium</i>	6.6		<i>Equisetum telmateia</i>	7.3	12
<i>Chrysosplenium oppositifolium</i>	5.7		<i>Erica arborea</i>	6.1	26
<i>Circaea lutetiana</i>	6.4	10	<i>Erica ciliaris</i>	4.4	40
<i>Cirriphyllum piliferum</i>	6.9	10	<i>Erica cinerea</i>	4.4	40
<i>Cirsium arvense</i>	7.0	13	<i>Erica scoparia</i>	4.9	38
<i>Cirsium oleraceum</i>	7.3	10	<i>Erica tetralix</i>	4.6	33
<i>Cirsium palustre</i>	6.5	13	<i>Eupatorium cannabinum</i>	7.6	10
<i>Cirsium tuberosum</i>	8.5	14	<i>Euphorbia amygdaloides</i>	6.6	10
<i>Cistus albidus</i>	8.5		<i>Euphorbia characias</i>	8.5	
<i>Cistus laurifolius</i>	6.6	15	<i>Euphorbia cyparissias</i>	8.3	
<i>Cistus monspeliensis</i>	6.2		<i>Euphorbia dulcis</i>	6.5	15
<i>Cistus salviifolius</i>		40	<i>Euphorbia hyberna</i>	5.4	
<i>Clematis flammula</i>	8.5		<i>Eurhynchium hians</i>	8.5	10
<i>Clematis vitalba</i>	8.5	10	<i>Eurhynchium praelongum</i>	5.6	
<i>Clinopodium vulgare</i>	7.7	12	<i>Eurhynchium striatum</i>	6.2	10
<i>Colchicum autumnale</i>	8.5	10	<i>Evonymus europaeus</i>	7.4	10
<i>Conopodium majus</i>	5.6		<i>Evonymus latifolius</i>	6.8	
<i>Convallaria majalis</i>	6.6	10	<i>Fagus sylvatica</i>		19
<i>Cornus mas</i>	7.9		<i>Festuca altissima</i>	3.0	18
<i>Cornus sanguinea</i>	7.6	10	<i>Festuca filiformis</i>		37
<i>Coronilla minima</i>	8.5		<i>Festuca gigantea</i>	7.0	10
<i>Corydalis cava</i>	6.9	12	<i>Festuca heterophylla</i>	6.1	18
<i>Corylus avellana</i>	6.8	10	<i>Festuca rubra</i>	7.3	13
<i>Cotoneaster integerrimus</i>	7.3		<i>Filipendula ulmaria</i>	6.6	10
<i>Crataegus laevigata</i>	6.4	10	<i>Fissidens taxifolius</i>	6.2	10
<i>Crataegus monogyna</i>	7.0	10	<i>Fragaria vesca</i>	6.6	10
<i>Ctenidium molluscum</i>	8.5		<i>Frangula alnus</i>	3.0	29
<i>Cytisophyllum sessilifolium</i>	8.4		<i>Fraxinus excelsior</i>	7.1	10
<i>Cytisus scoparius</i>	4.7	25	<i>Fraxinus ornus</i>		
<i>Dactylis glomerata</i>	6.9	10	<i>Galeopsis tetrahit</i>	5.0	10
<i>Dactylis glomerata</i> subsp. <i>lobata</i>	6.7	10	<i>Galium aparine</i>	6.7	10
<i>Dactylorhiza maculata</i>	6.6		<i>Galium aristatum</i>	6.9	17
<i>Danthonia decumbens</i>	4.8	23	<i>Galium mollugo</i>	8.0	10
<i>Daphne gnidium</i>	7.2		<i>Galium odoratum</i>	6.4	10
<i>Daphne laureola</i>	7.0	10	<i>Galium palustre</i>	5.9	10
<i>Daphne mezereum</i>	7.5	10	<i>Galium rotundifolium</i>	5.8	28
<i>Deschampsia cespitosa</i>	5.9	10	<i>Galium saxatile</i>	3.0	24
<i>Deschampsia flexuosa</i>	3.0	28	<i>Galium sylvaticum</i>	6.4	
<i>Dicranella heteromalla</i>	3.6	26	<i>Galium verum</i>	7.6	10
<i>Dicranodontium denudatum</i>	3.0	24	<i>Genista cinerea</i>	8.5	13
<i>Dicranum scoparium</i>	3.0	32	<i>Genista pilosa</i>	7.4	
<i>Digitalis purpurea</i>	3.0	19	<i>Gentiana lutea</i>	7.7	40
<i>Dorycnium pentaphyllum</i>	8.5	13	<i>Geranium nodosum</i>	6.4	
<i>Dryopteris affinis</i>	5.7	12	<i>Geranium robertianum</i>	6.5	10
<i>Dryopteris carthusiana</i>	3.0	12	<i>Geranium sylvaticum</i>	6.7	
<i>Dryopteris dilatata</i>	3.0	22	<i>Geum urbanum</i>	6.7	10
<i>Dryopteris filix-mas</i>	5.7	10	<i>Glechoma hederacea</i>	6.6	10

