



HAL
open science

Evolution des sols et changements globaux : deux enjeux majeurs pour la durabilité des écosystèmes forestiers

Gilbert Aussenac, Maurice Bonneau, Guy Landmann, Jean-Pierre Troy

► To cite this version:

Gilbert Aussenac, Maurice Bonneau, Guy Landmann, Jean-Pierre Troy. Evolution des sols et changements globaux : deux enjeux majeurs pour la durabilité des écosystèmes forestiers. *Revue forestière française*, 1996, 48 (Spécial), pp.75-88. 10.4267/2042/26806 . hal-03444254

HAL Id: hal-03444254

<https://hal.science/hal-03444254v1>

Submitted on 23 Nov 2021

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.

ÉVOLUTION DES SOLS ET CHANGEMENTS GLOBAUX : DEUX ENJEUX MAJEURS POUR LA DURABILITÉ DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

G. AUSSENAC - M. BONNEAU - G. LANDMANN - J.-P. TROY (†)

Le débat actuel sur la gestion durable des forêts est principalement centré sur les questions suivantes : la gestion actuelle garantit-elle la durabilité des écosystèmes, faut-il lui apporter des inflexions, et, si oui, lesquelles ? Au cours des siècles écoulés, la gestion forestière des forêts a connu des modifications profondes. Des annonces faites actuellement laissent augurer des évolutions rapides pour les prochaines décennies. À cette échelle de temps, un certain nombre de facteurs échappent cependant au contrôle du gestionnaire ; il s'agit en premier lieu des facteurs socio-économiques qui, par le passé, ont contrarié maints projets, mais aussi de changements environnementaux liés à des phénomènes "globaux" (effet de serre) ou "régionaux" (pollution atmosphérique à longue distance). La figure 1 (p. 76) situe les différents facteurs et les principaux effets connus ou redoutés qui sont abordés dans cet article.

Ces facteurs environnementaux constituent un facteur d'incertitude dans la planification à long terme en matière de la gestion des écosystèmes forestiers. Comment prendre en compte ces incertitudes ? Les connaissances actuelles permettent-elles de formuler des conclusions suffisamment étayées et précises pour que les gestionnaires forestiers les traduisent en termes d'application ? Nous proposons ici une contribution à cette réflexion, en nous appuyant sur les résultats obtenus sur la **fertilité des sols** forestiers et sur l'**impact des changements globaux**. Y sont analysés successivement les risques encourus ou présumés et les démarches scientifiques actuellement engagées pour conduire une évaluation plus précise de ces risques.

LES RISQUES LIÉS À L'ÉVOLUTION DES SOLS ET DES CHANGEMENTS GLOBAUX

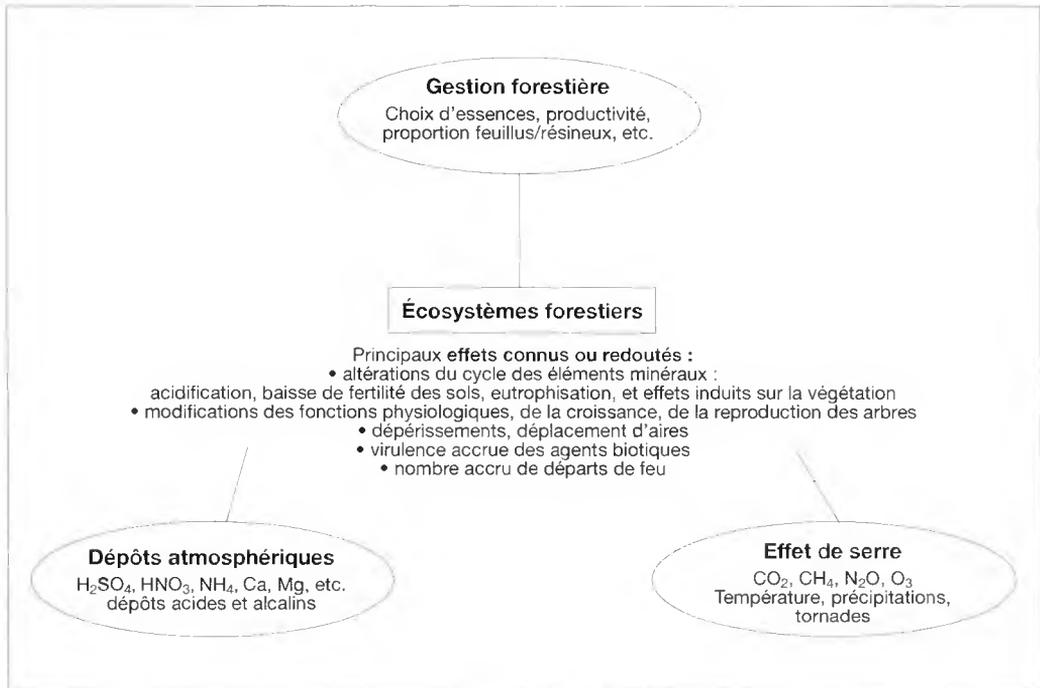
Diminution de la fertilité des sols forestiers

Tous les sols sont soumis à des apports de protons (H^+) d'origine interne (excrétion des racines correspondant à l'absorption de cations, respiration des racines et des microorganismes) ou externe (apports acides par les pluies, apports de NH_4^+ qui, en se nitrifiant dans le sol, génèrent des protons).

Figure 1

**SCHEMA CONCEPTUEL PLAÇANT LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS
AU CENTRE D'UN JEU D'INFLUENCES LOCALES (GESTION FORESTIÈRE)
RÉGIONALE (POLLUTION) ET GLOBALE (EFFET DE SERRE)**

Le gestionnaire forestier peut, selon les choix techniques, exacerber ou atténuer les effets des facteurs environnementaux (pollution, effet de serre)



Plusieurs processus "tampon" s'opposent dans le sol à l'abaissement du pH induit par cette **acidification**, notamment l'altération des minéraux, qui libère du calcium, du magnésium et du potassium (dissolution des calcaires, altération des aluminosilicates), et l'échange des ions.

Si le sol est riche en minéraux facilement altérables, c'est l'altération des minéraux (carbonates, feldspaths plagioclases, ferro-magnésiens, amphiboles) qui joue un rôle central. Le complexe absorbant reste saturé en cations, le stock d'éléments échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) reste à peu près constant et le phosphore assimilable reste abondant. Le bilan des éléments est équilibré ou excédentaire, c'est-à-dire que la libération par altération, à laquelle s'ajoutent les apports externes par l'atmosphère, compensent les pertes de l'écosystème par drainage et immobilisation dans le bois.

