



HAL
open science

PSDR4 DEFIFORBOIS - Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire

Nathalie Korboulewsky, Isabelle Bilger, Jean-Charles Bastien, Emmanuel Cacot, Alain Colinot, Jean-François Dhôte, Yann Dumas, Marion Gosselin,
Jean-Pierre Renaud, Jérôme Rosa

► To cite this version:

Nathalie Korboulewsky, Isabelle Bilger, Jean-Charles Bastien, Emmanuel Cacot, Alain Colinot, et al.. PSDR4 DEFIFORBOIS - Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire. Innovations Agronomiques, 2022, 86, pp.345-362. 10.17180/ciag-2022-vol86-art29 . hal-03896678

HAL Id: hal-03896678

<https://hal.inrae.fr/hal-03896678>

Submitted on 13 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

PSDR4 DEFIFORBOIS - Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire

Korboulewsky N.¹, Bilger I.¹, Bastien J.-C.², Cacot E.³, Colinot A.⁴, Dhote J.-F.², Dumas Y.¹, Gosselin M.¹, Renaud J.-P.⁵, Rosa J.⁴

¹ INRAE, UR EFNO, Domaine des Barres, F-45290 Nogent-sur-Vernisson

² INRAE, UMR BIOFORA, 2163 av de la Pomme de Pin, Ardon, CS 40001, F-45075 Orléans Cedex 2

³ FCBA, Délégation territoriale Centre Ouest Les Vaseix, F-87430 Verneuil-sur-Vienne

⁴ CNPF- CRPF Ile-de-France – Centre-Val de Loire, 43 rue du Boeuf Saint Patern, F-45000 Orléans

⁵ ONF, RDI – Pôle de Nancy, 8 allée de Longchamp - F-54600 Villers lès Nancy

Correspondance : nathalie.korboulewsky@inrae.fr

Résumé

Gérer durablement les forêts et renforcer la compétitivité de la filière forêt-bois sont des enjeux forts pour le développement économique des territoires ruraux de la région Centre-Val de Loire. Les acteurs amont de la filière doivent faire face à deux défis : mobiliser davantage de bois pour répondre à la demande croissante en matériaux biosourcés et en énergie renouvelable, sans altérer la fertilité des sols majoritairement pauvres, et trouver des solutions pour favoriser l'adaptation des peuplements au changement climatique. Des chercheurs et acteurs d'INRAE, de l'ONF, du FCBA, de Fibois Centre-Val de Loire, du CNPF et d'Unisylva se sont associés pour mener, dans le cadre du projet PSDR4 DEFIFORBOIS : i) une analyse prospective des moyens nécessaires aux entreprises régionales d'exploitation forestière pour assurer la mobilisation accrue de bois, ii) un diagnostic technique et environnemental des pratiques locales de récolte du bois énergie par arbre entier et de leurs impacts sur les sols et la biodiversité pour proposer des recommandations adaptées au contexte régional, iii) une étude de la vulnérabilité des essences en place et l'identification d'essences nouvelles potentiellement mieux adaptées à tester en plantations comparatives iv) le test d'une pédagogie permettant d'aplanir les inégalités d'acceptabilité sociale vis-à-vis des politiques et pratiques de transformation volontaire des forêts face au changement climatique.

Mots-clés : Bois énergie, Récolte arbre entier, Fertilité des sols, Changement Climatique, Adaptation, Essences

Abstract : Development and sustainability of the forestry and wood industry in the Centre-Val de Loire region

Sustainable forest management and to strengthen the competitiveness of the forest-wood sector are major challenges for the economic development of rural areas in the Center-Val de Loire region. Upstream actors in the wood sector must face two challenges: harvesting more wood to meet the increasing demand for wood product and renewable energy, without altering the soil fertility predominantly poor, and finding solutions to promote forest adaptation to climate change. Researchers and actors from INRAE, ONF, FCBA, Fibois, CNPF and Unisylva have joined their forces in the PSDR4 DEFIFORBOIS project to carry out: i) a prospective analysis of the resources required by regional logging companies to ensure the increase of wood harvest, ii) a technical and environmental diagnosis of local whole-tree harvest practices and their impacts on soils and biodiversity to propose recommendations for sustainable fuelwood harvest adapted to the regional context, iii) a study of the vulnerability of existing species and the identification of new, potentially better adapted species to be tested in comparative plantations, iv) the testing of a

pedagogy allowing to smooth out the inequalities of social acceptability with regard to the policies and practices of voluntary transformation of forests in the face of climate change.

Keywords: Wood energy, Whole-tree harvesting, Soil fertility, Climate change, Adaptation, Tree species.

Introduction

Avec un objectif de neutralité carbone en 2050, la France s'est engagée dans une stratégie bas carbone et de développement des énergies renouvelables où la forêt et la ressource bois prennent une place majeure. La filière forêt bois doit cependant faire face à deux défis : d'une part répondre à l'augmentation de la demande en bois, avec une diversification des usages et d'autre part les changements climatiques menaçant sérieusement les forêts à l'horizon 2050 (Roux et al., 2020). En dépit des incertitudes des modèles climatiques et sociétaux, ce contexte impose des mutations profondes aussi bien dans les pratiques forestières que dans l'environnement socio-économique (Thiffault et al., 2016 ; Hansen et al., 2017 ; IIASA, 2017).

Majoritairement privées, les forêts de la région Centre-Val de Loire recèlent une ressource bois importante mais sous-exploitée puisque les prélèvements de bois représentent moins de la moitié de l'accroissement annuel. Une intensification de la gestion forestière permettrait, d'après l'étude IGN sur la disponibilité en bois, des gains substantiels de plus de 2 millions de m³/an supplémentaires à l'horizon 2036 selon un scénario de gestion dynamique (Simon et Colin, 2018). Mais les transformations à opérer pour atteindre cet objectif suscitent des interrogations, notamment sur les besoins en investissement pour les entreprises de mobilisation du bois, l'impact des récoltes supplémentaires et des nouvelles pratiques d'exploitation sur le sol et la biodiversité ainsi que sur les modalités d'adaptation ou de transformation des peuplements face aux conditions climatiques futures (Legay et al., 2019). Le projet PSDR4 DEFIFORBOIS « Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire », porté par INRAE entre 2016 et 2020, en partenariat avec des acteurs régionaux de la filière, apporte des éléments de réponses.

Accroître la récolte de bois de 31% entre 2016 et 2026, comme le prévoit le Plan Régional de la Forêt et du Bois, passe en partie par une augmentation du taux de mécanisation des récoltes. Dans cette optique, le FCBA a mené une étude prospective dans le cadre du projet DEFIFORBOIS pour connaître la part de la ressource mécanisable à horizon 2026 et évaluer les moyens nécessaires pour y parvenir.

Depuis dix ans, l'utilisation de plaquettes forestières pour alimenter des chaufferies biomasses s'est fortement développée en région Centre-Val de Loire. Ces plaquettes, issues de peuplements majoritairement feuillus, souvent pauvres ou dépérissants, sont généralement produites par broyage d'arbres entiers. Cette modalité de récolte mécanisée exporte beaucoup plus d'éléments minéraux que les récoltes conventionnelles et réduit le stock de bois mort après coupe, au risque de diminuer la fertilité des sols (Achat et al., 2015a ; 2015b ; 2018, Ouimet et al., 2021) et de supprimer des habitats favorables à la biodiversité. Pour limiter ces risques, le projet DEFIFORBOIS a cherché à déterminer où et comment récolter le bois énergie en région Centre-Val de Loire, tout en préservant la fertilité des sols et la biodiversité.

Dans un premier temps, INRAE a réalisé une analyse de la sensibilité des sols de la région à l'exportation de biomasse basée sur les données de la littérature et des relevés de l'Inventaire Forestier (IGN). Parallèlement, une enquête conduite par le FCBA et Fibois CVL a permis d'identifier les modalités pratiques de récoltes du bois énergie les plus répandues dans la région. A la suite, une étude *in situ*, pilotée par INRAE, a porté sur neuf chantiers de récolte de bois énergie mis en œuvre par ONF Energie et Unisylva et répartis dans 4 secteurs (Orléanais, Sologne, Perche, Touraine, Figure 1). Ces chantiers

ont fait l'objet d'une analyse approfondie basée sur des relevés de terrain avant et après exploitation (sol, peuplement, flore, bois mort), des calculs de biomasse à partir de modèles (Deleuze et al., 2014) et des analyses physico-chimiques en laboratoire.

