N°7 - AVRIL 2025

LES CAHIERS du Groupe Pin Maritime du Futur

RÉCOLTES INTENSIVES DE BIOMASSE ET MAINTIEN DE LA FERTILITÉ DES SOLS

édito

En lien avec la transition écologique, la France connaît un développement des filières de biomasse-énergie dont une partie de la ressource provient de la forêt. Le massif forestier des Landes de Gascogne, à l'instar de l'ensemble des forêts françaises, est soumis à des sollicitations pour faire croître les récoltes de bois. Afin de répondre à cette demande dans ce massif où la disponibilité en bois a été limitée par les dernières tempêtes, des réflexions ont conduit à la mise en place de nouvelles pratiques sylvicoles.

Après la récolte de bois, les parties résiduelles de l'arbre (branches, feuillage, souches, racines) laissées au sol en sylviculture conventionnelle peuvent être maintenant récoltées pour un usage par des filières dites Biomasse ou Bois Énergie (chaleur et électricité principalement). En sylviculture, on définit ces parties comme des « rémanents » : les parties du tronc mal conformées ou de petit diamètre, les branches de petit diamètre et leur feuillage, mais également la souche et les racines. Ces récoltes additionnelles de biomasse par rapport à une récolte conventionnelle, induisent aussi des exportations de nutriments hors de l'écosystème forestier. Ces pratiques posent ainsi la question de leurs possibles répercussions sur le fonctionnement des forêts à long terme.

Le GIS GPMF mène des programmes expérimentaux pour tester de manière croisée les effets, d'une part, des différentes intensités de récolte lors de la coupe finale des peuplements et d'autre part, des différentes techniques visant à compenser ces exportations en biomasse et en nutriments. Ce numéro des cahiers du GPMF présente les résultats des recherches sur ces deux sujets.

Le Groupe Pin Maritime du Futur

Photo P. Trichet, INRAE ©

Tas de souches extraites.

Récolte des rémanents : évaluation des exportations et étude de leurs effets sur la fertilité des sols

L. AUGUSTO (INRAE) • J.-Y. FRAYSSE (FCBA) • C. MEREDIEU (INRAE) • P. TRICHET (INRAE)

Comment la biomasse et les nutriments sont distribués dans l'arbre ? Les résultats de la recherche montrent que, même si les rémanents ne représentent qu'une petite part de la biomasse totale de l'arbre en comparaison avec la biomasse du tronc, ils sont très riches en nutriments et contiennent souvent plus de nutriments que le tronc. Le chapitre « récolte des rémanents » fait le point sur une expérimentation initiée en 2009 sur la commune du Teich (33).

Répartition de la biomasse et des nutriments au sein de l'arbre : cas du pin maritime

Il est bien établi que la proportion de biomasse d'un arbre contenue dans son tronc augmente avec l'âge, avant de se stabiliser (Figure 1). Ainsi, chez un pin maritime adulte, le tronc représente plus de la moitié de sa biomasse, ce qui laisse environ 40-50 % pour les autres compartiments que sont le feuillage, les branches et le système racinaire.

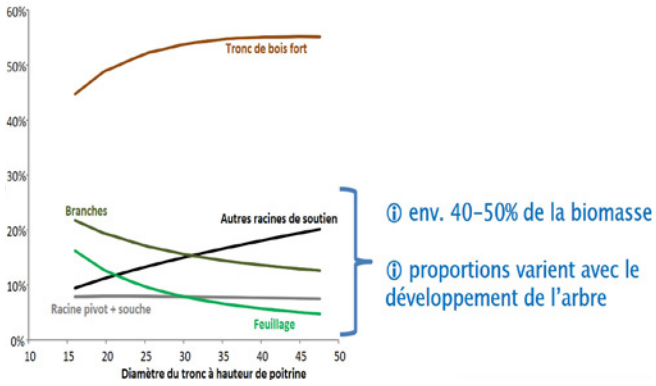

Figure 1 : Répartition de la biomasse en pourcentage entre le tronc et les autres compartiments selon la taille de l'arbre (Diamètre en cm mesuré à 1,30 m sur le tronc).*

(*) On appelle ici « Tronc de bois fort » (ou « Bois fort tige ») la partie du tronc (ou de la tige principale) jusqu'à un diamètre de 7 cm. Toutes les branches et la partie de tronc inférieures à 7 cm ne sont pas prises en compte dans ce compartiment.