Annexe : valeurs indicatrices (VI) EcoPlant

Espèce	pH_VI	C/N_VI	Espèce	pH_VI	C/N_VI
Globularia cordifolia	8.5		Laserpitium latifolium	7.3	
Hedera helix	6.5	10	Laserpitium siler	7.8	
Helichrysum stoechas	8.5		Lathraea clandestina	5.9	
Helleborus foetidus	8.5		Lathyrus linifolius subsp. montanus	5.7	15
Helleborus viridis	6.4	10	Lathyrus pratensis	8.0	12
Hepatica nobilis	7.0	40	Lathyrus vernus	7.0	13
Heracleum sphondylium	6.7	10	Leucanthemum vulgare	8.5	40
Hieracium lachenalii	7.5		Leucobryum glaucum	3.0	31
Hieracium laevigatum	5.0	16	Leucojum vernum	7.2	11
Hieracium murorum	7.5		Ligustrum vulgare	7.3	10
Hieracium pilosella	8.5		Lilium martagon	6.9	10
Hieracium prenanthoides	6.9		Linaria repens	4.9	16
Hieracium sabaudum	4.7		Listera ovata	8.5	
Hieracium umbellatum	4.5	28	Lithospermum purpureocaeruleum	7.0	11
Hippocrepis comosa	8.5	40	Lonicera alpigena	6.9	
Hippocrepis emerus	7.4	10	Lonicera etrusca	7.1	15
Holcus lanatus	5.3		Lonicera nigra	6.3	20
Holcus mollis	4.6	20	Lonicera periclymenum	4.6	23
Hordelymus europaeus	6.5	14	Lonicera xylosteum	7.4	10
Humulus lupulus	7.7	10	Lotus corniculatus	7.9	
Hyacinthoides non-scripta	3.0	10	Lotus pedunculatus	5.2	
Hylocomium brevirostre		40	Lunaria rediviva	6.7	10
Hylocomium splendens	3.0	33	Luzula campestris	5.4	
Hypericum androsaemum	6.0	10	Luzula forsteri	5.4	23
Hypericum hirsutum	6.7	12	Luzula luzulina	5.1	19
Hypericum montanum	6.3	16	Luzula luzuloides	3.0	20
Hypericum perforatum	6.9		Luzula multiflora	5.0	
Hypericum pulchrum	4.8	19	Luzula nivea	5.9	
Hypnum cupressiforme	3.0	30	Luzula pilosa	5.4	13
Hypnum cupressiforme var. cupressiform		27	Luzula sylvatica	3.0	22
Hypnum cupressiforme var. lacunosum	3.9	21	Lycopus europaeus	5.9	10
Hypnum jutlandicum	3.9	40	Lysimachia nemorum	5.4	
Ilex aquifolium	4.3		Lysimachia nummularia	6.6	10
Impatiens glandulifera	8.5	10	Lysimachia vulgaris	6.1	10
Impatiens noli-tangere	5.6	10	Lythrum salicaria	6.8	10
Iris foetidissima	8.1	10	Maianthemum bifolium	3.0	25
Iris pseudacorus	6.6	10	Malus sylvestris	6.4	12
Isothecium alopecuroides		17	Melampyrum pratense	3.0	29
Isothecium myosuroides	4.7		Melampyrum sylvaticum		40
Juncus conglomeratus	5.2	18	Melampyrum velebicum	6.7	17
Juncus effusus	5.2		Melica nutans	7.8	10
Juniperus communis	8.5		Melica uniflora	6.2	11
Juniperus oxycedrus	8.5		Melittis melissophyllum	8.2	10
Katapsuxis silaifolia subsp. silaifolium	7.7	13	Mentha aquatica	6.7	13
Knautia dipsacifolia	6.9		Mercurialis perennis	7.6	10
Laburnum alpinum	7.2	12	Mespilus germanica	5.0	22
Laburnum anagyroides	8.1	40	Milium effusum	5.7	10
Lactuca perennis		12	Mnium hornum	3.0	
Lamium galeobdolon	6.3	10	Moehringia muscosa	6.9	
Lamium galeobdolon subsp. montanum	7.1	10	Moehringia trinervia	5.5	10
Lamium maculatum	6.8	10	Molinia caerulea	3.0	31
Lapsana communis	6.4		Mycelis muralis	6.6	13
Larix decidua	8.5		Myosotis scorpioides	6.1	12
Laserpitium gallicum	8.5		Myosotis sylvatica	6.1	13

