



HAL
open science

Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable.

Denis Loustau, Didier Bert, Pierre Trichet

► To cite this version:

Denis Loustau, Didier Bert, Pierre Trichet. Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable.. *Revue forestière française*, 1999, 51 (5), pp.571-591. 10.4267/2042/5467 . hal-03443555

HAL Id: hal-03443555

<https://hal.science/hal-03443555>

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.

FONCTIONNEMENT PRIMAIRE ET PRODUCTIVITÉ DE LA FORÊT LANDAISE : IMPLICATIONS POUR UNE GESTION DURABLE

D. LOUSTAU – D. BERT – P. TRICHET

La mise en œuvre d'une gestion durable des forêts est aujourd'hui au cœur des préoccupations de la communauté forestière scientifique, française et européenne. Elle recouvre différents aspects touchant à l'écologie, la génétique, la sylviculture et l'économie forestière. Nous abordons dans ce qui suit les aspects liés au fonctionnement biologique des écosystèmes forestiers à sylviculture intensive, dont le fonctionnement primaire est fortement conditionné par l'action humaine. Notre analyse porte plus spécifiquement sur le cas du massif des Landes de Gascogne qui représente un ensemble forestier artificiel, jeune, unique en Europe par sa superficie et sa capacité de production. L'appréciation de la "durabilité" de la gestion forestière de cet ensemble pose un certain nombre de problèmes spécifiques : on ne peut en effet pas parler ici de la conservation d'un écosystème forestier **climacique**, c'est-à-dire qui évolue avec son environnement par ses propres processus d'adaptation, en dehors du cas de certaines réserves pouvant présenter un intérêt historique et botanique.

En fonction de leur situation géographique, les peuplements de Pin maritime landais sont gérés selon des objectifs soit de protection et récréation (forêt domaniale littorale), ou de production (forêt intérieure de production, majoritairement privée). Dans tous les cas, les itinéraires techniques sylvicoles mis en œuvre permettent actuellement d'atteindre ces objectifs de façon satisfaisante mais ils affectent profondément le cycle biologique de la forêt. De surcroît, la sylviculture du Pin maritime évolue continuellement (Lesgourgues *et al.*, 1997) mais on ne dispose pas toujours du recul nécessaire pour apprécier ses effets à long terme sur le milieu. Nous avons voulu considérer dans cet article la gestion à long terme du potentiel de production forestière de cet écosystème, en tant que modèle de forêt monospécifique à sylviculture intensive.

Ce potentiel productif repose sur deux composantes : le peuplement végétal et son milieu. La question du matériel végétal et de la gestion de la base génétique de l'espèce forestière principale de ce massif, le Pin maritime, n'est pas traitée ici. Nous traitons ici de la deuxième composante de la productivité du massif landais, la gestion du milieu. Dans cet article, nous dressons l'état actuel du biotope forestier landais, des ressources forestières de ce massif et des facteurs limitant la production actuelle. Nous nous attachons dans un deuxième temps à donner les éléments actuel-

lement connus sur l'évolution possible du milieu à long terme, en particulier sous l'action du changement climatique. À partir de ce scénario, nous tenterons d'apprécier l'évolution des facteurs limitant la productivité forestière du massif landais et d'identifier les indicateurs de cette évolution. Nous comparerons également, à titre de référence, la gestion actuelle du massif forestier landais aux indicateurs de gestion durable établis par la Conférence ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe (1996) qui donne une première base générale d'évaluation. Tout au long de cette synthèse, nous restons volontairement dans le cadre d'une forêt monospécifique de Pin maritime. Nous pensons que les principales conclusions de notre étude, qui se base sur une analyse des composantes de la production forestière primaire, sont relativement générales et pourraient rester valides pour d'autres espèces à croissance rapide, voire pour d'autres types de sylviculture.

ÉTAT ACTUEL DE L'ÉCOSYSTÈME FORESTIER LANDAIS

Le biotope

La topographie du plateau landais présente une pente faible, nord-est – sud-ouest, les seuls reliefs étant les cordons de dunes littorales et les anciennes dunes continentales qui constituaient l'habitat forestier primitif. Le drainage latéral très lent du plateau landais est à l'origine de la présence d'une nappe phréatique superficielle. Dans les zones les plus basses, le niveau phréatique affleure à la surface du sol en hiver et descend vers 1 à 2 m de profondeur en été.

Les sols sont formés sur un dépôt fluviomarin du Tardiglaciaire (11 000 BP) remanié, essentiellement quartzeux et de texture sableuse (médiane de 0,3 mm). Sur ce dépôt, plusieurs sols podzologiques acides se sont différenciés suivant un continuum allant des podzols humiques hydromorphes superficiels dans les zones les plus humides, au podzol humique à horizon A₂ différencié dans les zones mieux drainées. Ils présentent une très faible capacité de rétention en eau et nutriments minéraux. Les stocks de matière organique et de nutriments accumulés dans ces sols sont en moyenne plutôt faibles pour un sol forestier, même dans les sols à podzol humique. En l'absence d'argile, cette matière organique du sol joue cependant un rôle fondamental dans la rétention et les échanges d'eau et d'éléments minéraux entre le sol et la plante.

Le climat présente des contrastes saisonniers de pluviométrie, température et rayonnement faisant apparaître régulièrement un déficit hydrique en été (-120 mm environ) et un excédent en hiver (+ 200 mm) (Choisnel *et al.*, 1987). Cette sécheresse estivale et l'engorgement hivernal des sols sont des facteurs limitants importants sur l'impact desquels nous reviendrons en détail plus loin. Les risques de gelée (35 jours par an en moyenne) interdisent actuellement l'expansion naturelle des variétés de Pin maritime intolérantes à des basses températures, comme cela a été démontré par la mortalité des variétés méridionales de Pin maritime en 1985.

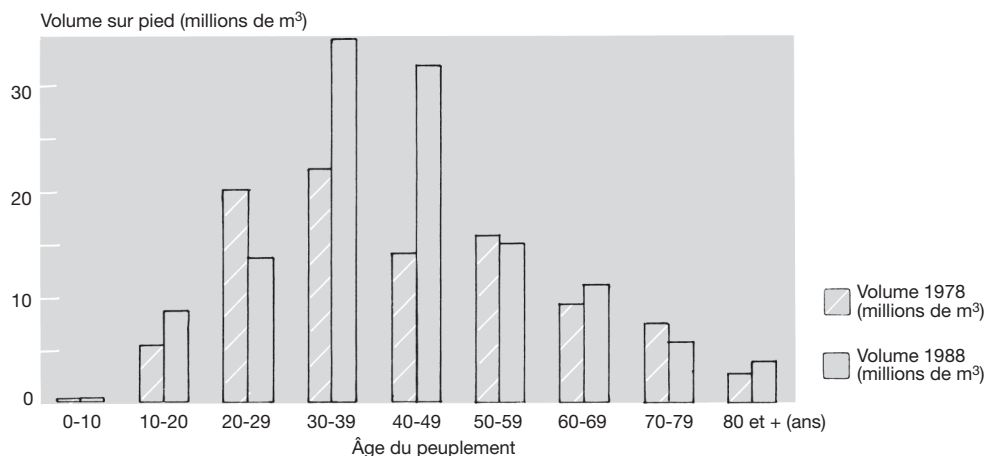
Le peuplement végétal

La végétation primitive était différenciée entre une forêt mixte de Pin maritime et Chênes atlantiques (tauzin et pédonculé) dans les milieux secs, à une dominante de chênes en milieu mésophile et une lande acide marécageuse à bouleaux et molinie en terrain humide. Cette forêt a été fortement dégradée au cours du premier millénaire et subsistait sous forme de reliques sur les reliefs dunaires mieux drainés. La forêt de Pin maritime que nous connaissons aujourd'hui a été installée à partir du milieu du siècle dernier à la suite d'importants travaux d'aménagement et drainage. Elle a changé plusieurs fois de vocation. Depuis les incendies de 1949, et l'abandon ultérieur du gemmage, elle est soumise à une intensification croissante qui a augmenté sa productivité moyenne d'environ 125 % depuis 1960, principalement sous l'effet de l'amélioration du drainage et de la fertilisation phosphatée.

État actuel de la production forestière

D'après le dernier inventaire effectué entre 1987 et 1989 (Inventaire forestier national, 1991), la surface du massif de Gascogne (dunes, Marensin, Plateau landais, Bazadais) est de 1 329 383 ha comportant 973 490 ha boisés, soit 73 %. La forêt de Pin maritime couvre une surface de 827 125 ha, dont 672 579 ha de futaie de Pin maritime pur, soit 76 %. Le volume sur pied des forêts de production de Pin maritime était de 110 500 437 m³ en 1978 et 127 783 225 m³ en 1988 (+ 15,6 %). La figure 1 (ci-dessous) montre que l'augmentation concerne surtout les classes d'âges de moins de 50 ans, et essentiellement entre 40 et 50 ans (+ 125 %).

Figure 1 **DISTRIBUTION PAR ÂGE DU VOLUME COMMERCIAL SUR PIED DE PIN MARITIME EN 1978 ET 1988**
(Forêt des Landes de Gascogne d'après données IFN)



Au sein du massif landais, le régime hydrique du sol et la composition de la végétation ont permis d'identifier quatre principaux types de stations :

- 37 % de la surface est en lande humide caractérisée par la Molinie (*Molinia coerulea*) et la Brande (*Erica scoparia*). Elle est potentiellement très productive si l'assainissement peut être réalisé. L'accroissement courant était de 7,8 m³/ha/an en 1988 en moyenne sur le massif ;

- 41 % est en lande mésophile caractérisée par la présence de Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) et naturellement favorable à la culture du pin sans modification du milieu : accroissement courant de 10,0 m³/ha/an en 1988 ;

- 14 % est en lande sèche caractérisée par la présence de Callune (*Calluna vulgaris*) et de Bruyère cendrée (*Erica cinerea*). L'accroissement courant moyen était plus faible : 8,3 m³/ha/an en 1988 ;

- 7 % est en dune qui avait un accroissement courant de 8,3 m³/ha/an en 1988.

