



Les sols forestiers landais : caractéristiques et effets des pratiques de gestion

23 octobre 2009

Laurent Augusto, Mark Bakker

UMR TCEM (INRA-ENITA de Bordeaux)

Compétences et spécificités de l'unité mixte de recherche TCEM

L'UMR TCEM a des compétences fortes en physico-chimie des sols et a pour objectifs de prédire la biodisponibilité des éléments nutritifs (ou éléments traces métalliques) et leur prélèvement par les plantes. L'étude conjointe des processus biologiques et physico-chimiques pour l'approvisionnement des plantes en éléments minéraux et la modélisation mécaniste de ces processus constituent un premier axe de nos travaux de recherche. L'effet des pratiques de gestion sur les cycles biogéochimiques à l'échelle du temps de la culture ou d'une révolution forestière constituent le deuxième grand volet de nos recherches.

L'étude des différents flux (entrée/ sortie, flux internes, prélèvements) ainsi que la quantification des stocks en éléments nutritifs sont centrales dans nos approches. Plus particulièrement pour la forêt landaise, nous mettons l'accent sur l'azote (N) et le phosphore (P) étudiés conjointement avec le carbone (C), avec également des ébauches d'étude d'ordres de grandeurs pour d'autres éléments (calcium Ca, magnésium Mg, potassium K).

La **durabilité** du système forestier landais (sous contrainte d'un environnement changeant, ou sous effet de pratiques sylvicoles plus au moins intensives) dépend de notre point de vue du bilan (le 'stock' d'éléments nutritifs) **en fonction des flux** (processus biologiques et physico-chimiques d'approvisionnement ou lixiviation ; les apports (fertilisation, compostage, épandage de cendres), les exportations, flux par dépôts ou fixation symbiotique, notamment.

Autrement dit :

1// est-ce que les apports et approvisionnements – par minéralisation, par altération, par la nappe, par fixation symbiotique, par déposition aérienne – compensent-ils les exportations par biomasse ? Ou encore, si les compensations sont insuffisantes, combien de temps faudra-t-il pour atteindre un déséquilibre important et donc une baisse de productivité de ce système ?

2// Comment différentes options sylvicoles peuvent-elles jouer sur ce bilan et sur ce facteur temps ?

Contexte et objet d'étude

Suite à la tempête de janvier 2009, il a été demandé aux divers acteurs impliqués dans la gestion de la forêt landaise de produire une expertise et des recommandations quant à l'avenir de ce massif à différentes échéances. Compte tenu de ses compétences, l'UMR TCEM s'est focalisée sur les questions de la caractérisation des sols, du fonctionnement biogéochimique (en nutriments : C, N, P, K, Ca et Mg) des écosystèmes et du maintien de leur fertilité en relation avec les opérations de gestion. Les sols décrits ci-dessous sont ceux du massif forestier landais, tel que définis par l'IFN (régions forestières 404, 330 et, plus minoritairement 334 et 401 ; considérées avec un couvert forestier en pin maritime).

Caractéristiques des sols forestiers landais

L'UMR TCEM possède une base de données des propriétés physico-chimiques des sols intégrant des informations sur plus de deux mille six cents horizons de sols répartis sur plusieurs centaines de profils. Le filtrage des données peu pertinentes, ou redondantes, conduit à une masse de données exploitables concernant 349 sites localisés sur l'ensemble du massif. Cette base de données se divise en deux jeux de données : *i*) les sols analysés par TCEM (n=83) et *ii*) les sols dont les analyses ont été recueillies dans la littérature (n=266). Le premier jeu de données est assez complet d'un point de vue analytique, mais partiel et hétérogène dans sa représentation spatiale du massif. A l'inverse, le second jeu de données concerne l'ensemble du massif, mais il est extrêmement hétérogène et incomplet pour ce qui est de la caractérisation physico-chimique des sols. En conséquence, la base de données ne permet pas la production d'une carte fiable et représentative des propriétés des sols landais. Seule une collaboration avec un ou plusieurs partenaires dans le cadre d'un programme pluriannuel pourrait produire une telle cartographie. A l'inverse, la base de données est un outil pertinent pour caractériser les sols des principales stations. Dans le présent document, nous présenterons les valeurs **moyennes** des principales propriétés des sols des quatre stations, telles que présentées dans Jolivet *et al.* (2007) : dune forestière (majorité de la région IFN 330, partiellement 401 et frange ouest de 404) ; lande sèche ; lande mésophile et lande humide.

