Janv. 2023

TAMOBIOM

TESTS ET APPROPRIATION PAR LES ACTEURS OPERATIONNELS DE NOUVEAUX MODELES TECHNICO-ECONOMIQUES POUR UNE RECOLTE DURABLE DE BIOMASSE FORESTIERE

Projet recherche et développement

RAPPORT FINAL

En partenariat avec :

CITATION DE CE RAPPORT

Rapport final TAMOBIOM, confidentiel ; 2023, 45 pages.

nota bene: la copropriété des résultats ADEME/bénéficiaire peut être un indice de contribution effective de l'ADEME**).**

Coordination : Morgan VUILLERMOZ, Alain BAILLY (FCBA)

Equipes projets : **ECOFOR** : Annabelle AMM, Marie CLUZEL, Guy LANDMANN, Nicolas PICARD

FCBA : Francis BIGOT de MOROGUES, Chloé BOLDRINI, Matthieu BONNEMAZOU, Emmanuel CACOT, Thomas CARRETTE, Xavier MONTAGNY, David PEUCH, Philippe RUCH

INRAE : Jens ABILDTRUP (BETA), May ATTALLAH (BETA), Isabelle BILGER (EFNO), Nathalie KORBOULEWSKY (EFNO), Arnaud REICHARD (BEF), Laurent SAINT ANDRE (BEF), Anne STENGER (BETA), Bernhard ZELLER (BEF),

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1903C0001

Partenariat FCBA, INRAE (BEF, BETA, Nogent), GIP-ECOFOR, ONF, GCF et COPACEL pour ce projet cofinancé par l'ADEME, COPACEL et le labex ARBRE

Projet de recherche coordonné par : FCBA
Appel à projet de recherche : GRAINE

Coordination technique - ADEME : DEPARTE Alba
Direction/Service : Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie
Direction Productions et Energies Durables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ 4

1. Contexte et objectifs du projet 5

2. Résultats des différents lots 6

2.1. Lot 1 : Mise en œuvre des réseaux d'acteurs 6

2.1.1. Groupe national 6
2.1.2. Réseau d'acteurs en Champagne Ardennes 6
2.1.3. Réseaux d'acteurs en Nouvelle Aquitaine 7

2.2. Lot 2 : Tests de modalités de récolte et de ressuyage des arbres en feuille 8

2.2.1. Objectif général 8
2.2.2. Méthodes communes – Protocole menus bois pour les tests de rétention de matière 8
2.2.3. Méthodes communes – Protocole pour les tests ressuyage 8
2.2.4. Résultats technico-économiques des chantiers 15
2.2.4.1. Modalité épointage / arbres entiers 15
2.2.4.2. Modalité ébranchage partiel 18
2.2.4.3. Modalité ressuyage - débardage différencié 20
2.2.4.4. Modalité extraction souches / mise en fagots des branches 22
2.2.5. Résultats chantiers Menu bois 24
2.2.5.1. Forêt de Chaux 24
2.2.5.2. Chantier Saint Cyr 25
2.2.6. Résultats chantiers Ressuyage 28
2.2.6.1. Forêt de Champenoux 28
2.2.6.2. Forêt de Chaux 28
2.2.6.3. Nogent sur Vernisson 29
2.2.6.4. Synthèse des résultats pour les deux sous-taches 30

2.3. Lot 3 : Identification des leviers (incitations et institutions) pour une mise en œuvre opérationnelle des recommandations de récolte 31

2.3.1. L'approche expérimentale 31
2.3.1.1. Expériences en laboratoire contre expériences sur le terrain 31
2.3.1.2. La filière bois-énergie et l'économie expérimentale 32
2.3.1.3. L'expérience 32
2.3.2. Les incitations 35
2.3.3. La signature d'une déclaration 35
2.3.4. Conceptual priming 36

2.4. Lot 4 : Communication des résultats et outils de transfert 43

2.4.1. Contribution à la brochure ADEME « Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières » 43
2.4.2. Collecte des informations auprès des responsables des différents Lots 43
2.4.3. Stratégie en matière de diffusion des informations auprès du public professionnel 43
2.4.4. Elaboration d'un « portail Gerboise » à partir du site Gerboise 43
2.4.5. Action de formation du secteur coopératif (webinaire) par INRAE- BEF (Nancy) 44

Conclusion 45

Annexes 45

Annexe 1 : TAMOBIOM_ : CR suivi chantiers Lot 2 45

Annexe 2 : TAMOBIOM : Annexes Lot 3 45

RÉSUMÉ

Les projets GERBOISE et INSENSE ont visé la mise à jour des recommandations environnementales existantes, datant de 2006, sur les pratiques de récolte liées au bois énergie (guide ADEME, 2006). Des discussions engagées avec les professionnels de la mobilisation du bois énergie sur les recommandations, il ressort que certaines recommandations :

- sont peu ou pas appliquées. Certains acteurs ignorent ou ne sont pas convaincus que la récolte arbres entiers, y compris avec feuillage, peut poser des problèmes pour les sols ou la biodiversité.
- sont perçues comme des contraintes non justifiées relevant du pur principe de précaution car elles ne sont pas assez documentées. Elles se heurtent alors aux considérations pratiques : à quel coût les mettre en œuvre, pour quelle efficacité sur la réduction des exportations minérales… ?

Cependant, pour être durable, le recours croissant à la biomasse forestière réclame une évolution rapide des pratiques de récolte, basée sur une adhésion aux recommandations.

Le projet TAMOBIOM a pour objectif de rendre effective la mise en œuvre, par les acteurs professionnels de la récolte, de recommandations pour préserver à long terme les sols forestiers et notamment leur fertilité. Cela se traduit par 3 sous-objectifs :

1. Formaliser des pratiques de récolte économiquement viables et compatibles avec la gestion durable de la fertilité des sols, basées sur les recommandations du projet Gerboise ;
2. Identifier les freins et les leviers relatifs à la mise en place de ces pratiques auprès des acteurs de la chaine de décision de la gestion forestière à la récolte, tenant compte des pratiques actuelles de récolte et de la compréhension des recommandations par les acteurs de terrain ;
3. Mettre en place in fine une stratégie d'influence et des outils d'accompagnement au changement adaptés auprès de l'ensemble de ces mêmes acteurs.

Quatre étapes majeures structurent ce projet :

1. L'animation d'une démarche concertée avec les acteurs concernés (gestionnaires, exploitants, entrepreneurs, etc.) afin d'être dans une coconstruction des modalités pratiques de mise en œuvre des recommandations issues de GERBOISE. Cette phase de travail a permis d'identifier 5 modalités qui ont ensuite été mises en œuvre et étudiées dans le cadre du lot 2 ;
2. Ces nouvelles modalités ont été mises en œuvre et analysées comparativement aux modalités actuelles de récolte à l'aide d'une méthodologie développée dans le projet en tenant compte des écueils de celle développée dans GERBOISE sur le suivi de chantiers d'exploitation et l'analyse du bilan minéral d'exportation. Les résultats montrent que la problématique est complexe et mérite des investigations complémentaires. Cependant en compléments d'autres projets financés par l'ADEME (RESPIRE), ces résultats ont permis de faire évoluer la loi sur l'épandage de cendres en sols forestiers qui certes ne résout pas tous les problèmes d'exportation (en particulier Matière Organique) mais permet un retour, à minima partiel, d'éléments fertilisants ;
3. Une approche d'économie comportementale a permis de mieux comprendre le type d'incitations, leurs formes, ainsi que l'institution la mieux placée pour inciter les professionnels à infléchir leurs pratiques vers une récolte durable de la biomasse.
4. Une stratégie et des outils de communication notamment ciblés sur les professionnels de la récolte ont été débutés dans le cadre du projet et se poursuivront.

Le projet TAMOBIOM, retenu à l'appel à projets GRAINE de l'ADEME, est piloté par FCBA, avec le partenariat de l'INRAé (équipes BEF, BETA et Nogent), ONF, GCF, COPACEL et GIP-ECOFOR.

1. Contexte et objectifs du projet

Les projets Gerboise et Insense ont visé la mise à jour des recommandations environnementales existantes, datant de 2006, sur les pratiques de récolte liées au bois énergie (guide ADEME, 2006). Des discussions engagées avec les professionnels de la mobilisation du bois énergie sur les recommandations, il ressort que certaines recommandations :

- sont peu ou pas appliquées. Certains acteurs ignorent ou ne sont pas convaincus que la récolte arbres entiers, y compris avec feuillage, peut poser des problèmes pour les sols ou la biodiversité.
- sont perçues comme des contraintes non justifiées relevant du pur principe de précaution car elles ne sont pas assez documentées. Elles se heurtent alors aux considérations pratiques : à quel coût les mettre en œuvre, pour quelle efficacité sur la réduction des exportations minérales… ?

Cependant, pour être durable, le recours croissant à la biomasse forestière réclame une évolution rapide des pratiques de récolte, basée sur une adhésion aux recommandations.

Le projet TAMOBIOM a donc pour objectif de rendre effective la mise en œuvre, par les acteurs professionnels de la récolte, de recommandations pour préserver à long terme les sols forestiers et notamment leur fertilité. Cela se traduit par 3 sous-objectifs :

1. Formaliser des pratiques de récolte économiquement viables et compatibles avec la gestion durable de la fertilité des sols, basées sur les recommandations du projet Gerboise ;
2. Identifier les freins et les leviers relatifs à la mise en place de ces pratiques auprès des acteurs de la chaine de décision de la gestion forestière à la récolte, tenant compte des pratiques actuelles de récolte et de la compréhension des recommandations par les acteurs de terrain ;
3. Mettre en place in fine une stratégie d'influence et des outils d'accompagnement au changement adaptés auprès de l'ensemble de ces mêmes acteurs.

Quatre étapes majeures structurent ce projet en quatre lots présentés ci-après :

1. **Lot 1 :** animation d'une démarche concertée avec les acteurs concernés (gestionnaires, exploitants, entrepreneurs, etc.) afin d'être dans une coconstruction des modalités pratiques de mise en œuvre des recommandations issues de Gerboise ;
2. **Lot 2 :** ces nouvelles modalités seront analysées comparativement aux modalités actuelles de récolte à l'aide de la méthodologie développée dans le projet Gerboise sur le suivi de chantiers d'exploitation et l'analyse du bilan minéral d'exportation ;
3. **Lot 3 :** une approche d'économie comportementale visera à mieux comprendre le type d'incitations, leurs formes, ainsi que l'institution la mieux placée pour inciter les professionnels à infléchir leurs pratiques vers une récolte durable de la biomasse.
4. **Lot 4 :** élaboration d'une stratégie et d'outils de communication notamment ciblés sur les professionnels de la récolte.