L'intensification de la sylviculture a été très nette depuis 1960. Simultanément, la production en volume chiffrée par l'Inventaire forestier national pour la période 1961-1977 a augmenté de 38 % en Gironde et 55 % dans les Landes. Le premier inventaire de l'Inventaire forestier national de 1961-62 a indiqué une production de 4,8 m³/ha/an, celui de 1977-78 a révélé 7,8 m³/ha/an et celui de 1987-89 indiquait 9,8 m³/ha/an pour l'ensemble des futaies régulières de production. À présent, la ligniculture permettrait une production d'environ 12 m³/ha/an en moyenne. Cette augmentation est la résultante de plusieurs phénomènes et notamment de la modification de la proportion de la surface des différentes classes d'âge au cours du temps. La productivité de chaque classe d'âge s'est aussi accrue de façon importante : notons par exemple que, pour la classe 10-19 ans dans le département des Landes (d'après l'Inventaire forestier, Alvarez-Marty, 1989), la production annuelle était de 3,9 m³/ha/an en 1964, 5,0 en 1978 et 7,8 en 1987.

La récolte forestière provient de deux types d'interventions sylvicoles qui fournissent chacun la moitié du prélèvement total effectué au cours de la révolution : les éclaircies et la coupe rase. Le prélèvement annuel en bois ronds de l'ensemble de l'Aquitaine a été estimé pour 1995 à 7,8 millions de m³. La région Aquitaine est la première région française en 1995 pour les récoltes de bois résineux avec 6,9 millions de m³, soit 35 % des récoltes françaises, répartis entre 2,5 millions de m³ de bois de trituration et 4,4 millions de m³ de bois d'œuvre (statistiques forestières du ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 1997). L'accroissement en volume des forêts de production de Pin maritime était de 7 161 550 m³/an en 1978 et 7 644 308 m³/an en 1988 (+ 6,7 %) (IFN, 1982 ; IFN, 1991). L'ensemble du massif présenterait donc actuellement une accumulation nette en bois de 644 000 m³/an.

Stockage de carbone dans le peuplement forestier

L'estimation de la quantité de carbone fixée par les peuplements qui composent le massif, et récoltée lors de l'exploitation, fait intervenir la notion de densité : biomasse par unité de volume de tronc. Cette grandeur est quantifiée par l'infradensité, qui est le rapport de la masse de bois après séchage sur le volume de bois vert. L'infradensité moyenne du Pin maritime varie autour de 410 à 470 g/dm³. Elle a tendance à augmenter avec l'âge entre ces deux valeurs dans l'intervalle de 35 à 75 ans étudié jusqu'à présent. Les déterminations de l'infradensité sont faites après extraction des résines, qui diminuent la valeur d'environ 4 à 5 %. En appliquant en première approximation une valeur d'infradensité moyenne de 440 kg/m³ augmentée de 5 %, soit 462 kg/m³, aux 7 millions de m³ récoltés annuellement (un cube de 191 m de côté), on estime ainsi la fixation de 3,23 millions de tonnes de biomasse dans le bois et l'écorce des troncs. D'après Lemoine *et al.* (1988), la biomasse de tronc de Pin maritime comporte 0,33 % d'éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg, Na), soit 10 700 tonnes pour l'ensemble du bois récolté. Il reste donc 3,22 millions de tonnes de matière organique essentiellement composée de C, H, O en proportions de C H_{1,44} O_{0,66}, soit 50 % de carbone. Une récolte annuelle moyenne dans les forêts de Pin maritime exporte ainsi 1,61 million de tonnes de carbone. Or, 1,76 million de tonnes étant fixés par l'accroissement moyen, la fixation nette de C dans le massif serait donc de 148 000 tonnes de carbone par an. Ces calculs ne concernent que le bois fort du tronc.

Les facteurs limitants de la production forestière du massif landais

- *Rayonnement disponible*

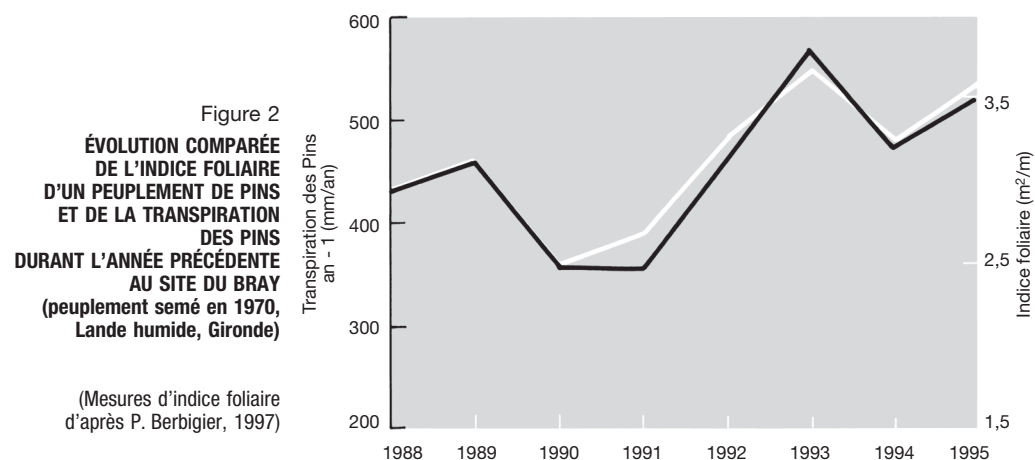
Le rayonnement solaire est la première des ressources trophiques à la base de la production primaire. En moyenne, suivant les endroits, la forêt des Landes de Gascogne reçoit un flux de rayonnement visible total compris entre 2 100 et 2 625 mégajoules par m² de sol et par an. On peut estimer le potentiel de production que cette énergie représente en reprenant les données de la littérature concernant l'efficacité de conversion du rayonnement par les plantations de conifères (*Pinus radiata*, *Pinus taeda*, *Pinus sylvestris*). En appliquant un rendement moyen de 0,87 g de carbone par mégajoule de rayonnement visible absorbé pendant la saison de croissance (McMurtrie *et al.*, 1994) et en admettant que 60 à 70 % de cette matière sèche est accumulée dans le tronc, un calcul simple aboutit à une estimation de la production "climatique" potentielle comprise entre 40 et 60 m³/ha/an. Cette valeur représente l'accroissement courant maximum qu'un peuplement atteindrait s'il pouvait utiliser tout le rayonnement utile incident pendant la saison de croissance. En fait, l'accroissement courant maximal réel des meilleurs peuplements adultes de Pin maritime est au plus de 25 m³/ha/an, soit la moitié de ce potentiel maximal.

Cette différence s'explique par deux types de mécanismes :

- en premier lieu, le feuillage des peuplements de pins n'est pas couvrant et n'absorbe qu'une partie du rayonnement solaire disponible, 63 % pour un indice foliaire de 3. Le reste du rayonne-

ment pénètre en sous-bois où il est soit utilisé par la végétation accompagnatrice (Molinie, Fougère, Éricacées...) dont l'indice foliaire peut atteindre 2,5, soit absorbé ou réfléchi par le sol. Ce déficit d'indice foliaire des arbres est dû à l'insuffisance des ressources en eau et en éléments minéraux. Sous des conditions trophiques optimales, l'indice foliaire d'un peuplement de conifères peut atteindre des valeurs dépassant 25 (Vose *et al.*, 1994). L'impact des ressources en eau sur l'indice foliaire est illustré par la figure 2 (ci-dessous) qui représente l'évolution sur 4 années de l'indice foliaire d'un peuplement de pins en lande humide. Celui-ci est en relation étroite avec la transpiration annuelle des arbres de l'année précédente. Cette corrélation empirique s'explique bien à partir de ce que l'on connaît de l'effet du stress hydrique sur la biologie du développement et de la croissance des aiguilles du Pin maritime. Les disponibilités en azote et en phosphore sont également des facteurs limitants de l'indice foliaire. L'ajustement de l'indice foliaire contrôle efficacement la transpiration des arbres et permet de limiter les effets les plus pénalisants des sécheresses : cavitation et embolisme du xylème, stress photochimiques foliaires...

— en second lieu, l'écart entre production climatique potentielle et production observée vient du fait que le rendement de conversion du rayonnement absorbé n'atteint une valeur de 0,87 g de carbone par mégajoule de rayonnement utile absorbé que sous des conditions optimales de température et de disponibilité en eau et en éléments minéraux du sol. Ces conditions ne sont pas également réalisées tout au long de la saison de croissance : pendant les phases de sécheresse, ou sous des températures basses, les pins diminuent fortement leur photosynthèse et leur croissance.



• Régime hydrique

Dans la quasi-totalité du massif landais, les précipitations annuelles sont supérieures à la demande évaporative annuelle (Choisnel *et al.*, 1987). Mais ces précipitations sont distribuées inégalement au long de l'année et, en été, un déficit hydrique de 100 à 200 mm⁽¹⁾ d'eau suivant les stations est observé. Les zones les plus exposées à ce déficit climatique sont situées dans l'est et le nord du massif landais, qui ne reçoivent que 700 mm de précipitations annuelles, le sud et la zone littorale recevant les plus fortes précipitations (1 200 mm). La présence d'une nappe phréatique et la capacité de rétention en eau du sol différencient nettement deux types extrêmes de biotopes :

— les milieux humides, où la nappe participe temporairement à l'alimentation en eau des arbres pendant la saison de croissance et où la teneur relativement importante en matière organique du sol permet une capacité de rétention plus importante (réserve utile de 110-140 mm). Dans ces

(1) Un mm correspond à une quantité de un kg d'eau (ou un litre) par m².

milieux, l'influence négative de l'engorgement hivernal du sol sur la croissance et la survie des arbres est historiquement connue ;

— les milieux secs, mieux drainés, où la nappe reste hors d'atteinte des racines des arbres et dont le stock de matière organique du sol est plus faible, sont plus exposés au déficit hydrique estival.

À condition que les pluies hivernales (de novembre à mai) aient permis une reconstitution complète des stocks et une remontée de la nappe, les milieux humides présentent une certaine aptitude à pourvoir à l'alimentation en eau des arbres en période de déficit. La présence de la nappe phréatique à faible profondeur et leur réserve en eau peuvent couvrir de 15 à 20 jours de transpiration estivale contre 8-10 environ pour les milieux secs.

La sécheresse édaphique et le déficit en eau du sol se manifestent avec une fréquence croissante depuis les milieux humides mal drainés (tous les 3 à 5 ans) jusqu'aux milieux drainés secs (tous les ans). Ils influencent fortement la production forestière de tous les types de milieux landais.

