



HAL
open science

Faut-il adapter la gestion de la forêt aux sécheresses et si oui, comment ?

Nathalie Bréda

► **To cite this version:**

Nathalie Bréda. Faut-il adapter la gestion de la forêt aux sécheresses et si oui, comment ?. EURO-FOREST 2006: “ Quel climat, quelle forêt pour l’an 2100 ? ”, Jun 2006, Dompierre-les-Ormes, France. hal-02750974

HAL Id: hal-02750974

<https://hal.inrae.fr/hal-02750974v1>

Submitted on 3 Jun 2020

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

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

EUROFOREST 2006

QUEL CLIMAT, QUELLE FORÊT POUR L'AN 2100 ?

Faut-il adapter la gestion de la forêt
aux sécheresses et si oui, comment ?

Nathalie Bréda

UMR1137 - INRA UHP Ecologie et Ecophysiologie forestières
Equipe Phytoécologie - INRA Nancy
breda@nancy.inra.fr

Les médias ne cessent de le rappeler : la France est sèche, et cela depuis 2003. Trois années consécutives que des alertes sont publiées et que des restrictions d'usage de l'eau sont mises en place dans divers départements. Les premiers acteurs touchés par ces conditions hydriques difficiles sont les agriculteurs, qui s'inquiètent pour leurs cultures et remettent en question leur choix de production, voire leurs investissements dans des dispositifs d'irrigation. Qu'en est-il de la forêt, qui souffre en silence, manifestant des symptômes parfois spectaculaires comme en 2003, ou parfois plus discrets.

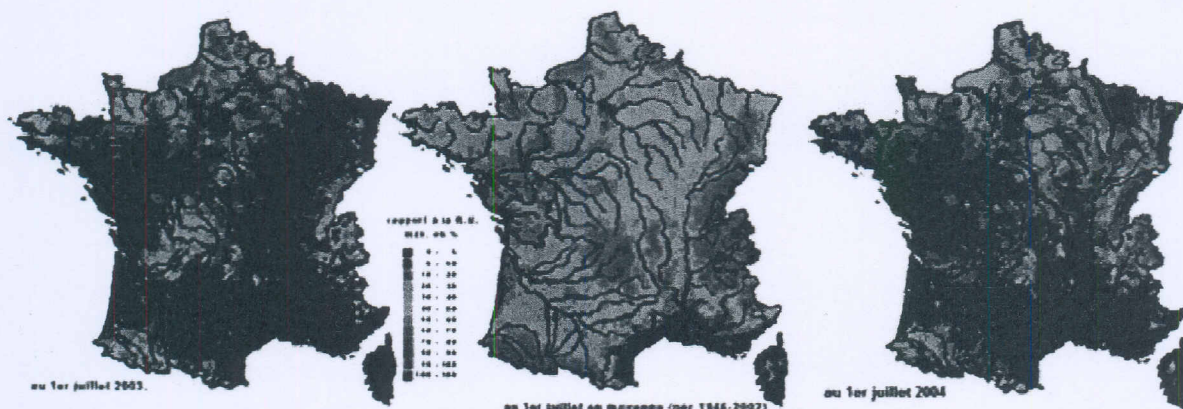
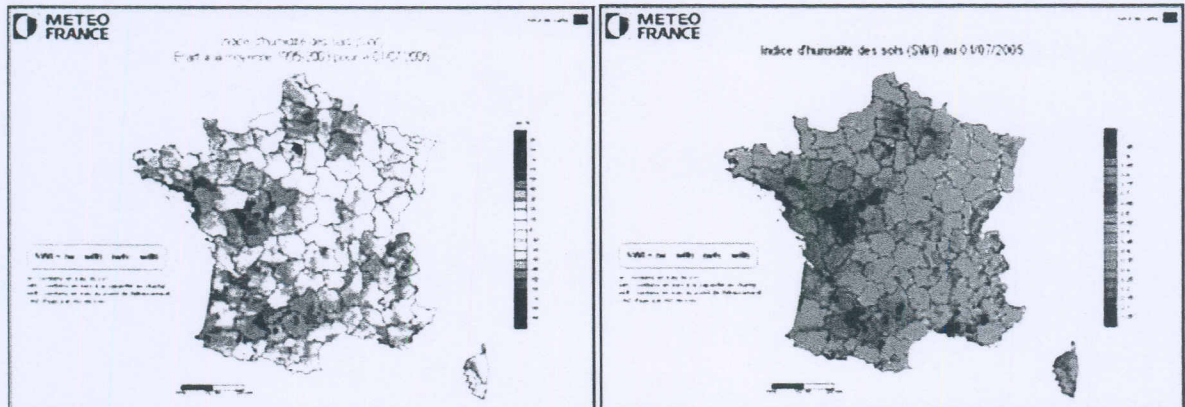


Figure 1 : En haut : Cartes de déficit hydrique en France, au 1^{er} juillet 2003, à la même date en moyenne sur la période 1964-2002 et en 2004. Cartes produites par le Réseau National des Données de l'Eau (RNDE). En 2005 (en bas), la carte a été établie par Météo France qui n'utilise pas le même indice pour quantifier la sécheresse (1 = la réserve en eau du sol est complète, 0 = il n'y a plus d'eau extractible). La comparaison par rapport à l'état moyen à la date du 1^{er} juillet est présentée sur la carte de droite (pour plus d'information, voire <http://www.eaufrance.fr/>)

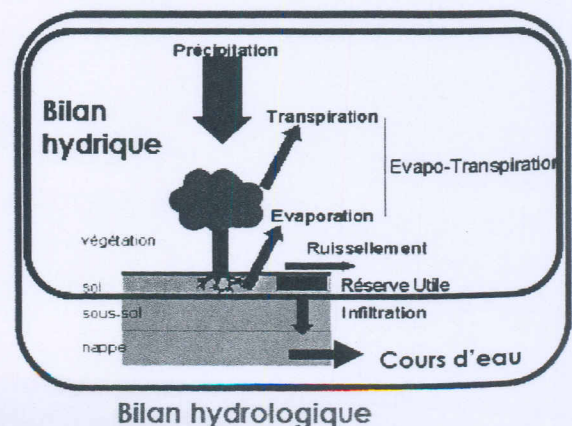


La sécheresse dont il s'agit ici est un évènement climatique caractérisé par un déficit en eau dans le sol qui affecte le fonctionnement optimal de la végétation. Nous ne nous intéressons ici qu'à la couche de sol prospectée par les racines des arbres, souvent de l'ordre de 1.5 à 2 m, parfois plus encore. Ici, nous ne considérons pas les ressources en eau que sont les nappes profondes, non accessibles par la forêt : c'est une des grandes différences entre un bilan hydrique et hydrologique (figure 2).