2. Résultats des différents lots

Les principaux résultats obtenus dans les différents lots sont présentés ci-après.

2.1. Lot 1 : Mise en œuvre des réseaux d'acteurs

L'objectif des travaux a été de mettre en place une démarche d'échanges et de co-construction des pratiques de récolte en phase avec les recommandations de Gerboise pour en faciliter l'appropriation par les professionnels concernés.

Trois groupes d'acteurs ont été constitués, un national et deux régionaux.

- Au niveau national le réseau comprend des représentants des propriétaires (CNPF-IDF, GCF, ONF), des organismes de certification (PEFC), des mobilisateurs de bois (FNEDT, ONFE, GCF, COPACEL), des industriels utilisant la plaquette forestière (Soven), l'ADEME et les ministères concernés (MTES, MAA).
- Au niveau régional, les groupes rassemblent des opérationnels de la récolte et de la gestion forestière afin de faire remonter les problématiques de terrain au plus près des différentes configurations territoriales.

Ces groupes ont été animés par FCBA dans un esprit d'accompagnement au changement, via la co-construction de solutions avec les acteurs engagés et volontaires.

2.1.1. Groupe national

Au niveau national, la réunion d'un comité de professionnels a été organisée dès le démarrage du projet, le 30 avril 2019 sur Paris.

Cette première consultation a permis de sélectionner les régions dans lesquelles l'animation du réseau d'acteurs locaux serait organisée dans TAMOBIOM.

Les discussions ont également révélé la nécessité de réaliser un document de synthèse (2-4 pages) expliquant le pourquoi des recommandations GERBOISE, à destination tant des professionnels que des propriétaires forestiers (cf. Lot 4 et livrable « Support de documentation pour la sensibilisation des opérateurs »).

Une séance de créativité a été organisée en partenariat avec le BETA (LEF) sur l'identification des motivations des acteurs forestiers à appliquer les recommandations de protection de la fertilité des sols ainsi que sur les incitations les plus pertinentes à mettre en œuvre. Les éléments rassemblés sont notamment destinés aux chercheurs du BETA (LEF) pour leur permettre d'élaborer le protocole d'expérimentation économique (lot 3). Le compte rendu de ces échanges est joint pour information en annexe 1.

2.1.2. Réseau d'acteurs en Champagne Ardennes

En région Champagne-Ardenne, en synergie avec les partenaires du projet MACOBOIS (AMI DYNAMICS Bois), la dynamique régionale est bien lancée. Il s'agit d'un groupe mixte composée de gestionnaires forestiers publics et privés, d'entreprises de la récolte (ETF et Exploitant), d'animateurs territoriaux (CRPF, URCOFOR, FIBOIS GRAND EST).

Un atelier a été réalisé 12 avril 2019 à St Dizier. Le groupe a pu tester en pratique en forêt le diagnostic de sensibilité à l'export des éléments minéraux (« INSENSE »). La discussion sur les modalités pratiques de récolte à tester (lien avec le lot 2) a abouti à un accord sur la modalité à tester sur le chantier suivi localement (chantier « 3 Fontaines l'Abbaye »). Et une proposition de déclinaison régionale des recommandations issues de GERBOISE a été mise en discussion. Le compte rendu de ces échanges est joint pour information en annexe 2.

Depuis, les acteurs sont en attentes des résultats des chantiers tests de modalité.

2.1.3. Réseaux d'acteurs en Nouvelle Aquitaine

En Nouvelle-Aquitaine, il s'est posé la question de la façon dont le comité régional de professionnels devait être réuni. Compte tenu de la taille de la région et des grandes variabilités de peuplements et de sol, 2 sous-groupes ont été imaginés : l'un centré sur les Landes de Gascogne, l'autre sur la Dordogne-Limousin.

Pour cadrer l'organisation de ce groupe régional, FCBA avait initialement prévu une réunion mi-mars 2020. Mais la crise sanitaire a bouleversé le plan et l'incitation à s'organiser en amont de Forexpo (initialement prévue en juin 2020) a disparu avec le report de la foire.

FCBA a sollicité à nouveau les acteurs ciblés (Smurfit, Gascogne, AFB, UNISYLVA) pour une réunion préparatoire en avril mais cette dernière a été annulée à la demande des professionnels. Compte tenu des ambitions vis-à-vis de la région 2 et de la disponibilité des professionnels dans le temps imparti post-crise sanitaire, il reste à déterminer ensemble le mode de consultation le plus pertinent à déployer.

Aussi, FCBA a considéré que la dynamique en Nouvelle Aquitaine ne pouvait être lancée.

Cependant les tests des différentes modalités identifiées et à tester dans le lot ont été lancés, en particulier sur les 2 tests menés sur ce territoire régional (chantiers « Pompogne » et « Sainte Anne »).

Au final 6 modalités ont été identifiées et testées dans les chantiers suivis lors du projet :

- **Modalité épointage vs arbres entiers :** Après abattage des arbres, voire regroupement en javelles, faire une intervention supplémentaire pour couper tout ou partie du houppier des arbres et les laisser sur place
- **Modalités ébranchage partiel :** Tout ou partie du tronc dans le houppier est ébranché sommairement. Après façonnage en général de billons BO voire BI dans la base du tronc, la cime est ébranchée sommairement et sera broyée pour du BE
- **Modalité ressuyage, débardage différencié :** Tester différentes durées de ressuyage fonction des essences, de la période de coupe, des conditions climatiques sur la quantité de menus bois et feuillage effectivement laissée au sol en forêt
- **Modalité extraction de souches/mise n fagots :** récolte des souches, récolte totale de la biomasse aérienne en fagotant les branches
- **Modalité écorçage :** Un écorçage des arbres en bûcheronnage mécanisé se produit lors du passage des troncs dans les têtes. Cet écorçage est plus ou moins fort en fonction des essences, de la période (montée de sève) et des réglages de la tête (pressions des couteaux et rouleaux). En jouant sur ces pressions, on pourrait augmenter le taux d'écorçage.

2.2. Lot 2 : Tests de modalités de récolte et de ressuyage des arbres en feuille

2.2.1. Objectif général

Le lot 2 comprenait deux sous-tâches :

(i) le test de nouvelles modalités de récolte, dites « de rétention de matière » pour réduire les exportations minérales et contribuer à une ressource trophique pour la biodiversité, avec notamment une quantification des menus bois (0-4, 4-7 et 7-22 cm) au sol, avant et après récoltes. Les chantiers (au nombre de 8) choisis, après concertation avec les professionnels (lot 1), permettaient de tester des modalités d'exploitation pour atteindre les recommandations GERBOISE tout en étant viable économiquement. Le descriptif des chantiers qui ont été mis en place sont donnés dans le tableau Lot2-1.

(ii) le test ressuyage des arbres en feuille, après abattage et avant débardage, comme élément important pour le retour au sol du feuillage, voire des menus bois, très concentrés en éléments minéraux sachant que l'entrainement par l'eau de pluie est très insuffisant (Bessaad et al. 2020). Des essais en conditions monitorées comme le climat seront conduits dans différents peuplements et essences afin de caractériser les temps optimaux de ressuyage, tenant compte du retour au sol et de la qualité de la biomasse, et en cherchant à fournir des indicateurs simples pour estimer la bonne durée de ressuyage pour une chute maximale des feuilles. Les chantiers suivis sont donnés dans le tableau Lot2-2.

2.2.2. Méthodes communes – Protocole menus bois pour les tests de rétention de matière

Différentes réunions ont eu lieu autour du protocole TAMOBIOM – Menus Bois, pour prendre en compte les défauts du protocole GERBOISE, et suite à une analyse bibliographique ainsi que des tests *in situ* et des simulations, un protocole optimisé a été établi (Korboulewsky et al. 2021). L'objectif est de réaliser un nombre plus important de transects (30 répartis sur deux zones de 0,5 ha, mais en réduisant leur longueur à 10 m) pour les menus bois supérieurs à 4 cm de façon à mieux couvrir la variabilité des parcelles, et de réduire la longueur de prise de données pour les menus bois de taille 0-4 cm (compromis précision, et temps sur le terrain). Sur chaque transect, est mesuré le diamètre de chaque menu bois à l'intersection avec le transect (méthode dite de *line-intersect sampling*, LIS). Le volume est déterminé par la formule suivante : $V\ (m3/ha) = [\pi^2 * 10000/ (8*L)] * \Sigma d^2$ avec L = longueur des transects en m et d = diamètres menus bois mesurés en m. Ce volume est calculé pour les différentes catégories de menus bois (0-4, 4-7, 7-22) avant et après exploitation.

Pour les estimations de volume, de biomasse et de minéralomasse sur pied et prélevés, nous avons utilisé les modèles issus du projet ANR EMERGE (Deleuze et al., 2014).

2.2.3. Méthodes communes – Protocole pour les tests ressuyage

L'objectif est de connaitre le temps nécessaire après une coupe en feuilles pour que celles-ci se détachent des houppiers. Cette sous-tâche vise à apporter des réponses aux gestionnaires et aux exploitants sur une planification du débardage quand la coupe n'a pu se réaliser autrement qu'en période de végétation. Pour cela, elle doit apporter des éléments sur la période de ressuyage minimum obligatoire pour ne pas exporter les éléments minéraux contenus dans le feuillage. Les variables influençant la chute des feuilles sont a priori : l'essence, la période de coupe, la durée de ressuyage, la météo, éventuellement aussi la taille des arbres, le niveau de découpe. Un premier test a été mis en place à Champenoux en juin 2019 pour caler ce protocole TAMOBIOM – Ressuyage (protocole inédit qui devait être inventé et dimensionné pour la constitution des fagots, les périodes d'abattage opportunes et de pesées successives pour le suivi du ressuyage). A l'occasion des chantiers menus bois, et différentes réunions des partenaires du lot 2, ce protocole a évolué et a ensuite été appliqué sur les tests mis en œuvre en 2020 et 2021. Parmi les décisions, il a été acté qu'une seule coupe ne suffisait pas et nous avons donc étendu à 2 modalités testées : une coupe en juin (correspondant au début de la saison de végétation), et une coupe en septembre (correspondant à une fin de saison de végétation). Le nombre de fagot a été réduit à 7 pour chaque modalité et essences (ratio temps passé et précision

des résultats). Les fagots sont constitués de branchages de 3 m de long et de grosseurs différentes. Ils sont réalisés à partir de houppiers de plusieurs tiges d'une même essence. Les différents arbres sont mélangés pour la constitution de chaque fagot, de façon à éviter l'équation un arbre = un fagot. Le houppier est considéré, dans le cadre de l'essai, commençant à partir de 9 cm (et moins) sur le tronc principal et sur les branches pour assurer le prélèvement de rondelles jusqu'à 7 cm jusqu'au bout de l'essai. Les branchages sont disposés de façon à permettre le prélèvement, aux différentes dates, des rondelles de sections variées et des rameaux. La mise en place de l'essai a nécessité l'abattage d'une dizaine à une vingtaine de tiges selon les essences pour avoir assez de branchages (nombre à ajuster au moment de couper les arbres pour réaliser des fagots de 50 kg environ). Le reste des arbres (dont le diamètre dépassait 9 cm) étaient utilisés comme supports des fagots. Ceux-ci étaient disposés sur des filets destinés à récupérer les feuilles et, éventuellement, les branches de faible diamètre, avant et après secouage des fagots (pour mimer la prise en charge par un débardeur des javelles). La figure Lot2-Ressuyage illustre ces démarches.