Toutefois, si tous les compartiments d'un arbre contiennent des nutriments, leur distribution est loin d'être homogène. En effet, les nutriments se concentrent dans les tissus cellulaires où l'activité physiologique de l'arbre est importante et au contraire sont peu présents dans les tissus de soutien. Dit autrement, plus un tissu est « vert » et de petite dimension (aiguilles, brindilles, radicelles) et plus la teneur en nutriments est élevée (Figure 2). Chez le pin maritime, une tonne d'aiguilles contient environ 40 fois plus de phosphore (0,76 kg-P/tonne de matière sèche) qu'une tonne de bois de cœur (0,02 kg-P/tonne) au centre du tronc. Il en va de même pour les racines puisque les racines les plus fines contiennent en moyenne 5 à 6 fois plus de phosphore que les souches.

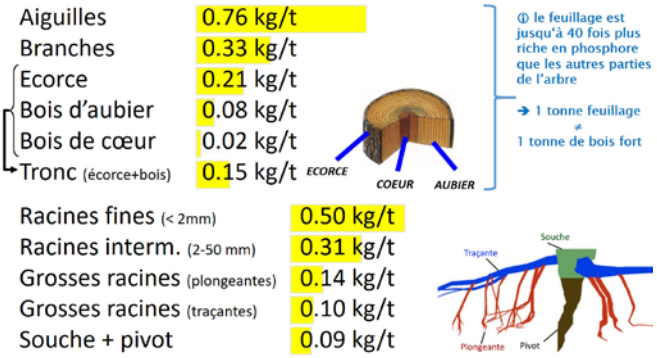

Figure 2 : Distribution du Phosphore dans les différentes parties de l'arbre : compartiments aériens et racinaires.

Du point de vue du maintien de la fertilité des sols, il est donc important de retenir qu'une tonne de biomasse récoltée n'en vaut pas forcément une autre selon les parties des arbres qui la compose. **La distribution hétérogène des nutriments dans les différentes parties d'un arbre peut donc avoir des conséquences importantes en termes d'exportation de nutriments lors des récoltes.** Ainsi la récolte de « rémanents » peut paraitre intuitivement peu impactante car elle n'augmente pas beaucoup les exportations totales de biomasse en comparaison de la récolte dite conventionnelle (récolte et exportation hors de la forêt de la partie des troncs de leur base jusqu'à la découpe dite « bois fort » avec tous les autres rémanents abandonnés au sol). Mais le fait de récolter des parties de l'arbre riches en nutriments conduit en pratique à de fortes exportations de nutriments hors de la forêt.

Une expérimentation initiée en 2009 sur la commune du Teich (33), et conduite en conditions réelles d'exploitation, a ainsi mis en évidence qu'une récolte « arbre-entier » (soit Tronc + Houppier + Souche) augmentait de 64 % les exportations en phosphore par rapport à une récolte conventionnelle (et jusqu'à + 145 % dans le cas de l'azote ou du potassium) tout en n'accroissant la récolte de biomasse que de 34 % (Figure 3). Ces évolutions en termes d'exportation de nutriments remettent-elles en question le caractère durable de la sylviculture landaise et le maintien de la fertilité des sols ? L'un des objectifs de l'expérimentation sur la commune du Teich était de répondre à cette question.

Effets de la récolte de rémanents sur la fertilité des sols et les peuplements à venir

Les sols de l'expérimentation du Teich ont été échantillonnés une décennie après les récoltes de biomasse. L'analyse de ces échantillons montre que la récolte de rémanents a eu des effets sur la fertilité des sols, c'est-à-dire sur une gamme d'indicateurs de son fonctionnement. Si certains de ces effets ne sont encore que des tendances (c'est-à-dire reconnues comme statistiquement non-significatives, en raison de l'hétérogénéité spatiale du sol étudié), elles sont néanmoins cohérentes avec des effets statistiquement validés dans la littérature mondiale. En effet, les résultats convergent pour indiquer que les récoltes de rémanents – et notamment la récolte « arbre-entier » – ont été suivies d'une diminution des paramètres associés à la fertilité des sols. Pour cette expérimentation du Teich, on observe des diminutions des teneurs en matières organiques, de la capacité d'échange cationique (CEC), et des teneurs en nutriments (N, P, Ca ; Tableau 1).