Pour établir le bilan hydrique d'une forêt, il faut connaître le climat (la pluie, le rayonnement, la température et l'humidité de l'air, la vitesse du vent), les propriétés du sol et la profondeur de l'enracinement. Connaissant de plus la phénologie (date d'apparition et de chute des feuilles, indice de surface foliaire), on calcule jour par jour la quantité d'eau dans le sol. Pour cela, partant d'un état de remplissage du réservoir que constitue le sol, il faut quantifier la quantité de pluie qui atteint le sol et la quantité d'eau prélevée par les arbres ou évaporée depuis le sol ou le feuillage.

Figure 2 :

Schéma simplifié des flux d'eau entrant et sortant de l'écosystème à prendre en compte pour établir le bilan hydrique d'une forêt (cadre bleu). Le cadre rouge délimite les compartiments à prendre en compte pour un bilan hydrologique.



Dans le cas des forêts, une première différence apparaît entre les espèces qui perdent leurs feuilles (espèces décidues) et celles dont le feuillage peut être efficace toute l'année, comme chez les conifères et les espèces à feuillage persistant. En effet, le feuillage intervient à deux niveaux : il intercepte une partie de la pluie qui n'atteindra jamais le sol (elle sera ré-é vaporée dans l'atmosphère) et il détermine la consommation en eau de la parcelle, directement proportionnelle à la quantité de feuilles ou des aiguilles des arbres.

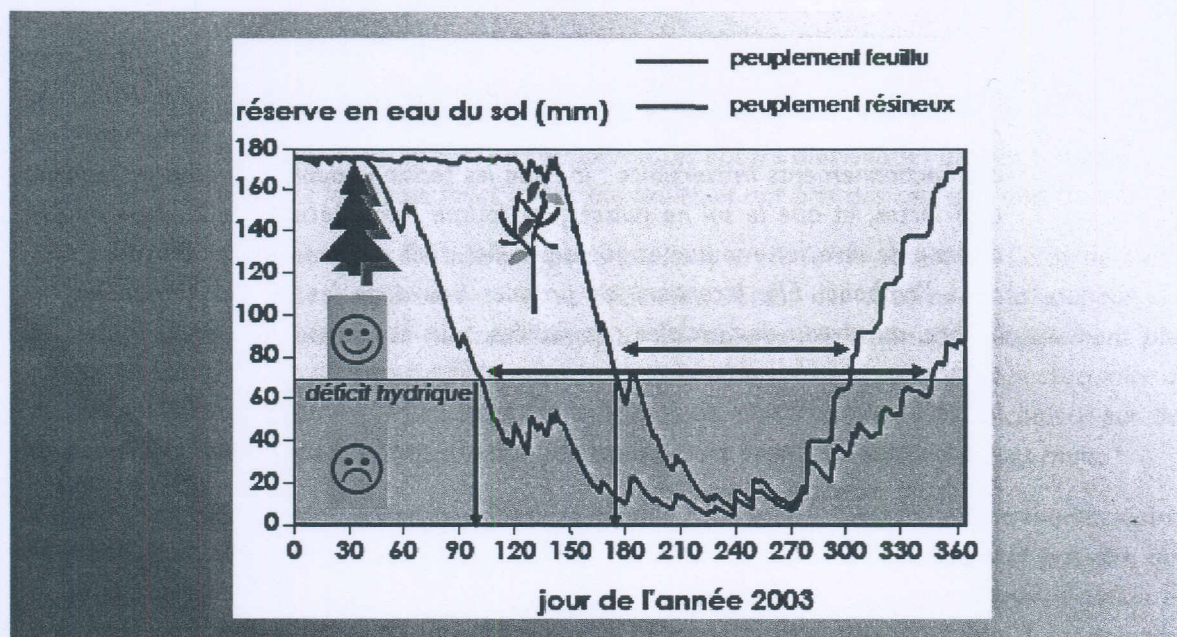


Figure 3 : comparaison du déficit hydrique sous forêt feuillue et résineuse, sur le même sol, ici à forte réserve utile. La durée de la période de déficit hydrique est plus longue sous résineux, elle débute plus tôt au printemps et se prolonge à l'arrière saison. La date de début de sécheresse est plus précoce de presque 3 mois sous résineux que sous feuillu.

La forêt transpire par l'intermédiaire de ses feuilles, percées de petits trous, les stomates ; la transpiration est émise dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. Elle assure une fonction de refroidissement des feuilles, et permet de maintenir les feuilles à une température inférieure à la température de l'air. Avant d'atteindre les feuilles, l'eau circule dans l'arbre en phase liquide, absorbée dans le sol par les racines fines aidées par leurs mycorhizes, puis transportée sous forme de sève brute dans le système conducteur jusqu'aux feuilles. Pour que le système fonctionne bien, il faut que « l'offre », c'est-à-dire la quantité d'eau dans le sol soit au moins égale à la « demande », correspondant à l'évapotranspiration potentielle. C'est lorsque l'offre n'est plus capable de répondre à la demande que les problèmes commencent...

Il faut savoir tout d'abord que cette situation est fréquente, et que les arbres possèdent de fortes capacités d'ajustement de leur consommation en eau lorsque la disponibilité dans le sol diminue. Ainsi, l'ouverture des stomates est réduite, ce qui permet de limiter la transpiration. Cette capacité de régulation est tout à fait réversible : dès le retour de la pluie, les stomates s'ouvrent à nouveau et la transpiration reprend... jusqu'au prochain retour à un niveau d'eau limitant dans le réservoir sol. Plusieurs cycles de ce type peuvent se succéder au cours d'une saison, et très souvent, la période estivale correspond à une période prolongée de contrôle de la consommation en eau par les arbres.