Les variables suivies étaient le poids des feuilles détachées, à 3 dates différentes (2 pour la seconde modalité), après secouage des fagots ; la date de ressuyage complet (= date constatée avec les feuilles complètement détachées des fagots), le poids des menus-bois tombés après secouage des fagots, à 3 dates différentes (2 pour la seconde modalité). Les pesées sur le terrain étaient faites à l'aide de pesons, montés sur un tracteur. A chaque date, des échantillons de bois sont prélevés à chaque extrémité des fagots de façon à couvrir tous les diamètres de bois. Ces échantillons étaient ensuite traités au laboratoire (Tableau Lot2-Ressuyage)

Tableau Lot2-Ressuyage : Echantillons prélevés sur chaque fagot et traités au laboratoire.

Echantillon prélevés : rondelles et rameaux, chaque fagot est individualisé	Récolte après secouage, chaque fagot est individualisé
Pour les rondelles : - Diamètre de chaque rondelle - Poids frais et poids après séchage à 65 ° C - Déchiquetage et broyage fin pour analyse minéralogique Pour les rameaux avec feuilles prélevés, - Poids total - Séparation feuilles-rameaux - Poids feuilles avant et après séchage 65 °C - Poids rameaux avant et après séchage 65 °C - Déchiquetage et broyage fin pour analyse minéralogique pour chaque type.	- Poids frais total - Séparation feuilles, bois<1cm (rameau), bois 1-4cm, bois 4-7cm, bois > 7 cm - Poids de chaque catégorie avant et après séchage à 65 ° C - Déchiquetage et broyage fin pour analyse minéralogique

Figure Lot2-Ressuyage : de gauche à droite – de haut en bas - mise en place des filets pour récupérer les feuilles et les menus bois, mise en place de billons de bois puis des fagots (faciliter les manipulations ultérieures), pesées avec les pesons et le tracteur.

Tableau lot2-1 : Description des 8 chantiers mis en place pour les tests de modalités

Modalités testées	**Descriptif**	**Types de coupes / peuplements où cette mesure serait applicable**	**Remarques complémentaires décrites au démarrage du projet**	**Tests réalisés dans TAMOBIOM**
Coupe supplémentaire dans les houppiers (**modalité « épointage / arbres entiers»**)	Après abattage des arbres, voire regroupement en javelles, faire une intervention supplémentaire pour couper tout ou partie du houppier des arbres et les laisser sur place	Tous types de coupe	Le mode opératoire et l'impact financier lié seront variables suivant les peuplements (ex : coup de cisaille supplémentaire dans les petits houppiers en 1ère éclaircie, coup de tronçonneuse ou grappin découpeur dans les gros houppiers en coupe définitive, menus bois laissés au pied des arbres ou ramenés en bord de cloisonnements…). En fonction du positionnement dans le houppier où le coup de cisaille est donné, l'impact sur la quantité de menus bois laissés au sol sera plus ou moins important, pour un coût a priori identique.	**St Cyr en Val (45)**: coupe rase de taillis (bouleau, chêne rouge) avec pelle+disque en comparant : - Arbres entiers pour BE - Epointage systématique (vers 4 cm) **ONFE en FD Orléans** (45) : Arbres entiers vs Epointage systématique (vers 4 cm) au feller-buncher **FD de Chaux (39)** : ouverture de cloisonnement et 1ère éclaircie sélective au feller-buncher dans une futaie régulière de chêne : - Arbres entiers pour BE Epointage vers 7 cm, couplé à la mise à longueur des produits en javelles

Modalités testées	Descriptif	Types de coupes / peuplements où cette mesure serait applicable	Remarques complémentaires décrites au démarrage du projet	Tests réalisés dans TAMOBIOM
Ebranchage partiel + rémanents (laissés sur parcelle) ou cimes en BE (**modalité « ébranchage partiel »**)	Tout ou partie du tronc dans le houppier est ébranché sommairement. Après façonnage en général de billons BO voire BI dans la base du tronc, la cime est ébranchée sommairement et sera broyée pour du BE	Coupe réalisée par des machines de bûcheronnage, majoritairement en résineux. Plutôt des coupes rases de résineux où le volume de cimes est suffisant pour être valorisé en BE (également en coupe de taillis mécanisé)	A voir si dans les arbres feuillus abattus à la cisaille, un ébranchage partiel peut être réalisé avec cet outil. Cet ébranchage sommaire est également possible dans du taillis ou 1ère éclaircie feuillue.	**FD de Paroy (54)** : 1ère éclaircie à la machine de bûcheronnage dans une futaie régulière de chêne en comparant : - Arbres entiers pour BE ébranchés sur la partie basse - 2 ou 3 billons BE de 5 m ébranchés puis abandon du houppier supérieur **Ste-Anne (87)** : coupe rase de taillis de châtaignier à la machine de bûcheronnage en comparant : - Billons BO et BI classiquement ébranchés - Mix-billons ébranchés puis cime entière en BE

Modalités testées	Descriptif	Types de coupes / peuplements où cette mesure serait applicable	Remarques complémentaires décrites au démarrage du projet	Tests réalisés dans TAMOBIOM
Augmenter les temps de ressuyage sur parcelle entre abattage et débardage (**modalité «ressuyage – débardage différencié »**)	Tester différentes durées de ressuyage fonction des essences, de la période de coupe, des conditions climatiques sur la quantité de menus bois et feuillage effectivement laissée au sol en forêt	Tous types de coupe	L'observatoire GERBOISE a montré qu'au moins 10% des menus bois sont laissés sur le parterre de la coupe (= résidus d'exploitation). En augmentant le délai de ressuyage, ce pourcentage pourrait augmenter. Bien coordonner les travaux et périodes d'abattage et débardage (attention à la portance des sols !). Attention à l'endroit où tomberont le feuillage et menus bois : sur les cloisonnements et/ou dans les bandes boisées ? => à suivre lors de la quantification des résidus d'exploitation Evaluer l'effet de cette durée de ressuyage sur la qualité des plaquettes (taux de fines en particulier).	**FD de 3 Fontaines – L'Abbaye (51)** : Ouverture de cloisonnements dans une coupe d'amélioration (TSF chêne-charme en cours de conversion), 2 temps de ressuyage sur parcelle suivis : 2 mois, 11 mois **Port-sur-Saône (70)** : 3 temps de ressuyage différenciés sur parcelle : 3 mois, 6 mois, 9 mois
Ne récolter que l'un des compartiments entre souche et menus bois aériens (**modalité « extraction de souches / mise en fagots »)**		Coupe rase de pin maritime dans le massif landais	A titre prospectif, l'écorçage par la machine de bûcheronnage est mesuré sur ce chantier (sans réglage ni comparaison spécifique pour augmenter cet effet) :	**Pompogne (47)**: Coupe rase de pin maritime en Aquitaine en comparant : - Récolte des souches - Récolte totale de la biomasse aérienne en fagotant les branches

Modalités testées	Descriptif	Types de coupes / peuplements où cette mesure serait applicable	Remarques complémentaires décrites au démarrage du projet	Tests réalisés dans TAMOBIOM
Ecorçage (inclus dans **modalité « extraction de souches / mise en fagots »**	Un écorçage des arbres en bûcheronnage mécanisé se produit lors du passage des troncs dans les têtes. Cet écorçage est plus ou moins fort en fonction des essences, de la période (montée de sève) et des réglages de la tête (pressions des couteaux et rouleaux). En jouant sur ces pressions, on pourrait augmenter le taux d'écorçage.	Toutes coupes réalisées en bûcheronnage mécanisé	Attention à ne pas trop marquer les billons avec les picots des rouleaux de la tête. Attention à l'usure prématurée de la tête et à la surconsommation de gazole avec de tels réglages. Avant de tester des réglages spécifiques, il faudrait déjà quantifier les pertes moyennes d'écorces avec les réglages actuels des têtes de bûcheronnage.	A titre prospectif, l'écorçage est mesuré sur 1 chantier (sans réglage ni comparaison spécifique pour augmenter cet effet) : **Pompogne (47)**: Coupe rase de pin maritime en Aquitaine

Tableau lot2-2 : Description des 4 chantiers mis en place pour les tests de ressuyages

Equipe	INRAE - BEF	ONF	FCBA	INRAE - EFNO
Lieu du test	Champenoux (54)	Chaux (25 ou 39)	St-Gence (87)	Les Barres Nogent-sur-Vernisson ou Ste-Geneviève des Bois (45)
Année	2019	2020	2020	2021
Peuplement	Mélange futaie taillis ou jeune futaie	Plantation au stade première éclaircie	Taillis	Taillis de charme et peuplement de bouleau
Essences	Chêne, charme, tremble	Chêne	Châtaignier	Charme, bouleau

2.2.4. Résultats technico-économiques des chantiers

Les fiches de synthèse de chaque chantier sont jointes en annexe (TAMOBIOM : CR suivi de chantiers lot 2).

L'analyse économique a été réalisée grâce à la mercuriale de coûts techniques par heure horamètre suivante, co-validée avec les partenaires techniques :

	Catégorie	Coût technique 2022 (€/heure horamètre)
Bûcheron manuel	-	40
Machine de bûcheronnage	Moyenne (160 à 210 CV et 501 à 599mm de coupe)	130
	Grande (211 à 280 CV et 600 à 750 mm de coupe)	140
	Très grande (281 à 350 CV et 751 à 950 mm de coupe)	150
Pelle TP + disque	25-28 tonnes avec disque 30 – 40 cm de coupe	110
Feller-buncher	25-28 tonnes avec disque 30 – 40 cm de coupe	150
Pelle TP + cisaille	14 tonnes avec cisaille 30-40 cm de coupe	90
Pelle TP avec grappin scie	9 tonnes avec grappin découpeur	70
Porteur	Petit (moins de 10 tonnes de charge utile)	85
	Moyen (11 à 13 tonnes de charge utile)	90
	Gros (14 à 17 tonnes de charge utile)	100
Broyeur à plaquettes forestières	Type Albach Diamant 2000	415
	Type broyeur sur camion Pezzolato PTH 1400/1000	290

2.2.4.1. Modalité épointage / arbres entiers

Chantiers concernés : FD Chaux, St Cyr en Val, FD Orléans

FD de Chaux

Productivité des différentes opérations, (calculée par heure productive (hpo), temps issu des chronométrages des observations instantanées des engins réalisés lors des suivis de chantier).