Espèce	pH_VI	C/N_VI	Espèce	pH_VI	C/N_VI
Narcissus jonquilla		13	Primula veris	7.1	10
Neottia nidus-avis	6.9	10	Primula vulgaris	6.3	14
Orchis mascula	7.1	12	Prunella vulgaris	6.3	13
Orchis purpurea	8.5	11	Prunus avium	6.3	10
Oreopteris limbosperma	3.0	19	Prunus mahaleb	8.5	40
Origanum vulgare	8.0	11	Prunus padus	8.5	10
Ornithogalum pyrenaicum	6.8	12	Prunus spinosa	7.0	10
Orthilia secunda	7.1	40	Pseudarrhenatherum longifolium	4.5	40
Osmunda regalis	4.3		Pseudotsuga menziesii	4.5	
Oxalis acetosella	3.6	13	Pteridium aquilinum	3.0	32
Paris quadrifolia	6.9	10	Pulmonaria affinis	6.5	10
Petasites albus	6.4	16	Pulmonaria longifolia	5.9	15
Peucedanum gallicum	4.7	20	Pulmonaria montana	6.7	11
Phalaris arundinacea	7.7	10	Pulmonaria obscura	6.8	10
Phillyrea angustifolia	8.5		Pyrus cordata	4.1	27
Phillyrea latifolia	8.0		Pyrus pyraeaster	5.7	
Phragmites australis	8.1	10	Quercus coccifera	8.5	
Phyteuma orbiculare	8.5	13	Quercus humilis	8.5	
Phyteuma spicatum	6.5	10	Quercus ilex	7.7	
Picea abies	3.0	23	Quercus petraea	3.9	
Pimpinella saxifraga	8.5		Quercus pyrenaica	4.3	38
Pinus nigra subsp. laricio	8.5		Quercus robur	5.8	
Pinus nigra subsp. salzmannii	4.9	24	Quercus rubra	4.7	
Pinus pinaster	4.7	40	Quercus suber		40
Pinus sylvestris	3.0	39	Quercus x-calvescens	7.5	
Pinus uncinata	8.5	40	Ranunculus aconitifolius	7.5	10
Plagiomnium affine	5.1	11	Ranunculus acris	6.1	
Plagiomnium undulatum	6.3	10	Ranunculus aduncus	6.7	16
Plagiothecium undulatum	3.0		Ranunculus auricomus	6.6	10
Platanthera bifolia	8.5		Ranunculus ficaria	6.5	10
Platanthera chlorantha	7.6		Ranunculus platanifolius	6.7	
Pleurozium schreberi	3.0	35	Ranunculus repens	6.3	12
Poa chaixii	5.5	10	Ranunculus tuberosus	6.3	13
Poa nemoralis	6.0	10	Rhamnus cathartica	8.5	40
Poa pratensis	7.9	10	Rhizomnium punctatum		16
Poa trivialis	6.2	10	Rhododendron ferrugineum	3.0	40
Polygala calcarea	8.5	11	Rhytidadelphus loreus	3.0	23
Polygala chamaebuxus	8.2	36	Rhytidadelphus triquetrus	7.1	
Polygonatum multiflorum	6.6	10	Ribes alpinum	6.9	12
Polygonatum odoratum	8.5		Ribes petraeum	7.5	10
Polygonatum verticillatum	6.5	10	Ribes rubrum	6.8	10
Polypodium vulgare	8.5		Ribes uva-crispa	7.4	10
Polystichum aculeatum	6.9	10	Robinia pseudoacacia	8.5	10
Polystichum lonchitis	7.0		Roegneria canina	7.1	10
Polystichum setiferum	6.3	10	Rosa arvensis	6.5	10
Polytrichum commune	3.9	34	Rosa canina	7.6	10
Polytrichum formosum	3.0	25	Rosa pendulina	6.9	
Polytrichum juniperinum	3.4	23	Rosa pimpinellifolia	8.1	
Populus nigra	8.5	10	Rosa sempervirens	6.3	14
Populus tremula	5.6	10	Rosmarinus officinalis	8.5	
Potentilla erecta	5.0	22	Rubia peregrina	7.1	
Potentilla sterilis	6.2	11	Rubus caesius	8.5	
Prenanthes purpurea		19	Rubus fruticosus	5.7	10
Primula elatior	6.3	10	Rubus idaeus		17