En revanche, si le sol est pauvre en minéraux altérables (roches-mères pauvres à l'origine comme les grès à ciment siliceux ou ferrugineux, les granites leucocrates, ou longue évolution pédologique des sols lessivés dégradés ou des sols podzoliques sur alluvions anciennes ou argiles à silex par exemple), c'est l'échange d'ions qui devient le processus tampon dominant. Dans ce cas, le bilan d'éléments assimilables entre les gains par les apports atmosphériques et l'altération des minéraux, et les pertes par drainage et exportation par la sylviculture risque d'être négatif ; le complexe absorbant du sol est de moins en moins bien saturé par Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, de plus en plus occupé par H⁺ et surtout Al³⁺. On connaît de telles situations : dans les Ardennes et dans les Vosges, Dambrine *et al.*

(1995a) ont mis en évidence de tels bilans négatifs (tableau I, ci-dessous), alors même que les réserves du sol en éléments échangeables sont très faibles. Non seulement ces déséquilibres réduisent la production mais, dans certains cas, ils altèrent la santé des peuplements : les carences magnésiennes (et calciques), avec jaunissement et perte de feuillage, observées dans ces régions s'expliquent ainsi.

Tableau I **Bilan du calcium et du magnésium dans trois peuplements d'Épicéa dans les Vosges (Bonhomme, 75 ans ; Aubure, 30 ans) et les Ardennes (Monthermé, 55 ans)**
(Dambrine *et al.*, 1995 a)

Bilan = apports atmosphériques + éléments fournis par l'altération des minéraux
- pertes par drainage - immobilisation dans la biomasse ligneuse.
Les valeurs présentées comme 0,1/0,4 indiquent une incertitude sur l'estimation

Peuplement	Bonhomme		Aubure		Monthermé	
	Ca	Mg	Ca	Mg	Ca	Mg
Apports atmosphériques	4,7/5,5	1,4/1,5	6,1/6,9	1,4/1,5	14,8/20,2	2,6/3,2
Altération	0,8/1,0	0,1/0,4	0,1/0,4	0,4/0,5	0,8/1,8	0,4/3,6
Drainage	7,5	2,6	2,9	1,4	14	3,6
Immobilisation	2,2	0,3	9,9	1,2	6,8	1,1
Bilan	- 4,2/- 1,2	- 1,4/- 1	- 6,3/- 4,9	- 0,8/- 0,6	- 5,2/+ 1,2	- 1,7/+ 2,1

Si l'on essaie d'obtenir, sur des roches-mères pauvres et sans apports de fertilisants, la production la plus élevée possible par un choix d'essences à fort pouvoir d'utilisation des éléments assimilables (par exemple en remplaçant les feuillus d'origine par l'Épicéa ou le Douglas), les bilans seront nécessairement négatifs. L'équilibre ne pourrait se maintenir, à long terme, qu'avec une production plus faible et par une réduction des apports acides. À sylviculture constante, on définit la notion de **charge critique** en acidité comme le niveau des apports acides à ne pas dépasser si l'on souhaite éviter un appauvrissement ultérieur des sols (Sverdrup et Warfinge, 1988). Dans les sols aujourd'hui les plus appauvris sur le plan minéral, il apparaît cependant que même un niveau zéro de pollution ne pourrait enrayer l'appauvrissement, du seul fait du prélèvement, par les peuplements, d'une quantité trop importante d'éléments nutritifs par rapport à la potentialité de la station.

Lorsque les sols sont très acidifiés, c'est aussi sa **fertilité physique et biologique** qui est mise en cause. Des essais d'apport de calcium (essais de Darney, Toutain *et al.*, 1988 ; essai de Fougères) ont montré que des sols acides, par comparaison avec ceux dont le complexe absorbant a été rechargé en calcium, n'hébergent qu'une beaucoup plus faible population de lombriciens. Or la fonction de brassage qu'assure la mésofaune participe de manière essentielle à la minéralisation des litières et contribue à assurer un cycle biologique actif. Dans les cas d'extrême acidification (Devèvre, 1995), une flore délétère, composée par des champignons saprophytes microscopiques résistants à l'aluminium, exerce une action négative sur les possibilités d'absorption des racines, et entraîne une régression de la mycorhization et de la population de *Pseudomonas*, bactéries qui la favorisent.

La culture des résineux augmente l'intensité de l'acidification du fait du captage des aérosols acides et des gouttelettes de nuage par le feuillage permanent, de l'évolution défavorable des humus (au moins en sol déjà acide), et d'une production généralement plus élevée. Elle exagère aussi les éventuels défauts de structure des sols (système racinaire superficiel de l'Épicéa par exemple, qui conduit à un tassement des horizons profonds). Le maintien de la fertilité à long terme nécessiterait donc, dans les sols les plus appauvris, que l'on évite les cultures résineuses, ou qu'on les mélange avec une proportion adaptée de feuillus à enracinement profond et litière facilement dégradable.

L'azote joue aussi un rôle essentiel dans la fertilité puisque c'est l'élément le plus abondamment absorbé. À l'heure actuelle, une part importante des besoins des peuplements est couverte par les apports externes (NO_3^- , principalement lié au secteur des transports, et NH_4^+ provenant en grande partie des élevages intensifs), parfois même excessifs (plus de 20 kg/ha/an). Ils accentuent alors, par déséquilibre de la nutrition minérale, les carences en cations ou phosphore. Ceci n'est pas général ; les Vosges, par exemple, ne sont soumises qu'à des apports modérés de 10-15 kg/ha/an. La notion de charge critique s'étend d'ailleurs aussi à ces apports d'azote. Si des mesures énergiques de dépollution sont prises, l'apport externe sera réduit à quelques kg/ha/an. Après l'établissement d'un nouvel équilibre succédant à un amenuisement du stock d'azote organique par minéralisation, absorption et drainage, cet apport ne permettra qu'une assez faible production, de l'ordre de 10 m^3 /ha/an. Un tel processus prendrait plusieurs dizaines d'années. Il est vrai que cette réduction des apports azotés réduirait aussi la charge acide et, en abaissant la production, diminuerait les risques de carence en Ca et Mg.

L'augmentation progressive du taux de CO_2 dans l'air, dont il sera question ci-après, peut aussi jouer de manière négative sur la fertilité des sols : l'acidification risque de progresser plus vite à cause d'une plus grande consommation de cations correspondant à la stimulation de la photosynthèse. L'augmentation de température par effet de serre peut conduire, par une minéralisation accrue de la matière organique, notamment en hiver, à un amenuisement accéléré des réserves d'azote organique, donc à une limitation de la nutrition azotée, en même temps qu'à une fragilisation de la structure des sols par perte de matière organique. En fait, tout dépend du bilan, inconnu actuellement, entre les gains de carbone par production accrue de litière et les pertes par minéralisation. D'autres exemples d'effets environnementaux jouant dans des sens identiques ou contraires sont présentés dans l'encadré ci-dessous.