		Modalité classique **Arbres entiers**	Modalité **épointage**	Delta épointage / classique
Abattage	Productivité (tonnes brutes/hpo)	22,4	21,2	- 5 %
	Distance parcourue (ml/hpo)	146,3	137,9	- 6 %

Débardage	Productivité (tonnes brutes/hpo)	12,9	10,7	- 17 %
	Surface parcourue (ha/hpo)	0,25	0,25	
Broyage	Productivité (tonnes brutes broyées/hpo)	63,8	65,5	+ 3 %

Qualité de plaquettes

	Modalité arbres entiers	Modalité épointage
Volume (tonnes brutes broyées)	107,8	81,7
Classes de granulométrie principale	P 30	P 30
Humidité moyenne	34,36 %	34,05 %
Taux de fines	4 %	4 %
Taux de cendres	1,8 % sec	1,9 % sec
PCI	5 051 kWh/to	5 106 kWh/to

Les plaquettes produites ont une « qualité de combustible similaire ».

Simulation économique

		Modalité arbres entiers	Modalité épointage
Coût de revient technique (€/hhm)	Abattage	150	150
	Débardage	90	90
	Broyage	415	415
Productivité moyenne (t/hhm)	Abattage	21	20
	Débardage	12	10
	Broyage	51	52
Coût technique par machine (€/t)	Abattage	7,3	7,7
	Débardage	7,3	8,9
	Broyage	8,1	7,9
Coût technique par système	**€ par tonne**	**22,8**	**24,5**

St Cyr en Val

Productivité des différentes opérations

Seules les données de l'abattage sont disponibles.

		Modalité Classique **Arbres entiers**	Modalité **Épointage systématique**	delta épointage/ classique
Abattage	Productivité (m^3/hpo)	23,38	Méthode d'épointage n°1 17,64	- 25%
	Productivité (m^3/hpo)	26,03	Méthode d'épointage n°2 17,77	- 32 %
	Nombres de tiges (nb/hpo)	310	305	- 2 %

Qualité de plaquettes

	Modalité Classique **Arbres entiers**	Modalité **Epointage systématique**
Humidité moyenne	33,1 %	32,9 %
Classe de granulométrie principale	P 45	P 45
Taux de fines	3 %	2 %
Taux de cendres	1,6 %	1,7 %
PCI	4 911 kWh/to	5 022 kWh/to

La qualité de plaquettes est similaire dans les deux modalités.

Simulations économiques

Les données ne sont pas reprises dans cette synthèse en raison d'une incertitude sur certaines valeurs annoncées par l'ETF.

FD d'Orléans 45

Productivité des différentes opérations

Seules les données de l'abattage sont disponibles.

		Modalité classique	Modalité épointage	delta épointage/ classique
Productivité moyenne (m3/hpo)	Abattage	36,5	20,5	-43 %

Qualité de plaquettes

Aucune donnée n'est disponible.

Simulation économique

Il n'y a pas eu d'étude économique, car seules les données de l'abattage sont disponibles.

Enseignements généraux sur les chantiers de la modalité épointage / arbres entiers

Derrière le mot clé « épointage » se cachent des différences d'interventions que les cas d'étude ne permettent pour l'instant que d'effleurer.

2.2.4.2. Modalité ébranchage partiel

Chantiers concernés : Ste Anne / FD Parroy

Ste-Anne (100 % bois court vs bois court + cimes BE)

Remarque : ce chantier a été initialement prévu dans le cadre du projet MECAFOX et a été intégré à TAMOBIOM en raison des difficultés à trouver des chantiers

Productivité des différentes opérations

		Modalité 1 Bois courts	Modalité 2 Bois courts + cimes BE	Delta tronçons cimes BE / bois courts
Abattage	Productivité (tonnes brutes/hpo)	8.7	9.8	+ 13 %
Débardage	Productivité (tonnes brutes/hpo)	10.1	12	+ 18 %

Remarque : bois courts et BE n'ont pas été débardés avec le même matériel dans la modalité 2

Qualité de plaquettes

Aucun comparatif n'est possible compte tenu du fait qu'une seule modalité comporte du BE.

Simulation économique

Il n'y a pas eu d'étude économique compte tenu du fait qu'une seule modalité comporte du BE. De plus au final deux porteurs différents ont été utilisés pour le débardage, avec un écart important sur la capacité de charge.

FD Parroy (arbres entiers vs tronçons BE avec rémanents)

Productivité des différentes opérations

		Modalité Arbres entiers	Modalité tronçons BE & rémanents	Delta tronçons BE & rémanents / arbres entiers
Abattage	Productivité (m^3/hpo)	4,9	3,6	- 27 %
Débardage	Productivité (tonnes brutes/hpo)	21,6	15,5	- 28 %
Broyage	Productivité (tonnes brutes broyées/hpo)	70,1	66,4	- 5 %

Qualité de plaquettes

	Modalité arbres entiers	Modalité tronçons BE & rémanents
Volume (tonnes brutes broyées)	81	54,2
Classes de granulométrie principale	P45	P45
Humidité moyenne	30,5 %	27,8 %
Taux de fines	2 %	1 %
Taux de cendres	1,6 % sec	1,1 % sec
PCI	5 058 kWh/to	5 078 kWh/to

Les plaquettes produites ont une « qualité de combustible similaire ».

Simulation économique

		Modalité arbres entiers	Modalité tronçons BE & rémanents
Coût de revient technique (€/hhm)	Abattage	120	
	Débardage	90	
	Broyage	415	
Productivité (t/hhm)	Abattage	4,5	3,3
	Débardage	20,5	14,7
	Broyage	56,1	53,1
Coût technique par machine (€/t)	Abattage	24,5	33,3
	Débardage	4,2	5,8
	Broyage	7,4	7,8
Coût technique par système	**€ par tonne**	**36,1**	**38,1**

Enseignements généraux sur les chantiers de la modalité ébranchage partiel

Le surcoût économique est de + 5% pour la modalité tronçons BE + rémanents.

2.2.4.3. Modalité ressuyage - débardage différencié

Chantiers concernés : FD Trois Fontaines / Port sur Saône

Chantier FD Trois Fontaines

Productivité des différentes opérations

		Modalité t+3 mois	Modalité t+11 mois	Delta t+11 mois / t + 3 mois
Abattage	Productivité (tonnes brutes / hpo)	7,9		
	Distance parcourue (mètres linéaire / hpo)	190		
Débardage	Productivité (tonnes brutes / hpo)	17	23,7	+ 39 %
	Surface parcourue (ha / hpo)	0,58	0,88	+ 52 %
Broyage	Volume broyé (tonnes brutes broyées/hpo)	47	44,4	- 6 %

Qualité de plaquettes

	Modalité t+3 mois	Modalité t+11 mois
Volume (tonnes brutes broyées)	80,38	80,58
Classe de granulométrie principale	P 45	P45
Humidité moyenne	36,8 %	35,3 %
Taux de fines	4 %	6 %
Taux de cendres	1,2 % sec	1 % sec
PCI	4 973 kWh/to	5 076 kWh/to

Du point de vue d'un producteur de plaquettes forestières, qui observe particulièrement le volume broyé, la taille de plaquettes, l'humidité et le taux de fines (exigences négociées avec son client), les deux modalités sont très proches en termes de valeurs. Seul le taux de fines de la modalité t + 11 mois (6 %) dépasse le seuil préconisé de 5 % du CIBE. Néanmoins, les plaquettes produites ont une « qualité de combustible très proche ».

Simulation économique

		Modalité t+3 mois	Modalité t+11 mois
Coût de revient technique (€/hhm)	Abattage	90	
	Débardage	100	
	Broyage	290	
Productivité moyenne (t/hhm)	Abattage	7,3	
	Débardage	16,2	22,5
	Broyage	37,6	35,5
Coût technique par machine (€/t)	Abattage	12,4	
	Débardage	6,2	4,4
	Broyage	7,7	8,2
Coût technique par système	**€ par tonne**	**26,3**	**25,0**

Port sur Saône

Productivité des différentes opérations

		T+3 mois	T+6 mois	T+9 mois
Abattage	Productivité (tonnes brutes / hpo)	4,4		
	Distance parcourue (mètres linéaire / hpo)	85		
Débardage	Productivité (tonnes brutes / hpo) *écart test vs T+3*	15,1	14,2 *- 6 %*	10,3 *- 47 %*
	Surface parcourue (ha / hpo)	0,43	0,53	0,63
Broyage	Volume broyé (tonnes brutes broyées / hpo)	77,7	67,2	86

Qualité de plaquettes

	T + 3 mois	T +6 mois	T + 9 mois
Volume (tonnes brutes broyées)	89,76	52,66	39,37
Humidité moyenne (données chaufferie)	38,8 %	40,4 %	41,8 %
Classes de granulométrie principale	P 45	P 45	P 45
Taux de fines	1 %	1 %	5 %
Taux de cendres	1,1 % sec	1,1 % sec	1,1 % sec
PCI	5 006 kWh/to	5 041 kWh/to	4 982 kWh/to

Les trois modalités sont très proches en termes de valeurs. Seul le taux de fines de la modalité T+9 mois est tangent au seuil acceptable de 5 % (référence courante professionnelle). Cela témoignerait de bois « sales » (avec présence de terre).

Simulation économique

		Modalité t+3 mois	Modalité t+6 mois	Modalité t+9 mois
Coût de revient technique (€/hhm)	Abattage	79	79	79
	Débardage	85	85	85
	Broyage	415	415	415
Productivité moyenne (t/hhm)	Abattage	4,0	4,0	4,0
	Débardage	14,3	13,5	9,8
	Broyage	62,2	53,8	68,8
Coût technique par machine (€/t)	Abattage	19,5	19,5	19,5
	Débardage	5,9	6,3	8,7
	Broyage	6,7	7,7	6,0
Coût technique par système	**€ par tonne**	32,1	33,5	34,2

2.2.4.4. Modalité extraction souches / mise en fagots des branches

Chantiers concernés : Pompogne

Avertissement : la récolte de souches n'est réalisée que sur une zone géographique restreinte donc les résultats ne sont pas extrapolables à l'échelle nationale.

