

Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime

Revue bibliographique et identification des pistes de recherches

P. Trichet⁽¹⁾, Cl. Jolivet⁽²⁾, D. Arrouays⁽²⁾, D. Loustau⁽¹⁾, D Bert⁽³⁾ et J. Ranger⁽⁴⁾

(1) INRA, Laboratoire d'Ecophysiologie et Nutrition, Domaine de l'Hermitage, 33610 Cestas.

(2) INRA, Unité de Science du Sol, SESCOF, Av de la Pomme de Pin, 45160 Ardon.

(3) INRA, Laboratoire de Croissance et Production, Domaine de l'Hermitage, 33610 Cestas.

(4) INRA, Equipe Cycles Biogéochimiques, Centre de Recherches de Nancy, 54280 Champenoux.

RÉSUMÉ

Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne sont des sols sableux podzolisés caractérisés par une forte acidité, une pauvreté en ressources minérales assimilables, fortement liée à la faible capacité de rétention de leur complexe adsorbant, la présence d'un alios plus ou moins induré et superficiel et d'une nappe phréatique atteignant la surface en hiver en lande humide. La végétation, le développement du profil et les stocks de matière organique dépendent étroitement du niveau de la nappe phréatique dont l'amplitude de battement varie en fonction du micro-relief. Le manque de connaissances sur la matière organique du sol, qui est une clef de compréhension de l'évolution de la fertilité, rend difficile l'établissement d'un diagnostic fiable sur le maintien de la fertilité azotée des sols landais. De plus, le non renouvellement de la ressource azotée par fertilisation, laisse entrevoir un appauvrissement progressif des réserves à chaque rotation. Pour le phosphore, la fertilisation des peuplements à chaque rotation maintient en équilibre la faible fertilité phosphatée des sols landais. Le potassium, et le magnésium, ne sont pas apportés par fertilisation. Le calcium est apporté à des niveaux variables comme élément constitutif des engrais phosphatés. Le faible niveau de connaissances sur leur cycle biogéochimique ne permet pas de conclure sur le caractère durable de la disponibilité de ces éléments dans les sols landais. De toutes les modifications probables de l'itinéraire technique sylvicole du Pin maritime, le raccourcissement des révolutions est sans doute le point le plus délicat à prendre en compte dans le raisonnement du maintien de la fertilité des sols landais, en raison de l'augmentation de la fréquence des prélèvements minéraux et organiques et des perturbations du sol occasionnées à chaque coupe rase.

Mots clés

Gestion durable, sol, fertilité, Pin maritime, Podzol, azote, phosphore, potassium, calcium, matière organique.

(1) : Les résultats présentés dans cet article ont fait l'objet d'une communication dans le cadre du quatrième Colloque ARBORA, Bordeaux, 20-21 Octobre 1997.

SUMMARY

SOIL SUSTAINABLE MANAGEMENT FOR THE MARITIME PINE SYLVICULTURE IN SOUTHWEST FRANCE.

Literature review and research prospects

Maritime Pine forest soils of french gascony are sandy spodosols, characterised with high acidity, low mineral nutrient availability linked to the low cation exchange capacity, iron pan more or less hard and superficial. The vegetation, the profile development and the organic matter storage are strongly affected by the water table level, which is governed by a decimetric micro-relief of low ridge and shallow troughs of 10 to 30 m width. Renewability of soil nitrogen resource is a key problem of the soil fertility sustainability, because of the absence of nitrogen fertilization and of the nutrient losses at crop harvest. The present lack of knowledge about the organic matter behaviour, and about the biogeochemical cycles of this ecosystem make impossible a reliable assessment of the soil nitrogen fertility sustainability. Phosphorus fertilization applied at the beginning of each forest rotation, balances the low phosphorus fertility of these sandy soils. Potassium, and magnesium are not renewed by fertilization. Calcium is supplied as constitutive element of the phosphorus fertilizers. There is a lack of knowledge about their biogeochemical cycle. The expected shortening of maritime Pine rotation duration is expected to fasten the soil nutrient impoverishment, because of the increased frequency of nutrient exportations and losses at harvest.

Key-words

Sustainable management, soil, fertility, maritime Pine, spodosol, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, organic matter.

RESUMEN

EL MANTENIMIENTO DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS FORESTALES DE LAS "LANDAS" EN EL CUADRO DE LA SILVICULTURA INTENSIVA DEL PINO MARÍTIMO. Revisión bibliográfica y pistas de investigaciones

Los suelos del macizo forestal de las "Landas" son suelos arenosos podzolizados caracterizados por una fuerte acidez, un manto freático superficial y una pobreza en recursos minerales aprovechables, fuertemente ligada a la pequeña capacidad de retención del complejo adsorbente. Para el nitrógeno, la ausencia de renovación del recurso por fertilización, deja entrever un empobrecimiento progresivo de las reservas a cada rotación. Además, la falta de conocimientos sobre la materia orgánica del suelo, que es una llave de comprensión de la evolución de la fertilidad, hace difícil el establecimiento de un diagnóstico fiable sobre el mantenimiento de la fertilidad nitrogenada de los suelos de las "Landas". Para el fósforo, la fertilización de las poblaciones a cada rotación mantiene en equilibrio la pequeña fertilidad fosfatada de los suelos "de los Landas". El potasio, el calcio y el magnesio, no son traídos por fertilización. El somero nivel de conocimientos sobre los ciclos biogeoquímicos no permite concluir sobre el carácter sostenible de la disponibilidad de estos

Palabras claves

Gestión durable, suelo, fertilidad, pino marítimo, Podzol, nitrogena, fósforo, potasio, calcio, materia orgánica.

La durabilité des écosystèmes forestiers, repose sur un équilibre dynamique impliquant un processus de recyclage permanent des éléments nutritifs entre la végétation et le sol. La perturbation du cycle naturel des éléments, consécutive au développement des pratiques sylvicoles, est susceptible d'entraîner des modifications de certaines propriétés du sol ainsi que des pertes en éléments nutritifs. L'impact de ces modifications et de ces pertes sur la durabilité des peuplements forestiers dépend en grande partie de l'ampleur de ces perturbations et de la capacité de régénération de l'écosystème (Pritchett et Fisher, 1987, Kimmins, 1996).

La gestion durable des forêts n'est pas une notion récente. En effet, le souci de maintenir le niveau de fertilité des sols forestiers préoccupait déjà Grandeau, Sabatier ou Henry dès la fin du XIX^{ème} siècle. Ce paramètre n'a pourtant pas retenu l'attention du sylviculteur, vraisemblablement en raison de la frugalité légendaire des peuplements forestiers, de la longévité et la rusticité des essences et de l'exploitation relativement extensive de la ressource (Ranger, 1996). Cependant, l'intensification de la sylviculture a récemment conduit de nombreux pays à se poser la question du caractère durable d'une telle gestion (Conférence de Strasbourg, 1991 ; Conférence d'Helsinki, 1993 ; F.A.O, 1995 ; O.E.C.D, 1997 ; Conférence de Lisbonne, 1998). Ainsi des travaux ont été menés aux Etats-Unis (Edwards et Ross-Todd, 1983 ; Mroz et al., 1985 ; Johnson et al., 1991a, 1991b), au Canada (Munson et al., 1993 ; Schmidt et al., 1996, Pennock et van Kessel, 1997), en Nouvelle Zélande (Hunter et Smith, 1996) et en Europe (Ranger et Bonneau, 1984, Nillson et al., 1995, Ranger et al., 1996). Tous ces travaux mettent en évidence que la succession de plantations forestières conduites de manière intensive peut entraîner une perte plus ou moins rapide de la fertilité des sols. Cette évolution est d'autant plus prononcée que les pertes minérales (demande à l'écosystème) liées à la récolte, au drainage et à l'érosion sont fortes et que les restitutions par la fertilisation sont faibles.

Le massif forestier des Landes de Gascogne représente une vaste unité pédologique relativement homogène (près d'un million d'hectares), constituée de sols sableux podzolisés plus ou moins hydromorphes. Le Pin maritime y est cultivé depuis près de 150 ans (trois rotations successives) selon des méthodes sylvicoles de plus en plus intensives. Ainsi, la productivité sur le massif landais est passée de 4,8 m³/ha/an en 1960 à 9,8 m³/ha/an en 1990 (I.F.N, 1991). Dans quelle mesure la culture du Pin maritime induit-elle une évolution de la fertilité de ces sols ? De quelle manière et à quelle rapidité l'aptitude des sols landais à soutenir une production forestière évolue-t-elle ?

L'objectif de cette revue bibliographique est de dresser un état des lieux des connaissances acquises et à acquérir dans le domaine du maintien de la fertilité des sols landais dans le

cadre de la gestion intensive du Pin maritime. Dans une première partie nous nous intéresserons à la description et à la répartition des sols sur le massif landais, pour ensuite, dans une deuxième partie, traiter de l'impact de la sylviculture du Pin maritime sur l'évolution de la fertilité des sols.

CARACTERES GENERAUX, DIVERSITE ET FERTILITE DES SOLS FORESTIERS LANDAIS

Caractères généraux des sols landais

Les sols de la plaine sableuse des Landes de Gascogne sont essentiellement des sols podzolisés humifères, plus ou moins hydromorphes. Ces sols sont développés sur une formation quaternaire superficielle d'origine éolienne, le Sable des Landes (Balland et Cailleux, 1946 ; Legigan, 1970, 1974), dont l'épandage est daté du Tardiglaciaire (11500 BP). Ces podzols sont caractérisés par une texture grossière, une pauvreté marquée en ressources minérales assimilables, une forte acidité, une nappe phréatique superficielle affleurant en hiver, et un horizon d'andos plus ou moins induré apparaissant entre 40 et 100 cm de profondeur. L'étude du fonctionnement géochimique de podzols landais réalisée à l'aide de la méthode des minéraux tests, a mis en évidence des podzols morphologiquement bien différenciés en phase de post-podzolisation ou de podzolisation ralentie ou épisodique (Rhighi et al, 1991). Cette étude montre l'intérêt de compléter l'étude descriptive des sols landais par des études de fonctionnement, jusqu'alors peu développées.

L'analyse granulométrique des horizons superficiels (Guinaudeau et al., 1963 ; Latouche et al., 1974 ; Righi, 1977 ; Wilbert, 1990 ; Saur, 1989a, 1990) met en évidence une texture presque exclusivement sableuse, caractérisée par une forte proportion de sables grossiers (200 à 500 µm) comprise entre 60 et 70 %. La fraction fine (0 à 50 µm), toujours inférieure à 10 %, se répartit entre 1 à 5 % de limons et 0,5 à 5 % d'argiles granulométriques.

Le pH des sols landais varie entre 3,5 et 5,5, avec une moyenne comprise entre 4 et 5 (Guinaudeau et al., 1963 ; Wilbert, 1990 ; Saur, 1989a, 1990 ; Juste, 1992), ce qui les classe dans la catégorie des sols très acides (Duchofour, 1995).

La pauvreté des sols landais en ressources minérales assimilables est fortement liée à la faible capacité de rétention du complexe adsorbant des sols (CEC < 15 meq/100 g, taux de saturation de 10 à 15 %, dans les horizons A). En raison des faibles teneurs en éléments fins (limons + argiles < 10 %), la capacité totale d'échange de cations est essentiellement attribuable à la matière organique du sol (Juste, 1992).

La matière organique des horizons superficiels varie de 1 à 15 % en fonction du type de sol (Juste, 1965; Jambu et Righi, 1973; Righi et Wilbert, 1984; Juste, 1992). Le rapport C/N est toujours élevé et varie entre 15 et 40 selon la situation topographique et les types de sol.