Tableau 1 – Composition du sol (couche 0-15 cm) après différents niveaux de récolte de biomasse

Récolte	Carbone organique total (g/kg)	Carbone organique dissous (mg/L)	Azote total (g/kg)	Phosphore disponible* (mg/kg)	Capacité d'échange cationique¤ (CEC ; $cmol_c/kg$)	Calcium échangeable ($cmol_c/kg$)
Tronc	38.6 ± 3.9	44 ± 2	1.41 ± 0.15	29.3 ± 2.2	3.51 ± 0.23	0.92 ± 0.04
T+Houppier	35.4 ± 3.9	42 ± 4	1.46 ± 0.15	25.3 ± 2.5	2.90 ± 0.24	0.67 ± 0.03
T+Souche	30.2 ± 3.9	39 ± 2	1.14 ± 0.15	25.3 ± 2.9	2.51 ± 0.23	0.65 ± 0.04
T+H+S	31.1 ± 3.9	31 ± 2	1.10 ± 0.15	21.0 ± 3.5	2.90 ± 0.24	0.69 ± 0.06

(*) méthode Olsen
(¤) la CEC peut être interprétée comme une mesure de la fertilité d'un sol en indiquant la capacité de rétention des éléments nutritifs d'un sol donné.

Toutes ces évolutions sont liées, et sont la conséquence des propriétés singulières des sols landais. Du fait de leur nature essentiellement sableuse, les sols landais ont une minéralogie en grande partie composée de quartz, un minéral inerte tant du point de vue nutritif que réactionnel. Contrairement aux autres sols forestiers, **la fertilité des sols forestiers landais repose sur leurs matières organiques (MO)** pour retenir les éléments chimiques (mesure de la CEC des MO), et fournir des nutriments lors de leur décomposition. Pour résumer, les matières organiques sont quasiment l'unique support de fertilité de ces sols puisqu'elles contribuent à retenir l'eau et à recycler les éléments nutritifs. **En récoltant les rémanents, le sylviculteur diminue de manière substantielle la quantité de débris végétaux sur le sol. Or ce sont eux qui alimentent le stock de matières organiques du sol.** La diminution du stock de matières organiques induit à son tour une réduction du réservoir en nutriments disponibles.

Une plantation de pins maritimes ayant été effectuée après l'exploitation du peuplement précédent, il a été possible d'évaluer les effets des différentes intensités de récoltes sur la nutrition et la croissance des arbres. Les résultats à 10 ans n'indiquent aucune détérioration de la nutrition des arbres, telle qu'évaluée au travers de l'analyse de la composition chimique des aiguilles (aucune différence entre les intensités de récolte). Cette analyse suggère que les arbres plantés dans les parcelles où les sols étaient moins fertiles suite aux récoltes non-conventionnelles ont pu s'adapter à ces conditions modérément plus défavorables. L'analyse de la croissance des arbres aboutit à des conclusions similaires, puisque qu'aucune différence statistiquement significative n'est démontrée. Une légère tendance à la baisse de la croissance semble émerger pour la récolte « arbre-entier » (- 12 % par rapport à la récolte conventionnelle), la récolte « tronc + houppier » (- 11 %), et la récolte « tronc + souche » (- 7 %) (Valeurs non significatives).