Productivité des différentes opérations

		Modalité Mise en fagot des branches	Modalité souches
Abattage et débardage du bois d' œuvre et du BI	Abattage	31.5 m^3 / heure horamètre	
	Débardage	13.7 m^3/heure horamètre	
Façonnage du compartiment Bois énergie	Volume	7.09 tonnes brutes / hpo	13.19 tonne brutes / hpo
Débardage du compartiment bois énergie	Volume	11.44 tonnes fraiches brutes / hpo	11.7 tonnes ressuyées brutes/hpo

Qualité de plaquettes

	Modalité Mise en fagot des branches	Modalité Souche
Humidité moyenne (%)	49,8 %	30,8 %
Volume (tonnes brutes broyées)	Non mesuré	174,4
Classes de granulométrie principale	Non mesuré	Non mesuré
Taux de fines (%)	Non mesuré	Non mesuré
Taux de cendres	Non mesuré	11,4 %
PCI brut	Non mesuré	10 660 J/g
PCI sec	Non mesuré	16 490 J/g

Taux de cendres : % en masse sur produit sec, selon CEN/TS 14961

Simulation économique

Par décision du partenaire technique, nous n'avons pas pu suivre les paramètres économiques sur ce chantier.

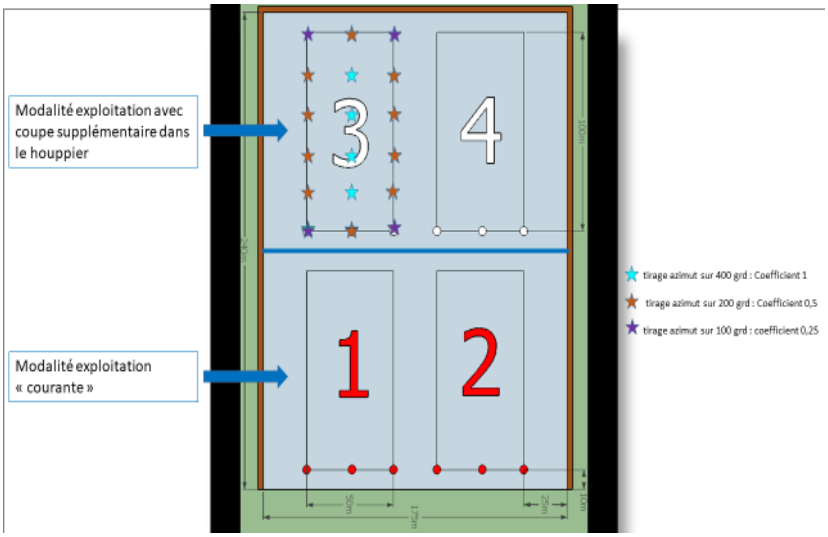
2.2.5. Résultats chantiers Menu bois

2.2.5.1. Forêt de Chaux

Le peuplement et les modalités testées

Il s'agit d'une 1ère éclaircie dans plantation de chênes sessiles, avec systématiquement l'enlèvement d'une ligne sur 5 (ouverture de cloisonnement) et une sélective sur les autres lignes. Les caractéristiques du peuplement avant l'expérimentation étaient de 1296 tiges/ha pour une surface terrière de 24m2/ha et une hauteur dominante de 16m et une hauteur moyenne de 15m. Les essences sont majoritairement chênes (de 64 à 99 %) avec du charme, du bouleau et du tremble. Le sol est de texture à dominance limoneuse avec un diagnostic INSENSE qui indique une sensibilité moyenne à partielle et diagnostic PROSOL qui indique une sensibilité forte au tassement des sols. La parcelle fait 8,8 ha dont 4,2ha ont été consacrés à l'expérimentation selon une modalité classique pour ce type de peuplement et à ce stade de maturité à savoir la récolte d'arbres entiers et une modalité d'épointage où les arbres sont abattus puis épointés par « un coup supplémentaire de disque » dans les branches terminales, au fin bout 7 cm, repéré approximativement par le conducteur (à environ 12m de hauteur en moyenne, soit 3 m de différence avec la hauteur moyenne des arbres). Le choix d'exploitation a été porté sur l'utilisation d'un feller buncher, jugé plus adapté pour réaliser des découpes dans les houppiers que la « pince coupante », du fait de la manipulation de plusieurs tiges à la fois.

Unités expérimentales et protocole appliqué



Les 4,2 ha expérimentaux ont été divisés en 4 unités expérimentales d'environ 1 ha (2 UE par modalités). Pour chaque UE, 18 transects ont été réalisés avec un tirage aléatoire des azimuts avec une correction pour tenir compte du fait que certains tirages étaient contraints (transects qui tombaient en dehors de l'unité expérimentale – cf figure Chaux-1 – les points de départs sont signalés par une étoile et la pondération appliquée dépend de la position du point de départ). Chacun des transects fait 10 m de longueur pour une estimation du volume menus bois 4-7 cm et 7-22 cm, et sur chacun d'entre eux, 2 mini-transects de 50 cm ont été localisés aléatoirement pour une estimation du volume des menus bois 0-4 cm. Les calculs de volume des différentes catégories de menus bois suivent la méthode présentée en introduction. Un inventaire après coupe permet de déterminer le prélèvement effectué dans le peuplement. Cet inventaire est réalisé dans l'interbande, sur 9 placettes de 140 m2 par UE (Essence, Diamètre 1.30 m, Diamètre 0 m ou diamètre souche (pour la détermination des diamètres 1,30m des tiges coupées dans l'interbande et dans le cloisonnement), Tige exploitée ou non). Un échantillonnage de tiges, par essence et par classe de diamètre est mesuré en hauteur totale et hauteur de décrochement (hauteur à laquelle le diamètre du tronc décroit fortement du fait par exemple la présence d'une fourche – protocole EMERGE). Le prélèvement de l'ouverture des cloisonnements est calculé à partir de l'inventaire des souches. La suite de modèles utilisés pour les calculs de volume, biomasse et minéralomasse est celle d'EMERGE.

Résultats

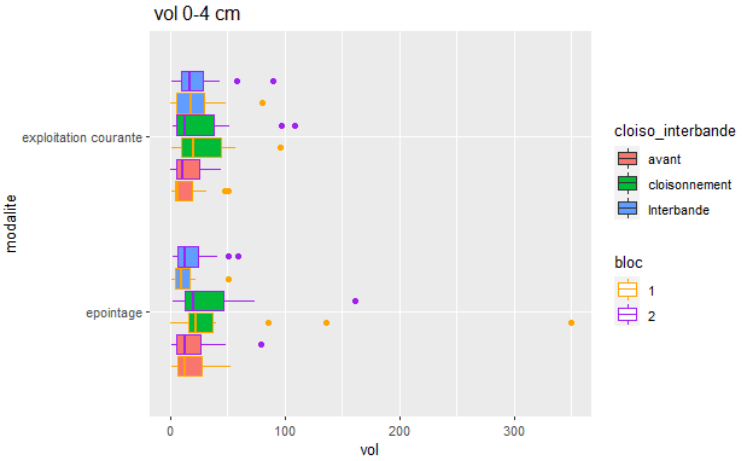
Les analyses dendrométriques (Tableau – Chaux 1) montrent un volume avant coupe d'environ 230m3/ha avec une légère différence entre les deux modalités (16m3/ha de moins pour la modalité épointage avant coupe) traduisant une hétérogénéité du peuplement, bien que non significative, à l'installation de l'expérimentation (essentiellement due à l'UE 4). La proportion du bois sur pied avant coupe est de 15% pour le compartiment 0-4cm, 12% pour le compartiment 4-7 cm et 71% pour le 7-22cm, reflétant le caractère jeune de ces parcelles. Le prélèvement moyen est de 30,3% du volume total (29,3% pour la catégorie 0-4cm, 28,6% pour 4-7cm, et 30,8% pour 7-22cm). Les différences de prélèvements sont minimes et non significatives entre les deux modalités (quelques soient les compartiments mais avec une gradation logique : de -0,4% pour la catégorie 7-22cm à -1,3% pour la catégorie 0-4cm pour la modalité épointage). Ces pourcentages sont très similaires pour la biomasse (28 à 31% de prélèvement) et pour la minéralomasse (29 à 30% de prélèvement quel que soit l'élément considéré), avec

quelques différences liées à la densité des bois ou de teneurs en minéraux dans les bois des différentes essences prélevées. En résumé, l'analyse dendrométrique (inventaires x modèles de volume, biomasse minéralomasse) donne des différences entre les modalités non significatives et très faibles même si le bilan est en faveur de la modalité épointage. La structure du peuplement (jeune avec forte proportion de bois de faible diamètre et 3 m laissés au sol) permet d'expliquer en grande partie ce résultat.

Tableau – Chaux 1 – Volumes (m3/ha) pour les 4 Unités expérimentales (total, compartiments 0-4 cm, 4-7 cm, et 7-22cm). Les chiffres entre parenthèse indiquent un ecartype.

Unité expérimentale	vol/ha moyen (m3) avant coupe +- un écart type	vol/ha moyen (m3) coupé +- un écart type	Catégorie 0-4 cm avant coupe	Catégorie 0-4 cm coupé	Catégorie 4-7 cm avant coupe	Catégorie 4-7 cm coupé	Catégorie 7-22 cm avant coupe	Catégorie 7-22 cm coupé
Courante 1	240 (38)	71 (20)	36,2 (9,6)	10,4 (2,3)	28,7 (7,7)	8,2 (1,5)	170,2 (26,1)	51,1 (17,3)
Courante 2	232 (36)	74 (27)	32,5 (4,2)	10,1 (3,0)	27,9 (6,5)	8,3 (1,6)	165,9 (33,0)	53,1 (20,4)
Epointage 3	235 (51)	75 (27)	36,3 (9,3)	10,9 (3,7)	29,8 (6,3)	8,8 (2,1)	165,3 (37,5)	54,1 (20,6)
Epointage 4	205 (30)	57 (14)	29,4 (4,7)	8,0 (2,0)	26,8 (6,4)	7,1 (2,0)	144,3 (21,8)	41,2 (11,4)

Les analyses des bois morts au sol montrent une très grande variabilité du volume avant et après la mise en place de l'expérimentation, quelle que soit la catégorie de bois (exemple pour 0-4cm Figure Chaux-2). Une analyse spatialisée en distinguant les cloisonnements et les inter bandes montre une différence significative et positive pour la modalité épointage pour la catégorie 0-4 cm et 4-7 cm dans les cloisonnements. Cela est logique dans la mesure où les javelles et les épointages sont constitués dans les cloisonnements mais cela pose un souci pour la gestion car les éléments minéraux laissés au sol ne sont pas complètement disponibles pour les arbres situés dans les interbandes (Tableau Chaux 2). Enfin, si un bilan est fait au niveau de l'écosystème sur la situation en tenant compte du bois mort au sol avant coupe et du bois exporté versus le bois mort au sol après la coupe, le ratio est de l'ordre de 100% pour le compartiment 0-4cm sans différence entre les deux modalités, alors qu'il aurait été attendu un différentiel plus fort en faveur de la modalité épointage. Lorsque la catégorie 4-7 est incluse dans le calcul (0-7 cm), la tendance devient favorable pour la modalité épointage (+16%) mais reste non significative compte tenu de toutes les variabilités exposées précédemment et loin des 30% qui sont préconisés dans le guide de GERBOISE compte tenu des diagnostics effectués.