De ces caractéristiques analytiques, il ressort de manière évidente que la matière organique joue un rôle essentiel dans les sols des Landes de Gascogne. Pratiquement seule composante du complexe adsorbant, elle constitue le support majeur de fertilité et de rétention d'eau du fait des faibles teneurs en colloïdes argileux de ces sols sableux. De plus, elle représente l'un des seuls éléments assurant au sol une certaine cohésion et joue par conséquent un rôle de stabilisateur structural, pouvant limiter par sa présence les phénomènes d'érosion hydrique ou éolienne (Jacquin et al., 1965; Juste et al., 1971; Juste, 1992).

Diversité des sols forestiers landais

Malgré une apparente homogénéité, les podzols landais possèdent des degrés d'évolution variés dont la distribution géographique n'est pas aléatoire. En effet, la répartition des sols présente deux niveaux d'organisation emboîtés, déterminés par la topographie (relief général et micro-relief) et par la présence d'une nappe phréatique superficielle apparaissant à profondeur variable. En effet, tout le massif est affecté par la présence d'une nappe phréatique souvent proche de la surface (Cottinet, 1974), qui oriente la pédogenèse (Legigan, 1974) et alimente les lagunes de la Haute Lande (Filipuzzi, 1974; Montès, 1992). L'influence sur la pédogenèse, de cette nappe et des associations végétales qui y sont liées, a été particulièrement mise en évidence par Righi (1977) et Righi et Wilbert (1984) sur les sols des Landes du Médoc.

Diversité pédologique à l'échelle du massif forestier (Répartition générale des sols)

A l'échelle régionale, le relief général (talwegs, interfluves, dunes continentales...) et la nappe phréatique superficielle déterminent la répartition des principaux pédopaysages du massif. Ainsi, en fonction de la situation topographique, de la profondeur d'apparition de la nappe phréatique et de son amplitude de battement, on distingue traditionnellement trois types de lande : la lande humide, la lande mésophile et la lande sèche. Les landes humides et mésophiles totalisent environ 80 % de la surface du massif forestier landais, et les landes sèches environ 15 % (I.F.N., 1991), le reste de la surface étant constituée par de la forêt dunaire littorale. Ces trois principaux types de lande sont définis par une végétation caractéristique (St-Didier, 1976; Demounem, 1979) et un type de sol dominant (Figure 1).

La lande humide (ou hygrophile)

La majeure partie du massif landais est occupée par de vastes étendues planes, mal drainées, où la nappe phréatique superficielle est omniprésente. Dans ces zones humides, le niveau de la nappe évolue lentement et affleure à la surface

lors des périodes de forte pluviosité printanière et automnale. Ces conditions, limitant la migration verticale des composés organiques, s'opposent à la formation d'un horizon éluvial. Les courtes périodes de dessiccation affectant la base du profil ne permettent pas non plus l'induration de l'horizon spodique qui reste meuble. Ces sols sont qualifiés de podzols humiques très hydromorphes à horizon spodique meuble (Podzosols humiques). La végétation caractéristique est essentiellement composée de Molinie (*Molinia coerulea*) et d'Ajonc nain (*Ulex nanus*). Enfin, dans les situations les plus humides (dépressions, anciennes lagunes), on observe des sols humiques à gley.

La lande sèche (ou xérophile)

Sur les bordures méridionales et occidentales du massif, sur d'anciennes dunes intérieures ainsi qu'en bordure des ruisseaux (Figure 2), l'enfoncement rapide des axes de drainage vers leurs niveaux de base provoque un rabattement important de la nappe phréatique. On observe alors des étendues de lande sèche où s'individualisent des podzols à horizon éluvial très épais et horizons spodiques meubles (Podzosols meubles). Ces podzols développés en milieu bien drainé ne subissent jamais l'influence de la nappe phréatique. Par conséquent, le processus de podzolisation n'est tributaire que du climat et de la végétation. La Callune (*Calluna vulgaris*), la Bruyère cendrée (*Erica cinerea*) et l'Hélianthème (*Helianthemum allyssoides*) de la série du Chêne tauzin, sont caractéristiques des landes sèches.

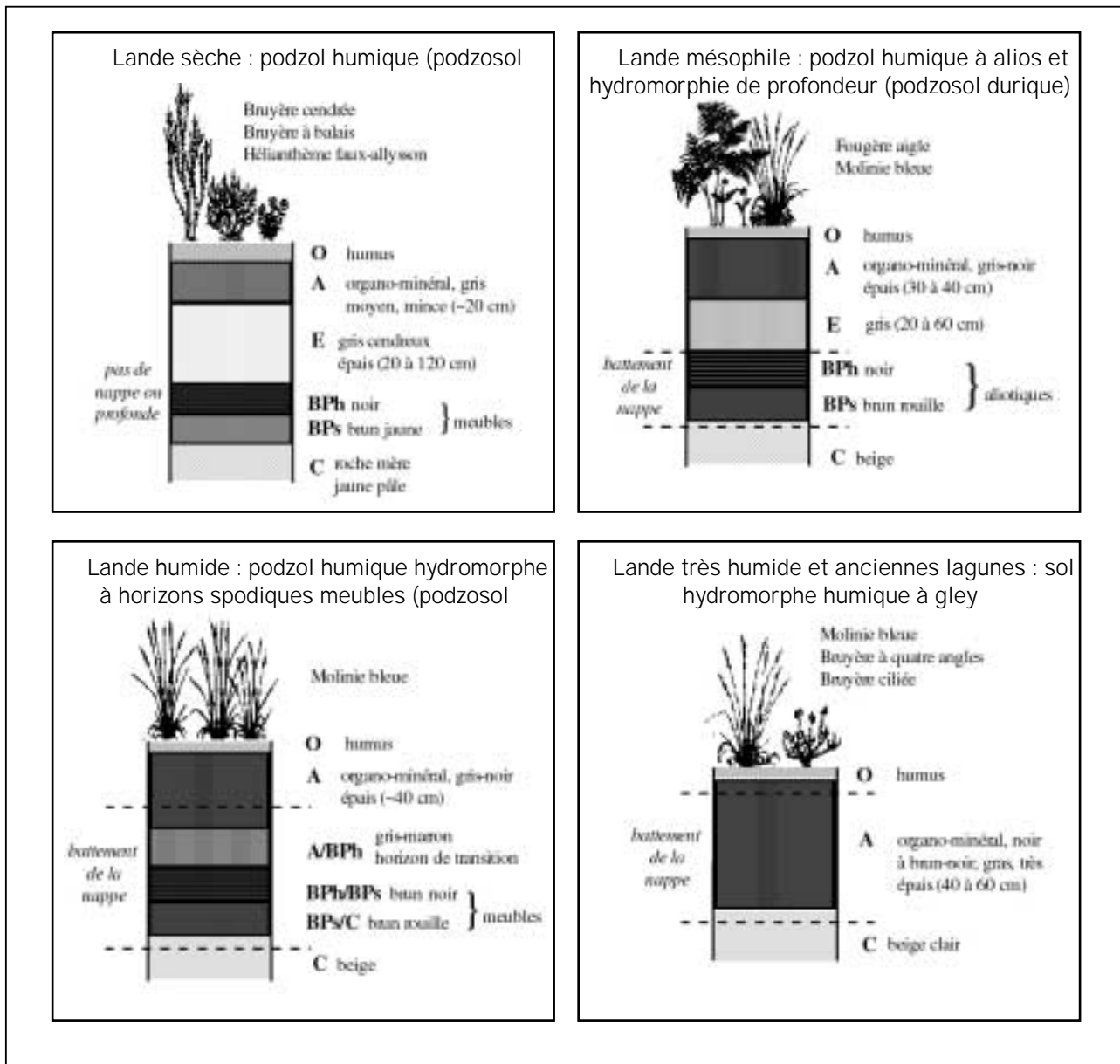
La lande mésophile

La lande mésophile représente une situation topographique et écologique intermédiaire entre lande sèche et lande humide. La présence de la nappe phréatique et surtout l'importance de son amplitude de battement créent des alternances de périodes d'humectation et de dessiccation permettant l'individualisation d'un horizon éluvial et favorisant la consolidation des horizons spodiques en alios. Les sols développés dans ces conditions sont qualifiés de Podzols humiques à alios et hydromorphie de profondeur (Podzosols duriques). La végétation caractéristique est représentée par la Fougère-Aigle (*Pteridium aquilinum*) et l'Ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*) de la série atlantique du Chêne pédonculé.

La couverture pédologique du massif landais est donc formée de la juxtaposition de trois terroirs principaux - landes sèche, humide et mésophile - présentant des caractéristiques propres. A l'échelle régionale, ces terroirs peuvent représenter des ensembles de vaste superficie. Les landes sèches sont localisées au sommet des dunes continentales et à proximité des cours d'eau, les landes humides au sein de vastes interfluves et les landes mésophiles occupent une position intermédiaire. Cette répartition régionale des pédopaysages apparaît cependant plus complexe lorsqu'on s'intéresse à des unités paysagiques plus petites. En effet, à l'échelle parcellaire,

Figure 1 - Principaux types de sols dans les Landes de Gascogne (G.E.R.E.A, 1990)

Figure 1 - Main soil types of the Landes de Gascogne (G.E.R.E.A, 1990)



ces ensembles - et en particulier l'organisation des sols qui les caractérisent - sont le plus souvent très morcelés avec des passages rapides d'un type de sol à l'autre. Ceci est particulièrement vrai au sein de la lande humide.

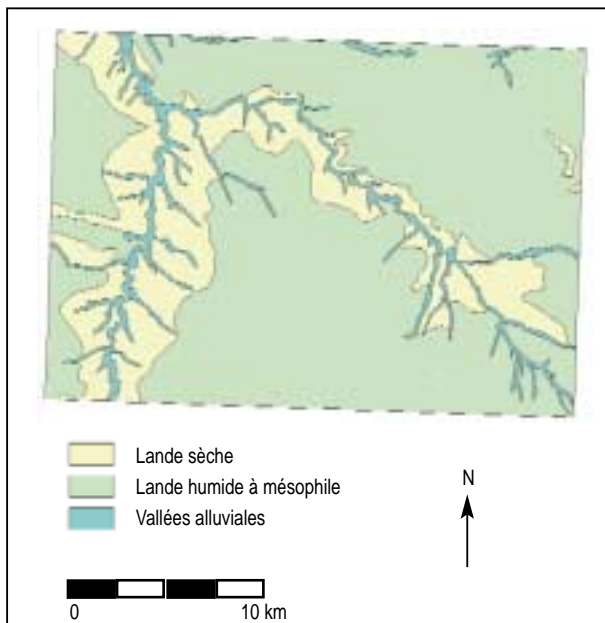
Diversité pédologique à l'échelle de la

parcelle (Variabilité intra-parcellaire des sols)

Dans les interfluvés mal drainés constituant la lande humide, la répartition des sols est déterminée par la nappe phréatique superficielle, mais également par la présence d'un microrelief, constitué de rides dunaires, étroites, grossièrement parallèles et discontinues, qui forment une suite de petites dépressions et de petites buttes de quelques centimètres de

Figure 2 - Extrait de la carte des pédopaysages des Landes de Gascogne (secteur de la Grande Leyre et de la Petite Leyre)

Figure 2 - Extract from the pedoscape map of the Landes de



Source I.G.C.S - I.N.R.A, d'après Jolivet (1996)

dénivellation, allongées dans le sens du vent dominant (Filipuzzi, 1974).