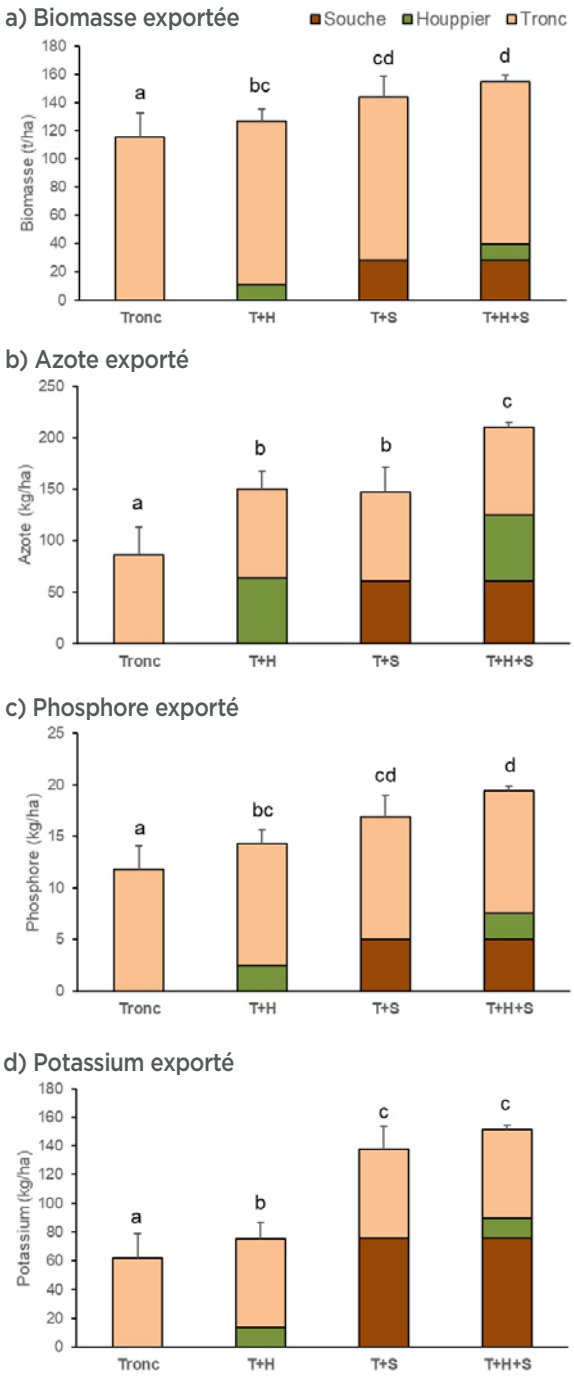

Figure 3 : Exportations réalisées de biomasse d'arbres (en tonne par hectare) et des principaux nutriments (en kg/ha) lors de la coupe finale des arbres : récolte conventionnelle (Tronc seul - T) ou pour trois autres niveaux plus intensifs : Tronc + Houppier (T+H), Tronc + Souche (T+S), Tronc + Houppier + Souche (T+H+S). Les barres d'erreur représentent les erreurs standards. Les traitements avec une lettre différente diffèrent significativement (P < 0,05).

D'une manière plus générale, si l'expérimentation du Teich apporte des éclairages nets quant à l'amplitude des exportations en biomasse et en nutriments, les résultats sur la fertilité des sols à 10 ans comportent quelques incertitudes. C'est pourquoi le GPMF a initié entre 2016 et 2020 une seconde expérimentation in situ (Pontenx-les-forges, 40 ; Figure 4). Cette nouvelle étude est destinée à tester dans quelle mesure les résultats observés lors de la première expérimentation sont généralisables ou fortement dépendants des conditions stationnelles.

Méthodes pour maintenir la fertilité des sols landais

Les sols des Landes de Gascogne sont caractérisés par une grande pauvreté en nutriments, particulièrement en phosphore. Dans ce contexte, les évolutions en termes d'intensité des récoltes remettent-elles en question le maintien de la fertilité des sols et donc le caractère durable de ces nouvelles pratiques ? Ce second chapitre décrit des solutions originales comme l'apport de cendres ou de matières organiques et rapporte les résultats les plus récents sur les pratiques alternatives à la fertilisation phosphatée.

De manière simplifiée, il est possible de gérer les conséquences des récoltes non-conventionnelles sur la fertilité des sols selon deux approches : (i) en limitant et rationalisant les récoltes (guide GERBOISE : cf. rapport ADEME, 2018), et (ii) en tentant d'en compenser les effets. Pour cette seconde approche, la fertilisation phosphatée lors de la plantation du peuplement (même si elle a largement démontré son efficacité pour soutenir la croissance des arbres dans un contexte de grande pauvreté des sols landais en ce nutriment) n'est pas suffisante puisque les récoltes non-conventionnelles peuvent affecter à la fois les stocks de matières organiques et divers nutriments (cf. § précédent). Toutefois, d'autres solutions peuvent être envisagées pour compenser les exportations en matières organiques et en nutriments.

Compte tenu de l'importance des matières organiques pour la fertilité des sols landais, **une première solution consiste à apporter des débris végétaux, sources de matières organiques et de nutriments.** En forêt, ces matières peuvent être d'origines diverses, comme les résidus d'exploitation forestière ou d'autres résidus de filières de transformation (par exemple des composts ; Houot et collaborateurs, 2014). Cette pratique du monde agricole (culture sur paillis, « slash » en anglais) est l'une des modalités testées dans l'expérimentation de Pontenx-les-forges (traitement H : apport de broyat de Houppier, Figure 4). En croisant de manière factorielle des récoltes différenciées de rémanents et des apports exogènes de matières organiques (Figure 5), cette expérimentation devrait permettre d'évaluer d'ici quelques années dans quelle mesure l'apport de débris végétaux pourrait atténuer ou remédier aux effets d'exportations de biomasse forestière.