Modalité. Avant après. Distinguo cloisonnement / Interbande	vol/ha 0-4cm (m3) +- un écart type	Groupe (Test de Newman Keuls)	vol/ha 4-7cm (m3) +- un écart type	Groupe (Test de Newman Keuls)
Exploitation courante avant	14,3 (12,6)	c	2,9 (3,0)	bc
Epointage avant	16,7 (14,1)	c	1,5 (2,0)	c
Exploitation courante cloisonnement	29,3 (31,4)	b	4,5 (6,0)	b
Epointage cloisonnement	41,4 (63,2)	a	8,4 (10,1)	a
Exploitation courante Interbande	21,5 (19,6)	bc	2,3 (3,7)	bc
Epointage Interbande	15,9 (14,8)	c	2,6 (3,9)	bc

2.2.5.2. Chantier Saint Cyr

Le peuplement et les modalités testées

Il s'agit d'une coupe totale du taillis/sous-étage dans un peuplement de type mélange futaie taillis très pauvre en réserves. Les caractéristiques du peuplement avant l'expérimentation étaient de 5830 tiges/ha (toutes tiges à partir de 2 cm de circonférence) pour une surface terrière de 31 m^2/ha et une hauteur dominante de 20 m. Il était majoritairement constitué de chêne rouge, bouleau, chêne pédonculé et pin sylvestre (respectivement 39%, 29%,

18% et 11% de la surface terrière) et d'essences diverses (tremble, charme, châtaignier). Le sol est de texture limono-sableuse à sablo-limoneuse sur 0-10 cm de profondeur et sablo-argileuse en profondeur avec une sensibilité forte selon le diagnostic INSENSE et moyenne selon le diagnostic PROSOL. L'abattage a été réalisé en feuilles (fin juin début juillet) avec un feller buncher qui est le système habituellement utilisé par l'entreprise dans la région pour ce type de coupe. L'expérimentation menée sur 3 ha a porté sur deux modalités : la récolte par arbres entiers appliquée classiquement pour des coupes rases de taillis (modalité courante) et une modalité dite « d'épointage » où une découpe supplémentaire a été pratiquée au sol avec le disque à l'extrémité des tas de tiges préalablement redécoupées en 2, avec un positionnement approximatif du disque par le conducteur de la machine.

Unités expérimentales et protocole appliqué

Les 3 ha ont été divisés en 2 zones de 1 ha en excluant des zones tampons (Figure StCyr 1). Sur chaque zone, 30 transects ont été réalisés avant abattage et 35 après débardage avec tirage aléatoire des azimuts et une correction pour les transects positionnés en bordure de l'unité d'expérimentation.

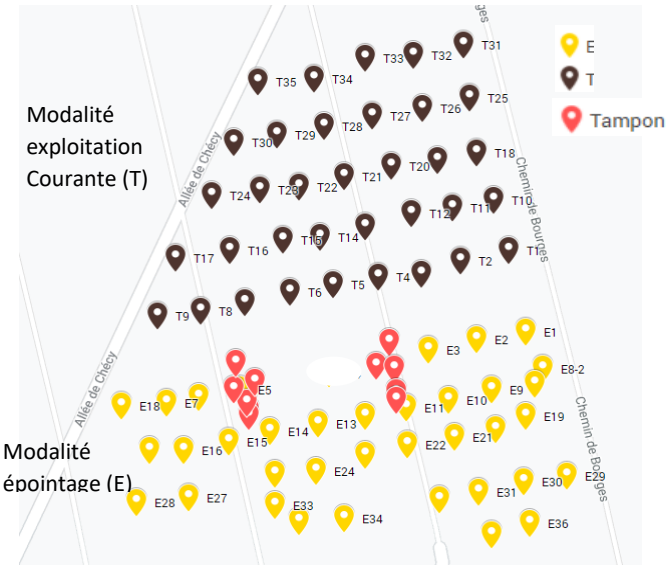


Figure St-Cyr 1 Localisation des transects d'inventaire du bois au sol après abattage

Sur chaque transect, un relevé au sol exhaustif des menus bois de diamètre 4-7 cm et des bois 7 cm a été effectué sur la totalité de la longueur (10 m), et un comptage des menu bois 0-4 cm a été réalisé sur 2 mini-transects de 50 cm de long, localisés systématiquement à 1 m et 6 m. Le volume et la biomasse de chacune des trois catégories de bois ont ensuite été calculés suivant la méthode présentée en introduction.

Un inventaire des tiges sur pied, réalisé avant coupe (essence, diamètre à 1,3m, hauteur totale hauteur de décrochement sur un échantillon de tiges), a permis d'évaluer l'hétérogénéité du peuplement pour définir l'emplacement optimal des deux unités d'expérimentation puis de calculer le volume coupé pour chaque unité. Il a été réalisé sur 5 placettes de 400 m² dont 2 localisées dans la zone « courante » et 3 en zones « épointage ». Les volumes de bois coupé par catégorie de diamètre ont été calculés en se référant au modèle EMERGE, adapté pour les petits diamètres au contexte des peuplements de la région Centre Val de Loire dans le projet DEFIFORBOIS.

Résultats

Les analyses dendrométriques (Tableau St Cyr 1) montrent un volume avant coupe d'environ 260 m³/ha avec une différence entre les deux modalités traduisant une hétérogénéité du peuplement (30 m³/ha en plus pour la modalité épointage avant coupe). Toutes les tiges du taillis ayant été prélevées, le volume de bois coupé correspond exactement au volume sur pied avant coupe. La proportion du compartiment 0-4 cm des arbres est similaire dans les deux modalités (21% pour la modalité épointage et 22% pour la modalité courante). Pour le compartiment 4-7cm on note une différence entre les deux modalités en faveur de la modalité courante (38%) par rapport à la modalité épointage (26%). La proportion de l'ensemble des menus bois (0-4 et 4-7 cm) est donc plus importante pour la modalité courante (+12%) tandis que les bois de diamètre supérieur à 7 cm représentent une part plus forte dans la modalité épointage. Ceci peut s'expliquer en partie par la présence de grosses cépées de chêne rouge sur une partie de la modalité épointage qui n'a pu être compensée lors de l'implantation de l'expérimentation.

Tableau StCyr 1 Volume (m3/ha) pour les 2 modalités (total, compartiments 0-4cm, 4-7cm et >7 cm)

Unité expérimentale	Vol/ha moyen (m3) avant coupe	Vol/ha moyen (m3) coupé	Catégorie 0-4 cm coupé	Catégorie 4-7 cm coupé	Catégorie 7-22 et >22 coupé
Courante	243,6	243,6	52,7	92,0	98,9
Epointage	273,1	273,1	58,4	71,6	143,1

Les analyses de bois morts au sol avant coupe montrent pour les deux modalités un volume moyen plus important de la catégorie de bois 0-4 cm (respectivement 14,9 ±6,3 et 17,1 ±8,2 m³/ha pour courant et épointage) par rapport à la catégorie 4-7 cm (6,2 ±3,1 et 7,3 ±6,1 m³/ha). Si pour le 0-4 cm il n'y a pas de différence significative entre les deux modalités, il y en a pour le 4-7 cm (Figure StCyr 2A), certainement en raison des différences de composition des deux zones.

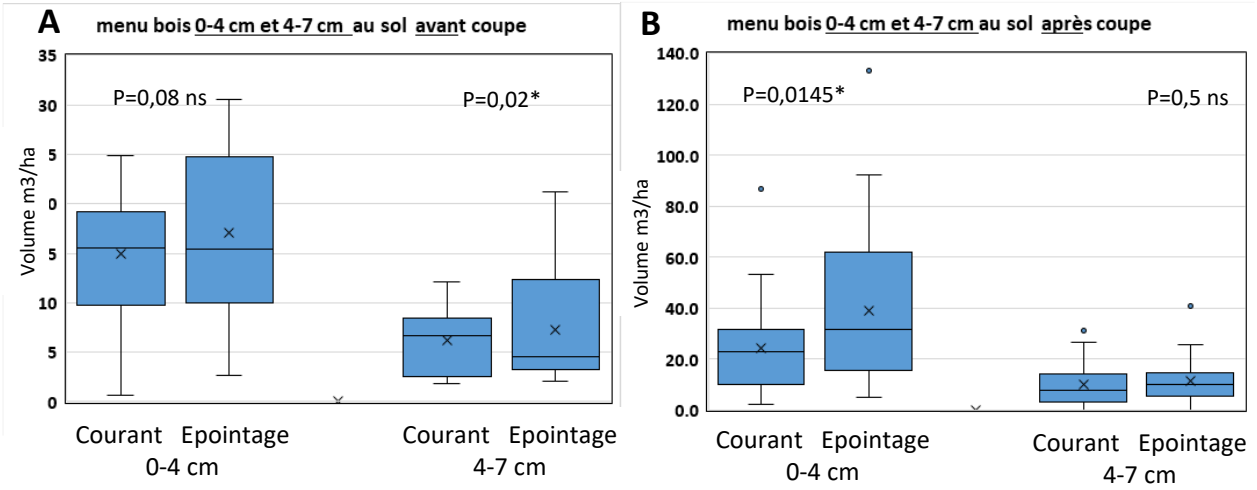


Figure StCyr 2 A et B Volume de menu bois au sol avant coupe (A) et après coupe (B)

Par contre, l'analyse après coupe et débardage montre pour la catégorie de bois 0-4 cm un volume moyen significativement plus important pour la modalité épointage (39,1 ±29,8 m3/ha) par rapport à la modalité courante (24,6 ±17,5 m³/ha) alors qu'elle ne révèle aucune différence pour la catégorie 4-7 cm dont le volume moyen est proche de 10 ±9 m3/ha pour les deux modalités (Figure StCyr 2B). Si l'on calcule le pourcentage de résidus de coupe laissé en faisant la différence entre les menus bois au sol après coupe et avant divisée par les menus bois coupés, on voit que dans la modalité où l'épointage a été réalisé le ratio pour l'ensemble des menus bois (0-7cm) est de 21% contre seulement 9% dans la zone témoin (Tableau StCyr2).