A l'échelle intraparcellaire, la présence de ce microrelief caractéristique introduit une gamme de variabilité pédologique supplémentaire. Cette variabilité se traduit dans la répartition des sols par une mosaïque de podzols plus ou moins différenciés, que l'on peut observer au sein de la lande humide. Dans ce milieu, le microrelief conditionne l'importance de la zone de battement de la nappe phréatique dans le profil. Une différenciation des profils intervient alors de façon progressive entre un pôle humide et un pôle mésophile, faisant apparaître de véritables toposéquences de transition (Righi, 1977, Righi et Wilbert, 1984). Ce type de toposéquence, représentative de la différenciation morphologique des sols, s'observe notamment lorsqu'on passe latéralement d'une micro-dune continentale à une dépression marécageuse, mais plus généralement lorsque sont perceptibles des variations d'altitude d'ordre décimétrique. En position haute (butte), on observe ainsi des podzols humiques à horizon éluvial (E), horizons spodiques indurés (alios) et hydromorphie de profondeur et en position basse, des podzols humiques hydromorphes sans horizon éluvial et à horizon spodique meuble. Ces conditions différentielles d'hydromorphie orientent non seulement l'évolution des sols

mais également les processus d'humification. Les stocks de matières organiques des sols et la qualité de ces matières organiques varient donc significativement d'un pôle à l'autre. Lorsque le sol est nu, cette organisation est décelable par des variations de couleur de surface, perceptibles à l'œil nu, ou sur photographies aériennes (Arrouays et al., 1983). Sous forêt, le passage entre zones de molinie et " ronds " de fougère illustre parfaitement cette organisation.

La mosaïque de sols constituant la lande humide se traduit par une forte variabilité de certaines propriétés du sol, dont en particulier la teneur en matière organique. L'étude et le suivi de l'évolution des propriétés du sol - dont la fertilité - doit nécessairement intégrer cette variabilité. Une telle démarche, nécessitant une approche géostatistique, a déjà été menée sur des parcelles de maïs (Arrouays et al., 1997 ; Jolivet et Arrouays, 1997 ; Duteïs, 1998). Nous présentons ici (Figure 3) une illustration de la variabilité spatiale des teneurs en matière organique de l'horizon A sous couvert forestier. Cette cartographie obtenue par interpolation d'un grand nombre d'analyses géoréférencées (300/ha) montre la forte variabilité de ces teneurs qui varient du simple au quintuple sur une surface d'un hectare.

Caractéristiques des sols landais en terme de fertilité forestière

Les différentes composantes de la fertilité

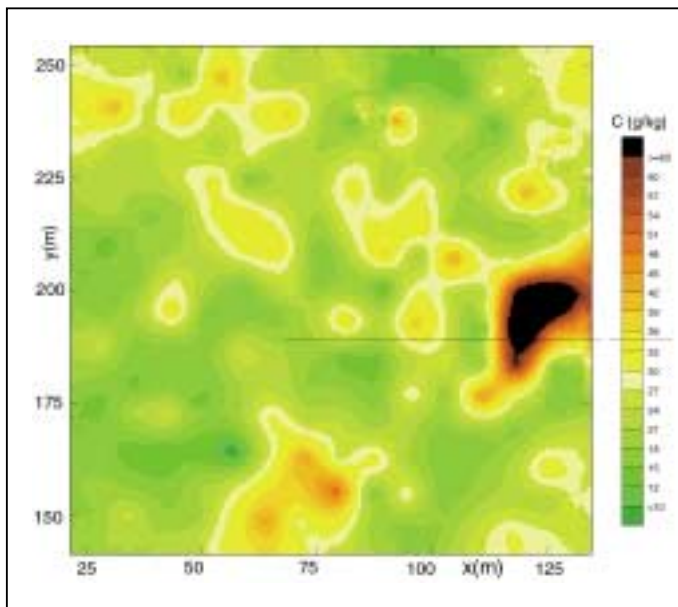
La fertilité d'un sol est le plus souvent définie comme une somme de facteurs physiques, chimiques et biologiques déterminant son aptitude à soutenir une production. Deux types de critères permettent de déterminer la fertilité forestière d'un sol (Ranger, 1993, 1996) : les critères intrinsèques de la fertilité (richesse minérale du sol et climat), qui déterminent de manière indépendante les potentialités du sol, et les critères dépendant de l'essence forestière, qui expriment plus ou moins le potentiel du sol en fonction de ses besoins propres.

Nous n'aborderons dans cet article que le volet minéral de la fertilité intrinsèque. D'autres facteurs interviennent dans l'expression de la fertilité, l'alimentation en eau en particulier (Chossat et al., 1997). Deux composantes définissent la fertilité minérale du sol : la fertilité actuelle d'une part et la fertilité à moyen et long terme d'autre part (Ranger, 1996).

La fertilité actuelle peut être assimilée au stock d'éléments minéraux disponibles pour la végétation. Son évaluation est réalisée à partir du dosage des cations échangeables (K, Ca, Mg), du phosphore dit assimilable (attaque des extraits à doser par des réactifs relativement doux) et de l'azote minéral. L'azote minéral disponible pour la végétation peut être estimé de manière ponctuelle, mais la fugacité et la mobilité des formes d'azote dosées entraînent des variations saisonnières fortes. Par conséquent, la production d'azote est généralement estimée à l'échelle d'une saison de végétation.

Figure 3 - Variabilité des teneurs en matière organique d'une parcelle forestière d'un hectare (horizon A, couche 0-30 cm).

Figure 3 - Organic matter variability in a maritime pine forest of the Landes de Gascogne (A horizon, 0-30 cm depth).



La fertilité à moyen terme est estimée au travers d'études dynamiques s'intéressant au flux d'éléments minéraux susceptible d'alimenter le pool biodisponible au fur et à mesure de sa consommation (altération des minéraux du sol, drainage, mouvements de nappe, retombées atmosphériques).

La fertilité à long terme peut être assimilée aux réserves totales du sol en éléments minéraux, quelle que soit leur forme chimique (engagés dans une structure organique ou minérale, stable ou non).

L'état des connaissances acquises et à acquérir sur la fertilité intrinsèque des sols landais est résumé dans le tableau 1.

L'azote

La disponibilité de l'azote pour les végétaux est étroitement liée à la quantité et à la qualité de la matière organique du sol. La matière organique des podzols landais susceptible de participer à la nutrition azotée de la végétation se trouve dans les horizons superficiels : humus de type mor à moder et horizon organo-minéral humifère (A). Dans l'horizon A, le rapport Carbone/Azote (C/N), indicateur de la capacité des sols à libérer de l'azote minéral assimilable, est relativement élevé et témoigne d'un humus libérant peu d'azote (Bonneau, 1995). Il varie schématiquement de 15 à 30 pour les sols de lande humide à mésophile et de 30 à 40 pour les sols de lande sèche (Guinaudeau et al., 1963; Juste, 1965, 1992; Jambu et Righi, 1973; Righi et Wilbert, 1984). D'une manière générale, les sols landais sont donc relativement riches en matière organique, mais cette dernière libère peu d'azote assimilable pour les arbres.

Le phosphore

La richesse en phosphore des sols landais est estimée par le dosage du phosphore assimilable, le plus souvent par "la méthode Duchaufour" ou "la méthode Dyer". Les concentrations en P_2O_5 dans les horizons superficiels varient entre 0,02 et 0,05 $g \cdot kg^{-1}$ pour la méthode Duchaufour et entre 0,025 et 0,035 $g \cdot kg^{-1}$ pour la méthode Dyer (Guinaudeau et al., 1963; Saur, 1990; Nys et al., 1995; Vauchel, 1996). Ces valeurs classent les sols landais dans la catégorie des sols pauvres en phosphore (Bonneau, 1995). Les faibles teneurs en phosphore assimilable s'expliquent par la pauvreté minérale des sables landais, mais également par leur caractère acide. En effet, plus l'acidité est forte, plus le phosphore se lie de manière énergétique avec les hydroxydes de fer et d'aluminium et plus il est difficilement libéré dans la solution du sol, et mis ainsi à disposition pour la végétation (Fardeau et al., 1991; Duchaufour, 1995). Dans ce milieu, l'utilisation de la technique de dosage de l'acide phosphorique par dilution isotopique (Fardeau, 1996) permettrait de caractériser la répartition du phosphore en fonction de sa biodisponibilité.

Les éléments échangeables

Les teneurs en K, Ca, Mg échangeables des horizons humifères et minéraux sont faibles (Tableau 2). Les sols landais sont donc classés dans la catégorie des sols pauvres en cations échangeables (Bonneau, 1995). La faiblesse des concentrations en éléments échangeables n'est pas surprenante, compte tenu de la pauvreté du sol en minéraux argileux, à l'origine d'un complexe adsorbant très réduit (CEC inférieure à 15 meq/100 g, essentiellement liée à la matière organique). De plus, la faiblesse des teneurs en éléments échangeables vient également du fait que (i) les minéraux altérables sont très peu abondants, ce qui implique un flux de recharge du complexe adsorbant potentiellement faible et que (ii) les remontées biologiques par les racines sont faibles car l'enracinement est souvent limité en profondeur par la couche d'aliés.

Les oligo-éléments

En ce qui concerne les oligo-éléments, Saur (1989a, 1989b, 1990) fournit des teneurs en Cuivre, Manganèse, Zinc, Bore et Fer dans des sols landais. Les faibles connaissances sur les normes de fertilité en oligo-éléments (Bonneau, 1995) ne permettent actuellement pas de relier ces teneurs avec le statut nutritif oligo-minéral des arbres. Le cuivre est l'élément qui a été le plus étudié : Saur (1990) met en évidence la très forte capacité des sols landais à complexer le cuivre et à le rendre ainsi peu disponible pour les

Figure 4 - Evolution du cycle biogéochimique dans une plantation de Pin maritime dans les Landes de Gascogne (Dessin d'après Centre de Productivité et d'Action Forestière d'Aquitaine, 1992).

Figure 4 - Biochemical cycling in a maritime pine plantation of the Landes de Gascogne (Illustration from Centre de Productivité et d'Action Forestière d'Aquitaine, 1992).