Quelques exemples d'effets environnementaux antagonistes, additifs ou synergiques :

- Le remplacement d'un feuillu par un résineux plus productif entraîne une immobilisation accrue d'éléments minéraux, une augmentation des dépôts acides (captation des aérosols et gouttelettes de nuage par les cimes), la constitution d'un humus épais, tous facteurs qui contribuent à une baisse de la fertilité des sols. On peut considérer que ces effets sont plus ou moins additifs.
- À l'heure actuelle, les dépôts azotés entraînent, quand ils dépassent un certain niveau (10-15 kg/ha/an), une eutrophisation (enrichissement en azote) du sol alors que le réchauffement entraînera à terme (par minéralisation de la matière organique et perte de nitrates) un appauvrissement en azote des sols. L'eutrophisation semble encore le phénomène dominant, tout au moins dans le Nord de la France (Thimonier, 1994). La baisse future (quoique lente) des dépôts azotés pourrait renforcer l'effet du réchauffement (effets additifs).
- Le dioxyde de carbone (CO_2) et l'ozone (O_3), deux gaz en augmentation, ont des effets contraires sur le plan physiologique (échanges gazeux). Des compensations ont été observées dans certains dispositifs expérimentaux (Polle *et al.*, 1993) ; ces effets sont (partiellement) antagonistes.
- Les facteurs climatiques jouent un rôle prépondérant dans la répartition de beaucoup de maladies et dans la dynamique de nombreux insectes ravageurs. Les changements climatiques (réchauffement, anomalies climatiques plus fréquentes) pourraient générer des effets synergiques (c'est-à-dire plus qu'additifs).

Risques liés à l'effet de serre

La répartition des forêts et leur pérennité sont déterminées, en dehors de l'action humaine, par les facteurs climatiques. À l'intérieur des grandes régions climatiques, la répartition des espèces forestières est sous la dépendance de facteurs édaphiques et topographiques incluant aussi des aspects microclimatiques. De fait, la forêt tempérée est limitée pour l'essentiel par le froid et la disponibilité en eau. D'autres facteurs climatiques tels le vent, la neige, jouent un rôle secondaire. L'importance et la durée des fluctuations climatiques autour des valeurs optimales définissent, dans une zone géographique déterminée, les risques de dégâts, de dépérissement, et donc la durabilité des écosystèmes forestiers. C'est dans ce contexte qu'il faut analyser les conséquences possibles des augmentations des gaz à effets de serre. Rappelons que la teneur en CO₂ de l'atmosphère est passée de 280 vpm⁽¹⁾ en 1750 à 350 vpm en 1990, et qu'on prévoit une concentration de 700 vpm à la fin du siècle prochain.

L'effet de l'augmentation du CO₂ sur la végétation forestière est complexe à analyser et à prédire dans la mesure où il y a d'une part une action directe sur les phénomènes de transpiration, de photosynthèse et de croissance des arbres, et d'autre part une action "indirecte" par l'intermédiaire des changements climatiques liés à l'accroissement de l'effet de serre.

• Influences "directes" de l'augmentation de CO₂

Ce sont d'abord les échanges de CO₂, d'H₂O et d'énergie entre les feuilles et l'atmosphère qui sont concernés. Ces phénomènes sont susceptibles d'entraîner des modifications complexes dans les processus de production. Les informations sur l'influence de l'augmentation de CO₂ sur la photosynthèse et la croissance des arbres forestiers sont encore partielles. En effet, la plupart des expérimentations ont été effectuées sur des rameaux ou de jeunes plants cultivés en conditions contrôlées et souvent sur de brèves périodes (quelques semaines). Dans ces expérimentations, menées en France au Centre INRA de Nancy et à l'Université d'Orsay, on observe généralement une **augmentation de l'assimilation de CO₂** et une **baisse de la transpiration**. Le fait que, chez beaucoup d'espèces, l'augmentation de concentration en CO₂ de l'air entraîne une diminution de la conductance stomatique, a souvent été considéré comme un facteur de réduction de l'évapotranspiration des couverts végétaux ; en fait, rien n'est moins sûr car, au niveau régional, la transpiration dépend surtout de l'énergie reçue et de l'indice foliaire. Aussi n'est-il pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de considérer le CO₂ comme un antitranspirant lorsqu'on se place à une échelle globale.

Les expérimentations de longue durée (plusieurs mois) font apparaître un effet positif de l'augmentation du CO₂ sur la **croissance**, mais des différences notables existent selon les espèces testées jusqu'ici (Chêne, Pin maritime, Cèdre de l'Atlas, Pin laricio de Corse, Châtaignier) (Kaushal *et al.*, 1988 ; Vivin *et al.*, 1995 ; Picon *et al.*, 1995 ; Vivin *et al.*, 1995), sans qu'il soit possible de les classer pour le moment. Il est donc nécessaire de disposer d'informations précises sur la réponse des principales essences forestières de nos régions. Par ailleurs, il s'avère que, pour certaines espèces, l'effet "fertilisant" du CO₂ est limité dans le cas de sols à fertilité faible.

L'augmentation de concentration en CO₂ pourra avoir d'autres effets, notamment des modifications des **processus de croissance, de floraison, de fructification et de régénération des peuplements**. En effet, la capacité de croissance végétative et reproductrice d'une plante dépend certes de la disponibilité en assimilats, mais aussi de la structuration spatio-temporelle des organes remplissant ces fonctions : vitesse d'apparition, nombre, masse, disposition dans l'espace, sénescence de ces organes.

À l'heure actuelle, on n'a pas la preuve que l'augmentation de concentration du CO₂ dans l'atmosphère soit directement à l'origine des augmentations de croissance observées dans diverses régions

(1) vpm : volume par million.

de l'hémisphère Nord, notamment dans les récentes études dendroécologiques françaises (Becker *et al.*, 1995). En effet, les rares résultats sur les conséquences d'une augmentation de la concentration préindustrielle de CO₂ à la concentration actuelle doivent être confirmés, et d'autres paramètres (dépôts azotés, climat, sylviculture) sont susceptibles d'expliquer en partie ces tendances. Dans le cas du Pin à crochets dans les Pyrénées françaises (Dupouey *et al.*, non publié) et du Pin cembro dans les Alpes suisses (Nicolussi *et al.*, 1995), le nombre de causes potentielles est restreint puisque les peuplements étudiés poussent hors compétition, et que les dépôts azotés sont probablement très faibles. Les éventuelles dérives climatiques et l'augmentation des concentrations de CO₂ sont, dans de telles situations, les causes les plus plausibles.