Les sols ont été étudiés pour un volume allant de la litière en place à 1.2 mètre de profondeur. Ce volume inclut l'ensemble des racines participant à la nutrition des arbres en lande humide, la grande majorité des racines en lande sèche et, très probablement (manque de données sur ce dernier point), la majorité des racines en dune.

Propriétés physiques

C'est bien connu, les sols landais sont sableux. Tous les sols du massif contiennent une proportion importante de sables grossiers (taille : 200–2000 μm soit 0.2–2 mm) avec la majorité des grains ayant une taille d'environ 280–320 μm .

Cette propriété discrimine néanmoins le massif landais en deux zones : la plaine landaise (mise en place du sédiment sableux au Pléistocène \approx -12000 ans) et la frange dunaire (\approx -6000 jusqu'à nos jours). Le matériau n'est donc pas le même et n'a pas le même âge partout. Il en résulte que la proportion de sables grossiers est significativement différente en dunes (94–98% du sol) et en plaine (80–92%). De manière concomitante, les fractions les plus fines sont plus faibles en dunes. Dans tous les cas, les fractions fines sont très, voire ultra, minoritaires. Or, ce sont de loin les phases les plus fines qui présentent l'essentiel de la réactivité des sols (en termes de fourniture / mise en réserve de nutriments) et des stocks en nutriments rapidement biodisponibles pour la croissance des arbres (et des végétaux en général).

La composition minéralogique des sols landais indique une dominance quasi exclusive du quartz et de ses apparentés. Le quartz (SiO_2) ne contient aucun nutriment et ne présente aucune réactivité de surface. Autrement dit, les sols landais sont composés presque entièrement d'un minéral qui n'a aucune "valeur nutritionnelle". Dans ces conditions, les **propriétés biogéochimiques** de ces sols sont à rechercher dans les phases minérales minoritaires (par ex : oxydes de Fe et Al ; cf. ci-dessous) et les **phases organiques**.

Par ailleurs, les sols landais sont acides (pH) et peu saturés (S) en cations non acides (K^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+). L'acidité est marquée mais n'est pas exceptionnelle au regard de l'ensemble des sols forestiers français métropolitains. Là encore, il faut distinguer les dunes (pH=4.9 en surface et 5.4 en profondeur ; S \approx 40–15%) des sols de plaine (pH=4.3 en surface et 5.1 en profondeur ; S \approx 35–5%).

Notion de biodisponibilité des nutriments

Il est souvent assez facile de quantifier la concentration totale d'un nutriment d'un sol. Cette information est utile car elle indique la limite théorique maximale des réserves en cet élément. Toutefois, chaque élément chimique a plusieurs formes (c'est ce qu'on appelle la "spéciation" des éléments) et peut s'associer selon des modes très divers. Il y a donc potentiellement une grande hétérogénéité de propriétés associées à un même élément chimique. Les plantes ne peuvent pas prélever toutes les formes d'un nutriment. Sur la base des connaissances actuelles, on peut dire que les formes assimilables des nutriments majeurs sont : le nitrate (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+) pour l'azote¹ ; le phosphate (H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}) pour le phosphore ; les formes cationiques (K^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+}) pour le potassium, calcium et magnésium.

Pour l'essentiel, les plantes s'approvisionnent en nutriments dans l'eau du sol *via* leurs racines fines² et les symbiotes mycorhiziens. Autrement dit, les plantes ne sont pas en mesure de s'alimenter directement depuis les grains solides du sol ; elles pompent l'eau du sol dans laquelle se sont solubilisées les substances issues des phases solides du sol (on parle de solution du sol).