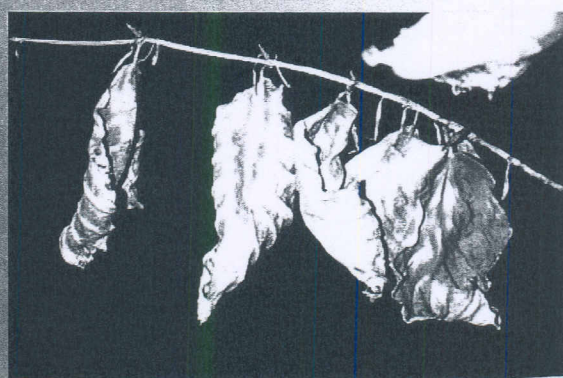
Cette limitation de la transpiration permet aussi à l'arbre de contrôler son état hydrique interne, et de limiter le dessèchement de ses tissus. En particulier, la régulation stomatique permet de protéger le système conducteur de dysfonctionnements irréversibles : lorsque les tensions dans le xylème deviennent trop fortes, et que le sol ne puisse plus fournir l'eau nécessaire, il arrive que la colonne de sève soit rompue et que des bulles d'air se forment dans les vaisseaux : c'est l'embolie. Elle intervient en premier lieu dans les parties terminales de l'arbre, au niveau des pétioles des feuilles, puis des jeunes rameaux. Toutes les espèces ne présentent pas la même vulnérabilité à ce type de dysfonctionnement : le système conducteur de la sève chez les résineux, formé de trachéides, est en général plus résistant à ce phénomène que le système conducteur des essences feuillues, constitué de vaisseaux.

En 2003 ou 2005 selon les régions de France, c'est dès les mois de mai-juin que le système d'économie d'eau a été mis en place par les arbres. Dans ce cas où la régulation est très précoce, il est possible que le système de protection soit

Exemple de feuilles de hêtre desséchées sur une partie terminale de branche dont le système conducteur est embolisé. La sève n'atteint plus les feuilles, elles sèchent.



Exemple de réaction contrastée à la sécheresse : le charme présente toute la partie terminale de sa couronne desséchée alors que le pin sylvestre voisin ne manifeste pas de symptôme visible.

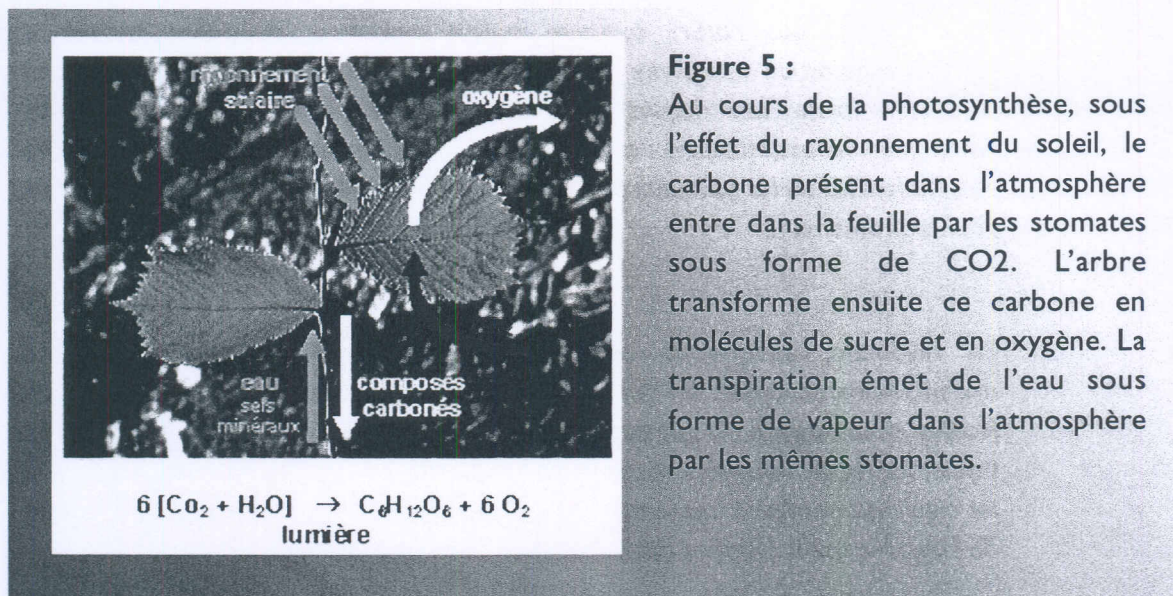


insuffisant, et que l'arbre continue malgré tout à se dessécher, surtout si l'évapotranspiration est élevée en raison d'un rayonnement fort, d'un air sec et d'un vent faible. Les risques d'embolie sont réels, à des taux importants, rapidement catastrophiques : ainsi, 80 à 90 % des capacités de transfert de sève vers les feuilles ou les rameaux peuvent être perdues. Mais tout cela reste invisible pour le promeneur...

En revanche, lorsque la canicule est intervenue en août 2003, ces dysfonctionnements ont été révélés de manière spectaculaire, par des chutes de feuilles prématurées. D'autres espèces, dont la fermeture des stomates était totale, l'effet de refroidissement par la transpiration n'existait plus, les feuilles et les aiguilles ont atteint des températures encore plus élevées que les températures de l'air : les tissus foliaires ont été brûlés et ont pris des couleurs anormales.

On peut donc considérer que la canicule a été le révélateur de l'état de stress hydrique des arbres ... et a déclenché l'émoi des médias et la stupeur des promeneurs, qui ne trouvaient plus en forêt ce microclimat habituellement plus frais et si appréciable en été. On retiendra donc que le caractère spectaculaire de cette année 2003 est lié à la conjonction d'un épisode de forte chaleur sur des forêts déjà soumises à une forte contrainte hydrique depuis de longs mois.

En ce sens, les sécheresses des années 2004 et 2005 ont été moins spectaculaires car les températures atteintes ont été moins élevées, ce qui ne veut pas dire que les arbres n'aient pas souffert ... Le système de contrôle de la consommation en eau avant qu'il ne soit trop tard semble bien adapté pour faire face à des épisodes de limitation de l'eau dans le sol. Mais il faut savoir que, si l'eau sort de l'arbre par cette ouverture des stomates, le carbone entre sous forme de CO₂ par la même voie dans le sens inverse : il est fixé par la photosynthèse dans la feuille (figure 5). Ainsi, toute régulation des "pertes" en eau par transpiration s'accompagne d'une limitation de la photosynthèse, ce qui limite rapidement la croissance de l'arbre. D'ailleurs, les anneaux annuels de croissance formés en 2003, 2004 et 2005 ont été anormalement étroits, voir même absents chez certaines espèces. Vous pouvez l'observer en regardant les souches d'arbres qui viennent d'être abattus.