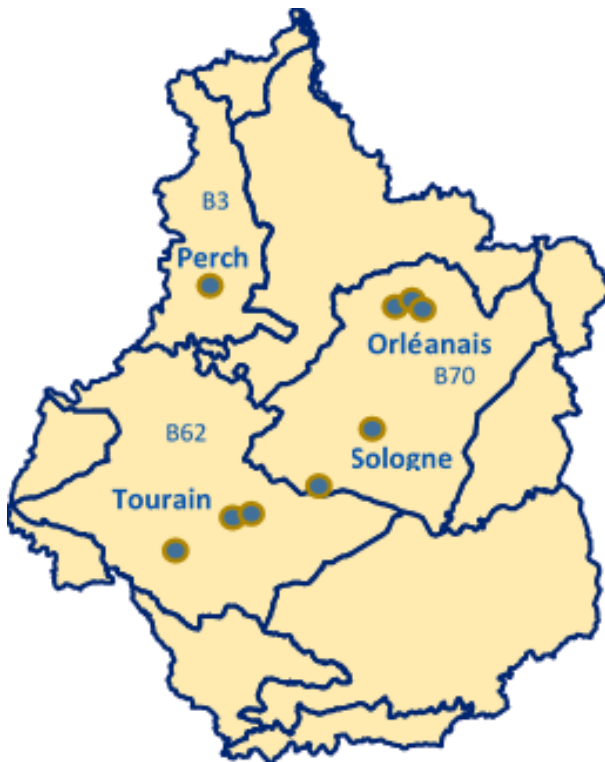


Figure 1: Situation des neuf chantiers bois énergie étudiés, répartis dans trois sylvoécocorégions de la région Centre-Val de Loire

La durabilité des pratiques impose de se projeter dans le futur et de réfléchir aux essences et pratiques de gestion à mettre en œuvre pour favoriser la résilience des forêts face au changement climatique. Une analyse menée par l'ONF, l'INRAE et le CRPF, en parallèle de réflexions engagées à l'échelle nationale dans le projet ESPERENSE (Kebli et al., 2019), a permis de définir les zones à enjeux écologiques et économiques par sylvoécocorégion (SER). Le niveau de vulnérabilité aux changements climatiques des essences régionales majeures a été cartographié à l'aide du modèle IKSmaps pour repérer les zones et espèces à fort risque de dépérissement. Une analyse des données de survie et de dendrométrie obtenues à partir de dispositifs de tests anciens a été réalisée et complétée par une revue bibliographique afin d'identifier des essences et provenances nouvelles, potentiellement adaptées au futur climat. En parallèle, INRAE a conçu une valise pédagogique pour sensibiliser divers publics aux mutations nécessaires et impulser une nouvelle dynamique de gestion forestière.

1. Principaux résultats obtenus

1.1 Mobilisation accrue de bois énergie, pratiques de récolte et impacts environnementaux

1.1.1 Une mobilisation supplémentaire conditionnée à un investissement en machines et main d'œuvre

L'état des lieux du parc de machines d'exploitation forestière en région Centre Val de Loire révèle que le développement de l'activité de récolte du bois énergie (abatteuses, broyeurs) est conséquent compte tenu du parc spécifique observé sur la région Centre-Val de Loire (Cacot et al., 2016).

Par ailleurs l'analyse prospective sur l'évolution de l'exploitation forestière en région CVDL (Boldrini et Cacot, 2016) indique une ressource bois disponible et mécanisable à l'horizon 2026 permettant une

augmentation des récoltes de bois de 33% selon un scénario tendanciel tenant compte de l'évolution de la ressource (+ 0,5 M. de m³ par an) et de 61% selon un scénario dynamique visant l'objectif du Plan National Forêt Bois (PNFB, +1,1 M. de m³ par an). Cependant dans un contexte général, on s'attend à une diminution de 42% de la capacité de bucheronnage manuel par rapport à 2016 se traduisant par des besoins supplémentaires de 71 à 147 machines d'abattage et de débardage et de 78 à 157 postes d'emploi en fonction des scénarios (Cacot et al., 2016). Ces résultats assortis de recommandations pour accompagner l'évolution des entreprises en matière de formation des personnels et d'équipement ont été présentés à la Commission Régionale de la Forêt et du Bois, puis repris par les instances régionales pour définir des objectifs opérationnels inclus dans le Plan Régional de la Forêt et du Bois.

1.1.2 Les récoltes de bois énergie sont réalisées principalement par arbres entiers dans des peuplements feuillus

Les résultats de l'enquête sur les pratiques de récoltes pour la production de plaquettes forestières en région CVDL au cours de l'année 2015 révèlent que l'essentiel des récoltes portent sur des coupes de petits bois feuillus (taillis ou sous étage), exploités en arbres entiers et le plus souvent en feuille (avril à septembre) de façon à intervenir en dehors de la période de chasse et d'engorgement des sols. Si ces coupes sont bien guidées par un objectif sylvicole d'amélioration ou de régénération de peuplements, leur mise en œuvre est fortement contrainte par des facteurs liés à la météo qui impactent les conditions de portance des sols (sols engorgés d'eau), par le niveau de la demande en bois énergie des chaufferies industrielles, par l'état des stocks, par les exigences de qualité des plaquettes, voire par la gestion cynégétique dans certains massifs privés de la région.

1.1.3 Des sols forestiers régionaux majoritairement sensibles

L'analyse de la sensibilité des sols forestiers de la région à la perte de fertilité chimique, réalisée à partir des données relevées par l'IFN sur 4393 points forêts (Korboulewsky et Bilger, 2018), atteste de la présence de sols majoritairement (i) acides, avec la moitié des relevés ayant un de pH inférieur à 5,2, (ii) sableux, avec plus de 40% des sols de texture de surface (0-10 cm) sableux ou sablo-limoneux, et (iii) une majorité hydromorphes (pseudogleys à engorgement temporaire).

D'après cette synthèse, une majorité des peuplements forestiers de la région sont sensibles aux dommages physiques occasionnées par une circulation mal raisonnée d'engins lourds (56% des points) mais également à la perte de fertilité liée à des récoltes intensives ou trop fréquentes (55% de l'ensemble des points) avec cependant des disparités entre les sylvoécotons. Dans les SER B70 (Sologne-Orléanais) et B61 (Beaugeois-Maine) respectivement 66% et 69% des points sont fortement sensibles à la perte de fertilité alors que ce n'est le cas que pour 24% des points de la SER B62 (Champagne Gâtine tourangelle) et 12% des points de la SER 91 (Boichaut et Champagne berrichonne). Ce travail a donné lieu à une première cartographie régionale de la sensibilité des sols à la récolte accrue de biomasse ayant servi de support pour des échanges avec les acteurs du projet.

Cette sensibilité des sols a été confirmée par les résultats de l'analyse chimique comparés aux seuils de sensibilité du projet « Insensé » (Augusto et al., 2018 ; Durante et al., 2019), sur une vingtaine d'échantillons prélevés sur les chantiers étudiés et une cinquantaine d'autres données issues du Référentiel Régional Pédologique du Loiret (RRP45 ; Richer de Forges, 2008) et du catalogue des types de stations forestières de l'Orléanais (Brêthes, 1993). Elle est due à de faibles concentrations en N, K, Mg et P, sachant que plus de 60% des sites forestiers de ces jeux de données présentent une sensibilité forte à au moins trois de ces éléments.

En outre, il ressort de cette étude que la texture sur la couche 0-10 cm de profondeur pourrait être, à elle seule, un bon prédicteur du niveau de sensibilité à la perte de fertilité chimique dans le contexte de la région. Par suite, 3 classes de sols ont pu être établies (Figure 2) :

- Les sols à dominante sableuse (sols sableux S et sablo-limoneux SL) : Ils sont très sensibles car en une seule coupe par arbres entiers, l'exportation de nutriments peut facilement être supérieure

au stock de nutriments du sol (dans les 10 premiers cm du sol). La récolte par arbres entiers y est fortement déconseillée. De plus, la reconstitution du stock de nutriments sur ces sols est longue. L'exportation de biomasse aurait un effet néfaste sur le long terme.

- Les sols à dominante argileuse (sols argileux A, argilo-limoneux AL, argile lourde ALO): ce sont les moins sensibles car les stocks de nutriments dans le sol sont plus importants que dans les autres types de sols.
- Les autres sols, de texture à dominante limoneuse ou équilibrée (AS, SA, LSA, LAS, LA, LS, LSM, LM, LLS, LL), peuvent être de très sensibles à moyennement sensibles, et donc seules des analyses chimiques permettraient aux forestiers une prise de décision raisonnée et fiable. Les sols à texture LLS et LS ont été classés dans cette classe par manque de données, mais ils pourraient basculer dans celle des sols fortement sensibles, en raison de leur teneur en sables. Parallèlement, les sols limoneux sont les plus sensibles aux dommages physiques : tassement et orniérage.

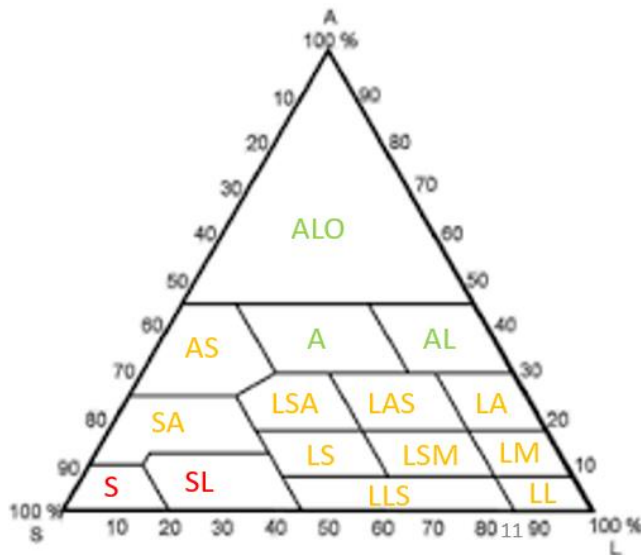


Figure 2: Représentation du triangle des textures en 15 classes valable pour la région Centre VL et des niveaux de sensibilité associée : rouge pour les sols fortement sensibles, vert pour les sols les moins sensibles, et orange pour les sols dont la sensibilité est intermédiaire ou incertaine.