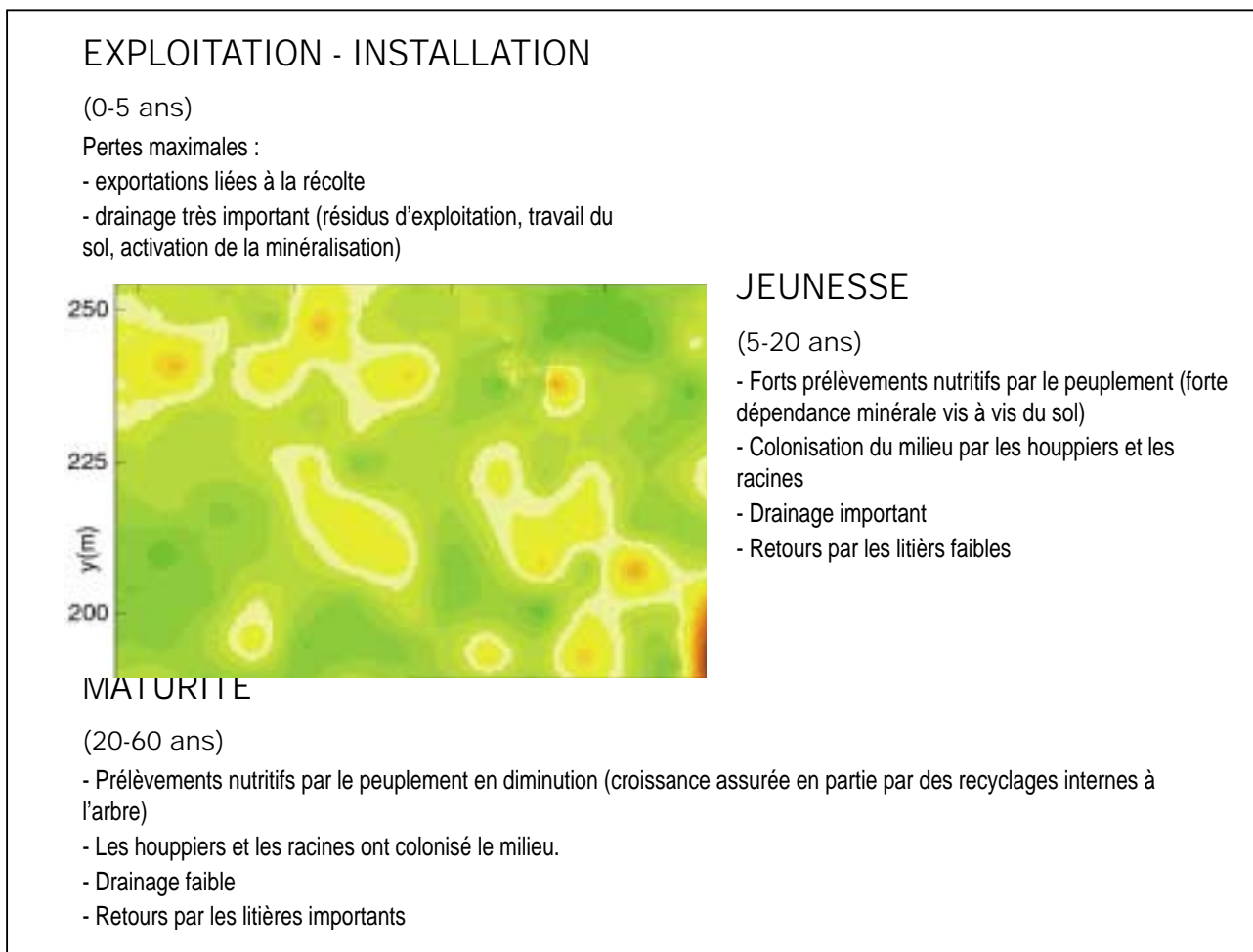


Tableau 2 - Concentrations en K, Ca, Mg échangeables rencontrées dans des sols landais.

Table 2 - Exchangeable bases concentrations of the forest soils of the Landes de Gascogne.

		K (meq/100 g)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)
Horizons humifères	Sol landais ¹	0,02 à 0,2	0,3 à 1,6	0,2 à 0,7
	Seuil de pauvreté ²	< 0,4	< 1	< 0,6
Horizons minéraux	Sol landais ¹	0,01 à 0,05	0,2	0,07
	Seuil de pauvreté ²	< 0,12	< 0,3	< 0,15

1 d'après Guinaudeau et al, 1963, Saur, 1989a, 1990, Nys et al, 1995, Vauchel, 1996.

2 d'après Bonneau, 1995

Tableau 1 - Etat des connaissances sur la fertilité des sols forestiers des Landes de Gascogne.

Table 1 - Current knowledge about the forest soils of the Landes de Gascogne.

	apparition de l'alias...	Connaissances acquises
Fertilité à très long terme	Réserves totales	
Fertilité à moyen terme	Réserves mobilisables : Etudes des flux de minéraux dans le sol	Des données ponctuelles dans Courcoux (1982) et Merzeau (1983). Des données sur les flux de minéraux dans des bassins
Fertilité actuelle	L'azote minéral - la matière organique et le taux de minéralisation - la solution du sol (NH ⁴⁺ , NO ³⁻)	versants (Chossat et al., 1997). Description de la matière organique et des données sur le C/N (indicateur de l'aptitude de l'humus à libérer le N) dans Jambu et Righi (1973), Righi et
Fertilité actuelle	Le phosphore assimilable	Wilbert (1984). Concentrations : des références (Saur, 1989a) Le passage des concentrations aux quantités par ha est rarement réalisé. Des bilans (kg de P ₂ O ₅ /ha) : ont
Fertilité actuelle	Les cations	été réalisés sur le site de Berganton (Vauchel, 1996) et sont en cours à Mimizan (Nys et
Fertilité actuelle		al., 1995)
Fertilité actuelle	Les oligo éléments	Concentrations : des références
Fertilité actuelle	Le pH Description pédologique des sols,	

végétaux. Il attribue la mauvaise forme des arbres à cette déficience en cuivre.

LA SYLVICULTURE DU PIN MARITIME ET SES CONSEQUENCES POUR LES SOLS

La forêt exploitée de Pin maritime des Landes de Gascogne est récente. Elle a fonctionné pendant plus d'un siècle (de sa " création " vers 1850 jusqu'aux années 1950) selon un mode de gestion sylvicole de type traditionnel basé sur la production de bois de sciage et le gemmage (250 pins/ha, rotations de 80 à 90 ans). Cependant l'enjeu économique d'un tel massif est énorme et l'on comprend aisément que des tentatives d'amélioration et d'accélération de la production soient envisagées. La modernisation de la sylviculture entreprise depuis la fin des

années 1950 a progressivement introduit puis imposé dès les années 1960-70 sous le terme de ligniculture, l'assainissement des landes humides, le travail mécanique du sol, la fertilisation phosphatée, le débroussaillage chimique et mécanique inclus dans un itinéraire sylvicole comprenant quatre éclaircies et une coupe rase (Lesgourgues et al., 1997). Les modes de gestion actuels des peuplements forestiers landais (400 pins/ha, rotation de 40 à 50 ans) ont largement généralisé l'utilisation des techniques de ligniculture à l'ensemble du massif, mais également l'emploi de variétés de Pin maritime améliorées. D'ores et déjà, des scénarios plus intensifs fondés sur de courtes rotations (20 à 25 ans) sont envisagés par les gestionnaires forestiers pour répondre à l'évolution du marché vers la production de bois de trituration (Lesgourgues et al., 1997).

Face à l'apparition de tel scénarios, impliquant une pression accrue sur les sols forestiers (interventions mécaniques, augmentation de la productivité forestière et raccourcissement des

rotations), le maintien de la fertilité des sols à long terme se pose de manière cruciale. Dans un souci de gestion durable des ressources minérales et organiques du sol à l'échelle du massif landais, un certain nombre de travaux ont déjà été réalisés ou sont en cours de réalisation.

Dans un premier temps, nous discuterons de l'impact des différentes étapes de l'itinéraire technique de la ligniculture du Pin maritime sur l'évolution de la fertilité des sols landais, pour ensuite déboucher, dans un second temps, sur des bilans entrées-sorties de minéraux de l'écosystème, pour une rotation de Pin maritime de 50 ans. Dans un troisième temps, le problème de l'acidification des sols landais en relation avec la culture du Pin maritime sera abordé.

Impact sur les sols des différentes opérations sylvicoles caractérisant la sylviculture intensive du Pin maritime (ligniculture)

Coupe rase et installation du peuplement

La coupe rase est l'étape de la vie d'un peuplement où la perte d'éléments minéraux est susceptible d'être la plus importante (Figure 4). En effet, au moment de la coupe rase, le sol de la parcelle forestière est fortement perturbé par l'abattage, le débardage, le broyage et l'enfouissement des résidus d'exploitation, le dessouchage et le labour. Ces multiples opérations entraînent un profond remaniement des caractéristiques physico-chimiques du sol et du fonctionnement des cycles biogéochimiques (Johnson et al., 1991b), susceptible de provoquer une activation brutale de la minéralisation des stocks de matières organiques accumulés tout au long de la révolution.

Gestion des résidus végétaux de la coupe rase

Après l'abattage et le débardage une quantité importante de résidus d'exploitation reste sur la parcelle (houppiers, racines). Les houppiers de Pin maritime constituent en effet 32 % de la biomasse aérienne dans un peuplement de 16 ans (Lemoine et al, 1986), et de l'ordre de 20 % dans un peuplement de 25 ans, soit 25 t/ha (Porté, 1999). Pour réduire les exportations minérales et organiques hors de l'écosystème, il est primordial de broyer et d'enfouir ces résidus lors de la préparation du sol pour la future plantation; c'est la solution la plus fréquemment choisie sur le massif landais. La mise en andain et le brûlage provoquent des pertes minérales importantes (lessivage, volatilisation, pertes particulières) et privent le sol d'un apport de matière organique fraîche, nécessaire au maintien de ses caractéristiques physico-chimiques. Ces pratiques sont donc à déconseiller dans le cadre d'une gestion durable. Chez le Pin maritime l'écorce est épaisse : elle constitue sur un peuplement de 26 ans de l'ordre de 12 % de la biomasse aérienne

(Porté, 1999). L'écorçage en forêt permettrait de réduire les exportations, et restituer au sol une importante quantité de matière organique (+55% par rapport à la restitution du houp-pier seul, sur le peuplement étudié de 26 ans) et de minéraux : pour un pin maritime de 16 ans, 30 % de l'azote et du phosphore contenus dans le tronc, sont dans l'écorce (Lemoine et al, 1988, 1990). Cependant, la valeur commerciale de l'écorce de Pin maritime (très recherchée en horticulture), rend peu probable l'hypothèse d'un écorçage in situ.

Durée de la coupe et gestion de la strate basse

Le terrain est généralement laissé en friche durant deux voire trois ans. En effet, la plantation n'est pas possible immédiatement après le débardage, en raison du très fort risque d'attaque des plants par l'hylobe (*Hylobius abietis* L.), ravageur endémique des peuplements résineux, qui trouve après la coupe rase, par la présence de souches, les conditions idéales de son développement.

L'ampleur des pertes minérales par drainage sur un sol nu après coupe rase est conditionnée par les dynamiques conjointes de dégradation des rémanents et de colonisation de la friche par la strate herbacée et buissonnante. En effet, dans les écosystèmes tempérés, la libération de minéraux contenus dans les résidus végétaux, par dégradation et minéralisation de la matière organique, est relativement faible la première année, puis s'amplifie la deuxième et la troisième année après la coupe rase (Kubin, 1995; Kimmins, 1996). Ces minéraux sont entraînés hors de l'écosystème s'ils ne sont pas remobilisés par la strate herbacée qui permet ainsi de les garder dans la phase biologique du cycle biogéochimique (Bormann et Likens, 1979). Dans l'écosystème landais, le risque de perte de minéraux par lessivage est réel, compte tenu de la nature sableuse et filtrante du substrat, cependant la forte vigueur de la strate herbacée est probablement un facteur limitant ces pertes minérales.

Travail du sol, préparation du terrain de plantation

Au terme des 2 ou 3 ans de friche, les résidus d'exploitation sont broyés par passage du "rouleau-landais" (rouleau lourd pourvu de lames tranchantes). Le dessouchage est très rarement pratiqué. Le terrain est ensuite préparé soit par un labour d'automne en plein ou à moitié, réalisé sur une profondeur de 25 à 40 cm à l'aide de charrues forestières, soit par d'autres techniques (houes rotatives, train d'outils) qui réalisent un travail juste sur la ligne de plantation (Crémère, 1995).