La capacité d'un sol à "nourrir" la plante est donc dépendante des quantités de nutriments qui sont dans la solution du sol et qui seront, à court et moyen termes, sous une forme assimilable. Toutefois, la très grande majorité des nutriments d'un sol est, à un instant donné, non pas dans la solution du sol mais dans la phase solide du sol. Au final, la "fertilité d'un sol" (du point de vue de la nutrition minérale) dépend donc *i*) des quantités de nutriments contenus dans le sol, *ii*) de la spéciation des nutriments (notamment la proportion des formes assimilables), *iii*) de la dynamique des processus qui changent la spéciation des nutriments et *iv*) de la capacité du sol à réguler dans le temps la quantité de nutriments sous forme assimilable dans la solution du sol. Tous ces facteurs sont en forte interaction et contribuent à l'établissement dans un sol donné d'un niveau de **biodisponibilité en nutriments**.

L'azote (N) et le carbone (C)

Dans les sols, le nitrate est peu retenu et est ainsi soit rapidement prélevé, soit rapidement perdu dans les eaux de drainage. A l'inverse, l'ammonium est retenu dans les feuillets des minéraux argileux.

Cet élément n'est pas le principal facteur limitant la croissance en plaine³ (Trichet *et al.*, 2009). Toutefois, il peut s'avérer l'être lorsque la contrainte du phosphore est levée (Trichet *et al.*, 2008). Dans les sols landais, la fraction de minéraux argileux⁴ est insignifiante (Augusto *et al.*, 2010) ce qui implique que la capacité de rétention de l'ammonium de ces sols est très faible. **L'azote est stocké dans les sols landais sous forme de matières organiques** (débris morts ou microorganismes). Le carbone des sols acides étant sous forme de matière organique, les stocks d'azote et de carbone sont étroitement liés.

Les phénomènes de mise à disposition pour la plante de l'azote sont donc dépendants des **processus biologiques de décomposition des matières organiques mortes et de la dynamique de renouvellement des microorganismes** du sol (essentiellement des bactéries et des champignons).

Dans le massif landais, les stocks de C et N dépendent de la station. Il existe ainsi un gradient depuis les dunes (C \approx 60 t/ha ; N \approx 2.2 t/ha) vers les landes mésophiles et humides (C \approx 200 t/ha ; N \approx 8 t/ha) avec les landes sèches en position intermédiaire (C \approx 150 t/ha ; N \approx 5 t/ha).

¹ Certaines espèces peuvent également prélever des formes organiques (acides aminés).

² Racines ayant un diamètre inférieur ou égale à 2 mm.

³ L'azote est assez probablement le principal facteur limitant en dunes, mais cela reste à confirmer.

⁴ Il ne faut pas confondre les minéraux argileux (famille de cristaux silicatés : "phyllosilicates") et les argiles granulométriques d'un sol (particules de moins de 2 μm en taille). La confusion provient que la plupart des phyllosilicates sont de très petites tailles.

Le phosphore (P)

Dans la très grande majorité des sols mondiaux, le phosphore assimilable est très fortement retenu sur la phase solide du sol. Son passage en solution est étroitement contrôlé par les fractions réactives du sol. Dans les sols acides, ces fractions sont souvent des oxydes de fer et d'aluminium.

Dans les sols landais, les **stocks en phosphore sont exceptionnellement bas**, ce qui classe ces sols parmi les plus **déficieux** du globe (Achat *et al.*, 2009). Dans ces conditions, il est logique que la fertilisation en P soit une pratique largement efficace dans le massif (Trichet *et al.*, 2009).

Les sols landais présentent une autre particularité assez exceptionnelle. En effet, et contrairement à la très grande majorité des cas, beaucoup d'entre eux ont une **capacité physico-chimique nulle ou extrêmement faible à retenir et échanger⁵ le phosphore assimilable**, au moins dans le haut du profil de sol (Achat *et al.*, 2009). Cette capacité est étroitement liée à la concentration en oxydes des sols (Achat, 2009) qui est très variable dans le massif (Augusto *et al.*, 2010). Très grossièrement, on peut dire qu'elle est très basse ou nulle en dunes et en landes sèches mais, en moyenne, significative en landes mésophile et humides. Il est à noter qu'il existe une forte variabilité au sein des landes mésophiles et humides : certains sites sont dépourvus d'oxydes (sites dits "non réactifs") alors que d'autres ont des teneurs assez élevées (sites "réactifs"). Cette capacité à échanger le phosphore des sols joue probablement un rôle très important dans la productivité du massif. En effet, le programme Sylvogene a montré que le **premier facteur expliquant la hauteur des pins maritimes à un âge de 8 ans est la concentration des sols en oxydes** (Meredieu *et al.*, 2008). Ce même programme a montré que la classification actuelle en quatre stations n'était pas discriminante pour expliquer la croissance des peuplements.