Annexe : valeurs indicatrices (VI) EcoPlant

Espèce	pH_VI	C/N_VI	Espèce	pH_VI	C/N_VI
Rubus saxatilis	6.2	10	Thalictrum minus	8.5	10
Rubus ulmifolius	6.4		Thamnobryum alopecurum	6.9	10
Rumex acetosella	4.8	24	Thuidium tamariscinum	5.5	20
Rumex arifolius	6.3	10	Thymus serpyllum	8.5	10
Rumex obtusifolius	5.8	12	Thymus vulgaris	8.5	10
Rumex sanguineus	7.3		Tilia cordata	6.5	10
Ruscus aculeatus	6.2	13	Tilia platyphyllos	7.7	10
Salix acuminata	5.0		Trifolium medium	6.9	10
Salix aurita	5.0		Trifolium montanum	7.2	10
Salix caprea	5.7		Trifolium pratense	7.3	11
Sambucus nigra	8.3	10	Trochiscanthes nodiflora	7.0	
Sambucus racemosa		17	Ulex europaeus	4.2	40
Sanguisorba minor	8.5	10	Ulex minor	3.4	35
Sanicula europaea	6.6	10	Ulex parviflorus	6.2	
Saxifraga rotundifolia	6.4		Ulmus glabra	7.1	10
Scilla bifolia	6.7	10	Ulmus laevis	7.5	10
Scilla lilio-hyacinthus	6.1	10	Ulmus minor	7.4	10
Scirpus sylvaticus	6.0	12	Urtica dioica	6.7	10
Scleropodium purum	3.0	34	Vaccinium myrtillus	3.0	31
Scrophularia alpestris	6.4		Vaccinium uliginosum	3.0	30
Scrophularia nodosa	6.0	10	Vaccinium vitis-idaea	3.0	32
Scutellaria galericulata	6.3	10	Valeriana dioica	6.0	10
Sedum sediforme	8.3		Valeriana montana	7.1	
Senecio ovatus	5.4		Valeriana officinalis	6.2	10
Senecio ovatus subsp. ovatus	3.6	13	Valeriana officinalis subsp. repens	6.1	10
Serratula tinctoria	6.9		Valeriana tripteris		40
Sesleria caerulea	8.0		Veratrum album		12
Silene dioica	5.6	10	Veronica chamaedrys	6.2	10
Silene nutans	7.4		Veronica montana	6.2	10
Silene vulgaris	6.9	17	Veronica officinalis	5.6	
Simethis mattiazzii	4.4	32	Veronica urticifolia	6.5	
Smilax aspera	8.5		Viburnum lantana	8.5	10
Solanum dulcamara	6.7	10	Viburnum opulus	6.7	10
Soldanella alpina	6.2		Viburnum tinus	8.5	
Solidago virgaurea	6.1	25	Vicia cracca	7.1	
Solidago virgaurea subsp. virgaurea	7.0	18	Vicia sepium	6.7	10
Sorbus aria	8.5		Vinca minor		10
Sorbus aucuparia	3.0	29	Vincetoxicum hirundinaria	8.5	10
Sorbus domestica	6.6	17	Viola alba	7.9	
Sorbus torminalis	6.3	20	Viola biflora	6.6	
Stachys officinalis	6.2	10	Viola hirta	8.2	10
Stachys sylvatica	6.9	10	Viola mirabilis	7.1	11
Staelina dubia	8.5	10	Symphytum tuberosum	6.6	10
Stellaria holostea	5.6	10	Tamus communis	7.4	10
Stellaria media	5.1		Viola odorata	8.5	10
Stellaria nemorum	5.1	10	Viola reichenbachiana	6.5	10
Succisa pratensis	6.3		Viola riviniana	5.7	10
Symphytum officinale	8.5	10			
Tanacetum corymbosum	7.3				
Taraxacum officinale	7.5	10			
Taxus baccata	8.4				
Teucrium chamaedrys	8.5				
Teucrium scorodonia	4.8	23			
Thalictrum aquilegifolium	7.7	10			