Les connaissances concernant l'impact du travail du sol sur le bilan minéral et organique d'une culture du Pin maritime dans les Landes sont assez succinctes. Cependant, les effets observés lors de la mise en culture de ces sols (Jolivet et al., 1997) laissent penser que l'effet mécanique de la coupe rase et du travail du sol possède un impact important, au moins en ce qui concerne la minéralisation des stocks de matières organiques. Le labour pro-

fond réalisé avant l'installation de la plantation, favorise l'incorporation de la matière organique dans le sol, accélère la minéralisation et provoquerait ainsi une libération massive d'éléments minéraux dans le sol, qui peuvent être immobilisés dans la strate basse ou par les jeunes arbres, ou exportés hors du profil par drainage. Le mélange des horizons supérieurs (O et A1) provoqué par le labour peut également être à l'origine d'une dilution des stocks d'éléments minéraux et organiques localisés dans la couche superficielle du sol. De récents travaux réalisés sur une coupe rase de Pin maritime ont ainsi montré que le labour pouvait entraîner une diminution sensible des teneurs en carbone organique dans la couche superficielle du sol (0 - 30 cm) ; ces teneurs passant de 31,5 à 25,8 g. kg⁻¹, un an seulement après le labour (Richer de Forges, 1998).

L'activation des flux de minéraux liée à l'afflux de matière organique fraîche et au remaniement des horizons superficiels (activation de la minéralisation et modifications des caractéristiques physico-chimiques) a déjà été observé. Bormann et Likens (1995), Covington (1981) et Johnson et al. (1991a, 1991b) ont ainsi observé sur des coupes rases situées à Hubbard Brook Experimental Forest (New Hampshire, USA) une diminution des teneurs en matières organiques de l'horizon O, une redistribution des matières organiques dans le sol, susceptible de modifier leur taux de décomposition, ainsi qu'une réduction de la CEC et du pH du sol. Dans un contexte similaire, Schmidt et al. (1996) ont mis en évidence une diminution des teneurs en azote minéralisable et en phosphore assimilable, liée à la préparation mécanique du sol. Toutefois, de tels effets ne sont pas toujours observés. Ainsi, Hendrickson et al. (1989) ne constatent pas de diminution des stocks de carbone de l'horizon O avec la coupe rase. Mattson et Swank (1989) enregistrent même une augmentation de ces stocks consécutive à la coupe rase. Ces auteurs considèrent que les changements observés dans les stocks de matière organique du sol dépendent du type d'écosystème et de l'intensité de la perturbation provoquée au sol par la coupe rase (importance de la mécanisation et de l'exportation des matériaux de coupe). Pennock et van Kessel (1997) observent ainsi que la réduction des stocks de carbone liée à la coupe rase varie en fonction de la texture du sol, les pertes les plus importantes étant mesurées dans les sols de texture sableuse.

Fertilisation

Seule la fertilisation phosphatée est pratiquée sur le massif landais. Apportée à l'installation à la dose de 80 à 120 kg de P₂O₅/ha, elle permet de pallier à la faible disponibilité en phosphore des sols acides landais en procurant des gains de production importants (Guinaudeau et al., 1963 ; Gelpé et Guinaudeau, 1974 ; Chaperon, 1990 ; Trichet et al., 2000). L'épuisement de la ressource en phosphore assimilable observée par Nys et al. (1995), 38 ans après fertilisation et le ralentissement de l'effet phosphore constaté vers 20 ans, par

Lemoine (1993) et Vauchel (1996) suggèrent l'opportunité d'un regonflage en cours de rotation.

Brossard (1986) s'est intéressé à l'effet de la fertilisation sur le devenir de la matière organique à l'interface végétation-sol. Il s'est appuyé sur la comparaison des stocks de carbone dans trois situations opposées : aucune intervention sylviculturale moderne et semis naturel, ligniculture et ligniculture fertilisée dans des peuplements de 19 à 26 ans. La comparaison de ces trois situations suggère que la fertilisation augmente le stock organique au travers d'une augmentation des restitutions végétales au sol (accroissement de la production végétale). Dans ce dispositif, on observe un accroissement global de matière organique dans l'humus et dans l'horizon A1 du plateau fertilisé par rapport aux deux autres situations. La caractérisation chimique des litières semble également indiquer une amélioration de l'activité microbienne lorsque la fertilisation est présente. Par contre, Nys et al. (1995), sur un peuplement plus âgé (38 ans : dispositif de fertilisation de Mimizan), ne constatent pas d'augmentation des stocks de biomasse et des concentrations minérales dans la litière des placettes fertilisées.

D'un point de vue qualitatif, Jambu et al., (1987, 1991, 1993) et Amblès et al., (1989, 1990, 1993, 1994) ont étudié l'influence d'apport d'engrais minéraux (NPK) sur l'évolution des lipides naturels des sols landais. En particulier, l'apport de phosphore stimule la biodégradation ou la biotransformation de certains composés lipidiques naturels pouvant inhiber l'activité microbienne du sol (hydrocarbures à longue chaîne, acides gras, stéroïdes, cétones). Ceci se traduit par une accélération du turn-over des lipides naturels du sol et par des remaniements dans leur composition. Il apparaît donc que tout apport de fertilisant qui n'accroît pas l'acidité du milieu, stimule les synthèses microbiennes du sol.

La fertilisation phosphatée, aux doses actuellement appliquées, améliore donc la fertilité en phosphore des sols landais au moins pendant la première partie de la rotation du Pin maritime. De plus, la faiblesse des doses, alliée au caractère peu mobile du phosphore, rend très peu probable les risques de pollution des nappes. Une étude récente montre que le flux de phosphore total mesuré à l'exutoire d'un bassin versant forestier est faible, de l'ordre de 0,16 kg. ha⁻¹.an⁻¹ (Beuffe et al., 1998).

Entretien des plantations, gestion de la strate basse

La clarté du couvert des peuplements de Pins maritimes, permet le développement d'une strate herbacée très vigoureuse, qu'il convient de maîtriser tout au long de la vie du peuplement. L'entretien, qu'il soit mécanique (passage du "rouleau landais") ou chimique, n'est pas sans conséquences sur le bilan minéral du sol : la strate basse permet à une quantité importante de minéraux de rester dans la partie biologique du cycle biogéochimique ; ainsi, un sous-bois de molinie mobilise

de l'ordre de 18 tonnes de matière sèche par hectare, soit environ 200 kg d'azote et 13 kg de phosphore par hectare (Trichet et al., 1996). Sa suppression rend disponible de la matière organique et des minéraux, qui peuvent alors être utilisés par les arbres et provoquer une amélioration de leur nutrition azotée (Loustau et al., 1997).

Le passage du rouleau landais détruit mécaniquement les parties aériennes, sans détruire totalement les parties racinaires : la strate basse est seulement affaiblie. L'emploi des herbicides systémiques entraîne par contre une destruction complète (partie aérienne et racinaire) de la strate basse et provoque de ce fait la libération d'une quantité importante de minéraux. Par exemple, un traitement au glyphosate contre la molinie dans le contexte landais, a maintenu la molinie à un recouvrement inférieur à 50 %, 7 ans après le traitement (Bazelaire, 1997).

Les entretiens mécaniques ou chimiques peuvent également entraîner des substitutions de flore (Dreyfus, 1984; Trichet et al., 1987; GERA, 1990), qui pourraient être à l'origine d'une évolution de la qualité des humus forestiers (modification des apports de matière organique fraîche en quantité mais surtout en qualité). Bazelaire (1997), dans le contexte landais, ne met pas en évidence de substitutions de flore durables suite à des traitements herbicides, mais montre par contre qu'un effet du travail mécanique du sol entraîne une augmentation momentanée de la diversité végétale.

L'état actuel des connaissances ne permet pas de quantifier l'impact à long terme des méthodes de gestion de la strate basse sur l'évolution de la fertilité des sols. Cependant la destruction des strates herbacée et buissonnante n'est généralement pas réalisée sur la totalité de la surface de la parcelle (entretien uniquement entre les lignes de plantation), ce qui limiterait les éventuelles pertes de minéraux liées à de telles pratiques.

Drainage

En modifiant localement les conditions d'hydromorphie affectant les sols, le drainage généralisé des parcelles forestières a permis l'implantation du Pin maritime sur l'ensemble du massif et entraîné la raréfaction et l'évolution de certains biotopes (Timbal et Maizeret, 1998). Bien que très peu d'études aient été réalisées à ce sujet, il est probable qu'à long terme, cette pratique soit à l'origine d'une évolution différentielle de certaines propriétés des sols (quantité et qualité des matières organiques, taux de minéralisation, stocks d'éléments minéraux du sol).

En effet, l'engorgement hivernal et printanier des sols landais ralentit l'activité biologique des sols des stations les plus humides. En revanche dans ces stations, le maintien d'un taux d'humidité élevé au cours de l'été favorise l'activité biologique des sols et la minéralisation des matières organiques, accélérant ainsi le turn-over des éléments minéraux. De ce fait, en

conditions naturelles, le rapport C/N des sols de lande humide est toujours inférieur au rapport C/N des sols des stations plus sèches.

Bilans de l'évolution des stocks de minéraux et de matière organique du sol après une culture de Pin maritime

La méthode d'approche la plus directe de l'étude de l'évolution des stocks de minéraux et de matière organique du sol serait d'établir un bilan des stocks avant et après une culture de Pin maritime, sur une même parcelle. De tels bilans n'ont pas été réalisés du fait de la longueur des révolutions forestières. Par contre, l'étude du cycle biogéochimique des minéraux, à un instant donné, sur des peuplements d'âges différents, correspondant aux principaux stades de la vie d'un peuplement (chronoséquence) fournit des renseignements sur les tendances d'évolution de ces stocks dans le sol. La figure 4 résume les caractéristiques du cycle biogéochimique de la vie d'un peuplement de Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Pour le Pin maritime, l'étude d'une telle chronoséquence est en cours, par l'estimation de la biomasse et de la minéralomasse dans des peuplements de 0,5, 16, 25, et 32 ans. Nous en résumons ici les principaux résultats pour le phosphore, l'azote et la matière organique, et les cations échangeables.

Le phosphore

Le bilan présenté dans la figure 5, donne un ordre de grandeur des quantités de phosphore transitant dans l'écosystème au cours d'une révolution, et laisse ainsi entrevoir un bilan global équilibré. La fertilisation phosphatée pratiquée au début de chaque rotation (60 à 120 kg de P_2O_5 apportés sous forme d'hyper ou de superphosphates) semble compenser les exportations liées à l'exploitation forestière.


Cependant, le faible niveau de connaissances i) sur le comportement du phosphore dans les sols acides landais (quantification de la rétrogadation, mécanismes de mise à disposition des différentes formes de phosphore dans la solution du sol, ...), ii) sur la gestion du phosphore par l'arbre (absorption, assimilation, translocations internes...), ne permet pas de réaliser, pour chacune des phases de la vie du peuplement, le bilan des entrées-sorties de phosphore dans l'écosystème. La quantification conjointe de l'aptitude du sol à libérer du phosphore assimilable et de l'aptitude de l'arbre à le prélever et l'utiliser pour sa croissance n'est pas réalisable dans l'état actuel des connaissances.

Le caractère très conservatif du cycle biogéochimique du phosphore, allié au faible ruissellement des eaux observé sur le massif landais (pas de entraînement particulière) réduit les contraintes environnementales liées à l'utilisation des engrais phosphatés (Ranger et al., 1995).

L'azote et la matière organique

Figure 5 - Bilan en phosphore d'une rotation de Pin maritime de 50 ans, dans les Landes de Gascogne.
 Figure 5 - Phosphorus budget of a 50 years forest rotation of maritime pine in the Landes de Gascogne.