Lorsque la photosynthèse est ainsi limitée par une sécheresse précoce et longue, non seulement la croissance est affectée mais aussi tous les processus de mise en réserves de sucres. Ceux-ci jouent un rôle important (1) dans l'entretien des tissus en particulier au cours de l'hiver, (2) dans la réactivation du fonctionnement de l'arbre au printemps suivant (reprise de croissance aérienne et souterraine, ouverture des bourgeons et mise en place des feuilles) ou encore (3) dans les capacités de résistances des arbres à diverses contraintes. Ainsi, la récurrence de sécheresses sévères pendant trois années consécutives a un effet cumulatif néfaste sur la reconstitution des réserves des arbres. Ceci a pour effet d'augmenter leur vulnérabilité aux insectes, aux pathogènes racinaires ou foliaires, aux gels ... et aux sécheresses à venir. Dès 2004, les forestiers ont rapporté des taux de mortalité anormaux, particulièrement sur résineux, résultant d'effets directs de la sécheresse ou d'interactions entre affaiblissement par la sécheresse et une vulnérabilité plus grande aux insectes (scolytes en particulier), aux champignons pathogènes (armillaire par exemple). De telles interactions ont conduit à des mortalités tout à fait exceptionnelles dans certains massifs. Depuis, des symptômes de perte de vitalité des arbres sont rapportés, comme des dessèchements de branches dans les parties terminales des couronnes, illustrant l'effet irréversible de l'embolie des systèmes conducteurs dans les organes pérennes. L'apparition de branches mortes est aussi un indicateur fort de basculement possible vers un état sanitaire médiocre, tendant rapidement vers un dépérissement. Certains arbres ont en effet toutes chances de ne jamais récupérer complètement de ces successions de contraintes, et de progressivement perdre leur compétitivité. Un des challenge pour la recherche est de savoir prédire quels arbres sont dans ce cas, afin d'aider les forestiers à les récolter rapidement, avant que le bois ne se déprécie suite à des attaques d'insectes. En Lorraine, nos calculs

de bilan hydrique depuis 1950, à partir de la station météorologique de Hesse (57), nous révèle que l'année 2003 a présenté le déficit hydrique le plus sévère des 54 dernières années, aussi bien sous peuplement feuillu que sous résineux (figure 6). Si de telles sécheresses devenaient la "normale", il conviendrait d'adapter les peuplements en réduisant leur indice foliaire, afin de réduire leur consommation en eau.

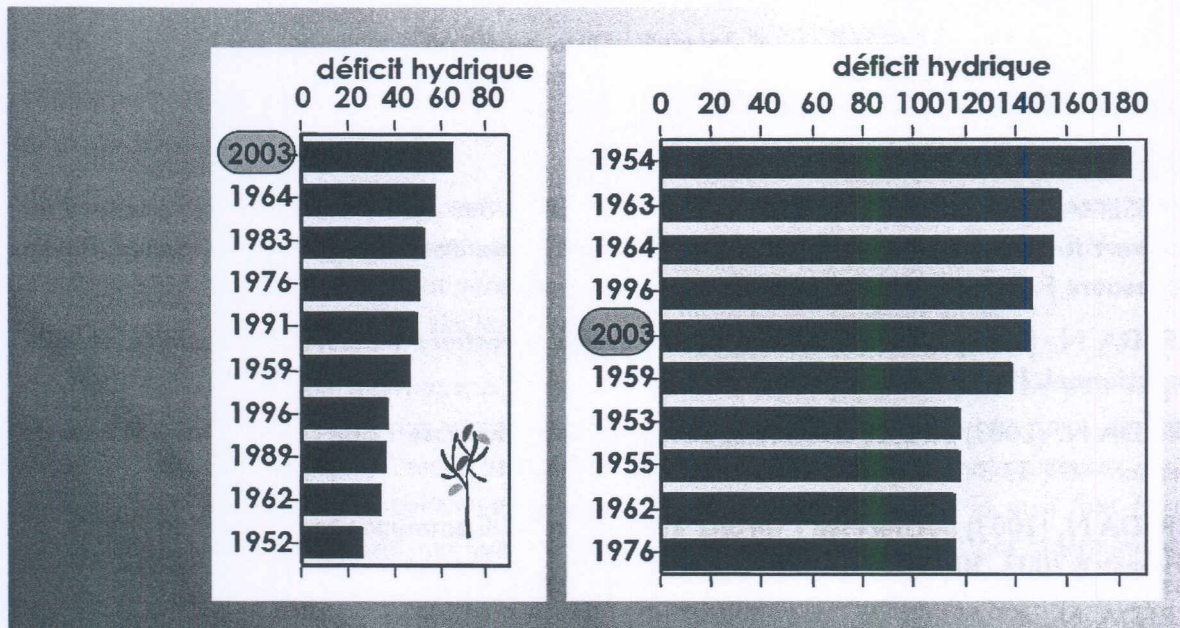


Figure 6 :

Hit parade des années à déficit hydrique sévère sous forêt feuillue depuis 1950 en Lorraine. La sécheresse de 2003 a été plus sévère sous résineux que sous feuillus. Source des données climatiques utilisées : INRA, Site atelier de Hesse (57).

Par ailleurs, il conviendra d'être toujours plus vigilant à ne plus installer d'essence sensible à la sécheresse sur les sols les plus superficiels, et/ou la pluviométrie est la plus limitante déjà aujourd'hui. Sans quoi le forestier doit s'attendre à une baisse de productivité voir même à des dépérissements massifs dans toutes les zones limites.

Des liens utiles pour en savoir plus

http://www.inra.fr/presse/le_point_sur_les_recherches_de_l_inra_sur_les_impacts_de_la_secheresse_sur_l_agriculture_et_la_foret

http://www.inra.fr/presse/les_secheresses_telles_celle_de_l_ete_2003_auraient_un_impact_durable_sur_les_ecosystemes_terrestres

http://www.inra.fr/presse/changement_climatique_quels_impacts_sur_la_foret

http://www.inra.fr/presse/changement_climatique_selectionner_des_arbres_resistants_a_la_secheresse

http://www.inra.fr/presse/les_arbres_plus_sensibles_au_froid_apres_une_secheresse

http://www.inra.fr/presse/l_embolie_gazeuse_un_accident_vasculaire_vegetal

http://www.agriculture.gouv.fr/spip/ressources.themes.foretbois.santedesforets_r314.html<http://www.gipecofor.org/ecofor/publi/page.php?id=1735>

<http://www.greenfacts.org/climate-change/giec/giec.htm>

<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Rayonnement/Effetserre/IPCC-995.htm>

Des articles à lire pour mieux comprendre :