En plus de ce phénomène d'échange de phosphore assimilable entre la phase solide du sol et la solution du sol, des processus biologiques interviennent dans tous les cas. En effet, hormis lors d'une fertilisation, le phosphore qui retourne au sol est sous forme organique (litières aériennes et racinaires). Les **processus biologiques** (dégradation des matières organiques du sol ; dynamique des populations microbiennes) **participent à l'approvisionnement du sol en phosphore assimilable**. Dans les sites non réactifs, ce sont les seuls processus permettant le recyclage du phosphore sous forme biodisponible pour les plantes. Il est à noter que, contrairement aux processus physico-chimiques, les processus biologiques sont d'intensité très variable dans le temps car soumis à l'activité de la biocénose du sol, elle-même très dépendante des conditions du milieu (principalement humidité et température).

Les autres nutriments majeurs (K, Ca et Mg)

La forme assimilable de ces éléments est le cation (ion chargé positivement : K^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+}). Les cations sont retenus dans les sols par *i*) des minéraux argileux (phyllosilicates) et *ii*) la matière organique. La capacité totale d'un sol à retenir, et échanger, les cations est appelée capacité d'échange cationique (CEC) et augmente logiquement avec les teneurs en argiles et en matières organiques. Comme cela a été signalé plus haut, les sols landais ont une teneur en minéraux argileux qui est insignifiante (ce qui constitue une nouvelle originalité de ces sols par rapport à la plupart des sols connus). Ceci veut dire que la **capacité des sols landais à échanger les cations est directement proportionnelle à leur teneur en matière organique** (Augusto *et al.*, 2010).

Il existe peu de données pour déterminer si ces nutriments sont limitants dans le cas du massif landais. Il est assez probable que les dunes, soumises aux embruns océaniques et ayant des stocks totaux relativement élevés, ne présentent pas de déficience grave en ces nutriments. En plaine, des travaux anciens suggèrent une déficience en magnésium (Dumonem, 1979). Les stocks des sols en potassium sont très élevés mais la fraction directement assimilable est à l'inverse très faible (Augusto *et al.*, 2010). Le caractère déficient en potassium resterait donc à explorer, même si les essais de fertilisation n'ont pas été concluants (Trichet *et al.*, 2009).

⁵ Echanges entre la phase solide du sol et la solution du sol (et inversement).

Notion de bilan entrées–sorties biogéochimique

Comme nous l'avons vu, la biodisponibilité en nutriments dans un sol dépend de plusieurs facteurs dont les propriétés de réactivité. Elle dépend aussi de la **quantité de nutriments stockés dans l'écosystème**. Dans les écosystèmes forestiers peu anthropisés, les nutriments circulent en circuit fermé, à savoir qu'ils passent du sol à la plante (nutrition des plantes), puis de la plante au sol (litière ; mort des plantes) etc... C'est le **cycle biogéochimique**⁶. Il est important de souligner que, fonctionnant en circuit fermé entre la plante et le sol, aucun de ces processus n'enrichit ou n'appauvrit l'écosystème puisque ce dernier est la somme des compartiments "sol" et "végétation". Ainsi, une chute de litière ne doit pas être perçue comme une fertilisation du sol puisque les nutriments contenus dans la litière ont été au préalable puisés dans le sol ; c'est juste une partie du recyclage permanent qui existe entre le sol et la plante.

A l'inverse, tous les processus qui font entrer, ou sortir, des nutriments de l'écosystème (écosystème = système sol+plante) l'enrichissent ou l'appauvrissent (on parle de "flux entrant" et de "flux sortant" ; notés ici "flux E/S"). Pour un nutriment donné, c'est la somme des flux entrants moins la somme des flux sortants qui détermine si un écosystème s'enrichit ou s'appauvrit ($\Delta F = \Sigma \text{flux entrants} - \Sigma \text{flux sortants}$). On parle de **bilan biogéochimique** (ou de bilan entrées–sorties).