Figure 3 **COMPARAISON DE LA CROISSANCE RADIALE DE TROIS PEUPLLEMENTS DE PINS D'UN DISPOSITIF DE FERTILISATION EN LANDE HUMIDE (BERGANTON, SAINT-JEAN-D'ILLAC) avec la transpiration annuelle des arbres estimée par modélisation, à partir de la fermeture du couvert (≈ 15 ans)**

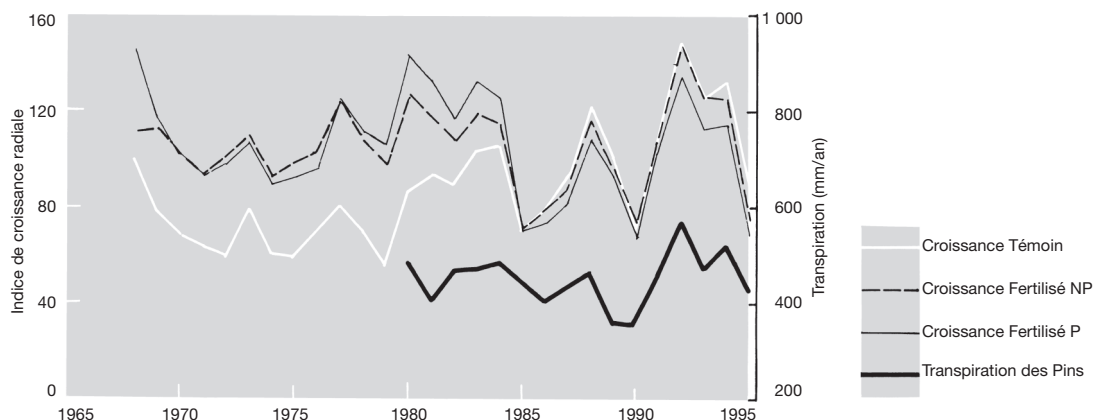
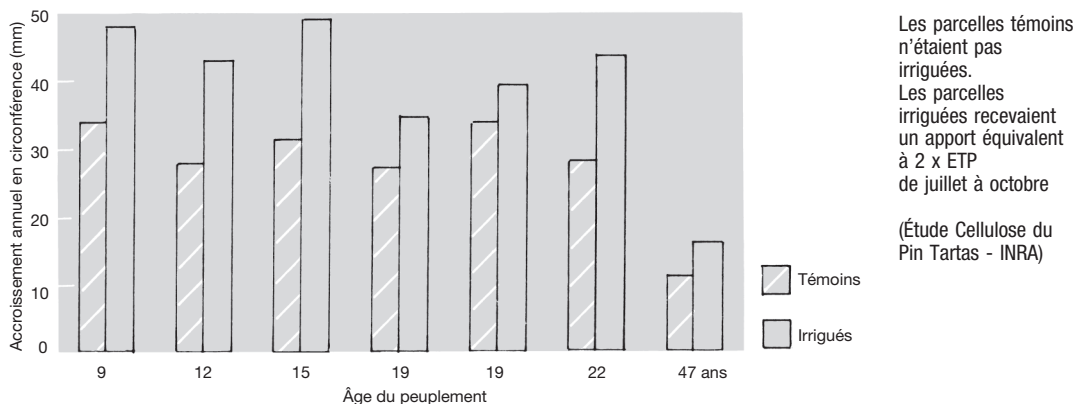


Figure 4 **COMPARAISON DE L'ACCROISSEMENT MOYEN ANNUEL EN CIRCONFÉRENCE mesuré sur des peuplements de Pins de différents âges dans un dispositif comparatif de 7 couples de parcelles de 2 500 m²**



Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise

La figure 3 (p. 576) illustre par exemple la relation étroite qui lie la transpiration du peuplement de Pins à sa croissance radiale, dans le cas d'un dispositif comparatif de fertilisation (Vauchel, 1996).

Un deuxième exemple est donné par l'étude d'irrigation expérimentale de peuplements adultes par des eaux usées de papeterie qui permet de fournir une estimation approximative de l'impact du déficit hydrique sur la croissance en circonférence (figure 4, p. 576) : des peuplements recevant un apport estival par irrigation couvrant leurs besoins en eau ont une croissance annuelle en volume améliorée de plus de 50 % (Loustau, 1994). Par ailleurs, plusieurs expérimentations ont démontré, en conditions naturelles comme en laboratoire, que la contrainte hydrique s'exerce à long terme sur l'indice foliaire des peuplements et à court terme sur l'assimilation du carbone par les arbres (Guehl *et al.*, 1994 ; Queyrens *et al.*, 1998).

Le bilan hydrique des peuplements de Pin maritime a fait l'objet de différents programmes internationaux de recherche. Le terme d'évapotranspiration est relativement bien caractérisé sur peuplement adulte en lande humide (tableau I, ci-dessous) (Berbigier *et al.*, 1991 ; Loustau *et al.*, 1992 ; Granier et Loustau, 1994 ; Loustau *et al.*, 1997) et en lande mésophile (Granier *et al.*, 1990).

Tableau I **Valeurs moyennes annuelles des composantes du bilan hydrique d'un peuplement de Pin en lande humide (en mm/an)**
 Ces valeurs ont été calculées en utilisant un modèle de couvert à 3 couches, les Pins, la Molinie et le sol (Loustau *et al.*, 1997) appliqué à un jeu de données climatiques couvrant la période 1949-1992 (Service interrégional du Sud-Ouest Météo France, Station de Mérignac)

	Minimum	Moyenne	Maximum
Transpiration des Pins	–	390	–
Transpiration de la Molinie	–	133	–
Évaporation du sol	–	163	–
Interception	–	103	–
Évapotranspiration totale	605	789	966
Drainage	0	111	298
Remontées capillaires	4	25	52
Précipitations	–	875	–

Tableau II **Sensibilité des composantes du bilan hydrique d'un peuplement de Pins en lande humide aux facteurs du climat et à deux facteurs biologiques, l'indice foliaire et la conductance stomatique de couvert**
 La sensibilité est définie ici comme le changement relatif d'une variable y , soit dy/y , rapportée à la variation relative de la variable indépendante x , soit dx/x ; par exemple, l'évapotranspiration totale augmente de 0,54 % quand la pluie augmente de 1 % (d'après Loustau, 1997)

	Pluie	Température de l'air	Déficit de pression de vapeur	Rayonnement total	Conductance stomatique du Pin	Indice foliaire
Transpiration des Pins	0,51	0,00	– 0,05	0,24	0,53	0,82
Transpiration de la Molinie	0,35	0,18	0,30	0,47	– 0,27	– 0,85
Évaporation du sol	0,62	– 0,26	0,14	0,26	– 0,36	– 0,74
Interception	0,69	– 0,06	0,11	0,00	– 0,02	0,20
Évapotranspiration totale	0,54	– 0,02	0,06	0,24	0,17	0,15
Drainage	2,90	0,09	– 0,42	– 1,12	– 0,77	– 0,61
Remontées capillaires	– 1,23	0,09	0,28	1,13	0,72	0,53
Déficit annuel en eau du sol (indice de stress)	– 1,24	0,05	0,31	1,11	0,74	0,54

Depuis 1995, le drainage sous le bassin versant du Tagon (Gironde) est mesuré par le CEMAGREF de Bordeaux et il est estimé à 186 mm/an en 1996 (Beuffe *et al.*, 1997). On sait apprécier globalement la sensibilité du bilan hydrique d'un peuplement de pins aux facteurs du climat (tableau II, p. 577).

Le tableau II permet de mettre en évidence la forte sensibilité de toutes les composantes du bilan hydrique aux précipitations. La température a en revanche peu d'effet. Une variation du déficit de pression de vapeur augmente fortement l'évapotranspiration du sol et de la Molinie, et amplifie le stress hydrique annuel.

Le rayonnement affecte le bilan hydrique en augmentant l'évaporation depuis chaque strate du couvert. Les mécanismes biologiques de régulation contrôlent efficacement la transpiration des arbres : une variation d'indice foliaire se répercute fortement sur la transpiration des arbres et, en sens inverse, sur celle du sol et du sous-bois, en modifiant la distribution du rayonnement absorbé entre les strates du couvert. La sécheresse du sol (dernière ligne du tableau) est fortement affectée par l'indice foliaire ou la régulation stomatique des arbres. Ceci démontre que les éclaircies en réduisant l'indice foliaire du peuplement ont un impact important sur la transpiration des arbres et le bilan hydrique du peuplement.

• *Le carbone*

Le carbone est le constituant majeur du bois. Sa fixation photosynthétique chez les plantes en C3, dont les arbres font partie, est limitée étroitement par la concentration atmosphérique en CO₂, qui est actuellement de l'ordre de 360 ppm⁽²⁾, contre 280 au début du siècle dernier. Cette augmentation continue a certainement joué un rôle dans l'évolution récente de la productivité forestière mais cette contribution n'a pas pu être distinguée jusqu'à présent des autres facteurs.

Tableau III **Valeurs moyennes de concentrations en azote et phosphore d'aiguilles de Pin maritime adulte en peuplement**

Site	Âge des arbres (ans)	Azote (kg/kg)	Phosphore (10 ⁻³ kg/kg)	Référence
Pallas	15	0,0079	0,63	Bonneau <i>et al.</i> (1968)
Liposthey	20	0,0077	0,49	-
Pissos	20	0,0096	0,54	-
Mimizan (témoin)	40	0,011	0,52	Nys <i>et al.</i> (1997)
Mimizan (fertilisé en P)	40	0,0096		
St-Jean-d'Ilac	16	0,011	0,8	Lemoine <i>et al.</i> (1988)
Bray (Cestas)	26	0,009	0,59	Bosc (1997)
Bray (témoin)	24	0,0095	0,5	Anonyme (1996)
Bray (débourssaillé après 5 ans)	24	0,0116	0,5	Anonyme (1996)
Begaar	10 à 35	0,0095	0,7	Loustau <i>et al.</i> (1994)
St-Jean-d'Ilac (témoin)	24		0,6	Saur (1988)
(Fertilisé 230u P ₂ O ₅)	24		0,8	Saur (1988)
Placettes Renecofof (1993) (Vielle-St-Girons, Arx, Losse)	15 à 29	0,07 à 0,0125	0,53 à 1,03	MAP (1994)
Pays de Monts	20-60	0,0074	0,91	Grouhel (1991)
Olonne	20-60	0,0075	1,11	Grouhel (1991)
Placettes Renecofof (1993) (N-D de Monts, Île d'Oléron)		0,0062 à 0,008	0,53 à 1,03	MAP (1994)

(2) Partie pour million.