Ce dernier exemple nous rappelle qu'il est délicat d'analyser l'augmentation de CO₂ séparément des autres facteurs de l'environnement. Les fonctions physiologiques des arbres forestiers sont, en dehors du CO₂, largement influencées par des variables climatiques comme le déficit hydrique, qui se traduit au niveau des feuilles par une régulation stomatique. Ainsi, si l'accroissement en CO₂ de l'air est associé à une diminution de l'humidité, l'augmentation de photosynthèse pourrait être finalement limitée, et, dans certaines conditions, les effets climatiques négatifs pourraient même prendre le pas.

• *Influences possibles des changements climatiques sur l'évolution de la végétation forestière*

La prévision des changements climatiques repose sur des modèles de circulation générale de l'atmosphère. En l'état actuel des connaissances (IPCC, 1995), un doublement de la teneur préindustrielle en CO₂ entraînerait une augmentation moyenne de température à l'échelle de la terre située entre 1,5 et 4,5 °C. De fait, de grandes incertitudes existent dans la modélisation de la température future de la terre, en particulier au niveau de l'influence des nuages et de l'albedo des glaces. Enfin, le rôle des océans est incertain. Les modèles suggèrent aussi que l'accroissement le plus important des températures interviendrait aux hautes latitudes en automne et en hiver. Les latitudes moyennes et moyennement continentales seraient surtout concernées par une sécheresse estivale. Les modèles indiquent aussi une évolution vers une plus grande hétérogénéité interannuelle, notamment au plan des précipitations et de la violence des vents.

Au total, on s'acheminerait vers des caractéristiques climatiques (sécheresses, inondations, tempêtes) plus défavorables au développement et à la pérennité des forêts : c'est ainsi qu'on prévoit, dans le Sud de l'Europe, à l'horizon 2020, un accroissement de l'ordre de 2-3 °C, un accroissement des précipitations hivernales, mais une baisse de 5 à 15 % en été, avec une baisse de disponibilité en eau des sols de 10 à 20 %. Pour le moment, les modèles de prédiction des changements climatiques (Shugart *et al.*, 1987 ; Warrick *et al.*, 1987) ne peuvent pas fournir des informations précises sur la structure réelle des futurs climats avec une résolution spatiale (niveau régional) et temporelle (niveaux saisonnier et interannuel) qui serait pertinente sur un plan écologique et pour les gestionnaires. Aussi n'envisagerons-nous ici que les influences possibles des modifications **générales** des régimes thermiques et pluviométriques.

• *Rôle d'une modification des régimes thermiques*

Dans les populations naturelles adaptées aux conditions climatiques existantes, le débourrement des arbres est déterminé par le cycle annuel de la **température** qui conditionne le développement des bourgeons. Pendant la période de repos automno-hivernale, une exposition plus ou moins longue à des températures comprises entre - 5 °C et - 10 °C est nécessaire pour lever la dormance des bourgeons. Le développement de ces derniers va alors dépendre de l'augmentation des températures. Les risques importants de dégâts dus aux **gelées tardives** ne se rencontrent pas uniquement dans les zones les plus froides, mais concernent aussi des zones à climats plus doux, océaniques ou méditerranéens. Certaines espèces, comme le Sapin pectiné et le Sapin de Céphalonie ou certains écotypes, se trouveraient tout à fait inadaptées (débourrement trop précoce) à certaines zones climatiques, où ils subiraient de sérieux dommages (Aussenac, 1973).

Face aux prévisions de changement climatique, on peut se demander quelles seraient les conséquences d'une augmentation de température au plan des dégâts de gelées tardives et du maintien de plusieurs espèces dans certaines régions. La réponse n'est pas facile car il s'agit à la fois d'estimer l'effet de la modification climatique sur la précocité du débourrement et sur les risques de gelées au printemps. En effet, si l'on peut "facilement" simuler l'effet d'un réchauffement hivernal modéré sur le développement des bourgeons, il est beaucoup plus difficile de prévoir l'évolution des phénomènes pour ce qui concerne la fréquence et l'importance des gelées tardives dont le déterminisme est lié à différents facteurs météorologiques (caractéristiques des masses d'air, bilan radiatif nocturne, importance du vent). Cannell et Smith (1986) et Hanninen (1991) ont abordé cette question et montrent que, très probablement, l'augmentation de température devrait se traduire par un accroissement des risques de dégâts au printemps en Grande-Bretagne et en Finlande. En France, on peut aussi penser que le risque de dégâts serait accru sans toutefois pouvoir préciser les zones les plus concernées. Pour les peuplements naturels, importants en surface en France, la vitesse d'augmentation de températures risque d'être trop rapide pour permettre une adaptation de la structure génétique de ces populations.

En été, les températures élevées ont généralement des effets pénalisants au-delà de 35-40 °C, mais on mesure mal quel pourrait être l'impact des changements climatiques sur ce plan.

En automne et en hiver, l'augmentation des températures pourrait rendre, paradoxalement, certaines espèces ou provenances plus sensibles aux coups de froids hivernaux. En effet, la tolérance des tissus végétaux au froid est conditionnée par la baisse des températures en automne. Ainsi, un durcissement insuffisant combiné à un type de climat caractérisé par des baisses importantes et rapides de température pourrait aboutir à des situations voisines de celles de l'hiver 1985 qui a provoqué des dégâts de froid (Aussenac et Pardé, 1985). Une augmentation de température pourrait favoriser des remontées en altitude de certaines espèces, cantonnées actuellement à basse altitude par des limitations thermiques, mais ces remontées seront toutefois limitées par le vent. Des remontées en latitude sont aussi envisageables. Le Pin maritime pourrait par exemple être utilisé plus au nord, mais il faudrait toujours tenir compte de la fréquence de froids exceptionnels. Il faut enfin remarquer qu'une augmentation généralisée des températures en période hivernale se traduirait par un accroissement de la photosynthèse hivernale (Guehl *et al.*, 1985) (espèces à feuilles persistantes), et une augmentation de la production de bois des zones tempérées froides et des zones boréales.

• Conséquences d'une modification des régimes pluviométriques

La **sécheresse** (en combinaison avec divers facteurs aggravants, fortes températures, vent, etc.) constitue l'autre facteur décisif pour la vie des arbres. Le fonctionnement physiologique de l'arbre est fréquemment perturbé par des déficits hydriques limités mais ce sont les épisodes secs de longue durée qui entraînent le dépérissement et finalement la mort des arbres. La modification du régime hydrique, en interaction avec les modifications des autres paramètres (accroissement de la concentration en CO₂ et température), devrait être l'élément le plus déterminant à moyen terme pour les arbres et les écosystèmes forestiers (Aussenac et Guehl, 1994 ; Becker, 1989).