Apports		Pertes	
Atmosphériques	(faible)	Récolte totale ^{1, 2}	30,4
Nappe	(faible)	Drainage ³	2
Altération	(faible)	Coupe rase	(faible)
Engrais	26,4 < < 52,8	Installation du peuplement	
Total	26 < < 33	Total	32 < < 33



1 Lemoine et al., 1988 2 Loustau et al., 1997 3 Chossat et al., 1997

La fertilisation azotée n'étant pas pratiquée dans les Landes de Gascogne, l'alimentation en azote des Pins maritimes est principalement liée à la libération d'azote par la matière organique du sol et secondairement aux retombées atmosphériques et à la recharge par les nappes.

Les connaissances sur la quantité, la qualité et la vitesse de renouvellement des stocks de matière organique sous l'action de la sylviculture sont encore limitées dans le contexte landais (Jambu et al., 1987, 1991, 1993; Amblès et al., 1989, 1990, 1993, 1994) et ne permettent pas de déboucher sur des bilans quantitatifs. Plus récemment, de nouvelles recherches portant sur l'évolution des stocks de carbone en fonction de l'occupation du sol et des pratiques sylvicoles ont été réalisées (Delprat, 1997; Jolivet et al., 1997) ou débutent actuellement (Jolivet, travaux en cours). Ces travaux montrent en particulier une décroissance brutale des matières organiques grossières lors du travail du sol après une coupe rase. En revanche, les matières organiques de la fraction fine (<50 µm) apparaissent relativement stables, même lors d'une mise en culture. En l'absence d'une protection physique par la fraction argile, cette stabilité des fractions fines suggère l'existence de formes chimiques de composés organiques résistantes à la biodégradation.

Il est important de souligner que l'azote actuellement consommé peut provenir de matières organiques d'âge variable. Le suivi de l'incorporation dans la biomasse actuelle, de marqueurs naturels ou artificiels tels que ¹⁵N, permettrait d'identifier l'origine de l'azote actuellement consommé et de préciser le rôle des apports atmosphériques.

Le bilan réalisé avec les données actuellement disponibles (Figure 6) comporte une forte marge d'incertitude, surtout concernant l'estimation des pertes azotées. Il laisse plutôt pressentir un bilan déficitaire en azote de la sylviculture du Pin

maritime, compte tenu de la très faible recharge de l'écosystème en azote par retombées atmosphériques (éloignement de grands centres industriels), et par les nappes (faible minéralité des eaux landaises). La fixation symbiotique d'azote est assurée par des ajoncs (*Ulex nanus* et *Ulex europaeus*), aucune estimation des quantités fixées ne peut à ce jour être fournie, cependant la non dominance des ajoncs parmi la flore landaise peut amener à penser que les quantités fixées sont faibles. La fixation non symbiotique de l'azote n'a jamais, à notre connaissance, été abordée, dans le contexte landais, les estimations fournies reposent sur des travaux réalisés dans des écosystèmes tempérés (Driscoll et Schaefer, 1989).


Les pertes azotées au moment de la coupe rase sont constituées d'une part par l'exportation des troncs hors de la parcelle, et d'autre part par les pertes par drainage de l'azote provenant de la minéralisation de la matière organique laissée au sol lors de l'exploitation (houppiers, racines en décomposition, strate basse endommagée), ces dernières n'ont également jamais été estimées dans le contexte landais. C'est au moment de la coupe rase et de l'installation du peuplement que les pertes d'azote hors de l'écosystème pourraient être les plus fortes.

La question de l'évolution de la fertilité azotée des sols forestiers landais est un enjeu d'autant plus urgent à résoudre que la fertilisation azotée, qu'elle soit organique ou minérale, n'est pas pratiquée. La fertilisation azotée minérale ne donne que des résultats fugaces en raison du comportement très mobile de cet élément dans les sols sableux landais (Guinaudeau et al., 1963, Chaperon, 1990). De même, la fertilisation azotée organique n'est pas actuellement envisagée. L'introduction de cultures intercalaires de légumineuses fixatrices d'azote (engrais vert), comme cela a été réalisé en Australie sur *Pinus radiata* (Nambiar et Nethercot, 1987; Smethurst et al., 1986), pourrait être une solution à tester.

Figure 6 - Bilan en azote d'une rotation de Pin maritime de 50 ans, dans les Landes de Gascogne.

Figure 6 - Nitrogen budget of a 50 years forest rotation of maritime pine in the Landes de Gascogne.

Apports		Pertes	
Atmosphériques ¹ (N - NO ₃ + N - NH ₄)	200 < < 400	Récolte totale ^{2,3}	496
Nappe	(faible)	Dénitrification ⁴	(faible)
Fixation symbiotique	(faible)	Drainage naturel ⁵	50
Fixation non symbiotique ⁶	50 < < 500	Coupe rase	(forte)
Engrais	0	Installation du peuplement	
Total	250 < < 900	Total	> 550



- 1 Ulrich et al., 1997
- 2 Lemoine et al., 1988
- 3 Loustau et al., 1997
- 4 Jambert, 1995
- 5 Chossat et al., 1997
- 6 Driscoll et Schaefer, 1989

Les éléments échangeables (K, Ca, Mg)

Les sols des Landes de Gascogne possèdent naturellement de faibles teneurs en éléments échangeables. Cependant, l'absence d'effet - voire les effets négatifs - généralement observés sur les essais de fertilisation potassique ou d'amendements calci-magnésiens réalisés sur des peuplements de Pin maritime, n'a pas incité les sylviculteurs à pratiquer cette forme de fertilisation. Le potassium et le calcium ne sont pas des facteurs limitants principaux de la croissance du Pin maritime. Cependant, le rôle de ces éléments comme éventuels facteurs limitants secondaires (par exemple, par rapport au phosphore, qui est un facteur limitant principal) n'a été que peu étudié : Maugé (1965) ne met pas en évidence d'effet positif du calcium apporté en addition d'une fertilisation phosphatée.

Les connaissances sur les stocks dans les sols et sur le cycle biogéochimique de ces minéraux sont assez limitées pour le milieu landais. On sait cependant que le potassium est un élément fortement mobilisé pour la production ligneuse, qui se recycle assez rapidement par le biais des recrétions : le potassium contenu dans les aiguilles est en partie solubilisé par les eaux de pluie, une quantité non négligeable de potassium retourne ainsi au sol par les eaux de ruissellement (Courcoux, 1982, Ranger et Bonneau, 1984). Les pertes par drainage sont en général limitées (Bonneau, 1995). De plus la proximité de la mer permet probablement des apports de potassium par les pluies. Le calcium est également fortement mobilisé pour la production ligneuse tout au long de la vie de l'arbre, son recyclage (retour au sol) se fait par le biais des

chutes de litière. Les pertes par drainage, la recharge par les nappes et les apports atmosphériques peuvent être très variables. Des apports non négligeables de calcium sont réalisés à chaque rotation par le biais de la fertilisation phosphatée, les phosphates naturels contiennent en effet de 9 à 20 % de CaO et les superphosphates simples de 17 % à 23 %. Cet apport pourrait avoir un rôle important, pour l'instant encore jamais analysé.

Culture du Pin maritime et acidification des sols

La culture du Pin maritime soulève le problème d'une acidification possible des sols. Cette évolution correspond à une perte de la capacité du sol à neutraliser les acides (Vaan Breemen et al, 1983) qui peut se traduire par une baisse du pH et une désaturation progressive du complexe d'échange cationique lorsque les apports naturels (dépôts atmosphériques, altération, minéralisation) ou anthropiques (fertilisation, amendements) ne suffisent pas à compenser les pertes par exportation. La capacité du sol à neutraliser les acides diminue en relation à l'exportation hors du profil des cations alcalins et alcalino-terreux (Ca, Mg, Na et K), au profit des ions H⁺ et Al³⁺. Plusieurs processus sont responsables de l'acidification des sols : (i) immobilisation des cations dans les tissus végétaux, (ii) drainage vertical ou latéral des cations par les eaux d'infiltration ou les nappes phréatiques (Dambrine, 1988). Cette évolution est favorisée par la présence d'une végétation acidifiante (Ericacées, résineux), dont la décomposition lente génère de fortes quantités d'acides orga-

niques. Ces différents processus conduisant à une acidification du sol ont été observés et étudiés sur des peuplements forestiers, en particulier lors de l'implantation de conifères (Bonneau et al., 1976 ; Nys et Ranger, 1985 ; Ranger et Nys, 1994 ; Dambrine et al., 1998). Ils s'accompagnent d'une diminution progressive de la fertilité du sol.

Dans le contexte landais, compte tenu des caractéristiques des sols (Podzols développés sur une roche mère siliceuse très pauvre en éléments échangeables), de la présence d'une espèce résineuse acidifiante en peuplements monospécifiques (Pin maritime) et de l'évolution actuelle des modes de gestion des peuplements forestiers, favorisant les exportations (raccourcissement des rotations, plantation d'arbres sélectionnés pour leur vigueur et leur croissance rapide), les conditions conduisant vers une acidification des sols sont réunies. Actuellement, il n'a pas été constaté de baisse de pH consécutive à la culture de Pin maritime, ce qui ne signifie pas pour autant que l'acidification ne soit pas réelle tant que l'on ne change pas de système tampon. Seul un bilan de la dynamique des flux de minéraux entrants et sortants (en particulier pour les cations) de l'écosystème permettra de prévoir une éventuelle acidification des sols landais. Une acidification supplémentaire de sols déjà très acides ne serait pas sans conséquences néfastes sur l'évolution de la fertilité des sols landais.

CONCLUSIONS

Les sols sableux podzolisés landais sont assez bien connus quant à leur description pédologique et à leur répartition spatiale sur l'ensemble du massif. Ils se caractérisent par une forte acidité, un engorgement hivernal et une pauvreté en ressources minérales disponibles, fortement liée à la faible capacité de rétention de leur complexe adsorbant. Ces sols permettent pourtant la culture intensive du Pin maritime à des niveaux de production assez soutenus depuis près de 150 ans, ce qui laisse pressentir un équilibre fonctionnel fragile. Les perspectives d'intensification, basée sur le raccourcissement des rotations et l'accroissement des exportations minérales hors de l'écosystème, seront donc à considérer avec la plus grande prudence.

En effet, pour l'azote, le non-renouvellement de la ressource par fertilisation et la faible recharge par les nappes et les dépôts atmosphériques, laisse entrevoir un appauvrissement progressif des réserves azotées au fur et à mesure des rotations. De plus, le manque de connaissances sur le comportement des matières organiques du sol qui est une clef de la compréhension de l'évolution de la fertilité, rend difficile l'établissement d'un diagnostic fiable sur le maintien de la fertilité azotée des sols landais.

Pour le potassium, le calcium et le magnésium, le cycle biogéochimique et le niveau des stocks ne sont pas connus de

manière complète, ce qui rend difficile le diagnostic sur l'éventuel processus d'acidification des sols, généralement observé sous culture de résineux (souvent lié à l'augmentation des exportations en bases échangeables).

Pour le phosphore, les quantités apportées par fertilisation à chaque rotation semblent pouvoir compenser les exportations liées à la récolte. Cependant, les connaissances actuelles concernant la dynamique d'évolution du phosphore dans les sols acides landais sont partielles, et ne permettent pas de pouvoir envisager le raisonnement de la fertilisation phosphatée (pourtant largement pratiquée sur le massif landais) sur des bases scientifiques.