Ce travail sur la sensibilité des sols a permis la réalisation de cartes de sensibilité à l'échelle régionale (Figure 3), et départementale (Figures 4 et 5).

La première est basée sur les descriptions de sol de l'inventaire forestier national, alors que la seconde, basée sur la carte des sols du Loiret, permet une cartographie plus fine (des cartes représentant les pourcentages de sols moyennement et fortement sensibles ont également été réalisées). Ainsi, alors qu'au sud de la Loire, en Sologne, les sols sont à plus de 80% fortement sensibles (20% moyennement sensibles et aucun faiblement sensible), au nord en forêt d'Orléans une part non négligeable (plus de 20%) correspond à des sols peu sensibles.

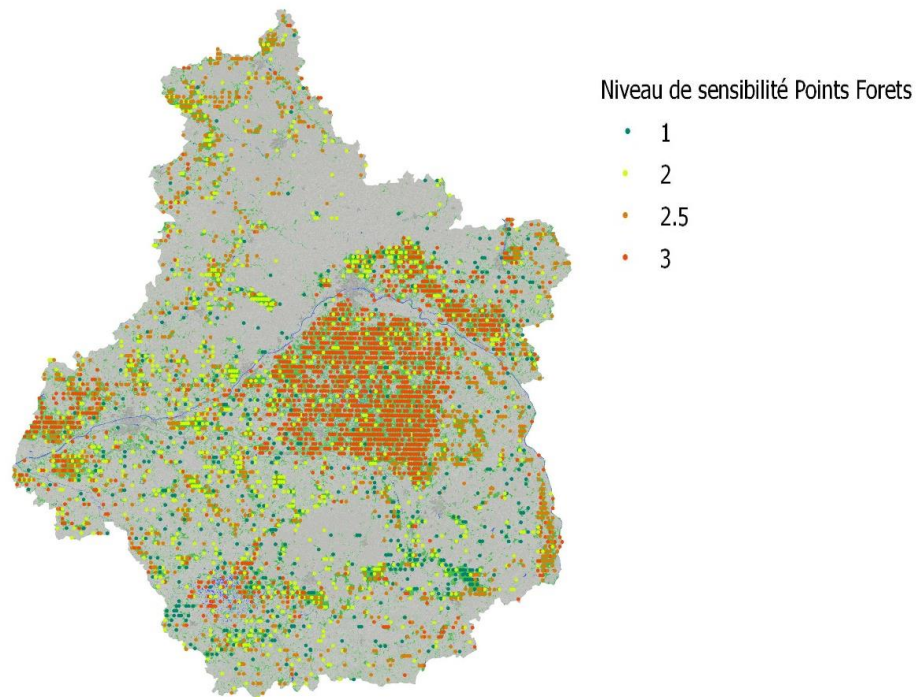


Figure 3: Niveaux de sensibilité des sols à l'exportation de biomasse d'après la texture du sol sur 0-10 cm de profondeur relevée par l'inventaire forestier (IGN) sur les points forêts de la région Centre-Val de Loire allant du niveau 1 (vert) au niveau 3 (rouge) pour les sols les moins sensibles au plus sensibles.

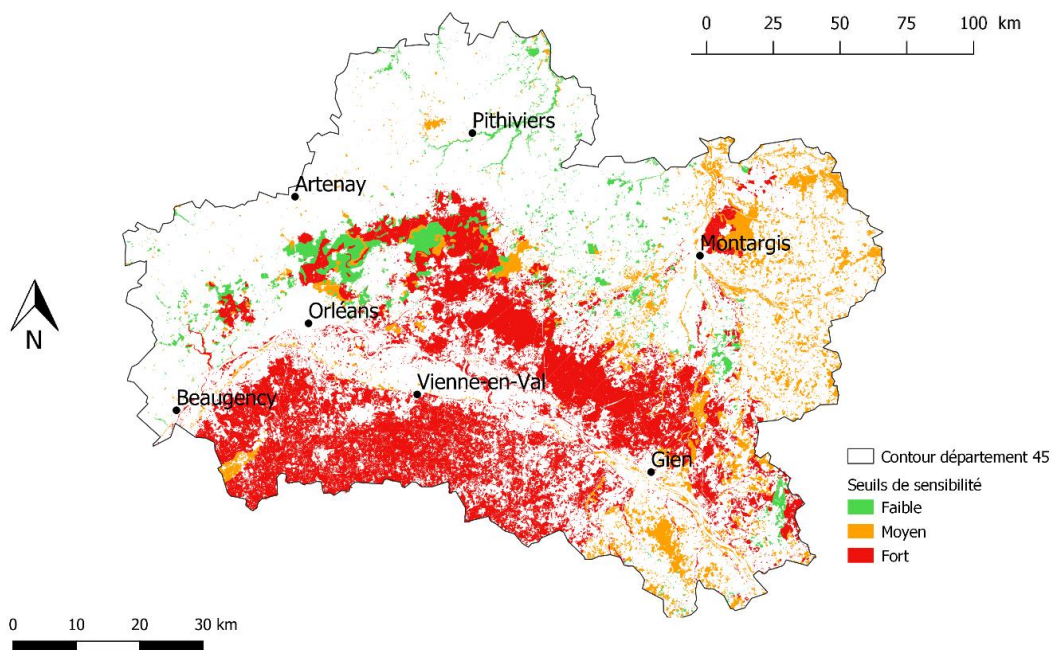


Figure 4: Carte de la sensibilité des sols forestiers du Loiret (45), issue de la BD Forêt V2 (données IGN) (Richer de Forges et. Lehmann, 2008). Les massifs forestiers ayant une majorité de sols dans la classe de sensibilité forte apparaissent en rouge, dans la classe de sensibilité moyenne en orange, et dans la classe de sensibilité faible en vert.

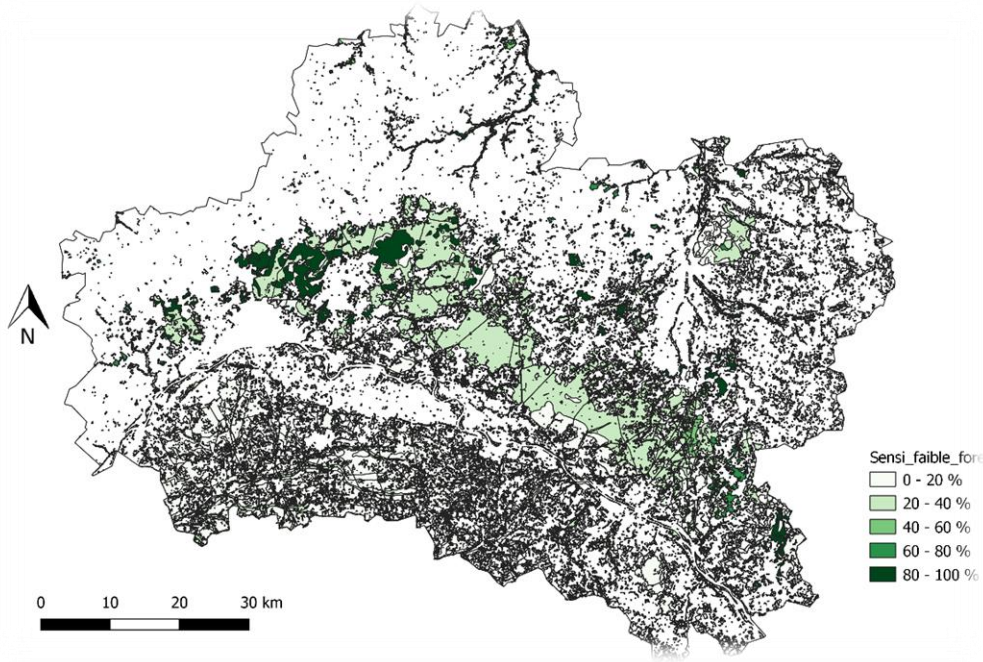


Figure 5 : Cartes du pourcentage en surface de chaque Unités Cartographiques de Sol du Loiret (UCS 45) des zones à sensibilité faible d'après la texture et la richesse minérale de la strate superficielle (0-10 cm) des Unités Typologiques de Sol (UTS), issue de la BD Forêt V2 (données IGN) (Richer de Forges et Lehmann, 2008).

1.1.4 Forte hétérogénéité des chantiers du point de vue des diamètres coupés et volumes prélevés

Les chantiers choisis sont représentatifs des peuplements et des sols dans lesquels les coupes par arbres entiers sont réalisées en région CVDL. Sur les neuf chantiers étudiés, deux correspondent à des coupes rases avant plantation et sept à des coupes partielles d'amélioration, sanitaire ou de prélèvement du sous-étage avant régénération naturelle (relevé de couvert) (Tableau 1). Les essences coupées varient selon les régions et les traitements sylvicoles mais la plupart des chantiers concerne des peuplements mélangés composés principalement de charme, châtaignier, bouleau, tremble, chêne. Trois chantiers se situent sur sols fortement sensibles, 5 sur sols moyennement sensibles et un sur un sol faiblement sensible.