Une seconde solution pour maintenir la fertilité des sols landais repose sur le concept de l'économie circulaire. En effet, une fois brûlé pour produire de l'énergie, il ne reste du bois-énergie que des cendres. Or, **ces cendres contiennent encore une partie des nutriments contenus initialement dans le bois** (l'autre partie des nutriments étant perdue dans les fumées de combustion). En Scandinavie, il a été envisagé depuis longtemps de rapporter en forêt ces cendres de bois afin d'y restituer ces nutriments et ces épandages sont toujours pratiqués.

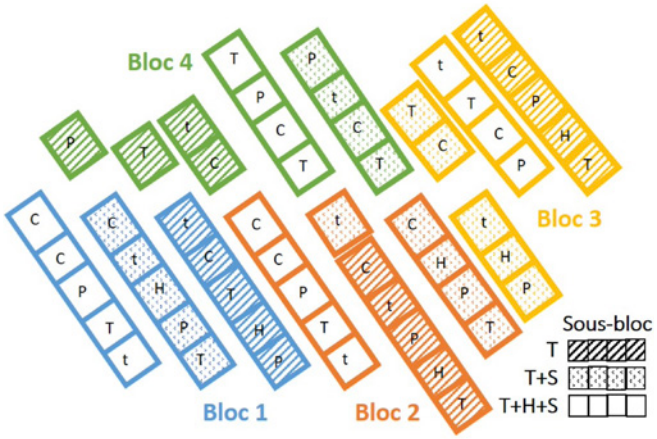

Figure 4 : Schéma du dispositif sur la commune de Pontenx-les-forges (40) installé en 2020. Les couleurs indiquent la répartition en 4 blocs (répétitions des modalités). Chaque sous-bloc correspond à une modalité de récolte lors de la coupe finale : Tronc (T), Tronc + Souche (T+S), Tronc + Houppier + Souche (T+H+S). Au sein de chaque sous-bloc sont disposées les placettes et leur modalité de fertilisation (t et T, deux témoins sans aucun apport, C : Cendres, P : fertilisation au Phosphore, H : apport de matières organiques par des broyats de Houppier).

Figure 5 : Illustration de la méthode d'apport de matière organique dans l'expérimentation de Pontenx-les-forges : houppiers au sol après récolte des troncs et apport des houppiers supplémentaires(*). Tous ces rémanents ont ensuite été broyés et laissés en place.

(*) Dans le cadre de l'expérimentation, l'apport de matières organiques supplémentaires a été fait avec les houppiers du traitement « récolte arbre entier ». Ce choix a été fait pour des raisons de commodité logistique (les houppiers étant sur place), mais pas pour préfigurer un développement opérationnel de l'apport de houppiers. En effet, si des apports de matières organiques devaient devenir une pratique sylvicole, ces matières organiques pourraient provenir de sources non-forestières comme par exemple des composts.

Toutefois, nous manquons de recul sur cette pratique en contexte de forêts tempérées et c'est pourquoi une modalité « apport de cendres de bois » a été incluse à la fois dans l'expérimentation du Teich et dans celle de Pontenx-les-forges. Ces études sont nécessaires car (i) les forêts boréales ne réagissent pas de la même façon que les forêts tempérées (les connaissances acquises en Scandinavie ne sont donc pas directement transposables) et (ii) les cendres de bois ne constituent pas une substance usuelle utilisée en contexte forestier en raison de ses propriétés. En effet, même provenant de la combustion de bois non traité ou brut (tels que les plaquettes forestières ou les connexes de scieries ou directement récolté en forêt), les cendres sont fortement alcalines (pH=12 en moyenne) et très concentrées en divers éléments chimiques (Deleuze et collaborateurs, 2012). On y trouve des nutriments majeurs (potassium-K, calcium-Ca et magnésium-Mg), des oligo-éléments (bore, zinc,...) et des éléments traces métalliques aussi appelés « métaux lourds » (plomb, cadmium,... ; voir l'encadré « éléments traces métalliques »). Épandre des cendres de bois dans un écosystème n'est donc pas anodin, et c'est pourquoi cette pratique est encadrée au niveau réglementaire et mérite des investigations scientifiques. L'expérimentation du Teich met en évidence que l'épandage de cendres de bois a des effets significatifs à la fois sur les propriétés du sol, et sur la végétation (Augusto et collaborateurs, 2022).