Dans une hypothèse d'augmentation modérée de température (1 à 2 °C), si le régime hydrique est satisfaisant, on ne devrait pas assister à de fortes perturbations pour les espèces constituant la forêt française actuelle. Il est en effet d'observation courante que des espèces septentrionales peuvent pousser convenablement dans les régions méridionales si les conditions d'alimentation en eau sont favorables. Des déficits hydriques plus importants et plus fréquents, couplés à un réchauffement modéré devraient favoriser certaines espèces limitées dans les conditions actuelles, par exemple le Cèdre, espèce résistante à la sécheresse, adaptée aux climats de transition méditerranéens-atlantiques (Aussenac, 1984) qui pourrait étendre ses zones potentielles vers le nord de la France. Inversement, les espèces sociales tant feuillues que résineuses qui constituent les forêts de produc-

tion de la France moyenne et septentrionale pourraient être en difficulté dans un pareil schéma, notamment sur les sols superficiels ; par contre, les Pins verraient s'agrandir leur aire de répartition, en raison de leurs caractéristiques écophysiologicals en général mieux adaptées à ce type de configuration écologique.

Les variations sur le plan de l'état hydrique des arbres et, en conséquence, de la photosynthèse et de la croissance vont dépendre de la capacité de stockage de l'eau dans les sols. Dans les régions septentrionales ou en montagne, les forêts occupent actuellement avec succès des surfaces importantes sur des sols superficiels, grâce à des pluies fréquentes et suffisantes pendant l'été. Une baisse importante et généralisée des précipitations estivales entraînerait une augmentation des contraintes hydriques qui se traduirait par des dépérissements et une disparition progressive de la forêt dans les zones à réserve hydrique faible. Le schéma serait alors celui qui est actuellement observé en région méditerranéenne : forêts dans les sols profonds ou fonds de vallées, les versants Nord et végétation arbustive ailleurs. Les effets des sécheresses répétées des deux dernières décennies permettent d'entrevoir l'évolution à attendre si les prévisions des modèles climatiques se vérifient.

Dans l'hypothèse de déficits pluviométriques importants, on pourra, dans un premier stade, paradoxalement, observer des contraintes et des dégâts plus importants chez les arbres des zones normalement bien alimentées en eau que chez les arbres installés sur sol superficiel et subissant déjà de façon chronique des périodes plus ou moins longues de sécheresse. Ces derniers présentent en effet une biomasse foliaire réduite, en équilibre avec un système racinaire adapté à des régimes hydriques peu favorables ; au contraire, les arbres des zones actuellement favorables sont caractérisés par une biomasse aérienne très importante à forte capacité évapotranspiratoire, et donc totalement inadaptée à une situation de sécheresse chronique. Ces arbres devront réduire leur biomasse et rééquilibrer leur fonctionnement hydrique global sous peine d'une disparition rapide. Dans un tel contexte, les arbres préexistants finiraient par disparaître, mais l'espèce considérée pourrait se maintenir avec des arbres ayant une croissance limitée ; par contre, dans les zones trop superficielles, l'espèce concernée pourrait alors disparaître.

En conclusion, sur la base des informations disponibles, on peut penser que les grandes essences sociales qui constituent la base des forêts de production de la moitié Nord de la France pourraient être concernées par des contraintes hydriques importantes de nature à mettre en cause leur niveau de production et même leur existence (tableau II, ci-dessous). Pour certaines essences à feuilles persistantes, des hivers doux seraient de nature à compenser en terme de photosynthèse les limitations estivales. Globalement les Cèdres, les Sapins méditerranéens, les Pins sylvestres, les Pins noirs,

Tableau II **Espèces favorisées ou défavorisées par les changements climatiques (sécheresses, radoucissement hivernal) dus à l'effet de serre (classement provisoire)**

Espèces affectées	Espèces favorisées
Chêne pédonculé (sS)	Chêne pubescent (F) (rS)
Chêne sessile (sS)	Chêne vert (F) (rS)
Hêtre (sS)	Cèdre (rS)
Épicéa (sS)	Sapins méditerranéens (rS)
Sapin pectiné (sS)	Pins noirs (rS), Pin sylvestre (rS)
Douglas (sS)	Pin maritime (F) (rS), Pin d'Alep (F) (rS)

(sS) : sensibilité à la sécheresse ; (rS) : résistance à la sécheresse ; (F) : sensibilité au froid.

pourraient alors constituer localement des solutions de remplacement, au moins pour ce qui concerne les reboisements ; enfin le Pin maritime, le Pin d'Alep, le Chêne pubescent, actuellement limités par les minima thermiques hivernaux, mais capables de supporter des déficits hydriques importants, pourraient voir augmenter la part des surfaces qu'ils occupent actuellement.

En dehors des effets thermique et hydrique, d'autres paramètres sont à prendre en considération : ainsi, par exemple, les modèles prévoient l'augmentation de la **vitesse du vent** avec une fréquence accrue des **tornades** ; si cette prévision se confirmait, il est certain que ce phénomène serait de nature à compromettre la production forestière dans les massifs montagneux où l'on sait que la vitesse du vent constitue déjà un facteur limitant au-dessus d'une certaine altitude, fonction de la hauteur moyenne du massif, et à augmenter ailleurs les risques de chablis. Enfin, il faut compter avec l'extension potentielle (indépendamment du succès des mesures de lutte) des **incendies de forêts**, éventuellement couplés à une érosion importante.

Enfin, il faut mentionner un risque mal cerné mais potentiellement très important, à savoir une modification éventuelle des **relations arbres / insectes ravageurs et champignons**. Les mortalités élevées, occasionnées récemment dans la moitié Nord de la France par le Bombyx disparate (*Lymantria dispar*) dans des chênaies affaiblies par des sécheresses répétées, pourraient préfigurer ce type d'effets, sans, bien sûr, qu'il soit possible d'y reconnaître la "signature" de changements climatiques déjà avérés. Autre exemple, un champignon racinaire comme *Phytophthora cinnamomi* pourrait voir son aire de répartition étendue en cas de réchauffement (Brasier et Scott, 1994).

VERS UNE ÉVALUATION PLUS PRÉCISE DES RISQUES

Un certain nombre d'actions de recherches et de suivi des écosystèmes, actuellement en cours, fourniront à court ou moyen terme des éléments de réponse aux questions évoquées plus haut. Globalement, le domaine de la fertilité des sols forestiers est mieux cerné que celui des effets des changements climatiques. Pourtant, même dans le premier domaine, des éléments sont à approfondir avant d'appliquer systématiquement des remèdes pour contrecarrer les évolutions détectées ou soupçonnées.