Tableau 1: Caractéristiques dendrométriques des chantiers étudiés

| Chantier | Type de peuplement | Type de coupe | Essences majeures coupées * | Surface terrière sur pied avant-coupe | Surface terrière coupées | Intensité de coupe (%G coupée) | Diamètre quadratique arbres coupés (cm) |
|----------|--|---|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---|
| B7 | Mélange futaie taillis pauvre en réserve | Amélioration : coupe de taillis, balivage | Châtaignier, Chêne, Bouleau | 23 | 12 | 50% | 5 |
| B9 | Mélange futaie taillis pauvre en réserve | Amélioration : coupe de taillis, balivage | Tremble, Chêne | 33 | 25 | 76% | 9 |
| Ch | Futaie issue de conversion | Relevé de couvert avant régénération | Charme, Tremble, Chêne | 36 | 23 | 65% | 13 |
| Co | Futaie issue de conversion | Relevé de couvert avant régénération | Charme | 46 | 11 | 23% | 13 |
| LaV | Mélange futaie taillis | Relevé de couvert avant régénération | Châtaignier, Robinier | 33 | 19 | 57% | 7 |
| Pru | Taillis | Coupe de taillis | Châtaignier | 52 | 43 | 82% | 12 |
| Se | Mélange futaie taillis | Coupe rase | Tremble, Aubépine, Merisier | 29 | 29 | 100% | 7 |
| StV | Mélange futaie taillis | Coupe de taillis | Châtaignier, Bouleau | 32 | 29 | 88% | 8 |
| Su | Futaie issue de conversion | Relevé de couvert avant régénération | Charme | 44 | 22 | 50% | 12 |

(*) Espèces représentant chacune plus de 10% de la surface terrière coupée

La comparaison des relevés dendrométriques avant et après coupe et l'estimation de la biomasse coupée permettent de mettre en évidence des différences nettes dans l'intensité de prélèvement et le diamètre des arbres coupés même pour des types de coupe proches (Tableau 1). Les surfaces terrières avant coupe vont de 23 à 52 m²/ha, et sont de 0 à 35 m²/ha après coupe, avec une gamme d'intensité de coupe de 23 à 100%. La biomasse totale coupée calculée varie de 38 t/ha pour une coupe de relevé de couvert à 186 t/ha pour une coupe rase d'un taillis dense. Si le diamètre moyen des tiges coupées varie entre chantiers de 5 à 13 cm, c'est surtout la distribution des différentes classes de diamètre dans la biomasse totale coupée qui est très différente. Ainsi la contribution des tiges de petits diamètres (<7 cm) varie de 2 à 31%. Au total, les menus bois, faisant moins de 7 cm de diamètre, provenant de ces petites tiges mais également des houppiers des arbres plus gros, représentent en moyenne 1/3 de la biomasse totale coupée (Figure 6). Or, ce sont les menus bois qui sont les parties les plus riches en éléments minéraux des arbres (André, 2010 ; 2003). Ces différences de volumes et de taille des bois prélevés ont une incidence sur le calcul des minéralomasses exportées et sont à prendre en compte dans le diagnostic du risque de perte de fertilité d'une coupe par arbre entier.

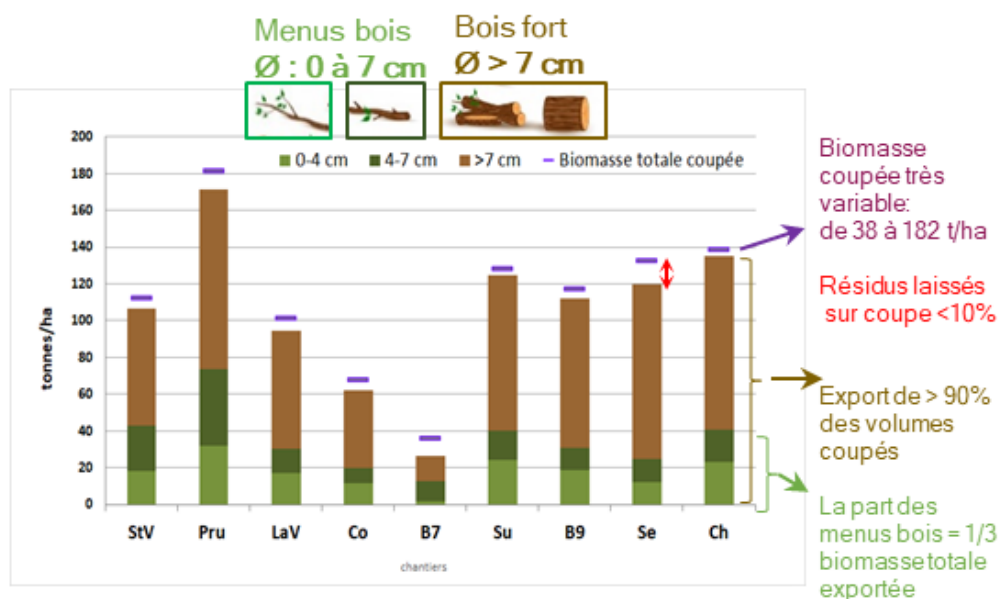


Figure 6: Biomasse coupée et exportée selon le diamètre du compartiment de bois.

1.1.5 Peu de résidus de coupe laissés au sol

Nos mesures montrent que plus de 90% de la biomasse totale coupée est exportée de la parcelle (Figure 6). La quantité des bois laissés au sol après les opérations de coupe et débardage - appelés résidus de coupe ou rémanents – est calculée par la différence entre la quantité de bois au sol avant et après les opérations sylvicoles. Cette quantité de bois au sol, en volume, a été estimée en appliquant la méthode dite Line Intercept Sampling (Marshall et al., 2000), puis traduite en biomasse (grâce à la masse volumique des bois mesurés sur des échantillons de bois prélevés sur le terrain). Ce travail a fait l'objet d'un développement méthodologique qui a abouti à la publication d'un protocole de terrain de référence (Korboulewsky et al., 2021).

En affinant aux différents compartiments de bois, on observe que plus le diamètre des bois est gros, moins il en est laissé au sol. Seulement 7% en moyenne des menus bois coupés sont laissés au sol (Ø < 7 cm ; 11% pour le compartiment 0-4 cm et 3% pour le compartiment 4-7%), et 2% pour le bois fort (Ø > 7 cm) (Bessaad et al., 2021a). Or, les recommandations nationales préconisent de laisser au minimum 10% des menus bois et 30% dans le cas des sols moyennement sensibles (Ademe, 2020). Par ailleurs, du point de vue de la biodiversité floristique (Miton, 2019), nos relevés avant et après coupe montrent

que la coupe par arbre entier a, à court terme, des effets forts sur la richesse spécifique : elle favorise les espèces héliophiles et de milieux humides et les espèces de bryophytes sur bois mort au sol de moins de 4 cm de diamètre (plus de 10% en plus en nombre total d'espèces après coupe, pour ces catégories) et défavorise les espèces bryophytes forestières, de milieux humides et saprolognicoles (perte de plus de 10% en nombre d'espèces, après coupe). De plus, pour certains chantiers les mesures révèlent qu'une partie des pièces de bois mort au sol préexistantes a été prélevée dans les moyens et gros diamètres (catégorie 4-7 cm et >7 de la catégorie 4-7 cm et >7 cm). Dans les consignes générales PEFC, ces pièces de bois ainsi que quelques billons issus de la coupe devraient être laissés au sol comme refuges pour la biodiversité.

En outre, la durée de ressuyage des tas de bois abattus avant débardage, qui est en moyenne d'un mois et demi selon notre étude, n'est pas suffisante pour que les feuilles tombent naturellement et la manutention des bois pendant le débardage ne laisse au sol qu'une très faible proportion de résidus de coupe et de feuilles. Les recommandations (Ademe, 2020) sont de privilégier les coupes hors feuilles (en hiver), et sinon de laisser plusieurs mois ressuyer dans la parcelle pour qu'un maximum de feuilles tombent au sol car les retours via la lixiviation par la pluie sont largement insuffisants (Bessaad et al., 2020). Pour le chêne, la durée optimale serait de 6 mois (Bessaad, 2020), En se décomposant, feuilles et bois, permettent un retour au sol de nutriments et de matières organiques primordiaux au maintien de la fertilité des sols.

1.1.6 Un export des nutriments doublé en cas de récolte par arbre entier

L'analyse des concentrations en N, K, Mg, Ca et P de plus de 600 échantillons de bois et feuilles, prélevés sur les chantiers confirme que les menus bois sont 2 à 3 fois plus riches en éléments nutritifs que le bois fort et les feuilles jusqu'à 7 fois plus (Figure 7). Sur les chantiers étudiés, le prélèvement des menus bois entraîne un export de près de deux fois plus de nutriments par rapport à une exploitation conventionnelle se limitant au bois fort.