Les éléments traces métalliques (ETM) dans les cendres de bois

La présence de ces éléments classiquement considérés comme des contaminants de l'environnement peut paraître surprenante dans une matière issue de bois non transformé et non traité. Il s'agit simplement d'un effet de concentration qui s'opère durant la combustion.

En effet, comme leur nom l'indique, ces éléments existent naturellement dans l'environnement mais à l'état de traces. Des traces de ces éléments sont donc aussi présentes dans la biomasse forestière.

Une masse de 100 kilos de bois sec produisant de 1 à 5 kg de cendres (selon le compartiment de l'arbre considéré ; Deleuze et collaborateurs, 2012), les éléments qui ne sont pas perdus dans les fumées de combustion se retrouvent concentrés dans les cendres par un facteur multiplicatif pouvant aller jusqu'à 100 par rapport à leur teneur dans la biomasse.

La composition de ces cendres est très variable et dépend de nombreux facteurs (origine des bois, compartiments de l'arbre, température de combustion...).

Comme initialement attendu compte tenu de l'état des connaissances et de la nature alcaline des cendres, il a été observé une augmentation significative du pH du sol suite à l'épandage. Cet effet était fort dans les premières années mais s'est atténué avec le temps (+ 0,24 unité-pH par rapport au témoin après 10 ans, passant de 4,41 à 4,65). Toujours logiquement, la proportion de cations échangeables (présents sur la CEC et donc biodisponibles) occupée par des cations non-acides (potassium, magnésium et surtout calcium) a augmenté suite à l'épandage. Une augmentation des teneurs du sol en certains oligo-éléments (manganèse, zinc) a aussi été observée. Enfin, ces épandages expérimentaux ont eu globalement peu d'effets sur les teneurs en éléments traces métalliques contaminants (plomb, cadmium). L'épandage de cendres a donc réduit l'acidité du sol et eu un effet positif sur les réserves en certains nutriments, ce qui constitue un effet bien connu en forêt boréale de cette pratique.

A l'inverse, il a été observé une diminution significative d'environ 12 % (dans la couche 0-15 cm du sol) des teneurs en matières organiques (dont le carbone organique et le carbone organique dissous) et des nutriments associés (dont l'azote), ce qui constitue une originalité par rapport à la littérature scientifique scandinave. Ce résultat peut s'expliquer par un effet stimulant de la remontée du pH du sol sur les quantités de microbes qui décomposent les matières organiques du sol pour se nourrir.

L'épandage de cendres de bois a eu aussi des effets notables sur l'ensemble de la végétation des peuplements. Le sous-bois a été modifié à la fois en termes de quantité et de composition (Figure 6). Il était déjà établi que la fertilisation phosphatée favorise le développement du sous-bois et principalement des ajoncs (Augusto et collaborateurs, 2005 ; Vidal et collaborateurs, 2019), mais l'expérimentation du Teich montre que cet effet est encore plus prononcé avec les cendres de bois (+ 41 % de biomasse par rapport au témoin). Ce développement s'est fait au dépend d'espèces acidiphiles comme les éricacées (callune et bruyères) et les herbacées (molinie, avoine de Thore), (voir images page 7).

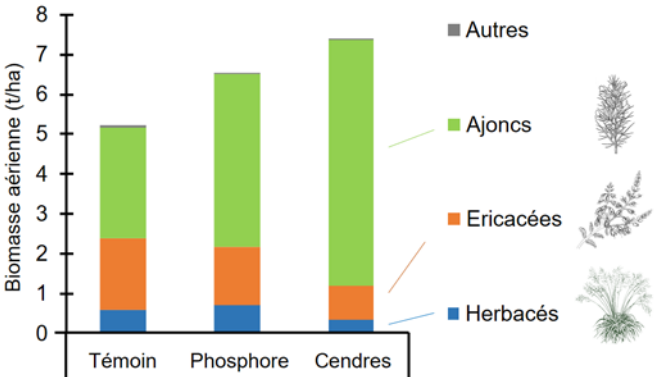

Figure 6 : Biomasse aérienne (Tonnes par hectare) par grandes catégories d'espèces du sous-bois en fonction de la méthode de compensation de la récolte de biomasse : Témoin = pas d'application de nutriments, Phosphore = Apport de Phosphore, Cendres = Apport de cendres.