Il existe de nombreux flux E/S. Dans le cas du massif landais, les principaux flux⁷ entrants sont (Augusto, 2003) : *i*) les intrants (fertilisation ; cendres ?), *ii*) les dépôts atmosphériques et *iii*) la fixation symbiotique de l'azote. Les principaux flux sortants sont : *iv*) les récoltes de biomasse et *v*) les pertes de nutriments dans les eaux de drainage.

Effets des pratiques de gestion sur le fonctionnement biogéochimique du massif landais

Dans le présent document, nous ne passerons pas en revue les différents itinéraires car notre objectif n'est pas de promouvoir, ou de jeter l'opprobre, sur un itinéraire en particulier. Notre objectif est de fournir les bases scientifiques permettant aux acteurs des filières forêt–bois–papier–énergie régionales de prendre des décisions raisonnées. A ce titre, nous présentons quelques règles d'appréciation des effets des différentes pratiques de gestion sur le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème forestier landais (cf. Annexe pour un tableau synthétique avec les exemples de N et P).

Exportations de biomasse ("récoltes")

Les exportations de nutriments augmentent logiquement avec la quantité de biomasse récoltée. Toutefois, il est très important de prendre en compte le fait que **les quantités de nutriments ("minéralomasse") ne sont absolument pas proportionnelles aux quantités de matière ("biomasse")**. En effet, les concentrations en nutriments varient très fortement au sein des plantes et des arbres en particulier. Ainsi, pour le pin maritime (Augusto *et al.*, 2008^a), le phosphore contenu dans 1.0 tonne d'aiguilles équivaut au phosphore contenu dans :

- 2.3 t de branches
- 3.6 t d'écorce
- 10.1 t de bois d'aubier
- 40.0 t de bois de cœur

Par ailleurs, au sein même d'un compartiment, il existe des disparités. Par exemple, plus une branche est de petit diamètre et plus sa concentration⁸ en nutriments est élevée.

D'une manière générale, on peut retenir comme règles que **plus un compartiment est de petit diamètre et plus il est riche en nutriments**. De même, **plus un organe est "vert"** (à savoir

⁶ "bio" pour biologique (plantes et autres organismes vivant), "géo" pour géologique et "chimique".

⁷ Il existe un déficit de données concernant certains flux empêchant de déterminer a priori leur importance dans l'écosystème landais (par ex : flux latéral de nappe).

⁸ Attention à ne pas confondre la concentration (une quantité de nutriment par gramme de biomasse) et un stock ou une minéralomasse (qui sont des quantités en absolue).

physiologiquement actif) et plus il est riche en nutriments. Ainsi, le raccourcissement des révolutions sylvicoles augmentent sensiblement les exportations de nutriments (cf. Annexe) car ce sont des compartiments plus fins qui sont récoltés.

La récolte de plus de compartiments, dans le cadre d'une révolution sylvicole classique (~40 ans), conduit aussi à des augmentations des pertes en nutriments : modérées pour les souches ; très importantes pour les rémanents (branches et aiguilles).

La mise en place de cultures dédiées à la production de biomasse conduit à une multiplication des exportations en nutriments. En ce qui concerne ces nouvelles cultures, les TTCR (taillis à très courte révolution) n'ont pu être évalués, faute de données fiables de production. Toutefois, il est d'ores et déjà certain que ces cultures s'apparentent plus à une gestion de type agricole que forestière. Elle ne pourra se faire sans fertilisation répétée, avec toutes les contraintes associées comme c'est le cas en agriculture.

Travail du sol

Actuellement, dans la plupart des parcelles, le sol est travaillé en bandes lors de l'installation du peuplement. Des questions se posent quant à l'opportunité de modifier ces pratiques (retour à un travail en plein ; profondeur de travail ? ; fréquence ? ; outil ? etc ...).