L'impact sur les sols des différentes opérations sylvicoles pratiquées dans le cadre de la ligniculture du Pin maritime n'est pas encore parfaitement connu. De toutes les modifications probables de l'itinéraire technique sylvicole du Pin maritime, le raccourcissement des révolutions est sans doute le point le plus délicat à prendre en compte dans le raisonnement du maintien de la fertilité des sols landais. En effet, l'augmentation des fréquences des prélèvements minéraux et organiques, et des perturbations du sol liées à la coupe rase, est susceptible d'engendrer d'importants changements dans les caractères et la fertilité des sols forestiers landais.

Mais avant toute chose, il convient tout d'abord d'augmenter les connaissances sur le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème forestier landais avant d'élaborer des modèles de gestion qui conduiront à des recommandations pratiques aux sylviculteurs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

Le GIP ECOFOR pour la contribution au financement des travaux.

L'Association pour la Recherche sur la Production Forestière et le bois en Région Aquitaine (ARBORA), pour l'organisation du colloque " De la Gestion au Développement Durable " qui a donné lieu à cet article.

P. Pastuszka (INRA-Bordeaux) et D. Merzeau (CPFA-Maison de la Forêt), pour leurs conseils concernant la description de l'itinéraire sylvicole du Pin maritime dans les Landes de Gascogne.

A. Castro, du Centre de Productivité et d'Action Forestière d'Aquitaine pour les références bibliographiques concernant les Conférences Ministérielles sur la gestion durable des forêts.

BIBLIOGRAPHIE

Ambiès A., Jambu P., Ntsikoussalabongui B., 1989 - Evolution des lipides naturels d'un podzol forestier induite par l'apport d'engrais minéraux : hydrocarbures, cétones, alcools. *Science du Sol*, 27 (3) : 201-214.

- Ambès A., Jambu P., Ntsikoussalabongui B., 1990 - Evolution des acides gras d'un podzol forestier induite par l'apport d'engrais minéraux. *Science du Sol*, 28 (1) : 27-42.
- Ambès A., Jambu P., Jacquesy J.-C., Parlanti E., Secouet B., 1993 - Changes in the ketone portion of lipidic components during the decomposition of plant debris in a hydromorphic forest-podzol. *Soil Sci.*, 156 (1) : 49-56.
- Ambès A., Jambu P., Parlanti E., Joffre J., Riffe C., 1994 - Incorporation of natural monoacids from plant residues into an hydromorphic forest podzol. *Eur. J. Soil Sci.*, 45 : 175-182.
- Arrouays D., Guyon D., et Riom J., 1983 - Différenciation par l'humidité et la matière organique de deux sols sableux à partir de données radiométriques et photographiques. 2ème Coll. Int. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux 12-16 Sept 1983, 10 p.
- Arrouays D., Vion I., Jolivet C., Guyon D., Couturier A., Wilbert J., 1997 - Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France). Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. *Etude et Gestion des Sols*, 4 (1) : 05-16.
- Balland R., Cailleux A., 1946 - Etude morphologique de quelques sables de la région bordelaise. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5e série, XVI : 61-64.
- Bazelaire (de) J., 1997 - Influences de l'utilisation des herbicides en culture du Pin maritime. Mémoire ENITA de Bordeaux, 75 p.+annexes.
- Beuffe H., Vernier F., Chossat J.-C., 1998 - Spatialisation à l'échelle du bassin versant. Rapport annuel GIP Ecofor Landes 2, Fonctionnement de l'écosystème forestier landais, phase II, 1997-1998.
- Bonneau M., 1995 - Fertilisation des forêts dans les pays tempérés, Editions de l'ENGREF, 368 p.
- Bonneau M., Brethes A., Nys C., Souchier B., 1976 - Influence d'une plantation d'épicéas sur un sol du Massif Central. *Lejeunia, Rev. Bot.*, 82 : 1-14.
- Bormann F.H., Likens G.E., 1979 - Pattern and process in a forested ecosystem. Springer-Verlag, New-York.
- Bormann F.H., Likens G.E., 1995 - Biochemistry of a forested ecosystem. Second edition. Springer Verlag. 159p.
- Brossard M., 1986 - Effets de la sylviculture moderne sur la répartition, le niveau et l'état du stock organique des sols de la Pinède des Landes de Gascogne. Thèse Univ. Poitiers, 128 p.
- Centre de Productivité et d'Action Forestière d'Aquitaine., 1992 - La Forêt des Landes de Gascogne, 70p
- Chaperon H., 1990 - Fertilisation initiale du Pin maritime dans les Landes de Gascogne. *Annales AFOCEL*, n° 2, fascicule 388 : 133-140
- Chossat J.C., Laplana R., Klingebiel A., Vernier F., Beuffe H., 1997 - Sylviculture du Pin maritime et ressources en eau. In : Actes du IVème colloque Arpora " De la gestion au développement durable ", Bordeaux, 20-21 Octobre 1997; 45-55.
- Conférence de Strasbourg, 1991 - Première Conférence Ministérielle pour la protection des forêts en Europe, organisée par le France et la Finlande avec la collaboration de la C.E.E. Ministère de l'Agriculture, 258p.
- Conférence d'Helsinki, 1993 - Deuxième Conférence Ministérielle sur la protection des forêts en Europe, Helsinki 16-17 juin 1993. Ministère de l'Agriculture, 186 p.
- Conférence de Lisbonne, 1998 - Troisième Conférence Ministérielle sur la protection des forêts en Europe, Helsinki juin 1998. Ministère de l'Agriculture.
- Courcoux P., 1982 - Approche du cycle biologique d'un écosystème à Pin maritime en lande humide. DEA Univ. Bordeaux III, 41 p.
- Cottinet D., 1974 - Contribution à l'étude des fluctuations de la nappe du massif forestier landais. Thèse Univ. Bordeaux I, 93 p.
- Covington W. W., 1981 - Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods. *Ecology*, 62 : 41-48.
- Cremière L., 1995 - la charrue rotative : une alternative au labour sur les landes humides. *Informations-Forêt*, 504 : 85-96.
- Dambrine E., Thomas A., Party J., Probst A., Boudot J., Duc M., Dupouey J., Gégout J., Guérolf F., King D., Landmann G., Maitat O., Nicolai M., Pollier B., Thimonier A., 1998 - Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses : distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 84 : 75-94.
- Dambrine E., 1988 - Acidification des sols et des eaux de surface : définitions, mécanismes, modélisation et rôle dans l'évolution biologique de ces milieux. Rapport interne INRA Champenoux, 29p.
- Delprat L., 1997 - Caractérisation du carbone organique soluble sous monoculture de maïs en sol sableux landais. Influence sur les émissions de protoxyde d'azote. Thèse Univ. Bordeaux I, 137 p.
- Demoune R., 1979 - Essai de définition et de caractérisation de niveaux éco-physiologiques dans le massif forestier des Landes de Gascogne. Thèse Univ. Grenoble I.
- Dreyfus P., 1984 - Substitutions de flore après entretien chimique des plantations forestières. Méthodes de diagnostic. Application au nord est de la France. *Rev. For. Fr.*, XXXVI, 5.
- Driscoll C.T., Schaeffer D.A., 1989 - Overview of nitrogen processes, in The role of nitrogen in the acidification of soils and surface water. Malanchuk J.L. et Nilsson I. Eds.
- Duchaufour P., 1995 - Pédologie. Sol, végétation, environnement. 4e édition, Masson, 324 p.
- Duteis S., 1998 - Analyse de la variabilité spatiale intraparcellaire du carbone organique des sols sableux maïsicoles des Landes de Gascogne. Comparaison de méthodes d'estimation applicables à l'agriculture de précision. Mémoire ENITA de Bordeaux.
- Edwards N.T., Ross-Todd B.M., 1983 - Soil carbon Dynamics in a mixed deciduous forest following clear-cutting with and without residue removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47 : 1014-1021.
- F.A.O., 1995 - Harmonization of criteria and indicators for sustainable forest management, F.A.O./I.T.T.O expert consultation, Rome, 13-16 february, 19p.
- Fardeau J.C., Morel C., Boniface R., 1991 - Cinétiques de transfert des ions phosphates du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie*, 11 : 787-797
- Fardeau J.C., 1996 - Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertilizer Research*, 45 : 91-100
- Filipuzzi, G. 1974 - Etude géomorphologique de la plaine landaise entre le Barp et Labouheyre. Travail d'Etude et de Recherche, Univ. Bordeaux III.
- Gelpe J., Guinaudeau J., 1974 - Essai de fertilisation minérale sur Pins maritimes à Mimizan (Landes). Résultats après la 16e année. *Rev. For. Fr.* XXVI, 6 : 459-463
- GEREA 1990 - Impacts du défrichement sur l'environnement dans le massif forestier des Landes de Gascogne, 103 p.
- Guinaudeau J., Illy G., Maugé J.P., Dumas F., 1963 - Essai de fertilisation minérale sur Pin maritime à mimizan. Résultats après la sixième année. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêt*, tome XX, 1, 71p.
- Hendrickson O.Q., Chatarpaul L., Burgess D., 1989 - Nutrient cycling following whole-tree and conventional harvest in northern mixed forest. *Can. J. For. Res.*, 19 : 725-735.
- Hunter I.R., Smith W., 1996 - Principles of forest fertilisation - illustrated by New Zealand experience. *Fertilizer Research*, 43 : 21-29.
- I.F.N, 1991 - Massif des Landes de Gascogne. Résultats de l'inventaire forestier 1987-1988. Ministère de l'Agriculture, 91p.
- Jacquin F., Juste C., Dureau P., 1965 - Contribution à l'étude de la matière organique des sols sableux des Landes de Gascogne. *C. R. Acad. Agr. Fr.* : 1190-1197.
- Jambert C. (1995) - Emissions de composés azotés dans l'atmosphère par les agrosystèmes : maïsiculture dans les Landes de Gascogne. Thèse de l'Université Paul Sabatier, 112 p.