Les peuplements de pins maritimes ont également bénéficié de l'épandage des cendres, tant en croissance qu'en nutrition. En effet, à 10 ans, les pins ayant reçu des cendres avaient cru en moyenne 7,5 % de plus que les témoins. De même, les teneurs des aiguilles avaient augmenté pour certains nutriments (azote, phosphore, potassium) et oligo-éléments (manganèse, bore). Ces augmentations peuvent être interprétées comme une conséquence directe des apports de cendres (potassium et oligo-éléments), et comme un effet indirect puisque la décomposition des matières organiques du sol a probablement libéré du complexe adsorbant du sol des quantités importantes d'azote et de phosphore.

Il est à noter enfin que la composition des aiguilles en éléments traces métalliques contaminants est restée globalement inchangée, à l'exception d'une augmentation des teneurs en plomb et arsenic par comparaison au témoin. Toutefois, compte tenu d'absence d'effet dans les sols, et de la faible augmentation en absolu des teneurs dans les aiguilles, il peut être conclu que la contamination de l'écosystème par une seule dose modérée de cendres de bois (5 tonnes/ha) dans la vie du peuplement est très faible, et potentiellement transitoire. Limiter les doses apportées en milieu forestier au regard de leur composition permet de restreindre la contamination potentielle, ce qui est cohérent avec la littérature scientifique (Augusto et collaborateurs, 2008).

Au final, l'expérimentation du Teich est riche d'enseignements concernant la pratique d'apports de cendres de bois en contexte forestier landais. **Cette étude met en évidence un impact significatif des cendres sur le fonctionnement de l'écosystème forestier des Landes de Gascogne.** L'épandage de ce produit issu des filières bois-énergie restitue à l'écosystème des nutriments et des oligo-éléments qui favorisent la nutrition et le développement des végétaux (arbre comme sous-bois). Toutefois, un effet délétère et inattendu au regard de la littérature scientifique a été une diminution des stocks du sol en matières organiques. Ces résultats sont originaux comparés à ceux observés sur l'impact de l'apport de cendres en forêt dans les pays scandinaves qui ne mettent pas en évidence un tel déstockage de matières organiques dans le sol, très probablement en lien avec les températures plus basses de ces pays. Cette diminution est problématique pour la fonction de puits de carbone des forêts puisque les matières organiques comptent pour le stockage de carbone dans le sol. Cette diminution est également préoccupante pour la fertilité à long terme de certains sols qui, comme pour les sols landais, repose essentiellement sur la biogéochimie des matières organiques. L'effet positif observé des cendres sur la croissance des pins maritimes du Teich pourrait ainsi être la conséquence du déstockage du sol en matières organiques, déstockage à quantifier mais qui ne saurait être soutenable sur le long terme.

L'expérimentation de Pontenx-les-forges qui inclut aussi une modalité d'apport de cendres pourrait fournir des réponses aux questionnements soulevés par l'expérimentation du Teich et valider des tendances. En effet, seule la couche supérieure du sol (0-15 cm) a été étudiée durant la première expérimentation, et une étude sur tout le profil du sol à Pontenx-les-forges permettra de mieux quantifier les effets des cendres sur les stocks de matières organiques et de nutriments. De même, au Teich, nous nous sommes retrouvés dans un cas peu commun en lande humide (Trichet et collaborateurs, 2009) où la fertilisation en phosphore ne montre pas d'effet positif sur la croissance des arbres, nous privant ainsi de la prise en compte d'un de ces facteurs limitants principaux dans les Landes de Gascogne. C'est pourquoi il est nécessaire de consolider les résultats obtenus par d'autres expérimentations dans des sols oligotrophes (pauvres en éléments nutritifs) où la fertilisation phosphatée aurait un impact positif sur la croissance. Enfin, comme pour l'étude des récoltes de rémanents, l'expérimentation de Pontenx-les-forges initiée en 2020 devrait permettre d'étayer des conclusions généralisables à l'ensemble du massif, dans le cadre des activités du GIS GPMF.

Arrachage de souche.

Parcelle expérimentale avec apport de cendres et un sous bois d'ajonc plus développé.