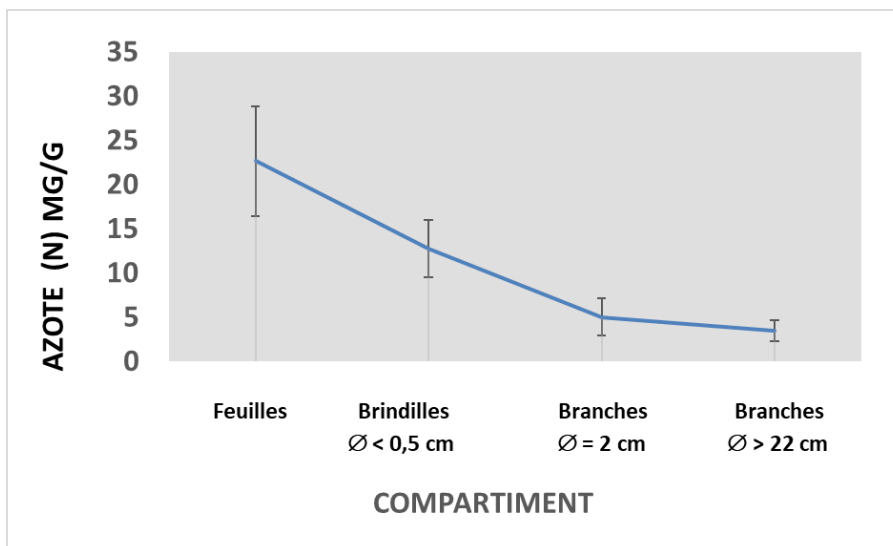


Figure 7: Concentration moyenne en azote (mg/g) sur l'ensemble des échantillons de feuilles, brindilles, branches et rondelles de bois collectés au moment de la coupe sur les neuf chantiers.

1.1.7 Un diagnostic du risque tenant compte de plusieurs facteurs

La valeur du stock de chaque élément chimique présent dans la couche superficielle du sol (0-10 cm) a été calculé pour chaque chantier étudié, et fournit une indication sur le niveau d'export en élément à ne pas dépasser en une opération de coupe pour éviter d'appauvrir le sol, le seuil limite habituellement considéré étant fixé à 100% de la valeur du stock. Pour cinq des neuf chantiers étudiés le seuil de 100%

du stock est dépassé pour le potassium et/ou le phosphore (Figure 8) et l'export peut dans certains cas atteindre 300%. Cependant l'étude nous apprend que le dépassement du seuil n'est pas uniquement lié à la sensibilité du sol. Par exemple, pour deux chantiers, l'export est inférieur aux stocks pour tous les éléments alors que le niveau de sensibilité était diagnostiqué comme fort ou indéterminé selon les éléments. Ceci s'explique par un volume exporté par la coupe assez faible (moins de 100 m³/ha, 70 t/ha), associé à peu de menus bois coupés (20 à 25 t/ha) ou beaucoup laissés au sol (plus de 30%). A l'inverse pour le chantier situé sur sol faiblement sensible, l'export dépasse malgré tout 100% du stock pour le P car le volume exporté est élevé (240 m³/ha, 135 t/ha), avec beaucoup de menu bois coupé (44 t/ha) et peu laissé au sol (7%). Si on considère l'export par éléments, les seuils de 100% du stock du sol les plus fréquemment dépassés concernent le K et P. Ces résultats montrent **l'importance de la prise en compte des biomasses exportées par compartiment, en plus de la sensibilité du sol**, pour l'évaluation du risque d'une coupe donnée vis-à-vis de la fertilité du sol, avec une vigilance particulière à avoir vis-à-vis du potassium et du phosphore afin d'éviter les conséquences néfastes sur le fonctionnement de l'écosystème et la productivité de la révolution suivante (Bond, 2010 ; Achat et al., 2018 ; Ouimet et al., 2021).

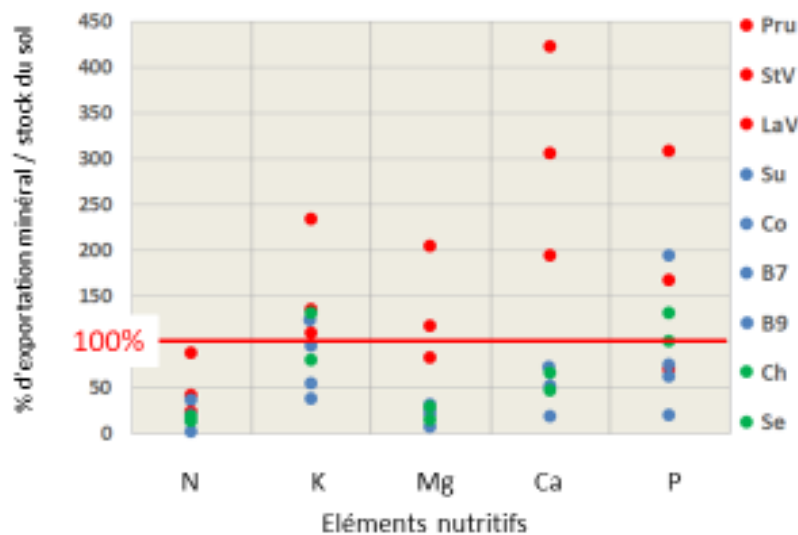


Figure 8: Taux d'export d'éléments nutritifs pour les chantiers suivis par rapport au stock dans l'horizon superficiel de sol (0-10 cm) sur les chantiers suivis sur sols fortement sensibles (rouge), peu sensibles (vert), moyennement sensibles ou incertains (bleu).

En se basant sur ces résultats, une grille de diagnostic spécifique pour la région a été élaborée. Ce travail est intégré à l'outil d'aide à la décision, développé dans le cadre de ce projet (<https://defiforbois-outil.efno.inrae.fr/>). Cet outil propose plusieurs modules et permet de guider le diagnostic de sensibilité du site du chantier d'exploitation, de calculer les niveaux d'exportation selon le scénario de coupe et le type de peuplement, et de déterminer le risque de perte de fertilité.

1.1.8 Des recommandations clés à suivre pour le maintien de l'intégrité des sols forestiers de la région et des habitats utiles à la biodiversité

▪ Raisonner l'organisation du chantier de coupe en fonction du site et de la météo

Pour limiter les risques d'orniérage ou de tassement du sol induits par la circulation des machines d'abattage et de débardage, auxquels les sols de la région sont particulièrement sensibles (texture à dominante limoneuse, argileuse ou sablo limoneuse), il est nécessaire de prévoir en amont l'implantation de cloisonnements, d'optimiser le choix des machines et, de planifier et adapter le déroulement des opérations en fonction de l'humidité du sol.

- **S'assurer que le sol peut tolérer un export de menus bois**

En région Centre Val de Loire, on peut distinguer trois classes de sols à partir de leur texture dans les 10 premiers cm : (i) les sols à texture dominante sableuse (S et SL), fortement sensibles et où les récoltes des menus bois sont déconseillées, (ii) les sols à dominante argileuse (A, AL, ALO), faiblement sensibles où la récolte est envisageable, et (iii) les sols à texture dominante limoneuse ou équilibrée, pour lesquels le niveau de sensibilité s'avère difficile à prédire avec fiabilité et seules des analyses chimiques permettraient aux forestiers une prise de décision raisonnée et fiable. Dans tous les cas, et surtout pour cette dernière catégorie, la caractérisation du sol devrait être associée à une récolte d'un volume adapté comme détaillé ci-après.

- **Récolter les arbres hors feuilles**

Pour éviter l'export de nutriments avec le feuillage, les arbres devraient être récoltés hors feuilles en décalant la période de récolte en hiver si la portance du sol le permet. Si la coupe a lieu en feuilles, laisser les arbres coupés plusieurs mois sur la parcelle pour qu'un maximum de feuilles tombent au sol (5 à 6 mois seraient nécessaires pour de nombreuses essences feuillues). La récolte hors feuilles présente également l'avantage d'éviter le dérangement d'espèces d'oiseaux patrimoniaux, rapaces et cigognes noires, pendant leur période de nidification.

- **Laisser davantage de bois au sol pour une coupe vertueuse vis-à-vis de la protection des sols**

Le pourcentage de menu bois à laisser au sol peut être de 10 à 30%, voire davantage selon la fertilité du sol et le volume de bois coupé, ainsi que d'autres paramètres plus secondaires. Le guide Ademe sous format papier (Ademe, 2020) ou l'application en ligne Défiforbois permettent en 2 à 5 questions simples d'identifier les facteurs de sensibilité du sol et le pourcentage de menus bois minimal à laisser au sol.

- **Adapter les volumes coupés**

Avant de procéder à la coupe, la quantité de biomasse exportée (sur une période de 10-15 ans) doit être raisonnée en fonction du peuplement et de la fertilité du sol. Pour cela, il faut veiller à ce que les exportations d'éléments nutritifs avec la biomasse de bois ne dépassent pas les stocks du sol. Un diagnostic précis peut être fait à partir d'une analyse de sol et d'un relevé dendrométrique. A défaut, l'outil d'aide à la décision, Défiforbois, a été élaboré pour aider à réaliser un diagnostic. Le principe est de calculer, à partir de quelques variables d'entrées simples sur le peuplement et le sol, le volume de bois exportable afin d'assurer le maintien de la fertilité du sol. Ce volume dépend du stock du sol et de la composition du peuplement.

Dans tous les cas, laisser des bosquets ou des tiges de petits diamètres permet de conserver un couvert végétal qui constitue une ressource alimentaire supplémentaire pour le gibier et contribue ainsi à la diminution de la pression du gibier sur la régénération forestière.

- **Laisser des pièces de bois pour la biodiversité**

Afin de conserver des bois pour la biodiversité, il faut veiller à laisser plus de 10% des menus bois au sol et quelques billons issus de la coupe, ainsi que les bois morts préexistants à la coupe, c'est-à-dire des chandelles, les troncs et souches déjà présents au début du chantier. Les rémanents, menus bois ou gros rondins, sont des habitats potentiels pour des végétaux ou des animaux forestiers, et constituent donc un réservoir de biodiversité. De plus, le maintien d'arbres qui offrent des ressources alimentaires et des habitats, par exemple des arbres fruitiers ou des arbres à cavités, est également favorable à la biodiversité. Sur les parcelles de plus de 3 ha, et si les rémanents sont trop gênants pour les travaux sylvicoles suivants, il est conseillé de laisser un îlot non coupé de 300 à 500 m². L'îlot pourra perdurer ou être déplacé sur une autre zone à la révolution suivante.