Opérations destinées (ou contribuant) à évaluer les risques de perte de fertilité des sols

Plusieurs études récentes dans le Nord-Est ont montré une baisse rapide de certains éléments échangeables dans des sols forestiers acides (Landmann, 1995). La question n'est donc plus de savoir si de telles évolutions existent, mais où et à quelle vitesse elles se produisent. Parmi les actions pertinentes à cet égard, mentionnons :

— une **photographie** de la richesse chimique des sols français (540 points, maille 16 x 16 km), permettant de localiser les sols les plus désaturés, sera disponible sous peu dans le cadre de l'**inventaire écologique du réseau européen de surveillance des forêts**, financé par la Commission européenne et le ministère de l'Agriculture (réalisation DSF/INRA) ;

— un instrument de détection des variations futures de fertilité des sols forestiers a été mis récemment en place dans le cadre du **réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers** (RENECOFOR) ⁽²⁾ géré par l'ONF. Ce dispositif, financé par la Commission européenne, les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, et l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), est constitué de 100 placettes (environ 0,5 ha de peuplement homogène) représentant les principales essences forestières et les principales conditions écologiques françaises. On dispose, pour chacune des 100 placettes, d'analyses complètes de sol (25 points, 4 à 5 horizons

(2) Ce réseau, géré par l'ONF, a été mis en place en application de la Résolution S1 de la première Conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe (Strasbourg, 1990).

par placette) qui seront en principe renouvelées tous les 10 ans. Parallèlement, des analyses foliaires annuelles devraient permettre la détection d'une éventuelle dérive à long terme de l'alimentation minérale ;

— les études sur les **charges critiques** de polluants, financées par l'ADEME et le ministère de l'Environnement, visent, à l'issue d'une phase pilote conduite sur les Vosges, à situer, à l'échelle de la France, les zones vulnérables à une action des dépôts atmosphériques acides et les zones où la désaturation des sols se poursuit (réalisation : INRA et CNRS) ;

— les études visant à établir **des bilans d'éléments minéraux**, évoquées plus haut, permettent, quand elles sont complétées par la modélisation, d'envisager les effets de différents niveaux de retombées atmosphériques et différentes modalités de gestion sylvicole (Dambrine *et al.*, 1995b). À moyen terme, des bilans pourront être calculés sur les placettes du réseau RENECOFOR (au nombre de 17 actuellement) pour lesquelles les dépôts atmosphériques et la perte par drainage sont disponibles.

Outre les risques "à sylviculture constante" liés aux dépôts atmosphériques, les risques liés à une intensification de la gestion sont évalués notamment dans le cadre de :

— l'étude, financée par le ministère de l'Agriculture, le GIP ECOFOR⁽³⁾, l'ONF et la Commission européenne, d'une chrono-séquence (trois peuplements d'âge croissant) de Douglas dans le Beaujolais. Les résultats provisoires suggèrent que le maintien à long terme de la fertilité des sols sous Douglas pourrait nécessiter une restitution minérale (Ranger *et al.*, 1995) (réalisation : INRA) ;

— l'étude de la pinède landaise lancée dans le cadre du GIP ECOFOR, financée par les ministères chargés de la Forêt et de la Recherche et des fonds propres du GIP. Ce programme comporte une analyse des risques liés à la monoculture et à l'intensification de la sylviculture (amélioration génétique, travail intense et répété du sol, fertilisation, etc.) qui restreignent encore la biodiversité naturelle et pourraient augmenter l'impact de stress climatiques ou autres (réalisation : INRA) ;

— l'étude, en cours de lancement dans le cadre du GIP ECOFOR, financée par l'ONF, d'une chrono-séquence (cinq peuplements d'âge croissant) de Hêtre en forêt de Fougères (Bretagne), visant à mieux comprendre le rôle du milieu et de la sylviculture sur le fonctionnement du cycle du carbone, de l'azote et des éléments minéraux (réalisation en phase de lancement : INRA et ONF).

Opérations destinées (ou contribuant) à évaluer les impacts des changements globaux

Alors que le problème du maintien de la fertilité des sols est, au moins dans certaines régions, déjà un sujet d'actualité, les effets des changements globaux s'inscrivent dans un contexte plus prospectif, la question de savoir si ces changements et leurs effets sont déjà perceptibles n'étant pas encore claire. Un certain nombre d'actions de suivi et de recherche s'inscrivent de façon explicite dans cette perspective, ou y contribueront :

— les observations réalisées par le **Département de la Santé des Forêts**, principalement par son réseau de "correspondants-observateurs", permettent, depuis 1989, une surveillance "semi-quantitative" des parasites et des ravageurs ; l'étude de la liaison des problèmes phytosanitaires avec les circonstances climatiques et écologiques devrait permettre, à terme, de tester les hypothèses, très spéculatives en l'état actuel des connaissances, sur le rôle des facteurs entomologiques et pathologiques en relation avec les changements globaux ;

(3) Ce GIP, dont la création récente (1993) concrétise la Résolution 6 de la Conférence ministérielle de Strasbourg (décembre 1990), a pour objet d'animer et de coordonner des recherches générales sur le fonctionnement et les dysfonctionnements des écosystèmes forestiers. Il est dans une certaine mesure, et sur un éventail de préoccupations plus large, l'héritier du programme DEFORPA. À l'heure actuelle, il y a cinq membres (Cemagref : la recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement ; CNRS : Centre national de la Recherche scientifique ; ENGREF : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts ; INRA : Institut national de la Recherche agronomique ; MNHN : Muséum national d'Histoire naturelle ; ONF : Office national des Forêts), auxquels viendront s'ajouter prochainement le CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche agronomique pour le Développement) et l'ORSTOM (Institut français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération).

— le **réseau européen** de surveillance de l'état sanitaire des forêts et le **réseau RENECOFOR**, précédemment évoqués, constituent des supports de choix pour un examen des modifications à moyen et long terme d'un certain nombre de caractéristiques fondamentales des écosystèmes forestiers ; outre l'évolution des sols et de la nutrition minérale, le réseau RENECOFOR pourrait se prêter à l'examen des questions relatives aux rythmes de croissance, de phénologie, de floraison, de fructification, etc. ;

— le projet, à l'étude, visant à associer, à un certain nombre de placettes RENECOFOR choisies pour une insuffisance d'alimentation minérale, des placettes fertilisées de façon adéquate, dans l'optique d'évaluer si l'alimentation minérale des arbres augmente leur résistance à des stress externes, notamment climatiques ;

— certains volets du programme d'étude des **dysfonctionnements en hêtraie** coordonné par le GIP ECOFOR, financé principalement par le ministère chargé de la Recherche et le GIP ; on peut signaler notamment une analyse du rôle des périodes sèches dans l'apparition de certains dépérissements en 1992-93 (INRA Nancy) et une analyse, sur la base de plusieurs dispositifs anciens de fertilisation, du rôle de la fertilité des sols sur la résistance aux sécheresses (INRA Nancy) ;

— une étude prospective, associant Météo France et l'INRA Nancy, vise à évaluer, à l'aide d'un modèle de bilan hydrique, l'intensité future des stress hydriques à partir des prévisions climatiques à long terme ;

— les recherches sur les impacts physiologiques d'une augmentation des concentrations de CO₂, seule ou en combinaison avec des stress hydriques et nutritionnels, seront poursuivies et amplifiées, dans un contexte pluri-institutionnel (INRA, CNRS, Universités), avec des financements multiples (notamment communautaires), grâce à de nouveaux équipements (tunnels) prochainement implantés au Centre INRA de Nancy (Champenoux) ; outre l'examen de la réponse d'un certain nombre d'essences forestières à l'augmentation de CO₂ et des recherches sur les mécanismes en jeu, l'examen des conséquences de l'augmentation historique (de 280 à 350 vpm) du niveau de CO₂ est prévu.