• Cycle de l'azote

Le contenu en azote des arbres, constituant essentiel des protéines (supports et effecteurs du métabolisme) et des acides nucléiques (support de l'hérédité), détermine leur performance photosynthétique et leur croissance (Guehl *et al.*, 1995 ; Porté et Loustau, 1998). Les stocks d'azote des sols landais sont généralement faibles mais assez hétérogènes [1 à 8 tonnes d'azote total/ha/an allant des sols peu organiques (dunes) aux podzols humiques à pseudogley (Saur, 1989 ; Loustau *et al.*, 1997 ; Trichet *et al.*, 1997)]. Ce stock édaphique est sous forme essentiellement organique dont une fraction importante est sans doute immobilisée, et donc inutilisable par la végétation. La concentration foliaire des aiguilles de Pin maritime est très faible, proche de la carence, comme le résume le tableau III (p. 578) qui rassemble la plupart des valeurs récentes obtenues pour des pins adultes de la forêt des Landes et du littoral vendéen.

À partir des données disponibles, on peut fournir une estimation des exportations d'azote par les récoltes de bois d'une seule révolution. En faisant l'hypothèse que les valeurs de concentration en azote du bois et de l'écorce, mesurées à 16 et 26 ans, peuvent être appliquées jusqu'à 50 ans, un calcul simple montre que les exportations de la récolte commerciale totale d'un peuplement (éclaircies + coupe finale) de lande humide standard atteignent près de 500 kg d'azote par hectare (estimation d'après Lemoine *et al.*, 1988 ; Trichet *et al.*, 1997) (tableau IV, ci-dessous). Cette estimation repose sur un scénario de croissance correspondant au climat moyen actuel et à une concentration en CO₂ atmosphérique comprise entre 340 et 355 ppm.

Tableau IV **Estimation des exportations en carbone (C), azote (N) et phosphore (P) par la récolte de bois d'un peuplement de lande humide (site du Bray) pour une durée de révolution de 50 ans**

Le volume total récolté (éclaircies + coupe finale) a été calculé en appliquant le modèle de Lemoine (1995) aux données d'accroissement mesurées annuellement sur cette parcelle de 1987 à 1995

	Volume récolté (m ³ /ha)	Biomasse récoltée (10 ³ kg/ha)	Teneur (kg/kg)			Quantité exportée sur 50 ans (10 ³ kg/ha)		
			C	N	P	C	N	P
Tronc	656	328	0,5	0,00115	0,000055	164,0	0,377	0,0180
Écorce		47,5	0,5	0,0025	0,00026	23,7	0,119	0,0124
Total						187,7	0,496	0,0304

On connaît moins bien les flux d'azote sortant par drainage. Les premiers résultats fournis par le suivi du bassin versant forestier du Tagon (Beuffe *et al.*, 1997) donnent une estimation de drainage moyen annuel proche de 1 kg/ha/an (0,30 minéral + 0,66 organique). La coupe rase et les travaux de préparation du sol sont à l'origine de pertes importantes en azote et matière organique par minéralisation et drainage mais il n'existe pas de données quantitatives sur ces pertes dans le cas du Pin maritime. L'émission de composés azotés gazeux sous forêt est inexistante et les dépôts sous forme de N₂O semblent faibles.

L'apport d'azote au sol sous forme d'engrais agricoles classiques (à base de nitrates ou ammoniums) est potentiellement très polluant pour les eaux ou l'atmosphère. La durée de rétention de l'azote ainsi apporté dans ce type de sol peut être évaluée au maximum à deux ans et son efficacité est pour cette raison très limitée, tant en apport à l'installation (Guinaudeau *et al.*, 1963 ; Donald et Glen, 1974 ; Chaperon, 1990) que sur peuplements adultes (Bonneau *et al.*, 1972). Les entrées aériennes d'azote (dépôts secs et occultes) dans l'écosystème sont variables, allant de 5,2 à 8,1 kg N (N-NH₄ + N-NO₃)/ha/an au site RENECOFOR de Losse (Landes) de 1993 à 1996 (Ulrich

et al., 1997). Ces valeurs sont très en dessous de celles mesurées sur des sites exposés à des pollutions. Elles sont probablement insuffisantes pour compenser les exportations de récolte dans les peuplements les plus productifs, même lorsque celle-ci est strictement limitée au tronc non écorcé (tableau IV, p. 579).

Le cycle de l'azote en forêt landaise, bien qu'imparfaitement connu, est donc un facteur limitant important de la croissance. Une grande partie de l'azote du sol est immobilisée dans un compartiment organique inerte et ne participe pas au cycle biogéochimique annuel. Les exportations d'azote lors des récoltes représentent donc une fuite importante hors du système, à la fois sur le plan quantitatif et sur le plan qualitatif.

- *Le phosphore*

Le stock présent dans les sols landais est très faible (il représente approximativement 550 kg/ha au site du Bray ; Anonyme, 1996), alors que la quantité exportée par la récolte atteint 31 kg par révolution. Mais l'essentiel de ce stock est inutilisable pour la plante. On sait qu'un apport supplémentaire de cet élément a un effet spectaculaire sur la croissance des peuplements de lande humide jusqu'à 20 ans, mais cet effet s'estompe au-delà (Gelpe et Lefrou, 1986 ; Vauchel, 1996), probablement par épuisement car les teneurs foliaires mesurées sur arbres adultes restent faibles, proches de la carence (tableau III p. 578). La fertilisation permet de remédier en partie à la déficience en phosphore disponible du sol, au moins dans la phase d'installation et de croissance juvénile du peuplement. L'apport de fertilisants phosphatés est maintenant une pratique courante, son efficacité peut certainement être encore améliorée mais elle ne pose pas de problèmes environnementaux majeurs. Le phosphore, peu mobile, ne semble pas être significativement entraîné dans la nappe.

- *Les autres éléments (K, Ca, Mg, oligo-éléments)*

Ils sont peu importants pour la croissance en volume, mais ils peuvent jouer un rôle bénéfique sur la qualité du bois et contre les déformations juvéniles ("verse") (Saur, 1989).

- *Événements rares*

Les événements rares et aléatoires, comme les fortes tempêtes ou les "grands froids" jouent un rôle important dans le fonctionnement primaire de la forêt landaise. Ils sont à l'origine de mortalité ou dépérissement importants (grands froids de 1985). De façon moins spectaculaire, certains événements climatiques (tempêtes, gel des aiguilles...) sont à l'origine de mortalité immédiate plus limitée mais leurs effets physiologiques (altération du fonctionnement racinaire, des propriétés de transfert hydrique ou des capacités de photosynthèse) peuvent se répercuter sur la production primaire de la forêt pendant plusieurs années consécutives. Les interactions entre ces stress climatiques et la sensibilité des arbres aux ravageurs et pathogènes sont couramment observées mais scientifiquement mal connues. En raison même de la rareté de ces événements, leur effet est difficile à quantifier.

Interactions

Les contraintes trophiques et climatiques s'exercent simultanément sur la croissance des arbres. Elles ont des effets variables suivant le type de milieu et en fonction de l'âge des peuplements. Il est certain que ces effets interagissent les uns sur les autres, mais on est encore loin de bien connaître ces interactions. Dans le cas du Pin maritime, certaines interactions entre les facteurs limitant la production primaire et la croissance sont assez bien connues :

— La contrainte hydrique, en limitant la croissance et l'assimilation du carbone, réduit les exigences en azote et en phosphore. Inversement, l'apport d'azote ou de phosphore augmente à la fois la capacité de photosynthèse foliaire, la surface foliaire et les besoins en eau du Pin maritime

(Guehl *et al.*, 1995). On a peu d'éléments sur les interactions entre sécheresse et nutrition azotée pour un peuplement naturel. Il convient cependant de remarquer que la fertilisation azotée entraîne un accroissement brutal de l'indice foliaire qui peut présenter des risques en terme de stabilité mécanique de l'arbre et de résistance à la sécheresse d'un peuplement.

— Pour le phosphore, l'absence d'effet des apports phosphatés en milieu de lande sèche indique une dominance des effets de sécheresse, qui serait alors le seul facteur limitant la croissance des arbres en lande sèche. En lande mésophile ou en lande humide, au contraire, les effets du phosphore et de l'azote sont marqués.

— Une interaction classique des effets de fertilisation sur la nutrition en différents éléments minéraux est aussi bien connue : la fertilisation en phosphore peut induire des carences en cuivre, responsables de déformations juvéniles (Saur, 1989) ; elle semble également affecter la nutrition en azote, par un effet de dilution (Nys *et al.*, 1996).

Partage des ressources trophiques entre le Pin et la végétation accompagnatrice

La relative faiblesse de la disponibilité en eau et en éléments minéraux du sol limite l'indice foliaire des arbres à une valeur basse, autour de 2 à 3,5 en lande humide, et 30 à 40 % du rayonnement incident utile pénètre jusqu'au sol. Conjugué au niveau temporairement élevé de la nappe en hiver et au printemps, ceci permet à une végétation herbacée à croissance rapide, Molinie en lande humide ou Fougère en lande mésophile, de développer son cycle annuel en sous-étage des arbres. Cette végétation accompagnatrice entre en compétition avec les arbres dans le partage des ressources limitantes dans le milieu : elle peut immobiliser un stock d'azote, phosphore et potassium significatifs (Anonyme, 1996) et consomme une fraction importante de l'eau disponible dans la zone racinaire des arbres (Loustau et Cochard, 1991 ; Berbigier *et al.*, 1991). La végétation en sous-bois peut jouer cependant un rôle positif au stade de peuplement adulte pour l'ancrage mécanique des arbres et pour la rétention d'éléments facilement lessivés en fin d'hiver et au printemps.

Variations au cours de la révolution

Les effets de ces différentes limitations trophiques et climatiques varient en fonction de l'âge du peuplement.

- La croissance juvénile des peuplements, avant la fermeture du couvert qui se produit vers 15-20 ans, est une phase d'expansion foliaire et racinaire de l'arbre qui lui permet d'accroître le taux d'acquisition de ces différentes ressources, lumière, CO₂, eau, azote, phosphore... et de soutenir sa croissance. À ce stade, la croissance est certainement affectée par les sécheresses mais, réciproquement, la contribution des arbres au bilan hydrique de l'écosystème est sans doute faible, en proportion de leur indice foliaire. La croissance répond spectaculairement à la fertilisation phosphatée durant cette phase.
- La fermeture du couvert, à partir de 10 à 20 ans, correspond à une saturation des possibilités de fourniture de ces ressources par le milieu. L'allocation de la croissance entre l'acquisition des éléments minéraux et de l'eau (racine) d'une part, et du CO₂ et de la lumière (aiguilles) d'autre part tend vers un équilibre relatif. Une ou plusieurs ressources deviennent limitantes et l'arbre n'a plus de possibilité d'expansion spatiale pour en accroître l'acquisition, en dehors des périodes consécutives aux éclaircies. Le taux de croissance relatif diminue. La croissance de l'arbre devient dépendante de son stock d'azote et de phosphore et de leur recyclage interne, son prélèvement net dans le sol ayant tendance à diminuer. Comme au stade précédent, la contrainte hydrique s'exerce directement sur la croissance du peuplement d'arbres adultes. De fait, une excellente corrélation apparaît après 15-20 ans entre la croissance radiale du Pin maritime en lande humide, l'efficacité de l'eau, l'indice foliaire du peuplement et le bilan hydrique annuel (Queyrens *et al.*, 1998 ; Vauchel, 1996).