1.2 Vulnérabilité des essences en place et identification d'essences nouvelles

1.2.1 Identification des espèces et zones de vulnérabilité

Les données sur la répartition en volume des essences présentes sur l'ensemble de la région issues de l'inventaire forestier (IGN) mettent en évidence la prédominance des essences feuillues indigènes, avec le chêne sessile en tête suivi du chêne pédonculé puis du pin sylvestre (Figure 9). Cette répartition de ces espèces n'est cependant pas homogène sur l'ensemble du territoire : dans la SER Sologne Orléanaise où c'est le chêne pédonculé qui occupe la première place devant le pin sylvestre. Ces résultats mettent en évidence la faiblesse du modèle qui s'appuie sur quelques essences majeures à temps de révolution très long peu compatible avec la vitesse du changement climatique et un nombre réduit d'essences déjà en place qui pourraient se substituer aux premières (Musch, 2019).

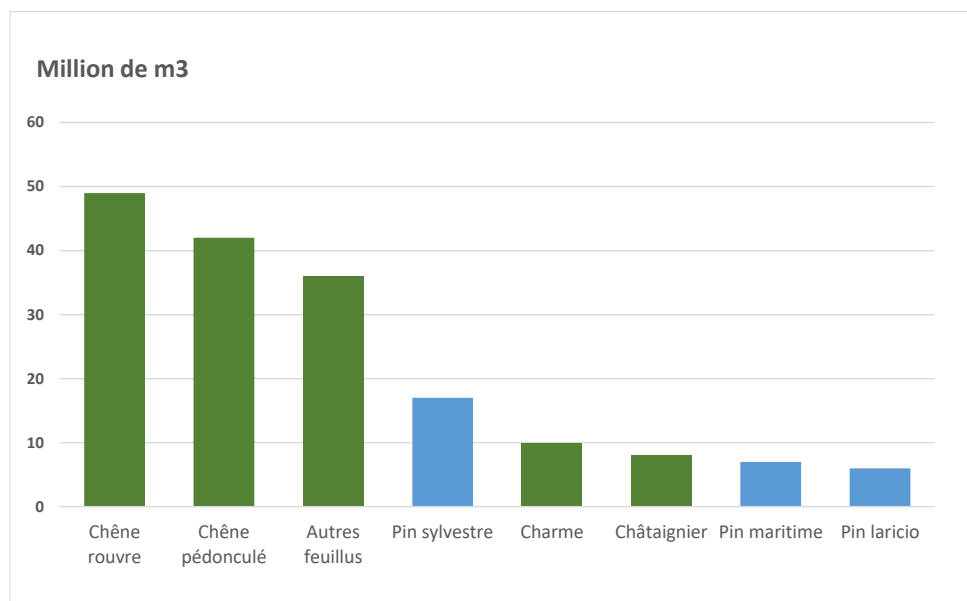


Figure 9: Volume total sur pied (m³) des essences feuillues (vert) et résineuses (bleu) les plus représentées en région Centre-Val de Loire.

Les prédictions de compatibilité climatique des 4 essences majeures, réalisées avec l'outil IKSmaps 1 & 2 à l'horizon 2070 selon le modèle Rcp 8.5 (Figure 10) montrent que les deux espèces de chêne ne trouveront plus dans la région les conditions climatiques favorables à leur croissance et leur survie.

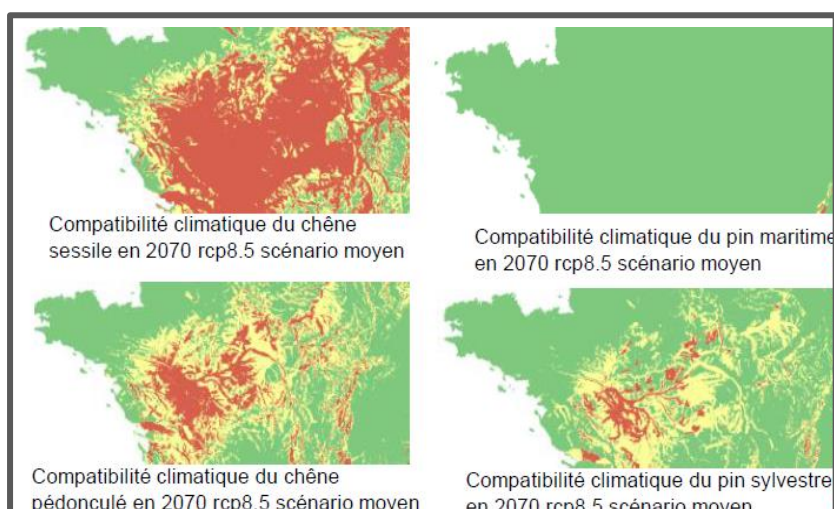


Figure 10: Niveau de compatibilité des quatre principales essences en 2070 selon le scénario Rcp8.5.

1.2.3 Sélection d'espèces nouvelles potentiellement adaptées

L'objectif était de sélectionner des espèces nouvelles qui soient considérées comme moins vulnérables que les espèces majeures, actuellement en place dans la région (Bertin et al. 2019). Pour cela des informations ont été collectées sur les espèces présentes dans des tests, complétée par une revue bibliographique (issue du projet CARAVANE ; Bertin et al. 2019, Aforce 2019). Un modèle de fiches descriptives a été établi afin que l'expérimentateur ou le gestionnaire puisse prendre une décision éclairée. Ces fiches comportent 37 critères regroupés en 8 grands thèmes : facteurs limitants climatiques, facteurs limitants édaphiques, diversité génétique, croissance et production de bois, mise en œuvre sylvicole, vulnérabilité aux risques biotiques et abiotiques. Pour chacun des critères une note de A à D a été attribuée ainsi qu'une appréciation sur la fiabilité de l'information. Une liste de 60 provenances a ainsi été pré-retenue et partagée avec les acteurs de la filière. Des tests d'approvisionnement en graines ont été menés pour un sous ensemble d'espèces assortis de la mise en place d'itinéraires de culture pour les espèces très peu connues.

1.2.4 Différentes modalités de tests expérimentaux envisagés

Afin de tester les différentes alternatives au chêne sessile en région Centre Val de Loire, une combinaison de 3 types de tests est envisagée pour explorer différents contextes pédoclimatiques et se projeter à différentes échelles temporelles. Ces modalités ont été élaborées à partir de réflexions nationales multi-organismes (projet ESPERENSE).

Le test d'élimination a pour objectif de tester sur le court terme (10 ans) la survie de nombreuses espèces et provenances au climat actuel. Il est composé de 60 unités génétiques (UG) répétées dans 3 blocs installés sur un site dont le sol ne constitue pas un facteur limitant. Des mesures précises sont réalisées régulièrement pour capter les différences entre les UG.

Le test de comportement a pour objectif de tester sur le moyen terme (30 ans) le comportement, dans différents contextes pédologiques, d'un nombre restreint d'espèces représentées chacune par une seule provenance mais avec un effectif plus important que dans le test d'élimination. A l'issue de l'expérimentation, des données sur les conditions d'emploi des UG dans des contextes de sols variés seront disponibles ainsi que l'effet de la concurrence et leur réaction à une éclaircie.

Le troisième type de test, l'îlot d'avenir, s'inscrit dans une démarche de recherche participative. Une UG, gérée en condition de gestion sur un demi hectare et menée avec les gestionnaires forestiers, permettra d'acquérir des données sur le long terme jusqu'à la phase de renouvellement.

1.3 Rencontres avec les acteurs

Au total plus de vingt conférences-débats ont été organisées avec des acteurs de la filière forêt-bois en région Centre-Val de Loire, avec des groupes d'acteurs locaux ou nationaux (grand public, industriels, pouvoirs publics, formations universitaires), et lors de congrès scientifiques.

Pour documenter ces rencontres, une valise pédagogique de quelque 150 diapos a été créée. Elle a été nourrie par une activité de veille scientifique et technologique de fond, avec un focus assez large quant aux disciplines, revues, types de supports et canaux d'information mobilisés (réseaux sociaux comme ResearchGate ; publications en ligne non éditées comme The Conversation ; ressources documentaires en ligne, médias généralistes ; des sources techniques ; des informations communiquées par divers services officiels sur les réseaux sociaux).

Les conclusions du cycle de conférences-débats ont été discutées lors d'une communication invitée par l'Académie d'Agriculture (7 novembre 2018). L'Académie a souligné l'originalité du travail réalisé. La séquence de plus de 59 dates réalisée à ce jour (23 pour Defiforbois, 36 dans d'autres contextes), avec des auditoires de compositions très variables, donne d'ores et déjà une information très utile pour la région Centre Val de Loire, avec des éléments de consolidation et mise en perspective inter-régionale.

2. Contribution au développement territorial ou aux transitions sur les territoires

Le projet avait comme finalité de fournir des recommandations et des outils d'aide à la décision pour garantir la durabilité de la gestion forestière face aux deux défis que constituent l'accroissement de la mobilisation du bois et plus spécialement du bois énergie et le renouvellement et la résilience des forêts de la région face aux changements climatiques.