■ Prochain numéro :

Nous évoquerons en particulier les résultats d'un long compagnonnage entre l'INRA et l'ONF dans les forêts du Géant de Provence : 60 ans de recherche INRA sur les forêts publiques du Mont Ventoux.

■ Retrouvez RenDez-Vous techniques en ligne

Sur intraforêt : depuis toutes les pages d'intraforêt, cliquer sur le lien « Portail biblio » du pavé « Ressource » en colonne de gauche (ou noter, dans la barre d'adresse : <http://biblio.onf.fr>) pour arriver sur la page d'accueil du portail ; en choisissant (pavé de gauche) de faire une recherche « dans une collection ONF », puis en choisissant « Rendez-vous techniques » dans la nouvelle fenêtre, on accède à tous les articles et dossiers au format pdf..

Sur internet : [http://www.onf.fr/\(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques\)](http://www.onf.fr/(rubrique Lire, voir, écouter / Publications ONF / Périodiques))

La revue RenDez-Vous techniques est destinée au personnel technique de l'ONF, quoique ouverte à d'autres lecteurs (étudiants, établissements de recherche forestière, etc.). Revue R&D et de progrès technique, elle vise à étoffer la culture technique au-delà des outils ordinaires que sont les guides et autres instructions de gestion. Son esprit est celui de la gestion durable et multifonctionnelle qui, face aux défis des changements globaux, a abouti à l'accord conclu en 2007 avec France nature environnement « Produire plus de bois tout en préservant mieux la biodiversité ». Son contenu : état de l'art et résultats de la recherche dans les domaines de R&D prioritaires, mais aussi porté à connaissance de méthodes et savoir-faire, émergents ou éprouvés, clairement situés vis-à-vis des enjeux de l'établissement ; le progrès technique concerne toutes les activités de l'ONF en milieu naturel et forestier, en relation avec le cadre juridique.

Sous l'autorité du directeur de publication assisté d'un comité directeur ad hoc, la rédaction commande des articles, suscite des projets, collecte les propositions, organise la sélection des textes et assure la relation avec les auteurs. N.B. : certaines propositions, parfaitement légitimes en soi, ne se justifient pas forcément dans RDV techniques et méritent d'être orientées vers d'autres revues forestières. Enfin le comité éditorial, siégeant une fois par an, est informé de cette activité et émet ses avis, critiques ou suggestions.



Si vous désirez nous soumettre des articles

prenez contact avec :

ONF - Département recherche, développement et innovation

Christine Micheneau