SCÉNARIOS FUTURS (2000-2100)

Dans ce qui suit, nous reprenons le plan de la partie précédente pour analyser les modifications possibles de la sylviculture et des différents facteurs limitants de la productivité forestière du Pin maritime dans les Landes.

Le climat

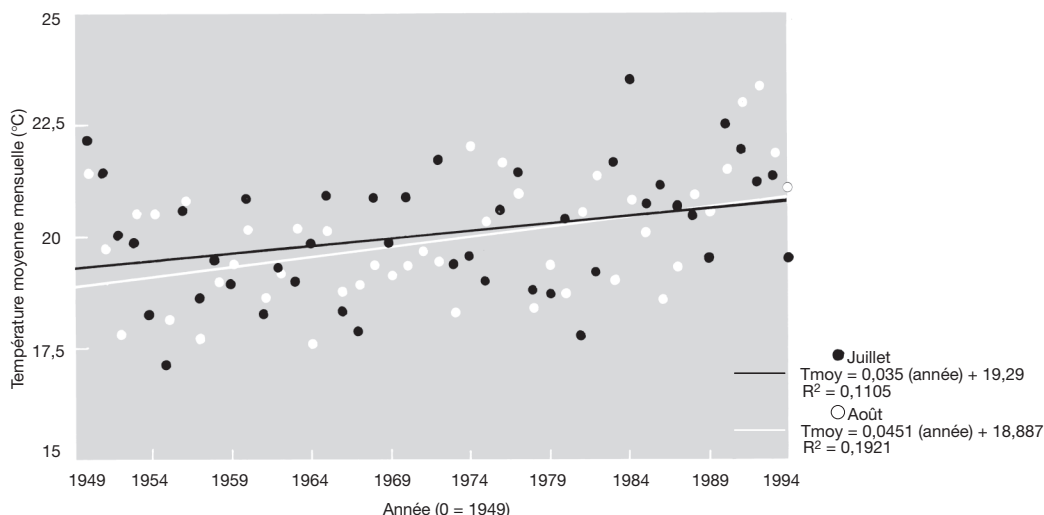
Le climat est en constante évolution depuis l'époque industrielle sous l'effet de la combustion d'énergie fossile et de la déforestation en milieu tropical, tous deux à l'origine d'un enrichissement atmosphérique en gaz à effet de serre (Déqué, 1998). Cet accroissement modifie le climat global par une augmentation globale de la température et des précipitations. Il demeure très difficile de prédire l'effet de ces modifications du climat global sur le climat local qui nous intéresse ici. Il y a cependant un consensus des principaux modèles climatiques globaux pour prédire, sous un doublement de CO₂ atmosphérique, c'est-à-dire à l'horizon 2050 à 2070, une augmentation de la température moyenne annuelle de 1,5 à 4,5 °C en Europe du Sud (IPCC, 1995). La modélisation numérique du climat de Météo-France prévoit quant à elle une augmentation des températures estivales régionales de 2 à 3 °C (Déqué, 1998). De fait, on observe une tendance significative à une augmentation de la température moyenne des mois d'été sur les séries de données 1949-1994 de la Station Météo-France de Mérignac (Service interrégional du Sud-Ouest Météo-France). Cette élévation est cependant modeste (0,035 et 0,045 °C par an, respectivement, figure 5, ci-dessous).

Évolution de la disponibilité des ressources trophiques dans le milieu landais

• Rayonnement

On dispose actuellement de très peu d'indications sur l'évolution du régime radiatif. Si une variation de la nébulosité prévue par certains modèles climatiques est susceptible d'affecter le bilan radiatif de la forêt landaise, il est difficile à l'heure actuelle d'avancer des prévisions sur l'évolution à long terme du rayonnement global incident sur la forêt landaise.

Figure 5 **MOYENNE DES TEMPÉRATURES DES MOIS DE JUILLET ET AOÛT MESURÉES DE 1949 À 1994**
À LA STATION MÉTÉO-FRANCE DE MÉRIGNAC
 (Service interrégional du Sud-Ouest Météo-France)



• Régime hydrique

Les modèles climatiques globaux prévoient aussi une augmentation des précipitations hivernales et une réduction des précipitations estivales et automnales (Déqué, 1998). Compte tenu de ce que nous savons de la sensibilité du bilan hydrique aux précipitations (tableau II, p. 577), ce scénario amène à considérer comme probable une augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses.

Cet impact pourrait être renforcé par les effets de l'intensification du drainage forestier et agricole qui a entraîné depuis une vingtaine d'années un abaissement important du niveau phréatique et la disparition de la moitié des zones humides répertoriées dans le périmètre du parc naturel régional des Landes de Gascogne (Klingebiel et Billy, 1997). Cette évolution du niveau phréatique est assez alarmante compte tenu du rôle joué par les fluctuations de cette nappe vis-à-vis de l'alimentation en eau des arbres et de la productivité des stations : l'abaissement du niveau de la nappe joue certes un rôle bénéfique pour faciliter l'installation des peuplements et la mécanisation de la sylviculture mais il a certainement un impact négatif sur la productivité des milieux les plus secs, sans parler des risques d'incendie.

• Concentration atmosphérique en CO₂

Les études faites en conditions contrôlées sous atmosphère enrichie en CO₂ confirment que le Pin maritime, comme la totalité des espèces forestières, répond positivement à un accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique, toutes choses égales par ailleurs (Picon *et al.*, 1995; Guehl *et al.*, 1994, 1995). Cependant, et contrairement à d'autres espèces, l'augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique ne semble pas devoir apporter de diminution des besoins en eau du couvert (liée à une éventuelle baisse de conductance stomatique) ni une amélioration de sa résistance à la sécheresse (Picon *et al.*, 1995). Contrairement à d'autres espèces, les différentes caractéristiques hydriques du Pin maritime, et en particulier son fonctionnement stomatique, ne semblent pas affectées significativement par la teneur atmosphérique en CO₂. Ceci ne permet pas d'envisager *a priori* une forte réduction des effets de la sécheresse par l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂, comme cela peut être le cas chez les Chênes par exemple. On ne sait cependant pas encore précisément comment la réponse observée sur jeunes plants peut s'extrapoler à des peuplements en conditions naturelles. L'utilisation de ces modèles de croissance écophysologiques suggère que cette réponse positive à l'accroissement en CO₂ pourrait être observée aussi pour des peuplements en conditions naturelles (Mohren *et al.*, 1997). Ces prédictions demeurent cependant entachées d'une large incertitude, et ne prennent pas en compte pour l'instant les limitations d'origine nutritionnelle.

L'impact sur la croissance de l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂, tel qu'il a été mesuré sur de jeunes plants, devrait être observé au moins transitoirement, en peuplement naturel. Cet impact est en fait déjà sans doute responsable d'une partie de l'augmentation de la production primaire et de l'immobilisation de CO₂ observée de façon générale dans les forêts tempérées de l'hémisphère Nord (Kauppi *et al.*, 1992 ; Ciais *et al.*, 1995). L'interrogation sur cet impact concerne sa durée et son intensité, compte tenu des effets de l'interaction entre CO₂, sécheresse (Guehl *et al.*, 1994, 1995) et nutrition azotée et phosphatée.

• Facteurs nutritionnels : alimentation en azote et phosphore

L'effet direct du changement climatique sur le cycle de l'azote en forêt landaise est difficile à établir de façon simple, compte tenu des incertitudes pesant déjà sur son fonctionnement actuel. L'augmentation probable de la température du sol pourrait conduire à accroître la vitesse de minéralisation de l'azote organique mais la diminution de la teneur en eau peut conduire à un effet inverse. L'effet indirect majeur, sous l'hypothèse d'un effet positif du CO₂ sur la croissance des arbres,

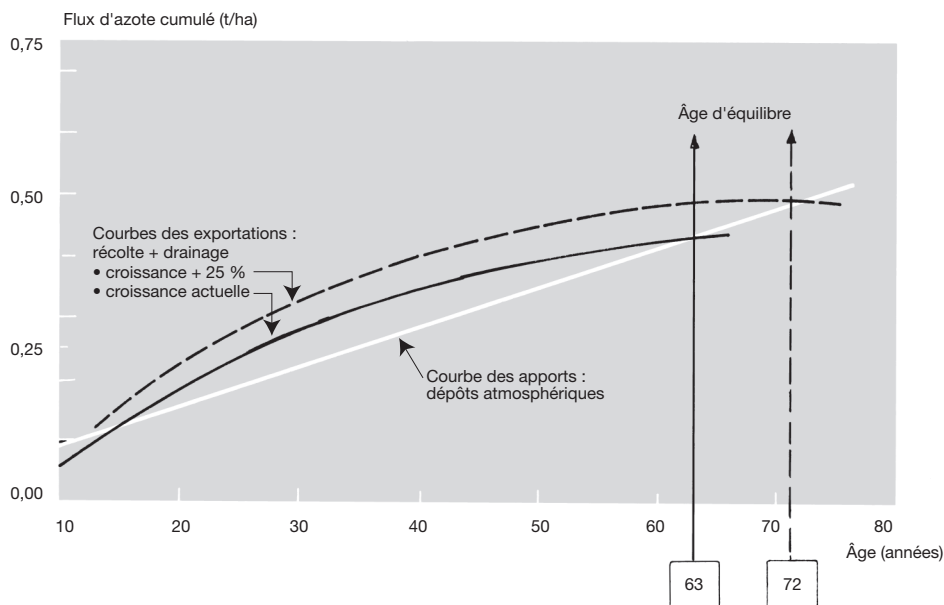
serait de diluer le contenu en éléments nutritifs des arbres et d'accroître l'impact des limitations nutritionnelles sur la croissance. Dans l'hypothèse défavorable, c'est-à-dire sur les sols les plus pauvres, cette limitation peut certainement annuler tout effet potentiel du CO₂ sur la croissance. À cet égard, les résultats récents des analyses de sols du réseau RENECOFOR en France montrent que les limitations nutritionnelles de la production forestière semblent plus répandues et plus importantes qu'on ne le supposait (ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 1994 ; Ponette *et al.*, 1997). Les mêmes remarques s'adressent au cas du phosphore mais, dans ce cas, la fertilisation permet de corriger le bilan en phosphore de la forêt, ce qui n'est pas le cas de l'azote.