Sur le plan de la mobilisation du bois énergie, on note que la récolte de plaquettes forestières a été multipliée par six depuis 2010 en région Centre-Val de Loire, grâce aux dispositifs successifs d'aides en faveur de la filière Biomasse énergie. En 2018, les grosses centrales de co-génération installées à Orléans et Tours mobilisaient annuellement environ 300 000 m³ de plaquettes forestières. La demande devrait encore progresser dans les prochaines années en réponse aux objectifs fixés dans le schéma régional climat air énergie (SRCAE) et le Plan régional de la Forêt et du Bois (PRFB). Les besoins en bois supplémentaires à récolter définis dans le Cap Filière Forêt-Bois 2019-2023 et le PRFB sont estimés à 252 000 m³ d'ici 2023 dont 188 000 t de bois énergie pour alimenter la soixantaine de nouvelles chaufferies escomptées. Or, il existe en amont de la filière une disponibilité théorique significative, principalement en forêt privée, permettant de répondre à la demande en matériau bois massif et fibres et valorisable en bioénergies et chimie.

Accroître et optimiser la mobilisation de cette ressource dans le cadre d'une gestion forestière productive et environnementale est une des priorités de la stratégie de la filière forêt-bois régionale (CAP 2019-23). Mais plusieurs verrous concernant l'amont de la filière doivent être levés. Il faut notamment que les exploitants disposent d'équipements et moyens humains appropriés et de conseils pertinents dans le respect d'une gestion durable, et que les propriétaires et gestionnaires forestiers soient informés sur les nouveaux modes d'exploitation et guidés sur les réorientations sylvicoles à opérer en cohérence avec les contraintes économiques et environnementale.

L'analyse technico-économique sur l'activité des entreprises d'exploitation mécanisée ont mis en évidence les éléments de vigilance et d'amélioration au niveau des formations et des équipements pour les années à venir. La filière régionale d'approvisionnement en plaquettes forestières est constituée d'une multitude d'opérateurs de travaux forestiers (exploitants-bucheron ; conducteurs d'engins, techniciens logistiques et technicien de mobilisation). On retrouve ces opérateurs regroupés au sein de structure comme les coopératives forestières ou l'ONF Energie mais aussi de nombreuses petites entreprises individuelle (ou avec 1 ou 5 salariés) disséminées dans le territoire. Ce maillage d'entreprises constitue une richesse pour la région mais reste fragile économiquement. Les résultats et la valorisation issue de ce projet devraient permettre de dynamiser la filière forêt bois locale en encourageant la modernisation des entreprises d'exploitation de travaux forestiers tout en assurant la durabilité éco-environnementale des nouvelles pratiques. En favorisant le déblocage de l'accès à la ressource et sa pérennisation, il conditionnera la création d'emplois et de richesses à court et moyen terme. À court-terme, ce sont des emplois qualifiés dans les entreprises d'exploitation forestière, liés à la mobilisation de nouvelles ressources en forêt privée qui sont escomptés. Rien que pour le secteur bois énergie les 188 000 t supplémentaires représentent au moins 30 emplois ruraux directs créés et donc à peu près autant d'emplois indirects qui maintiendront ou développeront la vitalité des territoires ruraux.

En se référant aux recommandations basées strictement sur le diagnostic de sensibilité du sol établi au niveau national (INSENSE), la récolte des bois par arbre entier ne serait durablement envisageable que sur une surface minime. Selon les sylvoécotémoins (SER), de 55 à 94% (respectivement pour les SER Pays-Fort Nivernais et plaines prémorvandelles à l'Est du département, et Sologne-Orléanais) des sites présentent des sols de sensibilité forte pour lesquels l'Ademe recommande de ne pas y effectuer de récolte en arbre entier. Ce constat remet en cause la production de plaquettes sur les trois quarts du territoire régional. Les apports de l'étude environnementale du projet DEFIFORBOIS ont permis d'affiner la classification de sensibilité des sols et surtout d'y adjoindre les caractéristiques du peuplement et de la coupe afin de définir les volumes mobilisables en coupe arbre entier sans porter atteinte à la fertilité des

sols. L'étude spécifique sur la biodiversité permet de compléter les recommandations du point de vue du maintien des habitats propices à la biodiversité floristique et faunistique.

Pour le CRPF et le FCBA, le volet relatif à l'impact de la récolte « arbres entiers » sur les sols est jugé primordial pour la durabilité des forêts et le maintien d'un potentiel de production en adéquation avec les besoins de la filière forêt-bois. Le positionnement territorial du projet en région Centre Val de Loire a permis d'affiner et préciser les conditions opérationnelles dans lesquelles les recommandations de maintien de la fertilité et de la biodiversité peuvent influencer les itinéraires techniques de récolte de bois valorisés en plaquettes forestières à usage énergétique. Les disparités locales de qualité des sols, de peuplements, types de coupes et itinéraires mécanisés (usages des entreprises de la récolte) sont autant de facteurs de complexité que le projet national de recherche GERBOISE (Landmann et al., 2018) ne pouvait pas prétendre traiter de manière exhaustive. En cela, le travail avec les acteurs régionaux a été une plus-value utile.

Le CNPF pourra intégrer les préconisations issues du projet Defiforbois en termes de diagnostic mais aussi de pratiques de gestion dans les conseils techniques prodigués, que ce soit individuellement à l'occasion des visites conseil, mais aussi collectivement lors de réunions, formations, publications... Il pourra s'appuyer pour cela sur les vidéos développées et l'outil numérique permettant le diagnostic de sensibilité des sols, en réponse aux nombreuses interrogations des gestionnaires et propriétaires forestiers sur la façon d'évaluer le risque de dégradation selon les types de sols.

Du point de vue de la coopérative forestière Unisylva, les résultats obtenus sur ses chantiers bois énergie suivis par INRAE ont accru leur sensibilité à la prise en compte des sols et les ont amenés à revoir leurs consignes internes à destination de leurs personnels techniciens et chauffeurs d'engins et de leur sous-traitants pour intégrer ces informations et accroître la performance environnementale de leur chantier vis à vis des sols et de la biodiversité.

Concernant le second volet ayant trait à l'adaptation des peuplements au changement climatique, les listes de nouvelles essences susceptibles d'être utilisées en substitution des essences présentes actuellement montrant des signes de faiblesse, vont faire partie des références utilisées pour la rédaction du schéma régional de gestion forestière de la région Centre-Val de Loire (SRGS), dont la rédaction est en cours. Pour Unisylva qui gère 360 000 ha de forêt de production, le projet apporte des réponses concrètes pour maintenir des forêts de production chez ses adhérents et les guider dans la mise en œuvre d'opérations de migration assistée des essences forestières ou de nouvelles mesures de gestion des peuplements. Les pépiniéristes et les entreprises de reboisement de la région sont des opérateurs économiques locaux qui vont profiter de ces recherches car la production de plants va pouvoir s'organiser de façon plus rationnelle.

Conclusion

Pour atteindre les objectifs de transition énergétique, la filière forêt bois doit accomplir une mutation pour produire au moins 1,5 fois plus de bois-matériaux biosourcés et 5 fois plus de bois énergie, mais en prenant garde de préserver les processus naturels et la biodiversité.

Aujourd'hui, la meilleure façon de réagir semble être de tendre vers une « bio-économie optimisée » avec une hiérarchie des usages conduisant à privilégier la production de bois d'œuvre et de bois d'industrie ce qui permet de stocker durablement le carbone séquestré par les arbres dans des biomatériaux et offre une solution de substitution à d'autres matériaux beaucoup plus énergivores. Cela dit, sur les parcelles forestières déjà dégradées, en impasse sylvicole, les taillis pauvres et taillis sous-futaies, la valorisation en bois énergie est une opportunité pour replanter des variétés adaptées au changement climatique qui produiront prioritairement du bois d'œuvre et du bois d'industrie.

Actuellement, le bois énergie récolté en région Centre-Val de Loire provient de peuplements feuillus poussant sur des sols majoritairement pauvres. Nos résultats montrent que la récolte pratiquée en arbres entiers conduit à un doublement des exports de nutriments, et que le potassium et le phosphore sont les éléments dont les stocks sont les plus affectés (Korboulewsky et al. 2020). Pour préserver les éléments minéraux et la matière organique du sol le principal levier consiste à laisser davantage de menus bois en forêt en découpant l'extrémité du houppier et en évitant de prélever les très petites tiges ainsi que les bois morts préexistants. Ces mesures permettront en outre de préserver des pièces de bois mort de dimensions diverses, utiles aux différentes composantes de la biodiversité, qui ne seraient pas maintenues par d'autres types de mesures visant à compenser uniquement l'export d'éléments minéraux et de carbone.

En outre, les résultats du projet ont permis (1) d'identifier les sols sensibles, (2) de définir des recommandations afin de maintenir la fertilité de ces sols et des habitats utiles à la biodiversité (voir les réalisations graphiques sur <https://defiforbois.inrae.fr/en-savoir-plus>), et (3) de développer un outil numérique d'aide à la décision et des supports de communication (<https://defiforbois-outil.efno.inrae.fr/>).