Tableau StCyr 2 Pourcentage de résidus pour les 2 modalités par catégorie 0-4cm, 4-7cm, >7 cm, Total et 0-7cm

Unité expérimentale	% Résidus Cat 0-4	% Résidus Cat 4-7	% Résidus Cat >7	% Résidus Total	% Résidus Cat 0-7
Courante	19%	4%	2%	6%	9%
Epointage	39%	6%	5%	13%	21%

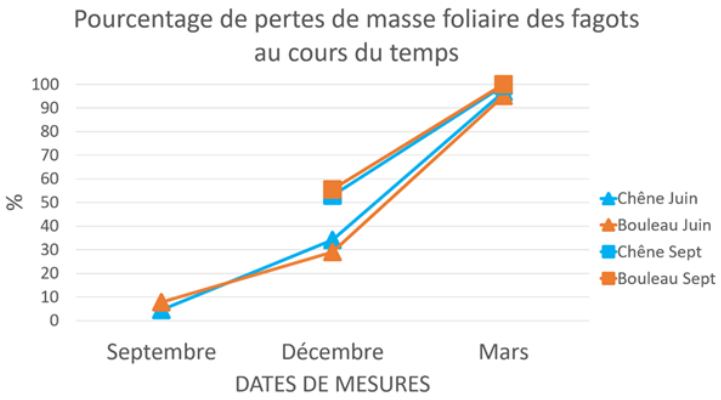
On peut donc conclure que la modalité d'épointage a permis d'augmenter la quantité de menu bois laissée au sol de 9% à 21% (soit +13,4 m³/ha), essentiellement pour la catégorie 0-4 cm (+12,8 m³/ha). Toutefois le test d'épointage tel qu'il a été réalisé n'a pas permis d'atteindre 30% de résidus laissé et encore moins 100% comme cela est préconisé dans le guide GERBOISE pour un tel site sur sol fortement sensible. Une des explications tient probablement au fait que l'épointage pratiqué sur les tas au sol ne permet pas une découpe de toutes les branches au fin bout 7 cm car les tiges étant de hauteur très variables, les branches se trouvant dessous, à l'intérieur ou sur le côté des tas et non à leur extrémité ne peuvent être coupés en procédant de cette manière.

2.2.6. Résultats chantiers Ressuyage

2.2.6.1. Forêt de Champenoux

A la mise en place des fagots, le taux d'humidité oscillait entre 37 et 42% (ratio Bsec/Bvert de l'ordre de 0.6) pour le bois et 46 à 67 % pour les feuilles. Lors de la première pesée, au bout l'un mois, les pertes en masse sèche sont nulles (Chêne, Charme) et de 4% pour le tremble. Les fagots ont perdu de l'eau. Les taux d'humidité sont passés à 19% (Chêne, Tremble) et à 22% (Charme). Lors de la deuxième pesée, 7 mois après la mise en place. Avant secouage les pertes vont de 11% (Chêne) à 18% (Tremble), après secouage, elles sont de 21% (Chêne), 24% (Charme), et 38% (Tremble). Les pertes sont essentiellement les feuilles (il n'y a plus de feuilles dans les tas après secouage) et quelques rameaux. Les coefficients de variation (écart-type des pertes/moyenne des pertes) sont relativement faibles (10% Charme, 22% Tremble, 28% Chêne). Les poids humides sont supérieurs à ceux mesurés en juillet (l'essentiel de la perte en eau a eu lieu entre juin et juillet). Ils ont repris de l'humidité entre temps (taux d'humidité de 38 à 40%). Pendant cette période de 6 mois, seules les feuilles sont tombées et encore après secouage des fagots.

2.2.6.2. Forêt de Chaux



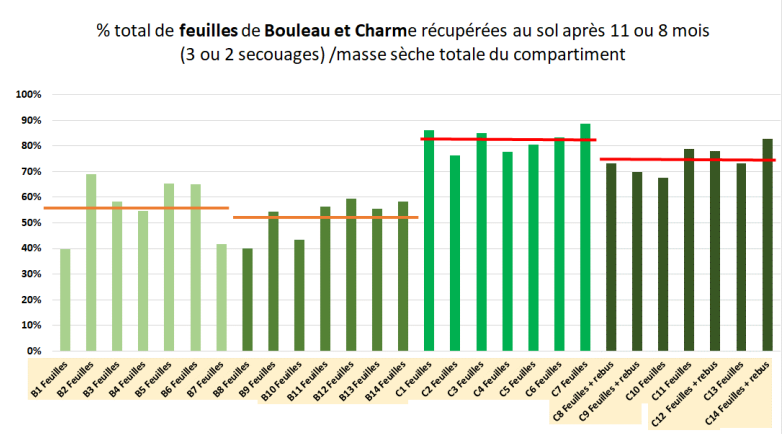
En se concentrant sur les feuilles (objectif principal du test de ressuyage), la modalité 1 « coupe en juin », le ressuyage est très insuffisant en septembre et en décembre. Il est nécessaire d'attendre mars pour avoir la quasi-totalité des feuilles tombées. Pour la modalité 2 « coupe en septembre », le ressuyage est insuffisant en décembre. Dans les deux cas, l'effet essence (bouleau et Chêne) n'est pas présent. Pour ce cas de figure, alors que 2020 a été sèche, les résultats de l'essai indiquent que cette méthode ne répond pas aux attentes des gestionnaires, il n'est pas possible de faire la coupe en début de saison de végétation et d'entreprendre le débardage en fin d'été. Dans les 2 cas (coupe juin et coupe septembre), il semble qu'il faille attendre mars pour pouvoir envisager un débardage, soit un minimum de 6 mois après la coupe. La durée de référence de 3 mois recommandée par le guide GERBOISE est donc insuffisante ici. Les coupes faites en feuilles concernent principalement les stations hydromorphes (donc des sols impraticables jusqu'à 6 mois de l'année) et il faudrait attendre une année pour pouvoir évacuer le bois énergie (abattage année n et débardage année n+1), cette solution n'est pas envisageable car les javelles de bois seraient alors bien dégradées. Le ressuyage n'est donc pas recommandé comme solution pour répondre à la problématique de l'export des feuilles.

2.2.6.3. Nogent sur Vernisson

La cinétique des chutes de feuilles montre une nette différence entre les deux essences (Bouleau et Charme) en ce qui concerne le % de chute des feuilles. La proportion des feuilles tombées au sol pendant le suivi est beaucoup plus grande pour le Charme que pour le Bouleau. Après 8 mois de ressuyage, le charme a un % de perte bien supérieur au bouleau, respectivement 74,8% et 49%, et cela quelle que soit la date de coupe (juin ou septembre).

Pour les 2 essences, c'est au bout de 4 mois qu'on constate la chute des feuilles la plus efficace mais celle-ci n'atteint que 60% pour le Charme et seulement 31% pour le Bouleau.

Pour les brindilles, il a fallu généralement attendre 8 et parfois 11 mois pour que la chute devienne plus importante. Au bout de 4 mois et souvent 8 mois, moins de 10% des brindilles étaient tombées pour les deux essences quelle que soit la date de coupe. Par ailleurs on note que la chute de brindilles a été plus forte pour les fagots coupés en Mai qui ont ressuyés tout l'été (chaleur et pluie) par rapport à ceux coupés en septembre.



Comme pour les deux autres chantiers, la dynamique des chutes de feuilles (et de brindilles pour Champenoux et Nogent) n'est pas celle espérée des recommandations GERBOISE, et il faudrait attendre beaucoup plus que les 3 mois préconisés. La date de coupe, début ou fin d'été (juin, septembre) ne modifie pas ces conclusions.

2.2.7. Synthèse des résultats pour les deux sous-taches

Synthèse des résultats pour les deux sous-taches

Test de rétention des Menus – bois *in situ* : sur l'ensemble des chantiers étudiés, même s'ils ne sont pas tous présentés de façon détaillée, il apparaît une hétéréogénéité avant coupe tant sur les peuplements sur pied (volume, composition en essence, proportion des compartiments des menus bois 0-4, 4-7, 7-22 cm) que sur les bois morts au sol. L'impact des modalités testées est perceptible sur les coupes totales (ou quasi totales, ex. StCyr), mais dans le cas des coupes très partielles (ex. Chaux, 1ère éclaircie), leur effet est difficile à séparer de celui de la variabilité car trop peu d'arbres sont coupés par rapport au volume de menus-bois morts au sol préexistant.

Les modalités de coupe testées en coupe rase (même si elles vont bien dans le sens de plus de bois laissé) s'avèrent insuffisantes par rapport aux recommandations du guide GERBOISE, à savoir 30% ou 100% de menus bois laissés sur place. Dans les coupes partielles, l'effet des modalités testées ne peut pas pour le moment être statistiquement appuyé du fait de la variabilité initiale. Par ailleurs, le surplus de menus bois est en général observé sur les cloisonnements, ne permettant pas aux arbres des inter-bandes de profiter pleinement des apports supplémentaires en nutriments. Le protocole TAMOBIOM-Menus bois (INRAE Nogent, revu et adopté par tous les participants du lot 2 au début du projet) a cependant permis de bien mieux apprécier les modalités testées par rapport au protocole de GERBOISE. Mais dans le cadre d'une opérabilité sur le terrain, avec les gestionnaires et ETF, ces protocoles sont à repenser pour pouvoir appréhender l'impact des modalités (et la façon de procéder) sur le retour des menus bois au sol et garantir le maintien de la fertilité sur un très grand nombre de chantiers. Les résultats sont ainsi contrastés, trop peu et trop variables pour déboucher sur des mises en œuvre opérationnelles des recommandations de GERBOISE. Le travail réalisé, incite à présent, à mieux tenir compte des différentes situations (qui sont multiples, uniques et peu généralisables), à améliorer les techniques de coupe pour laisser davantage de menus bois, et à revoir la façon d'appréhender l'évaluation des pratiques (en particulier sur le protocole de suivi), même si les tendances observées vont quand même bien dans le sens des recommandations GERBOISE :

- Les différentes modalités (épointage, abandon, ébranchage partiel…) ont présenté des retours au sol a priori inférieurs aux recommandations GERBOISE, notamment dans les coupes partielles (éclaircie) alors que des tas de rémanents étaient visuellement bien présents.
- Plusieurs raisons sont émises pour expliquer cette différence :
    - trop peu de chantiers analysés avec une hétérogénéité entre les peuplements étudiés et également une hétérogénéité des bois morts au sol avant la mise en place des chantiers,
    - des protocoles de mesures à repenser pour mieux appréhender l'impact des modalités,
    - améliorer les techniques de coupe pour laisser davantage de menus-bois en forêt.