Sylviculture

La sylviculture du Pin maritime est soumise à la demande de différents groupes d'utilisateurs, demande fluctuante et parfois contradictoire. La demande en produits forestiers divers est appelée à s'accroître au moins dans la première moitié du XXI^e siècle. Une forte pression en faveur d'une intensification est exercée, par les groupes papetiers par exemple (Lesgourgues *et al.*, 1997), tandis que la demande en bois de qualité est elle aussi importante. Il est certain que ces pressions se traduiront dans les faits par une intensification accrue de la sylviculture, au moins pour certaines zones du massif landais. Techniquement, une intensification de la sylviculture est possible, en accroissant les intrants, en raccourcissant la révolution, en étendant la récolte aux petits bois, en améliorant encore l'efficacité de la fertilisation, du drainage, et par l'introduction de matériel végétal sélectionné. L'interrogation majeure posée par ces scénarios concerne le maintien du potentiel productif du milieu (épuiement des réserves des sols, impacts hydrologiques...) dans un contexte climatique changeant.

À titre d'exemple, la figure 6 (ci-dessous) illustre l'impact de scénarios sylvicoles sur la durée d'équilibre du bilan d'azote d'un peuplement de Pin maritime. Les courbes des exportations indiquent la quantité totale d'azote exportée par la révolution en fonction de l'âge de la coupe, pour deux taux de croissance. La courbe des apports indique la quantité totale d'azote apportée (seuls les apports naturels sont ici comptabilisés). L'intersection entre la courbe des apports et la courbe des exportations correspond à ce que nous avons appelé "l'âge d'équilibre", où les pertes d'azote

Figure 6 **COMPOSANTES DU BILAN DE L'AZOTE D'UN PEUPEMENT DE PIN MARITIME EN LANDE HUMIDE AU COURS D'UNE RÉVOLUTION**



Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise

de la révolution sont équilibrées par les apports. Les valeurs utilisées pour construire cette figure ont été calculées à partir de données incomplètes et ne doivent pas être considérées comme des références exactes. Cette figure est plutôt destinée à illustrer une méthode de calcul du bilan d'une révolution. Deux conclusions peuvent être tirées :

— le raccourcissement de la révolution à un âge inférieur à l'âge d'équilibre présente un risque potentiel pour l'équilibre du bilan des éléments non maîtrisables, comme c'est actuellement le cas de l'azote. La courbe standard donne ici une durée d'équilibre de 63 ans ; raccourcir la durée de la révolution à 40 ans entraîne un déficit en azote de 60 kg par hectare à chaque révolution, ce qui laisse attendre une chute de productivité pour les révolutions futures.

— l'augmentation du taux de croissance en volume du peuplement (courbe en pointillés), par exemple par voie génétique, peut conduire à une immobilisation plus rapide d'azote dans la biomasse récoltée et accroître les exportations d'une révolution à âge constant, avec pour conséquence une augmentation de l'âge d'équilibre. Une amélioration de la croissance peut donc conduire paradoxalement à un allongement de la durée d'équilibre du bilan d'un élément comme l'azote.

APPRÉCIER LA DURABILITÉ DU NIVEAU DE PRODUCTION

Les critères et indicateurs de la Conférence ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe

Pour apprécier la durabilité de la gestion forestière d'un ensemble géographique, on peut dans un premier temps se référer aux critères recommandés par la Conférence ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe (1996) (tableau V, ci-dessous).

Les critères de gestion de la ressource en bois elle-même (surface boisée, structure d'âge, bilan de carbone...) semblent être actuellement satisfaits à l'échelle du massif, si l'on utilise comme indicateurs les données collectées par l'Inventaire forestier national. La mise en œuvre des critères de gestion durable de la ressource en bois sur pied semble déjà être la règle dans les peuplements soumis au régime forestier et dans ceux conduits classiquement suivant un objectif de qualité.

Tableau V Application des critères de la Conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe (1996) sur la productivité forestière au cas du Pin maritime des Landes de Gascogne

	État actuel	Évolution	Source
Gestion de la ressource sur pied			
Surface boisée	827 125 ha	stable	IFN
Structure d'âge		vieillessement	IFN
Volume sur pied	127 783 225 m ³	+ 640 000 m ³ /an	IFN
Carbone immobilisé	2 951 792 tC	+ 148 500 tC/an	IFN
Production annuelle	9,8 m ³ /ha/an	+ 2 %/an	IFN
Santé-vitalité			
Dépôts atmosphériques	apport de base "naturel"	inconnue	RENECOFOR
Dommages		inconnue	RENECOFOR
Chablis	X	inconnue	RENECOFOR
Incendies	X	inconnue	RENECOFOR
Gels	X	inconnue	RENECOFOR
Équilibres nutritifs			
pH sol	très bas	inconnue	RENECOFOR
Capacité d'échange cationique . .	très faible	inconnue	RENECOFOR

Des critères adaptés au cas de la forêt landaise

Les critères proposés par la Conférence ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe ne sont cependant pas totalement appropriés au cas du massif landais. L'exigence du maintien à long terme de la productivité forestière des Landes de Gascogne, compte tenu de ce que nous savons de ses facteurs limitants, amène à aller plus loin que ces indicateurs génériques. La définition de la durabilité adoptée à la réunion d'Helsinki de la Conférence ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe (juin 1993) stipule en effet qu'une gestion durable s'entend comme étant la « *gérance et l'utilisation des forêts et des terres forestières à un taux et de telle sorte que l'on préserve leur biodiversité, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur potentiel à jouer, maintenant et à l'avenir, un rôle pertinent dans les domaines social, économique et écologique, aux niveaux local, national et mondial, sans porter préjudice aux autres écosystèmes* ». Dans le cas du massif landais, l'appauvrissement de la phase organique du sol, une diminution des stocks de certains nutriments ou une aggravation du déficit hydrique conduisent à une baisse irréversible de productivité et doivent être évités. Le tableau VI (ci-dessous) rappelle les principaux facteurs limitants de la production forestière du massif, leur évolution possible, les remèdes possibles et les critères qui pourraient être appliqués pour apprécier cette évolution.

Perspectives de recherche et prédictions à long terme

Le suivi de certains indicateurs est déjà en vigueur actuellement pour des peuplements intégrés dans des réseaux d'observation : le réseau RENECOFOR suit plusieurs parcelles de Pin maritime dans le département des Landes (Vielle Saint-Girons, Arx et Losse) et en Vendée. Le suivi à moyen terme (5-10 ans) des exportations d'azote et phosphore à l'échelle du bassin versant apporte également une information précieuse sur les répercussions de la gestion forestière sur les bilans minéraux. On peut souhaiter que ce suivi soit formalisé dans un réseau coordonné et étendu à d'autres peuplements pilotes représentatifs des différentes options sylvicoles pratiquées aujourd'hui.

Les techniques d'extrapolation spatiale et temporelle des informations collectées sur ces réseaux se développent. Les progrès continus dans l'acquisition et l'interprétation de données à grande

Tableau VI **Principaux facteurs limitants de la productivité forestière landaise et indicateurs additionnels proposés pour en apprécier l'évolution à long terme**

Facteurs limitants	Impact actuel	Évolution possible	Remèdes possibles	Indicateurs additionnels possibles
Phosphore disponible . . .	fort	Inchangé	Fertilisation	Bilan de phosphore du sol, analyses foliaires
Azote disponible	fort	Impact accru	Allongement révolution, fixatrices d'azote, fertilisation-désherbage du sous-bois (engrais vert)	Bilan azoté du sol, analyses foliaires
Engorgement hivernal . . .	faible à fort	Impact accru	Drainage	Suivi piézométrique et drainage
Déficit hydrique estival . . .	faible à fort	Impact accru	Éclaircie, débroussaillage	Suivi piézométrique, suivi d'indice foliaire
Pauvreté chimique du sol	variable	Impact accru		Suivi du stock et C/N de la matière organique du sol

échelle, aéroportées ou satellitaires, sont un outil d'avenir pour le suivi du fonctionnement primaire de l'écosystème à l'échelle régionale. La dendroécologie a fait la preuve de son efficacité pour saisir les tendances à long terme de la croissance radiale des arbres et de ses relations avec le climat (Fritts, 1976).

Il est également nécessaire de disposer d'outils de gestion sylvicoles intégrant le fonctionnement primaire et le cycle des éléments, permettant d'anticiper les effets de différents types de scénarios sylvicoles sur la productivité du milieu et d'optimiser la sylviculture en fonction des ressources les moins maîtrisables de l'écosystème. Des modèles de ce type existent au stade de la recherche et demandent à être soigneusement évalués avant d'être utilisés comme guides de gestion. Cette validation suppose que soient comblées aussi un certain nombre de lacunes dans nos connaissances du fonctionnement actuel du système. La pertinence des prédictions de ces modèles dépend en effet directement de la fiabilité et de la précision des connaissances que nous avons sur ces processus de base et leur sensibilité aux facteurs de l'environnement.

CONCLUSIONS

La productivité forestière du milieu landais résulte d'une co-limitation de la croissance des arbres par la disponibilité de différentes ressources : rayonnement, CO₂ atmosphérique, eau, éléments minéraux... Les modèles climatiques actuels permettent de commencer à prévoir comment le spectre de ces ressources sera modifié par le changement climatique et atmosphérique qui surviendra au cours des cinquante prochaines années. On peut également anticiper les grandes options possibles dans l'évolution de la sylviculture du Pin maritime. Dans ce contexte, le maintien à long terme de la productivité du milieu landais suppose le respect de l'équilibre du cycle des différentes ressources ou éléments nutritifs. Une attention particulière doit être apportée à ceux dont le cycle n'est pas maîtrisé, par exemple l'eau et l'azote.

Au-delà d'une simple conservation, on doit rechercher à améliorer durablement le potentiel productif du biotope landais, en mettant au point les méthodes permettant de corriger les effets actuels et futurs des principaux facteurs limitants et d'équilibrer les bilans environnementaux de la révolution. Cette gestion intégrée de l'écosystème forestier est une perspective importante de la recherche forestière. Elle doit mobiliser non seulement l'ingénierie agronomique et forestière classiques mais aussi l'ensemble des disciplines forestières comme la génétique des arbres forestiers, la pathologie végétale et l'entomologie pour n'en citer que quelques-unes. Cette gestion du milieu physique doit aussi mobiliser les techniques de modélisation et de spatialisation permettant de représenter le fonctionnement de l'écosystème Pin maritime et de ses écotones aux échelles d'espace et de temps appropriées : bassin versant, petite région...