AUSSENAC G., GRANIER A., BRÉDA N. (1995) Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. Revue Forestière Française, XLVII, 54-62

BRÉDA N. (1999) L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. Revue Forestière Française, LI-2, 135-150

BRÉDA N. (2003) Arbres adultes touchés par la sécheresse : que faut-il faire ? Forêts de France, 467, 33-34

BRÉDA N. (2003) Sécheresse : verdict au printemps. Communes Forestières de France, 3^e trimestre 2003, 10-11

BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G. (2000) Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. Revue Forestière Française, LII, 73-90

BRÉDA N., GRANIER A., AUSSENAC G. (2004) La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. Revue Forestière Française, LVI, 2, 109-131

BRÉDA N., GRANIER A., DREYER E. (2004) Physiologie des arbres : les effets de la sécheresse et de la canicule. Forêts de France, 474, 22-23

DUPOUEY J. L., BRÉDA N., BADEAU V. (2005) Changements climatiques, des impacts encore peu visibles. FRAPNA Isère, Isère Nature, n°261, avril 2005, 14-15

GRANIER A., BADEAU V., BRÉDA N. (1996) Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Revue Forestière Française, XLVII, 59-68

LANDMANN G., BRÉDA N., HOULLIER F., DREYER E., FLOT J. L. (2003) Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? Revue Forestière Française, 55, 299-308

LEBOURGEOIS F., GRANIER A., BRÉDA N. (2001) Variations climatiques en France : +1,2°C depuis 40 ans. Forêt Entreprise, 139, 53-57

Guy LANDMANN

J'espère que vous avez eu une prof de Sciences Nat. aussi passionnée. On lui avait demandé comment les forêts sont affectées par le changement climatique ? Elle a répondu.

Pendant que Vincent BADEAU installe le matériel on va prendre, si vous voulez, les questions dans la salle.

Intervenant du public

Est-il possible d'accélérer artificiellement le vieillissement pour obtenir des conclusions plus rapides ?

Nathalie BREDA

C'est une bonne question. Je ne vous ai pas parlé d'une partie importante de la suite des études faites sur ces questions là. Un vieillissement accéléré ? Nous ne pouvons pas répondre car nous connaissons encore mal les processus physiologiques du vieillissement.

Au niveau international, une communauté scientifique de plus en plus large travaille pour comprendre le vieillissement et ce qui se passe du point de vue physiologique. Les recherches sont en cours, des résultats contradictoires sont obtenus, essentiellement selon la fertilité des stations. C'est là qu'il faut faire attention. Il faut voir que non seulement les arbres ne poussent pas indéfiniment, mais il y a un risque d'affaiblissement des ressources minérales des sols. Les arbres absorbent de l'eau, qui est renouvelée par les pluies. Par contre, l'épuisement de la quantité d'éléments minéraux peut se manifester et on peut s'attendre aussi à avoir, en dehors des problèmes liés à la sécheresse, une limitation de la productivité, voire des dépérissements provoqués par des problèmes de carence en certains éléments minéraux.

Guy LANDMANN

Merci encore à Nathalie BREDA.

Vincent BADEAU est un jeune chercheur assez connu en France, et en Saône-et-Loire aussi...

Je ne sais pas s'il l'a fait exprès, mais quand il est entré à l'INRA, il a commencé à travailler sur un sujet qui allait s'avérer important et médiatique ; la science produit de bons résultats.

Les cartes que Vincent va montrer, nous les avons vues au cours du journal télévisé de l'été 2004 et 2005 et ça continue encore...

Par l'auteur lui-même, quelques explications sur la façon dont la végétation à long terme va pouvoir se comporter.

Je laisse la parole à Vincent BADEAU.

Vincent BADEAU

Merci.

Guy LANDMANN a développé le titre, Nathalie BREDA a présenté l'INRA, je vais donc entrer directement dans le vif du sujet, mais j'ajouterai tout d'abord que si vous êtes intéressés par des résultats de recherches et des choses accessibles pour le grand public, vous pouvez vous connecter sur le site www.inra.nancy.fr pour compléter ce que je vais vous dire.

En guise d'introduction je vous présente ce qui concerne la distribution des espèces. Vous pouvez reconnaître des feuilles de tulipier et de magnolia datant du tertiaire qui ont été trouvées en Ardèche. Ces espèces ne sont évidemment plus présentes à l'état naturel en France.

Le tertiaire, c'est très ancien ... mais je vous présente une étude beaucoup plus récente obtenue à partir d'observations palynologiques. Depuis le quaternaire et les dernières glaciations dont nous a parlé M. VALLEE ce matin, nous avons eu une recolonisation des toundras, des landes, après la fonte des glaces. Maintenant, on sait assez bien évaluer la vitesse de recolonisation par l'analyse des pollens qui sont piégés dans les tourbières, les sols etc.

Pour les chênes, on constate qu'il leur a fallu environ 2 000 ans pour recoloniser notre territoire depuis les refuges ibériques ou italiens jusqu'au Nord de la France. J'aime bien l'évoquer car cela illustre bien que la question de la répartition des espèces ne date pas d'hier. MM. LAMARCK et DE CANDOLLE (grands botanistes français) ont publié en 1805 la première Flore de France, et se sont « amusés » à faire une première « métaanalyse » des informations qu'ils avaient à leur disposition, c'est-à-dire de toutes les flores régionales élaborées par des botanistes locaux (curés, médecins, notaires, etc.).

Ces flores existantes, c'est tous les noms que vous pouvez y voir. Ils ont pris toutes les flores régionales et ont essayé d'ordonner les informations : telle espèce se trouve ici et là, mais pas ici, etc. Ils ont réussi à dessiner une carte où ils ont représenté un domaine montagnard, un domaine aquitain, un domaine méditerranéen, etc. C'est assez formidable pour l'époque et nous n'avons pas inventé grand-chose depuis. Une chose importante également pour l'époque (et que ces auteurs avaient déjà observée), c'était les conditions de température qui faisaient qu'une plante était présente dans un endroit et pas dans un autre.

Les changements climatiques ne datent pas d'hier, et comme nous l'avons vu ce matin, des changements de 1°C sur le siècle, en France, ont pu être mis en évidence. La question est alors : peut-on déjà voir un impact de ces changements dans les écosystèmes forestiers ?

C'est quelque chose de compliqué à mettre en évidence, mais j'ai sélectionné quelques exemples.