Ce choix étant multicritères, les seules considérations biogéochimiques ne permettent pas d'indiquer la marche à suivre. Néanmoins, les paramètres suivants seront à prendre en compte :

- i) le travail du sol provoque un enfouissement partiel de la matière organique du sol. De plus, il stimule la dégradation de la matière organique. Il y a donc une diminution notable des stocks de matière organique dans le haut des profils de sol. Une bonne partie de la richesse et de la réactivité biogéochimique sont ainsi perdues⁹. Le stock de matière organique tend à être négativement corrélé à la fréquence du travail du sol (par exemple : raccourcissement des révolutions) et à l'intensité du travail (ex : labour profond en plein).
- ii) le carbone du sol est contenu dans la matière organique (2 t de MO \approx 1 t de C). Le travail du sol est ainsi contre-productif dans le cadre des politiques de réduction des émissions de CO₂.
- iii) le travail du sol est généralement effectué à l'installation. Il s'agit d'une période durant laquelle les besoins de la végétation en nutriments sont très faibles parce que les pins ne sont que des plantules et que, généralement, la végétation accompagnatrice a été supprimée. Dans le même temps, on assiste à une forte dégradation de la matière organique. Les sols landais ayant une faible capacité à retenir les nutriments assimilables, il y a des risques forts de perte de nutriments par lessivage (lors des pluies).

Apport de cendres de bois

La conséquence logique de la mise en place d'une filière bois-énergie est la production de volumes importants de cendres de bois. Les effets de l'épandage de cendres de bois ont été étudiés sur base d'une synthèse bibliographique (Augusto *et al.*, 2008^b). Pour simplifier, il est possible de dire que les cendres de bois s'apparentent à un amendement calcaire (2 t de cendres \approx 1 t de CaCO₃). L'ajout de cendres dans une parcelle a donc pour effet premier de remonter le pH. Cet apport constitue par ailleurs une restitution des nutriments prélevés (nutriments prélevés par l'arbre, exportés avec la biomasse et finalement concentrés dans les résidus de combustion). Toutefois, la restitution n'est que partielle car certains éléments sont partiellement ou complètement (C et N) perdus dans l'atmosphère lors de la combustion.

Les effets de l'épandage de cendres sont dépendants de la dose apportée. Les résultats de la littérature indiquent que les effets sont modérés quand la dose reste inférieure à 12 t/ha et par révolution (~40 ans). Les apports de cendres sont à éviter sur les jeunes plantations.

Il est enfin à noter que les cendres de bois sont assez concentrées en éléments traces métalliques (ETM *alias* "métaux lourds"). Ce phénomène résulte d'un effet de concentration lors de la combustion : les ETM naturellement contenus dans 1 tonne de bois se retrouvent, après combustion, dans 20–30

⁹ La matière organique des sols joue aussi d'autres rôles, comme pour la réserve en eau utile.

kilogrammes de cendres. Cette concentration n'est pas un problème tant que la dose de cendres épandues est proportionnée à la quantité d'ETM contenu dans la biomasse récoltée. Dans ce mode de gestion, on restitue à l'écosystème la même quantité d'ETM qui avait été exportée lors des récoltes de biomasse. A l'inverse, l'épandage systématique des cendres produites par une unité de combustion sur une même zone restreinte conduira à une accumulation de métaux lourds dans les sols (ce système revient à récolter des ETM sur l'ensemble de l'aire d'approvisionnement en biomasse de la centrale bois-énergie et à les concentrer sur une aire d'épandage beaucoup plus petite).

Orientations générales et perspectives

Les recherches conduites sur le massif forestier landais ont apporté de nombreux résultats dont certains nous éclairent sensiblement sur le fonctionnement de cet écosystème. Toutefois, des zones d'ombre subsistent et un modèle mathématique permettant de simuler avec fiabilité les impacts de changements de pratiques de gestion sur l'environnement et la fertilité des sols n'existe pas encore. Plusieurs flux de nutriments n'ont pas encore été pris en compte dans nos études. Il reste donc très périlleux de calculer des bilans biogéochimiques. Des résultats sont néanmoins relativement précis et fiables :