En parallèle, les essences forestières à enjeu économique de la région Centre sont particulièrement vulnérables au changement climatique déjà en cours. C'est le cas du pin sylvestre et du chêne pédonculé particulièrement menacés, tandis que le chêne sessile, plus résilient, peut être favorisé sur les meilleures stations. Après coupe, une liste d'essences feuillues et des résineuses autochtones ou allochtones est proposée (Musch et al. 2020, <https://climessences.fr/>). Le choix doit être guidé par l'adéquation au sol et au climat futur, avec maintien d'un accompagnement ligneux.

Remerciements

Le projet fait partie du programme PSDR4 avec le soutien financé par INRAE et la Région Centre-Val de Loire. L'ensemble des publications relatives aux 33 projets du programme PSDR4 est consultable : <https://www.psdr.fr/>

Les auteurs remercient les techniciens forestiers de l'ONF et d'Unisylva pour leur temps lors de la préparation et de la réalisation des suivis de chantiers. Nous remercions également tous les propriétaires forestiers de nous avoir accordé la possibilité de travailler sur les parcelles.

Enfin, nous remercions la société Ontomantics d'avoir développé l'outil numérique Défiforbois, et de 3dlight-studio pour les réalisations graphiques.

Références bibliographiques

Achat D., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L. 2015a. Consequences of Removing Harvesting Residues on Forest Soils and Tree Growth – A Meta-Analysis. *Forest Ecology and Management* 348, 124-41.

Achat D., Fortin M., Landmann G., Ringeval B., Augusto L., 2015b. Forest Soil Carbon Is Threatened by Intensive Biomass Harvesting. *Scientific Reports* 5 (1), 15991.

Achat D., Martel S., Picart D., Moisy C., Augusto L., Bakker M., Loustau D., 2018. Modelling the Nutrient Cost of Biomass Harvesting under Different Silvicultural and Climate Scenarios in Production Forests. *Forest Ecology and Management* 429, 642-53.

Ademe, 2020. Clés pour agir : Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières, Enjeux et bonnes pratiques : focus sur la préservation des sols. Ademe éditions, Angers, 40p.

Aforce, 2019. Projet CARAVANE « Catalogue raisonné des variétés nouvelles à expérimenter » <https://www.reseau-aforce.fr/n/caravane/n:3402>

- André F., Jonard M., Ponette Q., 2010. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. *Science of the Total Environment* 408 (11), 2285-94.
- André F., Ponette Q., 2003. Comparison of biomass and nutrient content between oak (*Quercus petraea*) and hornbeam (*Carpinus betulus*) trees in a coppice-with-standards stand in Chimay (Belgium). *Annals of Forest Science* 60 (6), 489-502.
- Augusto L., Pousse N., Legout A., Seynave I., Jabiol B., Levillain J., 2018. INSENSE : Indicateurs de SENSibilité des Ecosystèmes forestiers soumis à une récolte accrue de biomasse. Research Report. ADEME.
- Bertin S., Legay M., Musch B., Paillassa E., Perrier C., Piboule A., 2019. Un outil en ligne pour accompagner le choix des essences forestières dans un contexte de changement climatique. *Forêt entreprise*, 249, pp. 33-34.
- Bessaad A., 2020. Les récoltes intensives de bois énergie : risque environnemental et gain économique. Thèse, Orléans, France, 164 p.
- Bessaad A., Bilger I., Korboulewsky N., 2021a. Assessing Biomass Removal and Woody Debris in Whole-Tree Harvesting System : Are the Recommended Levels of Residues Ensured? *Forests* 12 (6), 807.
- Bessaad A., Korboulewsky N., 2020. How much can nutrients return to the soil by leaf leaching during the pre-drying period in whole-tree harvesting system? *Forest Ecology and Management* 477, 118492.
- Bessaad A., Terreaux J-P., Korboulewsky N., 2021b. Assessing the land expectation value of even-aged vs coppice-with-standards stand management and long-term effects of whole-tree harvesting on forest productivity and profitability. *Annals of Forest Science* 78 (3), 57.
- Boldrini C., Cacot E., 2016. Outil d'analyse prospective de l'évolution de l'exploitation forestière en région Centre Val de Loire à l'horizon 2026. Diaporama, 30 diapos.
- Bond William J., 2010. Do Nutrient-Poor Soils Inhibit Development of Forests? A Nutrient Stock Analysis. *Plant and Soil*, 334 (1), 47-60.
- Brethes A., 1993. Les types de stations forestières de l'Orléanais. ONF, Paris, 400p.
- Cacot E., Morillon V., Montagny X., 2016. Etat des lieux du parc de machines d'exploitation forestière en région Centre-Val de Loire pour l'année 2015. Rapport, 39p.
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J-P., Vivien Y., Rivoire M., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Hervé J-C., 2014. Estimation harmonisée du volume de tige à différentes découpes. *Rendez-vous techniques*, ONF 44,33–42.
- Durante S., Augusto L., Achat D., Legout A., Brédoire F., Ranger J., Seynave I., Jabiol B., Pousse N., 2019. Diagnosis of Forest Soil Sensitivity to Harvesting Residues Removal – A Transfer Study of Soil Science Knowledge to Forestry Practitioners. *Ecological Indicators* 104, 512-23.
- Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K., Beerling D.J., Cao J., Marcott S., Masson-Delmotte V., Prather M.J., Rohling E.J., Shakun J., Smith P., Lacs A., Russell G., Ruedy R., 2017. Young people's burden: requirement of negative CO2 emissions. *Earth System Dynamics* 8, 577–616. doi:10.5194/esd-8-577-2017.
- IIASA, 2017. Resource efficiency of future EU demand for bioenergy. IIASA Policy Brief 15
- Kebli H., et al., 2019. Forêt Entreprise n° 249 in Dossier "Forêt et changement climatique : Accompagner la décision d'adaptation ". Pages 24-26
- Korboulewsky N., Bilger I., 2018. Analyse de la sensibilité des sols forestiers de la région Centre Val de Loire à l'exportation de biomasse, 25 p.
- Korboulewsky N., 2021. Rapport d'activité du projet DEFIFORBOIS (2016-2020).
- Korboulewsky N., et al., 2020. Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre, Projet PSDR DEFIFORBOIS, Centre-Val de Loire, Série Les 4 pages PSDR4
- Korboulewsky N., Bilger I., Bessaad A., 2021. How to Evaluate Downed FineWoody Debris Including Logging Residues? *Forests* 12 (7), 881.

Landmann G., Augusto L., Bilger I., Cacot E., Deleuze D., Gosselin M., Pousse N. (Coord), 2018. Projet GERBOISE, Gestion raisonnée de la récolte de bois-énergie. Synthèse. Paris : ECOFOR, Angers : ADEME. Paris.

Legay M., Deleuze C., Dhôte J.-F., Kremer A., Musch B., Bartet X., 2019. Changements climatiques et gestion de la forêt ligérienne (dossier). Rendez-vous techniques ONF 61-62, 11-70

Marshall P.L., Davis G., LeMay V.M., 2000. Using Line Intersect Sampling for Coarse Woody Debris. Technical Report; Forest Research B.C.: Nanaimo, BC, Canada, 34p.

Miton A., 2019. Influence des coupes de bois-énergie sur la diversité et la composition des bryophytes et des plantes vasculaires. Rapport de stage de Master II, Université d'Orléans, 30p.

Musch B., 2019. Outils pour l'adaptation de la forêt aux changements climatiques : migration assistée et substitution d'essences. Rendez-vous techniques ONF 61-62, 42-49.

Musch B., Sevrin E., Colinot A., Dhote J.-F., Rousselle Y., 2020. Développement et durabilité de la filière forêt-bois en région Centre, Projet PSDR DEFIFORBOIS, Centre-Val de Loire, Série Les 4 pages PSDR4.

Ouimet R., Duchesne L., Tremblay S., 2021. Long-Term Soil Fertility and Site Productivity in Stem-Only and Whole-Tree Harvested Stands in Boreal Forest of Quebec (Canada). *Forests* 12 (5): 583.

Richer de Forges A., 2008. Base de données du Référentiel Régional Pédologique de la région Centre : carte des pédopaysages du Loiret à 1/250 000, en format DoneSol2. INRA InfoSol.

Richer de Forges A., Lehmann S., 2008. Couverture graphique du Référentiel Régional Pédologique de la région Centre : carte des pédopaysages du Loiret à 1/250 000, en format ArcInfo. INRA InfoSol.

Roux A., Colin A., Dhôte J.F., Schmitt B., Bailly A., Bastien J.C., Bastick C., Berthelot A., Bréda N., Caurla S., Carnus J.M., Gardiner B., Jactel H., Leban J.M., Lobianco A., Loustau D., Marçais B., Meredieu C., Pâques L., Rigolot E., Saint-André L., Guehl J.M., 2020. The forestry & wood sector and climate change mitigation: From carbon sequestration in forests to the development of the bioeconomy. *Éditions Quae*, 978-2-7592-3280-2. (hal-03121025)

Simon M., Colin A., 2018. Disponibilités en bois des forêts de la région Centre-Val-De-Loire à l'horizon 2036. IGN, 113p.

Thiffault E., Berndes G., Lamers P., 2016. Challenges and Opportunities for the Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes. In « Mobilisation of Forest Bioenergy in the Boreal and Temperate Biomes-Challenges, Opportunities and Case Studies », (Ed.): E. Thiffault, C.T. Smith, M. Junginger, G. Berndes, 190-213

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son DOI)