- Jambu P., Righi D., 1973 - Contribution à l'étude de l'humus des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. *Science du Sol*, 3 : 207-219.
- Jambu P., Bilong P., Amblès A., Ntsikoussalabongui B., Fustec E., 1987 - Influence d'apports minéraux sur l'évolution des lipides naturels de sols acides. *Science du Sol*, 25-3 : 161-172.
- Jambu P., Amblès A., Dinel H., Secouet B., 1991 - Incorporation of natural hydrocarbons from plants residues into an hydromorphic humic podzol following afforestation and fertilisation. *J. Soil Sci.*, 42 : 629-636.
- Jambu P., Amblès A., Jacquesy J.C., Secouet B., Parlanti E., 1993 - Incorporation of natural alcohols from plants residues into an hydromorphic forest-podzol. *J. Soil Sci.*, 44 : 135-146.
- Johnson C.E., Johnson A. H., Siccama T.G., 1991a - Whole-tree clear-cutting effects on exchangeable cations and soil acidity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 : 502-508.
- Johnson C.E., Johnson A. H., Huntington T.G., Siccama T.G., 1991b - Whole-tree clear-cutting effects on soil horizons and organic-matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55 : 497-502.
- Jolivet C., 1996 - Evolution des stocks de carbone organique des sols sous l'effet d'un changement d'occupation. Possibilité de généralisation spatiale sur les Landes de Gascogne. D.E.A de Sciences du Sol, Université de Nancy I, 55p.
- Jolivet C., Arrouays D., 1997 - Short range variability of organic carbon in sandy spodosols of France. *Comm - Austr Soil Science Soc.* 55 : 35-38
- Jolivet C., Arrouays D., Andreux F., Lévêque J., 1997 - Soil organic carbon dynamics in forested spodosols converted to maize cropping. *Plant Soil*, 191 : 225-231
- Juste C., 1965 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'aluminium dans les sols acides du Sud-Ouest atlantique : application à leur mise en valeur. Thèse Univ. Nancy.
- Juste C., Gréciet Ph., Rouquié R., Wilbert, J, 1971 - Relation entre la teneur en matière organique du sol et le rendement des cultures de maïs non irriguées, dans la zone sableuse des Landes de Gascogne. *C. R. Acad. Agr. Fr.* : 68-71.
- Juste C., 1992 - Caractéristiques et évolution de la matière organique en sols sableux. In : Etude et mise en valeur des sols sableux de Pologne et de France. Actes du colloque Franco-Polonais, Orléans-Bordeaux, Octobre 1989 (eds J. Chrétien & M. Jamagne) INRA : 135-142.
- Kimmins J. P., 1996 - Eds Forest Ecology. Prentice -hall, 595p.
- Kubins E., 1995 - The effect of clearcutting, waste wood collecting and site preparation on the nutrient leaching to groundwater. In *Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems*, Eds Nilsson L., Huttel R., Johansson U. : 661-670.
- Latouche C., Legigan P., Thibault C., 1974 - Nouvelles données sur le quaternaire des Landes de Gascogne. *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, 16 : 95-120.
- Legigan P., 1970 - Quelques précisions à propos du " sable des Landes ". *C. R. S. S. Soc. Géol. Fr.*, 4 : 116-117.
- Legigan P., 1974 - Signification de quelques sols fossiles à l'égard de la mise en place du sable des Landes. *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, 16 : 137-144.
- Le Goaster S., Dambrine E., Ranger J., 1991 - Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. I- Evolution de la biomasse et dynamique d'incorporation d'éléments minéraux. *Acta Oecologica*, 12 : 771-789.
- Lemoine B., Ranger J., Gelpe J., 1986 - Biomasse et croissance du Pin maritime. Etude de la variabilité dans un peuplement de 16 ans. *Ann. Sci. For.*, 43 : 67-84.
- Lemoine B., Ranger J., Gelpe J., 1988 - Distribution qualitative et quantitative des éléments nutritifs dans un jeune peuplement de Pin maritime. *Ann. Sci. For.*, 45 : 95-116.
- Lemoine B., Ranger J., Gelpe J., 1990 - Interprétation et modélisation de la distribution des éléments nutritifs dans les différents compartiments de la biomasse d'un jeune peuplement de Pin maritime. *Ann. Sci. For.*, 47 : 101-115.
- Lemoine P., 1993 - Etude dendroécologique du Pin maritime (*Pinus Pinaster* Ait.) sur le dispositif de fertilisation de Mimizan (Landes). DEA Univ. Nancy I.
- Lesgourgues Y., Merzeau D., Cremière L., Baillères V., 1997 - Conduite des boisements de Pin maritime sur le plateau landais : itinéraires techniques - pistes pour le futur. In : Actes du IVème colloque Arbora " De la gestion au développement durable ", Bordeaux, 20-21 Octobre 1997 : 207-222.
- Loustau D., Bert D., Trichet P., 1997 - La productivité forestière du massif landais et sa gestion durable, In : Actes du IVème colloque Arbora " De la gestion au développement durable ", Bordeaux, 20-21 Octobre 1997 : 119-144.
- Mattson K.G., Swank W.T., 1989 - Soil and detrital carbon dynamics following forest cutting in the southern Appalachians. *Biol. Fert. Soils*, 7 : 247-253.
- Maugé G., 1965 - Essais de culture et de fumure sur Pin maritime. Période 1960-1965. Association Forêt Cellulose, 73p.
- Merzeau D., 1983 - Approche du cycle de l'eau et des éléments minéraux d'un écosystème landais. DEA Univ. Bordeaux III, 40 p.
- Montès E., 1992 - Etude préliminaire des lagunes des Landes de Gascogne. *Bull. Inst. Géol. Bassin Aquitaine*, 51-52 : 69-83.
- Mroz G.D., Jurgensen M. F., Frederick D.J., 1985 - Soil nutrient changes following whole tree harvesting on three northern hardwood sites. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49 : 1552-1557.
- Munson A.D., Margolis H.A., Brand D.G., 1993 - Intensive silvicultural treatment : impacts on soil fertility and planted conifer response. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57 : 246-255.
- Nambiar E.K.S., Nethercot K.H., 1987 - Nutrient and water availability and growth of young radiata Pine plantations intercropped with lup ins. *New Forest*, 1 : 117-134.
- Nilsson L.O., Huttel R.F., Johansson U.T., 1995 - Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems. *Proceedings of the CEC/IUFRO Symposium*, Halmstad, Sweden. Kluwer Academic Publishers, 685p.
- Nys C., Didier S., Levy G., Lefevre Y., Trichet P., 1995 - Effet à moyen terme de la fertilisation sur le fonctionnement de l'écosystème forestier. Rapport intermédiaire GIP ECOFOR.
- Nys C., Ranger J., 1985 - Influence de l'espèce sur le fonctionnement de l'écosystème forestier : le cas de la substitution d'une essence résineuse à une essence feuillue. *Sciences du Sol*, 4 : 203-216.
- O.E.C.D., 1997 - Sustainable Development, Special Edition, The O.E.C.D Observer, 51p.
- Pennock D.J., van Kessel C., 1997 - Effect of agriculture and of clear-cut forest harvest on landscape-scale soil organic carbon storage in Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 77 : 211-218.
- Porté A., 1999 - Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime en Lande Humide. Thèse de l'Université d'Orsay, 168p.
- Pritchett W.L., Fisher R.F., 1987 - Intensive management and long-term soil productivity. In : *Properties and Management of Forest Soils* (second edition). J. Wiley & Sons, New York : 420-442.
- Ranger J., 1993 - Le diagnostic de fertilité chimique des sols forestiers. INRA Formation Permanente, Centre de Nancy, 16 p.
- Ranger J., 1996 - La fertilité des sols des forêts est-elle durable? Les dossiers de l'INRA : "La gestion durable des forêts : contribution de la recherche", n° 12, Automne 1996 : 26-31.
- Ranger J., Bonneau M., 1984 - Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. *Le cycle*

- biologique en forêt. *Rev. For. Fr.*, XXXVI, 2 : 93-112.
- Ranger J., Nys C., 1994 - The effect of spruce (*Picea abies* Karst.) on soil development : an analytical and experimental approach. *Eur. J. Soil Sci.*, 45 (2) : 193-204.
- Ranger J., Colin-Belgrand M., Nys C., 1995 - Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers. Importance dans le fonctionnement des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 2, 119-134.
- Ranger J., Marques R., Colin-Belgrand M., Flammang N., Gelhaye D., 1996 - La dynamique d'incorporation d'éléments nutritifs dans un peuplement de Douglas. Conséquences pour la gestion sylvicole. *Rev. For. Fr.*, XLVIII (3) : 217-230.
- Richer de Forges A., 1998 - Variabilité spatiale et temporelle de la biomasse microbienne des sols des Landes de Gascogne. DESS Université de Bourgogne, 55p.
- Righi D., 1977 - Génèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Univ. Poitiers, 144 p.
- Righi D., Wilbert J., 1984 - Les sols sableux podzolisés des Landes de Gascogne. répartition et caractères principaux. *Science du sol*, 4 : 253-264.
- Rhigi D., Ranger J., Robert M., Felix C., Bonnaud P., 1991 - The in situ weathering of a test mineral (vermiculite) introduced in a podzol (haplaquod) and in an hydromorphic soil (haplaquept) compared to the soil clay minerals evolution. In *Developments in Geochemistry 6. Diversity of Environmental Biogeochemistry*. J. Berthelin Ed. Elsevier : 366-370.
- Saint-Didier J., 1976 - Nature et évolution de la végétation de la Grande Lande à Pissos. Mémoire ENITA de Dijon.
- Saur E., 1989a - Alimentation oligo-minérale du Pin maritime en relation avec quelques caractéristiques physico-chimiques des sols sableux des Landes de Gascogne. *Ann. Sci. For.*, 46 : 119-129.
- Saur E., 1989b - Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments (Cu, Mn, Zn, B) à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de *Pinus Pinaster*, croissance et nutrition en éléments majeurs. *Agronomie*, 9 : 931-940.
- Saur E., 1990 - Influence de la fertilisation cuprique et phosphatée sur la croissance et la nutrition minérale du Pin maritime en sol sableux riche en matière organique. *Ann. Sci. For.*, 47 : 67-74.
- Smethurst P.J., Turvey N.D., Attiwill, P.M., 1986 - Effect of *Lupinus* spp on soil nutrient availability and the growth of *Pinus radiata* D. Don seedlings on a sandy podzol in Victoria, Australia. *Plant Soil*, 95 : 183-190.
- Schmidt M.G., Macdonald S.E., Rothwell R.L., 1996 - Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 76 : 531-540.
- Timbal J., Maizeret C., 1998 - Biodiversité végétale et gestion durable de la forêt landaise de Pin maritime : Bilan et évolution. *Rev. For. Fr.*, L : 403-423.
- Trichet P., Boisaubert B., Frochot H., Picard JF., 1987 - Impact sur le chevreuil des traitements herbicides contre la ronce. *Gibier Faune Sauvage*, 4 : 165-188.
- Trichet P., Loustau D., Lagane F., Lardit A., Rosseto P., 1996 - Biomasse-minéralomasse d'un sous-bois de molinie dans une plantation de Pin maritime de 25 ans (Site du bray), rapport annuel du GIP ECOFOR Pin maritime, 8 p.
- Trichet P., Ranger J. Bert D., Loustau D., 1997 - Fonctionnement minéral d'une plantation de Pins maritimes, In : *Actes du IVème colloque Arbora " De la gestion au développement durable "*, Bordeaux, 20-21 Octobre 1997 : 97-117.
- Trichet P., Vauchel F., Bert D., Bonneau M., 2000 - Fertilisation initiale et réitérée du Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait) : Principaux résultats de l'essai de Berganton. Accepté à la *Revue Forestière Française*.
- Ulrich E., Lanier M., Courbes D., 1997 - Dépôts atmosphériques et solutions du sol ; Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques.
- Vaan Breemen N., Mulder J., et Driscoll C.T., 1983 - Acidification and alcalinization of soils. *Plant and Soil*, 75 : 283-308.
- Vauchel F., 1996 - Effet d'une fertilisation phosphatée sur Pin maritime. l'essai de Berganton. Résultats à 32 ans. étude dendrochronologique, bilan

(Saur, 1989a)

Connaissances à acquérir

A acquérir

A acquérir

Pas d'études de type "cycle biogéochimique"

Des données (Saur, 1989a et b, 1990)

A acquérir

Pas d'études de type "cycle biogéochimique"

Thèse de C Jolivet (en cours), sur l'estimation et l'évolution des stocks de matière organique

Besoin d'harmonisation dans le choix des méthodes de dosage.

Nombreuses données

Besoin de connaissances théoriques sur le fractionnement du P du sol et le cycle interne du P à l'arbre.

Righi, 1977

Le passage des concentrations aux quantités par ha est rarement réalisé.

Connaissance lacunaire

Righi et Wilbert, 1984

en P du sol et diagnostic foliaire. DEA Univ. Nancy I, 27 p.

Wilbert J., 1990 - Les sols des Landes de Gascogne. Doc. Interne. INRA

Science du sol, Orléans, 20 p.