Le premier utilise les données de l'Inventaire Forestier National (IFN). L'IFN fait des inventaires de la ressource en bois, des relevés floristiques et écologiques, sur tous les départements français et repasse cycliquement en moyenne tous les dix ans. Comme l'IFN est un organisme qui a plus de quarante ans, on dispose de plusieurs cycles d'inventaires et on peut les comparer .

Le premier exemple concerne les Ardennes. Le premier inventaire a été réalisé en 1987 et à cette époque, on a observé que le houx était présent dans 9 % des placettes inventoriées.

Puis l'IFN repasse dix ans plus tard et en 1998, le houx est présent dans 21 % des placettes.

On observe donc une augmentation assez forte de sa présence. Quand on regarde en parallèle les données météorologiques enregistrées dans quelques stations des Ardennes, on constate que les températures des mois les plus froids sont passées dans le même temps de valeurs négatives à des valeurs positives ou nulles.

Est-ce dû à la dérive climatique ?

Je ne peux pas répondre, mais dans les Ardennes, on constate à la fois une augmentation des températures et la progression d'une espèce que l'on qualifie « d'atlantique », c'est-à-dire une espèce dont la frange Est de l'aire de répartition est limitée par la température des mois les plus froids. J'insiste aussi sur le fait que le houx garde ses feuilles toute l'année, c'est comme un conifère.

Autre espèce tout aussi sympathique : le lierre

Ce que l'on aime bien faire au labo, ce sont des études de dendrochronologie (plus précisément dendroclimatologie). Nous récoltons des échantillons de bois (carottes), sur lesquels on mesure la largeur des cernes annuels. On essaie ensuite d'expliquer l'évolution inter-annuelle de ces largeurs de cernes avec le climat.

Dans l'exemple du lierre, nous avons trouvé une espèce qui ne répond pas (comme beaucoup d'espèces forestières) à un déficit hydrique, mais qui répond presque uniquement aux températures minimales de février et de mars. On peut noter la bonne concordance entre croissance et températures. Comme le houx, le lierre ferait partie de ces espèces favorisées par une augmentation des températures hivernales. Là encore, cette espèce garde ses feuilles tout l'hiver.

Un autre exemple un peu moins rigoureux. La littérature scientifique recense beaucoup d'exemples de colonisation des forêts naturelles du Sud de l'Europe par des espèces exotiques et voici ce que nous avons pu observer avec un collègue dans une forêt aux alentours du Lac Majeur en Italie. Nous avons été très surpris que dans une forêt « classique » à base de frênes, de charmes, etc. on trouve des palmiers (je ne connais pas l'espèce) qui sont en train de se régénérer naturellement. Des graines ont été initialement apportées par des oiseaux depuis

des propriétés privées, des jardins d'agrément et maintenant les quelques individus adultes produisent une régénération « naturelle ».

Le même exemple que ce matin : le ban des vendanges. Ce n'est pas cette fois pour le Beaujolais mais le Châteauneuf-du-Pape et ce résultat a été obtenu à l'INRA d'Avignon.

Même conclusion que tout à l'heure, en cinquante ans, la date des vendanges a eu tendance à s'avancer nettement dans la saison.

J'arrête ici avec ces exemples, mais vous voyez que l'on commence à voir des choses qui nous interpellent. On aimerait donc bien savoir jusqu'où cela peut aller et comment cela va se passer dans le futur ? Pour prévoir les changements à venir, on calcule des modèles biogéographiques.

J'ai parlé de Messieurs LAMARCK et DE CANDOLE tout à l'heure, on a d'autres résultats plus récents (mais déjà anciens) publiés en 1995. Les auteurs ont calculé, à partir des données dont ils disposaient, la présence du hêtre en Europe à l'heure actuelle et dans le futur.

D'autres collègues, présentés ici, travaillent actuellement sur des données semblables à l'échelle européenne (et pour beaucoup d'espèces). Ce que je présente ici vous montrent la progression du chêne vert selon deux scénarii climatiques dont nous avons parlés ce matin.

Face à ces résultats, on est surpris par l'ampleur du phénomène mais vous constatez comme moi que ces cartes européennes ne sont pas précises à l'échelle des régions. Nous avons donc lancé ce genre d'étude à l'échelle strictement nationale.

Pour ceci, il faut connaître précisément les aires de répartition des espèces sur le territoire national, cela paraît facile mais en fait ce n'est pas si évident que cela. Ce n'est que depuis quelques années que l'IFN a terminé ces cycles d'inventaire sur tous les départements français. Avec plus de 100 000 points de relevés sur toute la France (soit un point d'observation pour 130 hectares de forêts), l'IFN inventorie très finement la présence d'une soixantaine d'espèces ligneuses. On n'a pas mieux. A partir de ces données, on peut dessiner des cartes d'aires de répartition très précises, le sapin par exemple et le chêne vert.

Je reprends maintenant la carte du chêne vert vue par l'IFN en France et je la compare à celle de l'Atlas Partiel de la Flore de France (maille de 20 km) et à celle de Flora Europaea (maille de 50 km). Vous pouvez constater que si ces cartes se ressemblent globalement, il y a de grosses différences à l'échelle régionale.

En conséquence, lorsque l'on essaie de comprendre la présence ou l'absence d'une espèce, c'est-à-dire quand on calcule des modèles de répartition, il faut faire très attention aux données que l'on utilise.

Grâce à l'IFN, on a donc des aires de répartition très précises pour les espèces forestières. Il nous faut aussi une bonne description du climat actuel, et là non plus ce n'est pas trivial. Météo-France a un réseau d'observation au sol assez dense mais ce sont des mesures ponctuelles alors qu'on veut les spatialiser sur le territoire français. Depuis les années 80, Météo-France sait calculer, avec le modèle AURELHY, des paramètres météorologiques pour tout le territoire avec une précision de 1 km. Ce modèle prend en compte le paysage, le relief, etc. et les données observées sur les postes pendant la période 1961 - 1991. Nous disposons donc de cartes précises où pour chaque km² de territoire nous avons des « normales mensuelles » de précipitations, de températures, du nombre de jours de gel, etc.

Puisque l'on dispose de cartes de présence des espèces d'une part et de cartes climatiques d'autre part, on va mélanger les deux. Cela s'appelle calculer un modèle de niches, c'est-à-dire un modèle mathématique capable de redessiner l'aire de répartition d'une espèce uniquement à partir de données climatiques. Toutes les données climatiques ne sont pas utilisées. Le modèle va tout d'abord rechercher les variables qui expliquent le mieux la présence de l'espèce. Une fois ces variables connues, on peut redessiner des cartes de niches climatiques actuelles pour l'espèce que l'on étudie.