D. LOUSTAU – D. BERT – P. TRICHET
Unité de Recherches forestières
INRA
BP 45
F-33611 GAZINET CEDEX

Remerciements

Les auteurs remercient les différents auteurs qui ont accepté de communiquer les informations rassemblées ici, Mme F. Vernier et J.-C. Chossat (CEMAGREF Bordeaux), P. Chassin et E. Lamaud (INRA Bordeaux), E. Ulrich, Q. Ponette et leurs collaborateurs (ONF - RENECOFOR). Cet article reprend le contenu d'une communication tenue au cours du 4^e colloque ARBORA (novembre 1997, Hôtel de Région de Bordeaux).

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ-MARTY (S.). — La Méthode des générations dans l'étude de la ressource d'une forêt équienne. Le cas du massif landais. — *Informations-Forêt*, n° 3, 1989, pp. 135-146.
- ANONYME. — Rapport final du projet Compostela-Forêts. Commission européenne – Direction générale XVI. — Station de Recherches forestières de Bordeaux-Cestas, 1996, 79 p.
- BERBIGIER (P.), DIAWARA (A.), LOUSTAU (D.). — Étude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de Pins maritimes et du sous-bois de Molinie. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 22 (48), 1991, pp. 157-177.
- BEUFFE (H.), LAPLANA (R.), VERNIER (F.). — Fonctionnement d'un bassin versant forestier : le Tagon (33). Dans : "Fonctionnement et gestion raisonnée de l'écosystème forestier landais". Rapport final du projet Landes 1. 1994-1996 / J. Timbal et M. Arbez. — INRA - Station de Recherches forestières de Bordeaux-Cestas, 1997. — pp. 52-64.
- BONNEAU (M.), GELPE (J.), ILLY (G.). — Résultats de deux essais de fertilisation sur Pin maritime adulte dans les Landes. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 29, 1972, pp. 353-367.
- BONNEAU (M.), GELPE (J.), LE TACON (F.). — Influence des conditions de nutrition minérale sur le dépérissement du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 25, 1968, pp. 237-251.
- CHAPERON (H.). — Fertilisation initiale du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. — *Informations-Forêt*, n° 2, fascicule 388, 1990, pp. 133-140.
- CHOISNEL (E.), PAYEN (D.), LAMARQUE (P.). — Climatologie de la zone du Projet HAPEX-MOBILHY. — Météorologie nationale, 1987. — 72 p. (ISBN 2-11-085157-0).
- CHOSSAT (J.-C.). — Migrations latérales de l'eau et des éléments minéraux dans les sols landais. Dans : "Fonctionnement et gestion raisonnée de l'écosystème forestier landais". Rapport final du projet Landes 1. 1994-1996 / J. Timbal et M. Arbez. — INRA - Station de Recherches forestières de Bordeaux-Cestas, 1997. — pp. 46-52.
- CAIS (P.), TANS (P.), TROLIER (M.), WHITE (J.W.C.), FRANCEY (R.J.). — A large Northern Hemisphere Terrestrial CO₂ Sink Indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂. — *Science*, 269, 1995, pp. 1099-1101.
- CONFÉRENCE MINISTÉRIELLE SUR LA PROTECTION DES FORÊTS EN EUROPE. — Compte rendu de l'évolution des travaux. Ministry of Agriculture, Rural Development and Fisheries, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. Liaison Unit Lisbon. — 1996.
- DÉQUÉ (M.). — Modélisation numérique des impacts climatiques. Dans : Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle. Rapport au Premier Ministre, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Mission interministérielle de l'Effet de Serre. — Paris : Imprimerie nationale, 1998. — pp. 22-46.
- DONALD (D.G.M.), GLEN (L.M.). — The response of *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* to N, P and K fertilizers applied at planting. — *South African Forest Journal*, 91, 1974, pp. 19-28.
- FRITTS (H.C.). — Tree rings and climate. — New York : Academic Press, 1976. — 567 p.
- GELPE (J.), LEFROU (G.). — Essai de fertilisation minérale sur Pin maritime à Mimizan (Landes). Résultats après la 26^e année. — *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° 4, 1986, pp. 394-400.
- GRANIER (A.), BOBAY (V.), GASH (J.H.C.), GELPE (J.), SAUGIER (B.), SHUTTLEWORTH (J.). — Vapour Flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les landes Forest. — *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 1990, pp. 309-319.
- GRANIER (A.), LOUSTAU (D.). — Measuring and modelling the transpiration of maritime pine canopy from sapflow data. — *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 1994, pp. 61-81.
- GROUHEL (A.). — Dépérissement du Pin maritime sur le littoral atlantique (Vendée et Charente-Maritime). Aspects méthodologiques, géomorphologie et symptomatologie. — Rennes : École nationale supérieure agronomique, 1991. — 100 p. (Mémoire de DAA).
- GUEHL (J.-M.), FORT (C.), FEHRI (A.). — Differential response of leaf conductance, carbon isotope discrimination and water-use efficiency to nitrogen deficiency in maritime pine and pedunculate oak plants. — *New Phytologist*, 131, 1995, pp. 149-157.
- GUEHL (J.-M.), PICON (C.), AUSSENAC (G.), GROSS (P.). — Interactive effects of elevated CO₂ and soil drought on growth and transpiration efficiency and its determinants in two European forest tree species. — *Tree Physiology*, 14, 1994, pp. 707-724.
- GUINAUDEAU (J.), ILLY (G.), MAUGÉ (J.-P.), DUMAS (F.). — Essai de fertilisation minérale sur Pin maritime à Mimizan (Landes). Résultats après la sixième année. — *Annales de l'École nationale des Eaux et Forêts*, tome XX, fascicule 1, 1963, pp. 3-71.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. — Massif des Landes de Gascogne. Résultats de l'inventaire forestier 1977-1978. — Paris : Ministère de l'Agriculture, 1982. — 55 p.
- INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. — Massif des Landes de Gascogne. Résultats de l'inventaire forestier 1987-1988. — Paris : Ministère de l'Agriculture, 1991. — 91 p.

- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. — Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change : Scientific-technical Analyses / R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss, D.J. Dokken Eds. — Cambridge University Press, 1995.
- KAUPPI (E.), MIELIKAINEN (D.), KUUSELA (K.). — Biomass and carbon budget of European Forests, 1971 to 1990. — *Science*, 256, 1992, pp. 70-74.
- KLINGEBIEL (A.), BILLY (F.). — Les Lagunes du massif forestier des Landes de Gascogne. Dans : "De la Gestion au Développement durable". Actes du 4^e colloque organisé par ARBORA, 20-21 novembre 1997. — 1997. — pp. 57-67.
- LEMOINE (B.). — Un modèle de croissance pour le Pin maritime dans les Landes de Gascogne. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 116-119.
- LEMOINE (B.), GELPE (J.), RANGER (J.), NYS (C.). — Biomasse et croissance du Pin maritime. Étude de la variabilité dans un peuplement de 16 ans. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 43, n° 1, 1986, pp. 67-84.
- LEMOINE (B.), RANGER (J.), GELPE (J.). — Distribution qualitative et quantitative des éléments nutritifs dans un jeune peuplement de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 45, n° 2, 1988, pp. 95-116.
- LESGOURGUES (Y.), CRÉMIÈRE (L.), BORDERES (M.). — Conduite des boisements de Pin maritime sur le plateau landais : itinéraires techniques, pistes pour le futur. Dans : "De la Gestion au Développement durable". Actes du 4^e colloque organisé par ARBORA, 20-21 novembre 1997. — pp. 207-223.
- LOUSTAU (D.). — Rapport final du Contrat INRA-Cellulose du Pin Tartas. — Cestas : INRA - Station de Recherches forestières de Bordeaux-Cestas, 1994.
- LOUSTAU (D.). — Rapport final INRA du projet LTEEF 1 "Long term Effects of Climate Change on European Forests" (EV5V-CT94-0468), participant 12. Programme "Environnement et Climat", 1995-1996. — Union européenne - Direction générale XII, 1997. — pp. 139-174.
- LOUSTAU (D.), COCHARD (H.). — Utilisation d'une chambre à transpiration portable pour la mesure de l'évapotranspiration d'un sous-bois de Pin maritime à Molinie. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991, pp. 29-45.
- LOUSTAU (D.), BERBIGIER (P.), GRANIER (A.). — Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II - An application of Gash's analytical model of interception. — *Journal of Hydrology*, 138, 1992, pp. 469-485.
- MC MURTRIE (R.E.), GHOLZ (H.L.), LINDER (S.), GOWER (S.T.). — Climatic factors controlling productivity of pine stands : a model-based analysis. In: Environmental constraints on the structure and productivity of pine forest ecosystems: a comparative analysis / H.L. Gholz, S. Linder, R.E. Mc Murtrie Eds. — *Ecological Bulletin*, 43, 1994, pp. 173-189.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PÊCHE, DERF - Département Santé des Forêts. — La Santé des Forêts (France) en 1993. — Paris : DERF - Département Santé des Forêts, 1994. — 120 p.
- MOHREN (G.M.J.). — Rapport final du Contrat LTEEF 1 "Long term Effects of Climate Change on European Forests" (EV5V-CT94-0468). Programme "Environnement et Climat", 1995-1996. — Union européenne - Direction générale XII, 1997. — 183 p.
- NYS (C.), DIDIER (S.), LÉVY (G.), LEFÈVRE (Y.), TRICHET (P.). — Éléments minéraux : azote et phosphore. Dans : "Fonctionnement et gestion raisonnée de l'écosystème forestier landais". Rapport final du projet Landes 1, GIP-ECOFOR 1994-1996 / J. Timbal et M. Arbez. — Cestas : INRA - Station de Recherches forestières de Bordeaux-Cestas, 1997. — pp. 28-31.
- PICON (C.), GUEHL (J.-M.), FEHRI (A.). — Leaf gas exchange and carbon isotope composition responses to drought in a drought-avoiding (*Pinus pinaster*) and a drought tolerant (*Quercus petraea*) species under present and elevated atmospheric CO₂ concentration. — *Plant Cell Environment*, 19, 1995, pp. 427-436.
- PONETTE (Q.), ULRICH (E.), BRÊTHES (A.), BONNEAU (M.), LANIER (M.). — RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du Réseau, campagnes de mesures 1993/95. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1997 (ISBN 2-84207-100-X).
- PORTÉ (A.), LOUSTAU (D.). — Variability of photosynthetic characteristics within the crown of a 25-year-old maritime pine. — *Tree Physiology*, vol. 18, 1998, pp. 223-233.
- QUEYRENS (A.), FEHRI (A.), LOUSTAU (D.), GUEHL (J.-M.). — Within and between annual ring variations in d¹³C values of two contrasting provenances of *Pinus pinaster*. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 28, 1998, pp. 766-773.
- SAUR (E.). — Nutrition oligo-minérale du Pin maritime : Interaction phosphore cuivre. — Nancy : Institut national Polytechnique de Lorraine, 1989. — 184 p. (Thèse).
- TRICHET (P.), RANGER (J.), BERT (D.), LOUSTAU (D.). — Fonctionnement minéral d'un peuplement de Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Dans : De la Gestion au Développement durable. Actes du 4^e colloque organisé par ARBORA, 20-21 novembre 1997. — 1997. — pp. 97-119.
- ULRICH (E.), LANIER (M.), COMBES (D.). — Dépôts atmosphériques et concentrations des solutions du sol : rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1997.