Étant donné les progrès de la recherche fondamentale et de la modélisation, on peut se demander s'il est indispensable de mettre en œuvre et de maintenir à long terme des réseaux d'observations, ceci d'autant que leur coût est élevé. En fait, la communauté scientifique salue l'avènement de tels réseaux, en particulier parce que les meilleurs modèles demandent, pour être validés, des données de terrain fiables, et, si possible, disponibles sur de longues durées. En outre, certains processus, notamment les processus lents, épisodiques ou aléatoires, multifactoriels, décalés et hautement variables (Fournier, *in* Dobremez, 1995) restent très difficiles à modéliser.

Les **dépérissements** sont un exemple d'événements brutaux (à l'échelle de la vie des peuplements), relativement rares (pour une essence donnée), et difficiles à prévoir. Certes, l'étude des relations entre les stress climatiques, plus particulièrement hydriques, et la croissance et la vitalité des arbres progresse, autorisant des perspectives de simulation des effets des changements climatiques. Mais force est de reconnaître que si on arrive à décrypter, *a posteriori*, les ressorts d'un dépérissement, il reste à comprendre la distribution des forêts touchées par les événements successifs. Outre une surveillance particulière aux limites d'extension des aires des différentes essences, l'identification des "réservoirs de dépérissement" (Landmann, 1993), déterminés en particulier par les conditions de station et de peuplement (importance de l'histoire sylvicole), paraît un enjeu important.

EN CONCLUSION : ACTIONS ENVISAGEABLES POUR CONTRECARRER LES ÉVOLUTIONS CONSTATÉES OU SOUPÇONNÉES

Cet article ne vise pas une analyse détaillée des mesures envisageables pour prévenir ou atténuer les conséquences de l'effet de serre et de la pollution atmosphérique à moyenne et longue distance.

En conclusion, un certain nombre d'orientations sont listées ici pour souligner la nécessité d'une relation forte entre la recherche sur ces phénomènes et la gestion forestière, dans la perspective d'une gestion durable des écosystèmes durables :

— à court terme, on disposera des connaissances suffisamment étayées pour justifier la définition et la mise en œuvre d'une véritable politique de **restauration des sols forestiers acides** ;

— dans un certain nombre de cas, un **changement d'essence**, souvent conforme aux principes généraux d'une bonne adaptation des essences aux stations, mais parfois en rupture par rapport aux pratiques actuelles, devra être envisagé. Cela peut conduire par exemple :

- à renoncer à des essences trop productives eu égard à la richesse des sols,
- à préférer des essences plus rustiques, notamment par leurs exigences hydriques,
- à utiliser des génotypes à débourrement plus tardif pour limiter le risque de gelée printanière (mais on sait que certaines espèces, *Abies alba* par exemple, sont caractérisées par une faible variabilité génétique de ce caractère) ;

— l'augmentation de la croissance, depuis un siècle, participe très vraisemblablement à la fragilisation des peuplements face aux sécheresses, en augmentant la compétition pour l'eau. Déjà en l'état actuel, et plus encore si cette tendance devait persister, une **augmentation raisonnée des récoltes de bois** doit être envisagée.

Rappelons par ailleurs qu'une réflexion approfondie a été menée sur le rôle que pourraient jouer les forêts dans le ralentissement de l'augmentation de CO₂ (cf. le "Plan national de lutte contre le réchauffement du climat"). Le groupe interministériel sur l'effet de serre a documenté les différents aspects du problème et conclu que, sur un plan économique, toute mesure qui concourrait à fixer une tonne supplémentaire de carbone atmosphérique à un coût inférieur à 1 500 F serait rentable. Toutefois, le bilan du carbone reste complexe : telle mesure d'entretien ou d'amélioration de la fertilité du sol concourt à augmenter la production, donc à fixer du carbone supplémentaire, mais en même temps favorise la minéralisation des humus et donc dégage du gaz carbonique.

Soulignons enfin que les problèmes analysés dans cet article ne sont pas les seuls à avoir une importance "globale" ou "régionale". Une analyse exhaustive devrait inclure en particulier les problèmes liés à l'augmentation progressive de l'ozone troposphérique et l'augmentation d'UV-B liée à la diminution de l'ozone stratosphérique.

G. AUSSENAC
Unité Écophysiologie forestière
INRA
F-54280 CHAMPENOUX

M. BONNEAU
Unité Écosystèmes forestiers
INRA
F-54280 CHAMPENOUX

G. LANDMANN
Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation
DÉPARTEMENT DE LA SANTÉ DES FORÊTS (DERF)
19, avenue du Maine
F-75732 PARIS CEDEX 15