- i) les dunes forestières de la frange littorale sont sans conteste les zones les plus pauvres du massif en C et N. Ces sols présentent également une faible réactivité biogéochimique. Ces propriétés, en lien avec les difficultés de gestion causées par le relief, incitent au maintien d'une gestion non intensive des peuplements. Par ailleurs, la relative richesse en Ca et Mg de ces écosystèmes et la faible acidité du milieu rendent peu attractif un éventuel apport de cendres de bois.
- ii) les landes sèches ont des stocks en C et N plus importants que les dunes. Toutefois, la fertilité reste intrinsèquement faible et cette station ne peut probablement pas supporter des itinéraires intensifs, sans restitution de fertilité appropriée aux sols sableux, au-delà du court terme.
- iii) de toutes les stations, les landes mésohygrophiles sont les plus riches. Toutefois, ce n'est qu'un classement relatif. **Dans l'absolue, même les "meilleurs" sols landais restent très pauvres.** La bonne croissance du pin maritime est d'ailleurs source d'interprétations erronées. Si le pin maritime pousse plutôt bien sur les sols landais, c'est parce qu'il est exceptionnellement frugal (et pas parce que les sols sont fertiles). Le fait que cette essence soit quasiment la seule à pousser correctement dans la *Grande Lande* est très démonstratif sur ce point (y compris en comparaison avec des essences de sols pauvres comme le pin *taeda*). Ainsi, même les meilleures stations doivent faire l'objet d'une gestion raisonnée. Une intensification modérée des pratiques est possible (notamment dans les sites relativement bien fournis en nutriments, en matière organique et en oxydes), mais des mesures compensatoires seront inévitables au-delà du court terme. Il est difficile de conclure quant à une intensification très prononcée (ex : TTCR) du fait du manque de données, mais, compte tenu des propriétés des sols landais, elle semble *a priori* non adaptée au milieu.

En ce qui concerne les pratiques de fertilisation en tant que mode de compensation, il faudra garder à l'esprit que cela ne constitue pas une panacée (coût des engrais lié à celui du pétrole ; bilan en CO₂ ; difficulté économique à compenser les pertes de tous les nutriments (oligoéléments ? Mg ?) ; nécessité d'apporter l'azote de manière fractionnée ; risque de pollution des cours d'eau (lacs ; bassin)...).

Les perspectives de recherche dans l'unité TCEM portent à moyen terme (2010–2014) sur :

- la modélisation des systèmes de prélèvement des arbres et du sous-bois (racines fines et système mycorhizien pour le prélèvement de nutriments),
- la modélisation des processus de réapprovisionnement en phosphore biodisponible
- la modélisation de la distribution des nutriments dans la biomasse végétale
- la modélisation du flux de fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses du sous-bois
- la quantification de certains flux E/S dans le cadre de la plate-forme ECOSYLVE.

Références bibliographiques

- Achat DL. 2009. Biodisponibilité du phosphore dans les sols landais pour les peuplements forestiers de Pin maritime. Thèse, Université Bordeaux 1, 291 p.
- Achat DL, Bakker MR, Augusto L, Meredieu C, Saur E, Morel C. 2009. Evaluation of the phosphorus status of highly P-deficient spodosols in temperate pine stands: combining isotopic dilution and extraction methods. *Biogeochemistry*, 92 : 183-200.
- Augusto L. 2003. Cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les écosystèmes forestiers. Programme initial de recherche. Rapport interne INRA, 30 p.
- Augusto L, Crampon N, Saur E, Bakker MR, Pellerin S, de Lavaissière C, Trichet P. 2005. High rates of N₂ fixation of *Ulex* species in the understory of Maritime pine stands (*Pinus pinaster*) and potential effect of P fertilisation. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 : 1183-1192.
- Augusto L, Meredieu C, Bert D, Trichet P, Porté A, Bosc A, Lagane F, Loustau D, Pellerin S, Danjon F, Ranger J, Gelpe J. 2008^a. Improving models of forest nutrient export with equations that predict the nutrient concentration of tree compartments. *Annals of Forest Science*, 65 : 808 (n° art.).
- Augusto L, Bakker MR, Meredieu C. 2008^b. Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. *Plant Soil*, 306 : 181-198.
- Augusto L, Bakker MR, Morel C, Meredieu C, Trichet P, Badeau V, Arrouays D, Plassard C, Achat DL, Gallet-Budynek A, Merzeau D, Canteloup D, Najjar M, Ranger J. 2010[?]. Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of the region? – A case study in a maritime Pine forest in south-western France. *European Journal of Soil Science* (en cours de finalisation).
- Jolivet C, Augusto L, Arrouays D, Trichet P. 2007. Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne : formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale. *Revue Forestière Française*, 59 : 7-30.
- Meredieu C, Augusto L, Porté A, Najjar M. 2008. Qualifier les potentialités de croissance initiale des peuplements en ligniculture (GIS Coopérative de données). Programme SYLVOGENE, tache 2.1.1., pp. 68-76.
- Thompson TD, Morris LA, Lee AH, Wells CG. 1986. Estimates of nutrient removal, displacement and loss resulting from harvest and site preparation of a *Pinus taeda* plantation in the Piedmont of North Carolina. *Forest Ecology and Management*, 15 : 257-267.
- Trichet P, Loustau D, Lambrot C, Linder S. 2008. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation: Effects on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. *Annals of Forest Science*, 65 : 814 (n° art.).
- Trichet P, Bakker MR, Augusto L, Alazard, P, Merzeau D. 2009. Fifty years of pine fertilization experiments in the Landes of Gascogne (France). *Forest Science*, 55 : 390-402.