VAUCHEL (F.). — Étude dendroécologique du Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) sur le dispositif de fertilisation de Berganton (Gironde). — Nancy : Université de Nancy I, 1996. — 25 pages + annexes (Mémoire de stage de DEA de Biologie forestière).

VOSE (J.M.), DOUGHERTY (P.M.), LONG (J.N.), SMITH (F.W.), GHOLZ (H.L.), CURRAN (P.J.). — Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. Dans : "Environmental constraints on the structure and productivity of pine forest ecosystems : a comparative analysis" / H.L. Gholz, S. Linder, R.E. Mc Murtrie Eds. — *Ecological Bulletin*, vol. 43, 1994, pp. 102-114.

FONCTIONNEMENT PRIMAIRE ET PRODUCTIVITÉ DE LA FORÊT LANDAISE : IMPLICATIONS POUR UNE GESTION DURABLE (Résumé)

Cet article dresse l'état actuel du biotope forestier landais, des ressources forestières de ce massif et des facteurs en limitant la production actuelle. Il s'attache dans un deuxième temps à donner les éléments actuellement connus sur l'évolution possible du milieu à long terme, en particulier sous l'action du changement climatique, à apprécier l'évolution des facteurs limitant la productivité forestière du massif landais et à identifier les indicateurs de cette évolution.

La productivité du massif forestier landais est en augmentation continue depuis 1960 et atteignait 9 m³ bois fort par hectare et par an en 1988. Elle est limitée par la disponibilité de différentes ressources trophiques : le rayonnement utile, le stock hydrique utile du sol, la concentration atmosphérique en CO₂, et le stock d'éléments nutritifs, azote, phosphore... Ces limitations varient dans le temps, au cours du cycle annuel, et au cours de la révolution. Elles varient également dans l'espace, en fonction du type écologique de la station. L'accès à ces différentes ressources fait aussi l'objet de relations de compétition entre les arbres et la végétation accompagnatrice.

Les scénarios climatiques disponibles montrent que l'accroissement de la teneur atmosphérique en CO₂ et en gaz à effet de serre entraînera une augmentation de la température moyenne et des contrastes pluviométriques saisonniers. Ce scénario pourrait conduire à un accroissement de la productivité forestière des stations les plus fertiles en lande humide et mésophile, mais aussi à une réduction de celle des stations les plus sèches ou les plus déficitaires en nutriments. Dans ce contexte, si on peut considérer que la sylviculture actuelle du Pin maritime satisfait globalement aux indicateurs généraux de gestion durable concernant la gestion de la ressource sur pied, le maintien de la productivité forestière du massif landais conduit à proposer une prise en compte de la gestion du biotope forestier dans la sylviculture du Pin maritime. En particulier, il est nécessaire de respecter les bilans biogéochimiques des éléments non — ou difficilement — renouvelables dans l'écosystème, dont l'azote, et à s'assurer que l'intensification du drainage est compatible avec une alimentation en eau optimale des arbres.

PRIMARY PRODUCTION AND PRODUCTIVITY OF THE LANDES DE GASCOGNE FORESTS : IMPLICATIONS FOR A SUSTAINABLE MANAGEMENT(Abstract)

This paper begins by describing the present status of the forest biotope of the "Landes de Gascogne" and identifying the main limiting factors. It goes on to give the available information about medium and long term changes in the physical environment, particularly those driven by global climate change, and analyses trends for the main factors that limit the primary production of the forest and possible indicators for monitoring these changes.

Forest production in the "Landes de Gascogne" area has been continuously increasing since 1960 and reached a level of 9 m³/ha/year in 1988. Production is curbed by the availability of trophic resources such as the incoming radiation, atmospheric concentration in CO₂, soil water and nutrients. Additionally, the access to those various resources is limited by competition with understorey vegetation. Those limitations vary over time, along the annual cycle and over the rotation. Site fertility is also constraining.

The available climatic scenarios suggest that the increase in atmospheric CO₂ and other greenhouse gases will lead to an increase in average temperature and reinforce the seasonal character of rainfall. This in turn could lead to increased forest production in the most humid and fertile sites. However, the productivity of the driest or nutrient-deficient sites could be lessened. Against this background, present management practices of maritime pine stands can be considered to be consistent with overall indicators of sustainable management. But to preserve the productivity of the Landes de Gascogne forests, additional management criteria for the maritime pine forests should be considered, such as the balance of nutrient cycling in forest ecosystem, especially for nutrients that cannot be or are difficult to renew, e.g., nitrogen. The improvement of soil drainage and subsequent lowering of the soil water table should also be kept compatible with optimal supply of soil water to trees during summer.

FUNKTIONELLE ABLÄUFE UND PRODUKTIVITÄT DER WÄLDER DER "LANDES" UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF EINE NACHHALTIGE BEWIRTSCHAFTUNG (Zusammenfassung)

Dieser Artikel stellt den aktuellen Zustand der Wälder der "Landes", der forstlichen Ressourcen dieses Waldmassivs und der Faktoren, die derzeit die Produktion begrenzen, dar. Darüber hinaus zeigt er die heutigen Kenntnisse über die mögliche langfristige Entwicklung der Umweltbedingungen, vor allem unter dem Einfluß der Klimaveränderungen, auf, schätzt die Entwicklung der begrenzenden Faktoren für die forstliche Produktion ein und identifiziert die Indikatoren dieser Entwicklung.

Seit 1960 steigt die Produktivität der Wälder der "Landes" kontinuierlich an und erreicht 9 m³ Starkholz pro Hektar und Jahr im Jahr 1988. Sie wird durch die Verfügbarkeit von verschiedenen Nährstoffressourcen begrenzt: photosynthetisch nutzbare Einstrahlung, nutzbare Feldkapazität des Bodens, CO₂ - Konzentration in der Atmosphäre und Nährelemente wie Stickstoff und Phosphor. Diese Faktoren variieren in der Zeit, mit dem Jahreszyklus, und im Verlauf einer Umtriebszeit. Sie variieren ebenso im Raum, in Abhängigkeit des Standortstyps. Der Zugang zu diesen verschiedenen Ressourcen unterliegt außerdem dem Wettbewerb zwischen den Bäumen und der Begleitvegetation.

Die verfügbaren Klima-Szenarien zeigen, daß die Erhöhung des Gehaltes an CO₂ und an Treibhausgasen in der Atmosphäre eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur und der jahreszeitlichen Niederschlagsunterschiede zur Folge haben wird. Dieses Szenario könnte zu einer Steigerung der forstlichen Produktivität der fruchtbarsten Standorte auf frischer, mesophiler Heide führen, aber auch zu ihrer Verminderung auf den trockensten und ärmsten Standorten.

Wenn man vor diesem Hintergrund annimmt, daß die derzeitige Bewirtschaftung der Seekiefer im großen und ganzen die Nachhaltigkeits-Indikatoren hinsichtlich der Bewirtschaftung der Ressource auf dem Stock erfüllt, dann führt die Erhaltung der forstlichen Produktivität dazu, eine Berücksichtigung des Standortes bei der Bewirtschaftung der Seekiefer vorzuschlagen. Insbesondere ist es notwendig, die biogeochemischen Bilanzen der nicht oder nur schwer erneuerbaren Elemente im Ökosystem, unter anderem Stickstoff, zu beachten, und sicherzustellen, daß die Intensivierung der Entwässerung mit der optimalen Wasserversorgung der Bäume zu vereinbaren ist.

FUNCIONAMIENTO PRIMARIO Y PRODUCTIVIDAD DEL BOSQUE LANDÉS : IMPLICACIONES PARA UNA GESTIÓN DURADERA (Resumen)

Este artículo establece el estado actual del biotopo landés, de los recursos forestales de dicho macizo y de los factores, limitando la producción actual. Se ocupa, en un segundo tiempo de dar los elementos, actualmente conocidos, sobre la evolución posible del ambiente, a largo plazo, en particular bajo la acción del cambio climático, de apreciar la evolución de los factores que limitan la productividad forestal del macizo landés y de identificar los indicadores de dicha evolución.

La productividad del macizo landés está en aumento continuo desde 1960 llegando a 9 m³ de madera fuerte por hectárea y por año en 1988. Está limitada por la disponibilidad de diferentes recursos tróficos : la expansión útil, la reserva hídrica útil del suelo, la concentración atmosférica en CO₂ y la reserva de elementos nutritivos, azote, fósforo, ... Esas limitaciones varían con el tiempo, durante el ciclo anual y durante la revolución. Varían, igualmente, en el espacio, en función del tipo ecológico de la estación. El acceso a esos diferentes recursos implica las relaciones de competencia entre los árboles y la vegetación de acompañamiento.

Las hipótesis climáticas disponibles muestran que el crecimiento de la dosis atmosférica en CO₂ y en gas, a los efectos de invernadero, ocasionará un aumento de la temperatura media y de los contrastes pluviométricos temporeros. Esa hipótesis podría conducir a un crecimiento de la productividad forestal de las estaciones más fértiles en landa húmeda y mesófila, pero también a una reducción de la de las estaciones más secas o las más deficitarias en nutrientes.

En tal contexto, si podemos considerar que la silvicultura actual del Pino marítimo satisface, globalmente, los indicadores generales de gestión duradera, concernientes a la gestión de las existencias en pie, el mantenimiento de la productividad forestal del macizo landés conduce a proponer una toma en consideración de la gestión del biotopo forestal, en la silvicultura del Pino marítimo.

En particular, es necesario respetar los balances biogeoquímicos de los elementos no — o difícilmente — renovables en el ecosistema, tal y como el azote y a asegurarse que la intensificación del drenaje es compatible con una alimentación de agua óptima para los árboles.