C'est une première étape très importante, mais si on connaît les variables climatiques qui déterminent la présence actuelle d'une espèce, on a également envie de savoir comment va évoluer cette présence si les variables climatiques évoluent dans le futur.

Le climat futur, c'est encore moins trivial que le climat actuel, nous en avons déjà parlé ce matin. Je vais vous présenter le modèle ARPEGE-B2 de Météo-France. Il y a un problème d'échelle (que l'on verra ensuite) mais Météo-France calcule avec le modèle ARPEGE l'évolution du climat du 1^{er} janvier 1960 jusqu'au 29 décembre 2100.

La France est couverte par 300 points. Le climat futur est donc donné sur un maillage très grossier. Je prends le relief de la France tel que nous le connaissons puis le relief tel qu'il est « vu » au travers du maillage ARPEGE.

Il y a une forte simplification. La Bourgogne disparaître ; on ne parle plus ni du Morvan, ni des Vosges, et les Alpes culminent à 2100 mètres. C'est un problème informatique. Les modèles climatiques sont tellement compliqués qu'il n'est pas possible de calculer l'évolution du climat sur la planète entière avec des mailles très fines. La capacité de calcul des ordinateurs évolue d'années en années, mais nous sommes encore loin d'avoir une estimation du climat futur pour des mailles de territoire de 1 km² comme avec le modèle AURELHY.

Le climat futur à l'échelle globale, c'est de grandes tendances, des moyennes, un peu de variabilité et tout cela ne peut pas être régionalisé facilement. Toutes les

cartes que l'on peut voir, regardez les comme des cartes de tendances pour la métropole, mais on ne peut pas s'en servir au niveau régional. Ne regardez pas la valeur précise de telle ou telle maille.

Le deuxième problème avec le climat futur a été évoqué ce matin. Dans le panel des modèles d'émissions de gaz à effet de serre et des modèles climatiques disponibles, on a une variabilité très forte.

On prévoit des augmentations de températures comprises entre $+1,4^{\circ}\text{C}$ à $+5,8^{\circ}\text{C}$, ce qui n'est pas la même chose. Je vous ai dit tout à l'heure que dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé un modèle (ARPEGE) avec un scénario de type B2, le tout conduisant à une prévision d'augmentation de la température en 2100 de $+2,7^{\circ}\text{C}$. Par rapport à la fourchette $+1,4^{\circ}\text{C}$ à $+5,8^{\circ}\text{C}$, le modèle ARPEGE-B2 est donc plutôt optimiste.

J'ajoute aussi que pour notre équipe de recherche, l'intérêt n'est pas de produire des cartes pour 2100. Nous travaillons sur l'écologie des espèces. Ce qui nous intéresse, c'est de déterminer les facteurs de l'environnement, le climat bien sûr, mais pas seulement le climat : le sol, l'acidité, la réserve utile en eau, l'excès d'eau, etc. Tous les facteurs biotiques et abiotiques qui font qu'une espèce est présente ou non, qu'elle produise du bois, qu'elle se reproduise, qu'elle dépérisse, etc.

Je passe aux exemples : le cas du chêne vert tout d'abord. On constate que le chêne vert est seulement présent dans le bassin méditerranéen et un peu sur la façade Atlantique. Sa présence est conditionnée par une forte évapotranspiration en été et de faibles amplitudes thermiques tout au long de l'année. Ces paramètres étant connus, on peut projeter ce qui pourrait se passer en 2100 avec le scénario climatique ARPEGE-B2.

D'après des cartes pour 2050 et 2100. Toutes conditions égales par ailleurs, un changement climatique avec le scénario B2, pourrait conduire à avoir du chêne vert jusqu'au Nord de la Loire, dans le mâconnais, etc.

Le cas du Hêtre à présent. C'est une essence essentiellement présente en montagne mais aussi en plaine dans le quart nord-est et le quart nord-ouest. Ce qui favorise la présence du hêtre, c'est presque uniquement les déficits hydriques des mois de juin et juillet. Voilà une variable qu'on aime beaucoup. On la connaît bien au laboratoire. J'ai travaillé sur la croissance radiale du hêtre en Lorraine : si on connaît le déficit hydrique (comme le calcule Nathalie BREDA) de l'été et de l'été précédent, on peut expliquer plus de 70% des variations inter annuelles de croissances radiales. Le hêtre est une essence qui réagit très clairement au climat ; il n'y a pas d'autres effets. Ce déficit hydrique, on le connaît aussi pour expliquer les pertes foliaires du hêtre. Maintenant, on le retrouve aussi pour expliquer la présence du hêtre. Il y a donc un faisceau de présomptions assez fort dans ce cas.

Contrairement au chêne vert, le hêtre pourrait être une espèce qui pose problème.

On voit sa niche climatique actuelle régresser assez fortement avec le scénario ARPEGE-B2. Il devrait quand même en rester encore au Mont-Beuvray.

Le cas du Sapin : c'est la même chose que pour le hêtre. C'est une espèce qui pourrait être en forte régression en 2100. Ce qui explique sa répartition sur le territoire, c'est encore le bilan hydrique mais cette fois, ce n'est pas le bilan hydrique de juin-juillet mais d'avril à juin, c'est-à-dire le bilan hydrique de printemps. Il est intéressant de voir cela après ce qu'a dit Nathalie BREDA. Le sapin est un résineux qui transpire plus tôt en saison, il va pomper l'eau du sol bien avant le hêtre. Si on a déjà des problèmes de sécheresse au printemps, c'est préjudiciable à la fois à la croissance (résultats de Michel BECKER dans les Vosges) et à sa répartition sur le territoire national.

Je vous ai parlé des cartes faites espèce par espèce. Maintenant, je rassemble toutes les espèces (une soixantaine) et j'essaie de les regrouper en « grandes familles » c'est-à-dire en des ensembles qui réagissent de façon homogène au climat actuel. Je refais en quelque sorte ce que Messieurs LAMARCK et DE CANDOLLE ont fait en 1805, la seule différence étant que j'utilise en plus des cartes climatiques.