Annexe – Tableau de synthèse des effets des pratiques de gestion sur le fonctionnement biogéochimique de l'écosystème forestier landais

Pratiques / Tendances	Premières estimation des principaux flux de nutriments (par ex : N et P)								Bilan			
	Exportation de biomasse (-)		Lixiviation (-)		Apports (+)		Fixation symbiotique (+)		Dépôts atmosphériques (+)		Σ Flux	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
Fertilisation-P ↓	↓	↓ ⁽¹⁾	.	↓ ^{γ(2)}	.	↓	↓
Apport de cendres ↗	.	.	↗?	.	.	↗	.	.	.	.	.	↗
Révolution sylv. ↓	↗20-30%	↗20-30%	↗↗ ⁽³⁾	↗ ^{γ(4)}	.	.	↗ ⁽⁵⁾	.	↓ ^{γ(2)}	.	↓?	↓
Récolte souches	↗20% ⁽⁶⁾	↗40% ⁽⁶⁾	↗ ^{γ(8)}	↗ ^{γ(8)}	.	.	.	.	.	.	↓	↓
Récolte rémanents	↗30% ⁽⁷⁾	↗20% ⁽⁷⁾	↓	↓
	↗70% ⁽⁶⁾	↗130% ⁽⁶⁾	↓	↓
	↗80% ⁽⁷⁾	↗30% ⁽⁷⁾	↓	↓
Semi-dédiés "biomasse"	↗60% ⁽⁶⁾	↗60% ⁽⁶⁾	↓ ⁽⁹⁾	.	.	.	↓	↓
Dédiés "biomasse"	↗~250% ^(6&10)	↗~250% ^(6&10)	cf. révol.	cf. révol.	.	.	γ ^(5&9)	.	↓ ⁽²⁾	.	↓	↓

Les chiffres présentés dans le tableau sont relatifs à une sylviculture "classique" (révolution de ~40 ans ; exportations du tronc-bois fort)

(1) : la fertilisation phosphatée augmente le flux de fixation symbiotique de l'azote (Augusto et al., 2005)

(2) : les dépôts atmosphériques augmentent avec la surface foliaire qui est elle-même stimulée par la fertilisation (Trichet et al., 2008) et est dépendante de l'âge.

(3) : le raccourcissement des révolutions sylvicoles augmentent la fréquence du travail du sol et donc des pertes en nutriments qui lui sont fréquemment associées (par ex : Thompson et al., 1986)

(4) : généralement, le phosphore est peu mobile dans le sol. Malheureusement, certains sols du massif landais n'ont pas les propriétés physico-chimiques suffisantes pour interagir efficacement avec cet élément chimique (Achat et al., 2009)

(5) : les perturbations du système ayant des périodicités de moyen terme (≈ 10-20 ans) favorisent l'implantation des espèces fixatrices d'azote rencontrées spontanément dans le massif landais (Mathieu, 2008)

(6) : estimations issues de simulations intermédiaires (Augusto, données non publiées)

(7) : estimations produites par l'expérience du Nezer (Sylvogène)

(8) : l'arrachage des souches pourrait stimuler la minéralisation des matières organiques du sol

(9) : la forte densité de plantation est préjudiciable à la survie des espèces fixatrices présentes spontanément dans le massif landais (Mathieu, 2008)

(10) : les données sur la productivité réelle et les itinéraires de peuplements dédiés sont fragmentaires ce qui rend les calculs de simulation imprécis.