J.-P. TROY (†)
GIP ECOFOR
15, avenue du Maine
F-75015 PARIS

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC (G.). — Le Cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysologique. — *Bulletin de la Société botanique de France*, vol. 131, *Actualités botaniques*, n° 2/3/4, 1984, pp. 385-398.
- AUSSENAC (G.). — Étude des gelées tardives en relation avec les problèmes de reboisement. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 30, n° 2, 1973, pp. 141-155.
- AUSSENAC (G.). — La Sécheresse de 1976. Influences des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XXX, n° 2, 1978, pp. 103-114.
- AUSSENAC (G.), GUEHL (J.-M.). — Dépérissement et accidents climatiques. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, 1994, pp. 458-470.
- AUSSENAC (G.), PARDE (J.). — Forêts, climats et météores. — *Revue forestière française*, vol. XXXVII, n° spécial "Regards sur la santé de nos forêts", 1985, pp. 83-104.
- BECKER (M.). — Major role of climate on present and past vitality of silver fir in N-E. France. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, 1989, pp. 1110-1117.
- BECKER (M.), BERT (G.-D.), BOUCHON (J.), DUPOUEY (J.-L.), PICARD (J.-F.), ULRICH (E.). — Long-term changes in forest productivity in northeastern France : the dendroecological approach. In : *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountain* / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer Verlag, 1995. — pp. 143-156.
- BRASIER (C.M.), SCOTT (J.K.). — European oak declines and global warming : a theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. — *Bulletin OEPP/EPPQ Bulletin*, vol. 24, 1994, pp. 221-232.
- CANNELL (M.G.R.), SMITH (R.I.). — Climatic warming, spring budburst and frost damage on trees. — *Journal of Applied Ecology*, vol. 23, 1986, pp. 177-191.
- CHOISNEL (E.), JACQ (V.), GUEHL (J.-M.), AUSSENAC (G.). — Simulation de la variabilité de la photosynthèse hivernale du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) dans les conditions climatiques françaises. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 47, n° 5, 1990, pp. 495-508.
- DAMBRINE (E.), BONNEAU (M.), RANGER (J.), MOHAMED (A.D.), NYS (C.), GRAS (F.). — Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway Spruce stands in northeastern France and the Erzgebirge (Czech Republic). In : *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains* / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer Verlag, 1995a. — pp. 233-258.
- DAMBRINE (E.), SVERDRUP (H.), WARFINGE (P.). — Atmospheric deposition, forest management and soil nutrient. In : *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains* / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer Verlag, 1995b. — pp. 259-269.
- DEVÈVRE (O.). — Étude expérimentale du rôle des champignons rhizosphériques dans l'acidification du sol et le jaunissement de l'Épicéa commun *Picea abies* (L. Karst.) dans les Vosges. — Nancy : Université Henri-Poincaré (Nancy I) - UER STB, 1995. — 191 p. + annexes (Thèse).
- DOBREMEZ (J.-F.) (rapporteur). — Les Études écologiques à long terme en France : état de l'art et spécificité française. Ministère de l'Environnement - Comité Ecologie et Gestion du Patrimoine naturel - Comité scientifique sur les problèmes de l'environnement. — Le Bourget-du-Lac : Université de Savoie - Dynamique des Écosystèmes d'Altitude, 1995. — 75 p.
- GUEHL (J.-M.), PICON (C.), AUSSENAC (G.), GROSS (P.). — The interactive effects of elevated CO₂ and drought on growth and transpiration efficiency in two forest tree species differing in their stomatal sensitivity to drought. — *Tree Physiology*, vol. 14, 1994, pp. 707-724.
- GUEHL (J.-M.), VITRY (C. de), AUSSENAC (G.). — Photosynthèse hivernale du Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco) et du Cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti et *Cedrus libani* Loud.), Essai de modélisation à l'échelle du rameau. — *Acta oecologica, Oecologia Plantarum*, vol. 6, n° 20, 1985, pp. 125-146.
- HANNINEN (H.). — Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees ? — *Plant, Cell and Environment*, vol. 14, 1991, pp. 449-454.
- IPCC. — Climate change. The science of climate change. — Contribution of Working Group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.-J. Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, K. Maskell Eds. — Cambridge (UK) : Cambridge University Press, 1995 (ISBN 0-521-564336 Hardback ; 0-521-564360 Paperback).
- KAUSHAL (J.-M.), GUEHL (J.-M.), AUSSENAC (G.). — Differential responses of growth to atmospheric carbon dioxide enrichment in seedlings of *Cedrus atlantica* Manetti and *Pinus nigra* Arn. ssp. *Laricio* var. *Corsicana*. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, 1988, pp. 1351-1358.
- LANDMANN (G.). — Role of climate, stand dynamics and past management in forest decline : A review of ten years of field ecology in France. In : *Forest decline in the Atlantic and Pacific region* / R.F. Hüttl, D. Mueller-Dombois Eds. — Berlin : Springer, 1993. — pp. 18-39.
- LANDMANN (G.). — Forest decline and air pollution effects in the French mountains : a synthesis. In : *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains* / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin, Heidelberg, New-York : Springer Verlag, 1995. — pp. 407-452.
- NICOLUSSI (K.), BORKENSCHLAGER (S.), KÖRNER (C.). — Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. — *Trees*, vol. 19, n° 4, 1995, pp. 181-189.
- PICON (C.), GUEHL (J.-M.), AUSSENAC (G.). — Growth dynamics, transpiration and water-use efficiency in *Quercus robur* plants submitted to elevated CO₂ and drought. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, n° 2/3, 1996, pp. 431-446.

- POLLE (A.), PFIRRMANN (T.), CHAKRABARTI (S.), RENNENBERG (H.). — The effects of enhanced ozone and enhanced carbon dioxide concentrations on biomass, pigments and antioxidative enzymes in spruce needles (*Picea abies* L.). — *Plant, Cell and Environment*, vol. 16, 1993, pp. 311-316.
- RANGER (J.), MARQUES (R.), COLIN-BELGRAND (M.), FLAMMANG (N.), GELHAYE (D.). — The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. — *Forest Ecology and Management*, vol. 72, 1995, pp. 167-183.
- SHUGART (H.H.), ANTONOVSKY (M.Y.A.), JARVIS (P.G.), SANDFORD (A.P.). — CO₂, climatic change and forest ecosystems. *In* : The greenhouse effect climatic change and ecosystems / B. Bolin *et al.* Eds. — pp. 475-521. — New-York : Wiley, 1986. — XXXI-541 p.
- SVERDRUP (H.), WARFINGE (P.). — Assessment of critical loads of acid deposition on forest soils. *In* : Critical loads for sulfur and nitrogen / J. Nilsson, P. Grennfelt Eds. — Copenhagen : Nordic Council of Ministers, 1988. — Miljørapport, vol. 15, pp. 131-149.
- THIMONIER (A.). — Changements de la végétation et des sols en forêt tempérée européenne au cours de la période 1970-1990 : rôle possible des apports atmosphériques. — Université de Paris-Sud ; INRA-Centre de Nancy, 1994. — 102 p. + annexes (Thèse).
- TOUTAIN (F.), DIAGNE (A.), LE TACON (F.). — Possibilités de modification du type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. — *Revue forestière française*, vol. XLI, n° 2, 1988, pp. 99-107.
- VIVIN (P.), GUEHL (J.-M.), CLÉMENT (A.), AUSSENAC (G.). — The effects of elevated CO₂ and water stress on whole plant CO₂ exchange, carbon allocation and osmoregulation in oak seedlings. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, n° 2/3, 1996, pp. 447-459.
- VIVIN (P.), GROSS (P.), AUSSENAC (G.), GUEHL (J.-M.). — Whole-plant CO₂ exchange, carbon allocation and growth in *Quercus robur* seedlings exposed to elevated CO₂. — *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 33, 1995, pp. 201-221.
- WARRICK (R.A.), SHUGART (H.H.), ANTONOVSKY (M.Y.A.), TARRANT (J.R.), TUCKER (C.J.). — The effects of increased CO₂ and climatic change on terrestrial ecosystems. *In* : The greenhouse effect climatic change and ecosystems / B. Bolin *et al.* Eds. — pp. 475-521. — New-York : Wiley, 1986. — XXXI-541 p.