D'après les calculs de l'ordinateur, avec soixante-dix espèces ligneuses et cinq variables climatiques (que je ne vais pas détailler) on dessine des cartes. Elles ressemblent aux cartes biogéographiques présentes dans nos livres de géographie ou de sciences naturelles avec un domaine méditerranéen, un domaine montagnard, un grand quart nord-est, un grand quart sud-ouest. Comme tout à l'heure, puisque l'on connaît les variables climatiques actuelles et que l'on dispose d'un modèle mathématique, on va observer ce qui pourrait se passer en 2050 et en 2100. Le domaine méditerranéen qui couvre actuellement 9% du territoire, pourrait atteindre les 28% en 2100. Les domaines montagnards pourraient passer de 16% à 6%. La zone (le climat sud-ouest) qui couvre actuellement 17% du territoire pourrait atteindre 46% en 2100.

Quelques remarques pour terminer cette présentation

Avec les prévisions ARPEGE-B2, ce travail vous avez pu constater de profondes modifications des aires potentielles de distribution des essences en France. Ces grosses modifications, on les obtient avec un scénario climatique plutôt optimiste.

J'insiste encore sur le fait que les cartes pour 2100 ne sont ni une prédiction, ni une prévision pour un grand nombre de raisons. Il existe d'abord des problèmes inhérents aux scénarii climatiques. La résolution de ces modèles est actuellement assez grossière et la qualité des modèles est perfectible. On peut mettre des tas de choses dans les modèles. Il ne faut pas perdre de vue qu'on a beau améliorer les modèles pour prédire l'évolution du climat en 2100, mais il y a des variables que

l'on ne maîtrise pas actuellement. C'est notamment l'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère au cours du siècle à venir : quelle sera la démographie de la planète ? fera-t-on attention à l'émission des gaz à effet de serre ? La concentration de ces gaz est bien actuellement la plus grosse inconnue dans les modèles climatiques.

Les données actuelles permettent de construire des modèles très fins à l'échelle régionale, mais on est encore très loin de construire des modèles pour aider les gestionnaires dans leurs décisions pour 2050 ou 2100. C'est un problème de taille des mailles !

On a également de grandes incertitudes à propos du comportement des essences. J'ai listé quelques exemples ici, mais ce n'est pas une liste fermée :

Les capacités de migrations tout d'abord ; je vous ai dit tout à l'heure que les chênes ont mis près de 2000 ans pour traverser la France après la dernière glaciation. Pour le chêne vert, il lui faudrait donc aussi 2000 ans pour arriver à Lille. Mais comme l'a dit M. VALLEE ce matin, on ne parle pas en milliers d'années quand on parle du changement climatique actuel.

L'ordre de grandeur est plutôt la centaine d'années, la dizaine d'années, voire moins. Ce ne sont pas les mêmes "intervalles de temps". Mécaniquement les chênes ne peuvent pas traverser la France tout seuls en 100 ans. Au quaternaire, les migrations se sont faites dans des espaces vierges, il n'y avait ni agriculture, ni autoroutes, ni canaux, ni villes. Il n'y avait pas de contraintes à la migration des espèces, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui.

Si on a quelques informations sur les ligneux, on en sait encore moins sur les herbacées.

Beaucoup de travaux rentrent maintenant dans le schéma. Les scientifiques commencent à démontrer qu'il y a beaucoup d'espèces forestières, comme le muguet par exemple, qui ont des vitesses de migration de l'ordre de quelques dizaines de centimètres par an. C'est ridicule et peu compatible avec les vitesses de changements climatiques. Si on se dit que le forestier peut planter des espèces mieux adaptées au climat, va-t-il planter toutes ces espèces qui font la biodiversité des sous-bois ?

Pour ce qui est de la compétition entre espèces, on a très peu d'informations. Même si on admet que les espèces migrent, elles ne vont pas migrer toutes seules. Les champignons du sol vont bouger, les bactéries, les pathogènes, les chenilles etc. vont également bouger.

Comment vont se faire les nouveaux équilibres avec les nouveaux cortèges de pathogènes et de symbiotes ? On ne sait pas encore. Nathalie BREDA en a déjà parlés.

Quel sera le rôle de la variété génétique ?

Un arbre est là pour cent ans ; il ne va donc pas s'adapter. Il y a adaptation si on a plusieurs générations. Notre arbre va devoir se débrouiller avec la variabilité génétique contenue dans son propre génome. Cette variété génétique on la connaît mal. Elle a surtout été étudiée dans une optique de productivité. Il y a eu des programmes d'amélioration génétique, mais les scientifiques et les forestiers cherchaient avant tout à sélectionner des arbres droits, bien élagués, avec certaines qualités mécaniques et un bon niveau de productivité. On ne connaît pas la variété génétique qui fait qu'un arbre va résister ou non à la sécheresse.

Comme je vous l'ai dit, les cartes ne font varier que le climat. L'environnement est considéré constant, mais on sait bien qu'il ne le sera pas.

Un seul exemple sur la composition de l'atmosphère : le CO2 augmente et un arbre dans une atmosphère plus ou moins riche en CO2 va réagir différemment. Ce CO2 peut améliorer la photosynthèse ; il peut avoir un effet anti-transpirant (qui marche chez le chêne mais pas chez le hêtre). Il ne faut pas oublier les dépôts azotés. Ces pollutions azotées fertilisent les forêts (des sols qu'on ne fertilise jamais d'habitude) et cela a un impact sur la croissance et la biodiversité des forêts.

Nous avons également au laboratoire des résultats concernant l'utilisation ancienne des sols. A deux cents ans d'intervalle, dans l'emprise de fermes vosgiennes abandonnées, on voit encore la trace de l'influence humaine. La végétation des sous-bois n'est actuellement pas la même en fonction de l'utilisation ancienne des sols (pâtures, champs, jardins, anciennes forêts). En forêt de Haye à côté de Nancy, des chercheurs de l'INRA ont mis en évidence que la présence gallo-romaine a toujours une influence sur la forêt actuelle, à près de deux mille ans d'intervalles.

Depuis 1830, les surfaces boisées ont doublé. Quand vous vous promenez en forêt, vous avez une chance sur deux de vous promener dans quelque chose qui n'était pas de la forêt il y a 200 ans. Quel était alors l'usage de ces sols ?

Les conditions stationnelles peuvent modifier les effets du changement climatique, c'est-à-dire que si vous avez des espèces en limite de station, elles pourront s'en sortir si par exemple le sol est très profond et bien alimenté en eau.

On parle de sécheresse mais on a aussi d'autres phénomènes comme les excès d'eau. Plus de pluies en hiver, cela veut dire qu'en France, il pourrait y avoir des sols sans problèmes actuellement qui deviennent des sols à problèmes (engorgement, asphyxie des racines, etc.), sans compter les forestiers qui risquent de se demander quand ils pourront aller en forêt et débarder.