Placette expérimentale Témoin (Expérimentation du Teich).

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce cahier souhaitent remercier les propriétaires et gestionnaires des parcelles forestières mises à disposition pour ces expérimentations (Société Forestière de la Caisse des dépôts et Consignations), les ETF qui sont intervenues pour mettre en place les modalités expérimentales (dont Smurfit Westrock Comptoir du Pin) ainsi que tous les collègues du FCBA et de INRAE, en particulier de l'UEFP pour leur participation à l'installation et aux nombreuses campagnes de mesures et d'échantillonnage.

CONTACTS CONCERNANT LES EXPÉRIMENTATIONS

L. Augusto, P. Trichet (INRAE) ; M. Mercadal (FCBA)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Augusto L., Crampon N., Saur E., Bakker M.R., Pellerin S., de Lavaissiere C., Trichet P. (2005) High rates of nitrogen fixation of Ulex species in the understory of maritime pine stands and the potential effect of phosphorus fertilization. Canadian Journal of Forest Research, 35: 1183-1192.

Augusto L., Bakker M.R., Meredieu C. (2008) Wood ash applications to temperate forest ecosystems — potential benefits and drawbacks. Plant and Soil, 306: 181-198.

Augusto, L., Achat, D. L., Bakker, M. R., Bernier, F., Bert, D., Danjon, F., Khilfa R. Meredieu C., Trichet, P. (2015). Biomass and nutrients in tree root systems–sustainable harvesting of an intensively managed Pinus pinaster (Ait.) planted forest. Gcb Bioenergy, 7(2): 231-243.

Augusto L., Beaumont F., Nguyen C., Fraysse J.Y., Trichet P., Meredieu C., Vidal D., Sappin-Didier V. (2022) Response of soil and vegetation in a warm-temperate Pine forest to intensive biomass harvests, phosphorus fertilisation, and wood ash application. Science of the Total Environment, 850, 157907: 1-20.

ADEME (2018) : documents disponibles à https://librairie.ademe.fr/agriculture-alimentation-foret-bioeconomie/892-gerboise-gestion-raisonnee-de-la-recolte-de-bois-energie.html

Deleuze, C., Micheneau, C., Richter, C., Boulanger, V., Gardette, Y.M., Brethes, A., Gibaud, G., Augusto, L., Dupont, C., Gautry, J.Y., Fraysse, J.Y., Rantien, C. (2012) Le retour des cendres de bois en forêt : opportunités et limites. Rendez-Vous Techniques de l'Office National des Forêts, 35: 16-28.

Houot, S., Pons, M.N., Pradel, M., Caillaud, M.A., Savini, I., Tibi, A. (2014) Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective INRA-CNRS-IRSTEA, (France).

Trichet P., Bakker M.R., Augusto L., Alazard P., Merzeau D., Saur E. (2009) Fifty years of fertilization experiments on Pinus pinaster in Southwest France: the importance of phosphorus as a fertilizer. Forest Science, 55: 390-402.

Vidal D.F., Trichet P., Puzos L., Bakker M.R., Delerue F., Augusto L. (2019) Intercropping N-fixing shrubs in pine plantation forestry as an ecologically sustainable management option. Forest Ecology and Management, 437: 175-187.

Directeur de la publication
GPMF

Comité éditorial
Annie Raffin, INRAE - Présidente du GPMF
et le Comité Exécutif du GPMF

Contacts GPMF
Groupe Pin Maritime du Futur
Domaine de l'Hermitage
69 route d'Arcachon – Pierroton - 33612 Cestas Cedex
contact@gisgpmf.fr

CAHIERS DÉJÀ PARUS

N°1 - Sylviculture et stabilité, novembre 2011
N°2 - Situation sanitaire et Diversification, mai 2012
N°3 - Les techniques d'installation, mai 2013
N°4 - Matériel végétal de reboisement, juin 2014
N°5 - 20 ans de progrès et d'innovation, novembre 2016
N°6 – Gestion du sous-bois et de la fertilisation, mai 2019

POUR EN SAVOIR PLUS

Les publications du GIS GPMF sont disponibles en ligne
https://www.gisgpmf.fr/
et sur les sites des partenaires.

Tapez « Publications du GPMF »
dans un moteur de recherche.

Avec le soutien de

RÉGION Nouvelle-Aquitaine

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE
Liberté
Égalité
Fraternité