A noter que les échanges sur le terrain, entre partenaires mais aussi avec les opérateurs ETF, ont abouti à la décision de mettre en place un cycle de séminaires avec les coopératives de façon à rappeler les grands principes et les ordres de grandeur sur les cycles biogéochimiques, sur l'impact de la gestion sur ces cycles et sur le tassement des sols (INRAE – BEF réalisé en janvier 2023).

Ressuyage : Selon les essences et les contextes, on constate une hétérogénéité dans les durées nécessaires pour obtenir un ressuyage partiel, qui peut être plus ou moins significatif. Sur l'ensemble des essais, il est apparu que la période préconisée dans les recommandations du guide GERBOISE (3 mois) n'était pas du tout suffisante pour un ressuyage total pour les essences testées (feuillues) et nécessiterait, notamment sur certains sols sensibles au tassement et/ou hydromorphes, d'attendre l'année n+1 pour sortir les javelles des peuplements. Les délais recommandés engendreraient de fortes difficultés et une altération de la qualité de la biomasse (bois sec, cassant). La multiplicité des opérations de terrain (abattage, ressuyage, débardage), pose une question de gestion importante devant les défis climatiques à venir et la nécessité de remplacer les énergies fossiles (réduire autant que possible le nombre d'opération de terrain pour un même chantier).

2.3. Lot 3 : Identification des leviers (incitations et institutions) pour une mise en œuvre opérationnelle des recommandations de récolte

Responsable : INRAé BETA

Partenaires : GCF, ONF, FCBA, COPACEL, comité de professionnels

Objectif : Identifier les freins/leviers liés à la mise en œuvre des pratiques de récolte de biomasse,

L'objectif du lot 3 est *d'identifier les freins/leviers liés à la mise en œuvre des pratiques de récolte de biomasse.* Nous allons d'abord documenter la méthodologie et le protocole expérimental utilisés dans le projet et ensuite synthétiser les principaux résultats.

La recherche est basée sur une approche d'économie comportementale en mettant l'accent sur les incitations non monétaires. Nous avons prévu de procéder en trois étapes. Premièrement, nous avons sollicité les acteurs et les parties prenantes pour identifier les incitations les plus pertinentes lors des échanges (réunions, brainstorming). Deuxièmement, nous testerons ces différentes incitations à l'aide d'une expérience en laboratoire auprès d'étudiants pour déterminer la (ou les) incitation(s) la (les) plus efficace(s). Enfin, une fois l'incitation la plus efficace identifiée, nous avons prévu de tester cette dernière auprès d'un public de professionnels avec une expérience de terrain. Cependant, cette dernière étape n'a finalement pas été mise en œuvre. En raison de la covid19, il n'a pas été possible de faire venir des professionnels à une réunion où nous devions réaliser nos expériences. Nous avons étudié d'autres options comme la réalisation des expériences en ligne. Cependant, cela a été bloqué par des restrictions administratives. Notre protocole expérimental exigeait que les sujets reçoivent des récompenses monétaires pendant l'expérience, en fonction de leurs choix, et il n'était pas possible, dans le cadre des règles comptables de l'INRAE, de transférer les récompenses en ligne. Comme alternative aux professionnels de la forêt, l'école BTS forêt Mirecourt a accepté que nous réalisions l'expérience avec leurs étudiants, les futurs professionnels de la forêt à partir de 2021. Cependant, l'expérimentation n'a finalement pas été acceptée car le risque de contamination par le covid19 reste élevé. Finalement, nous avons convenu, au sein du consortium du projet Tamobiom, d'abandonner l'expérience sur le terrain et de la remplacer par un test supplémentaire en laboratoire avec des étudiants à Strasbourg. Comme nous l'expliquons dans la section *l'expérience*, nous avons légèrement modifié le protocole expérimental pour vérifier la robustesse des résultats obtenus lors des premières expériences. Nous avons voulu tester si l'incitation non monétaire, l'engagement, a toujours un effet significatif si les acheteurs de bois ne sont pas en situation de concurrence entre eux.

Dans la section suivante, le choix du cadre expérimental est brièvement expliqué ainsi que les incitations choisies. Enfin, nous présentons les principaux résultats et discutons des implications.

2.3.1. L'approche expérimentale

2.3.1.1. Expériences en laboratoire contre expériences sur le terrain

Après avoir sollicité les acteurs sur l'identification de différentes composantes de scénario d'incitation, nous testerons à l'aide d'une expérience en laboratoire auprès des étudiants, différents types d'incitations. Les données issues des expériences en laboratoire ont l'avantage d'être contrôlées, adaptées à un contexte précis qui intéresse l'expérimentateur. De plus, les décisions en laboratoire sont des décisions effectives grâce à l'incitation monétaire, pilier de la méthode expérimentale en économie.

Une fois que le type de l'incitation la plus efficace est déterminé, Il était prévu de tester cette dernière auprès d'un public de professionnels dans une expérience de terrain « artefactuelles » (artefactuel). Selon Harrison et List (2004), ce type d'expérience est identique aux expériences en laboratoire mais avec des sujets « non standards », i.e. des sujets autres que des étudiants, comme par exemple des professionnels. Les expériences de terrain «artefactuelles » garantissent la validité externe des résultats dans le champ concerné. Nous avons choisi de faire une expérience contextualisée car un contexte parlant peut à la fois améliorer la compréhension de l'expérience et réduire la confusion chez les participants, rendant les choix plus cohérents ou stratégiques (Alekseev et al., 2017). En même temps, placer les sujets dans une situation de décision très similaire à la décision réelle améliore la validité externe des résultats, car il est plus facile pour les sujets de s'imaginer dans cette situation. Des études antérieures ont utilisé des expériences de laboratoire contextualisées pour rendre la situation plus réaliste pour les sujets, et/ou pour les aider à comprendre une conception complexe (Krawczyk et al., 2016).

2.3.1.2. La filière bois-énergie et l'économie expérimentale

L'un des problèmes évoqués lors des réunions avec les acteurs est qu'un petit propriétaire forestier privé peut être relativement mal informé de l'importance du suivi des recommandations. L'acheteur de plaquettes de bois fait donc face à un dilemme. Si l'acheteur décide de suivre les recommandations, ceci implique des coûts de récolte plus élevés et donc un paiement plus faible au propriétaire forestier. Ce dernier peut s'adresser à un autre acheteur de bois qui ne suit pas les recommandations et qui est en mesure de payer un prix plus élevé pour la coupe. Ainsi, l'acheteur de bois a une forte incitation économique à ne pas suivre les recommandations.

Cette relation entre l'acheteur de bois et le propriétaire forestier pourrait être décrite par un modèle Principal-Agent (Holmström, 1979, Grossman et Hart, 1983). On peut formuler le problème de la relation Principal-Agent de la façon suivante : si un Principal-le propriétaire forestier- dépend d'un Agent –l'acheteur de bois- pour la réalisation d'un objectif-récolte de bois, le Principal doit choisir *une incitation* de manière à surmonter la difficulté qui provient de la non-observabilité de l'action de l'agent dont il a besoin par ailleurs. Ce modèle se base sur une hypothèse d'imperfection de l'information et met en évidence la divergence d'intérêts qui se manifeste entre le Principal et l'Agent.

Dans notre expérience en laboratoire, il est essentiel de trouver un compromis optimal entre la simplicité de l'expérience axée sur les hypothèses à tester (les incitations/leviers) et le maintien d'un contexte suffisant pour garantir que les résultats peuvent être transférés à une situation spécifique (la filière bois-énergie).

L'expérience que nous présentons ci-dessous ne représentera pas toutes les situations et relations possibles entre les propriétaires forestiers et les acheteurs de bois. Nous nous concentrons sur les petits propriétaires forestiers (majoritaires dans la filière) qui ne connaissent pas en général les recommandations relatives à une récolte durable de bois énergie ou qui n'auront pas la capacité ou la volonté de réaliser un diagnostic des sols. Il existe bien sûr des petits propriétaires forestiers privés qui au contraire en tiennent compte. Ils peuvent soit être informés et préoccupés par l'impact potentiel de la récolte de biomasse sur leurs sols forestiers, soit utiliser des experts forestiers comme intermédiaires entre eux et les acheteurs de bois.

2.3.1.3. L'expérience

Tous les participants jouent le rôle d'un acheteur de bois (l'Agent) qui fera une recommandation de « récolter » ou ne pas « récolter » aux propriétaires forestiers (les principaux). Les gains des propriétaires forestiers seront versés à : *Reforest'Action*. C'est une entreprise à vocation sociale dont la mission est de sensibiliser et d'agir pour les forêts. Ceci garantit que les décisions des acheteurs de bois ont un impact réel sur la durabilité de la gestion des forêts françaises. Nous présentons le contexte des recommandations de L'*ADEME* aux participants d'une façon simplifiée. Ces recommandations portent sur les pratiques de récolte durable du bois « énergie ». Dans les jeunes peuplements forestiers, la récolte d'arbres entiers (le tronc ainsi que les feuillages et les branches) est souvent la seule méthode de récolte rentable permettant de produire du bois énergie. Ce type de récolte implique aussi un prélèvement des menus bois (i.e. les feuillages et branches de moins de 7 cm) habituellement laissés sur le sol dans la forêt. Cependant ces menus bois contiennent une quantité importante d'éléments minéraux nécessaires pour la fertilité des sols. Ainsi, les prélever peut mettre en danger la fertilité du sol sur le long terme. C'est pourquoi l'ADEME déconseille la récolte de bois en arbres entiers pour les sols les plus sensibles. Pour la simplicité, nous classons dans l'expérience la sensibilité des sols en deux catégories : « **modérée à forte** » ou « **faible** ».

- Si la sensibilité du sol est ***modérée à forte***, le prélèvement des menus bois (feuillages et branchages) est fortement déconseillé. En effet, la récolte de bois énergie vient dans ce cas, appauvrir la fertilité des sols sur le long terme : cela est dû au fait que les éléments minéraux contenus dans les menus bois ne sont pas maintenus sur le sol mais exportés, et le propriétaire forestier perd la fertilité de son sol sur le long terme.

Si la récolte est faite quand la sensibilité du sol est ***modérée à forte***:

- Les menus bois sont récoltés. L'acheteur va gagner un profit de la récolte.
- Le propriétaire va gagner un profit de la récolte qui est inférieur à la perte de fertilité de son sol sur le long terme. Donc dans cette situation, l'acheteur de bois gagne et le propriétaire forestier perd.

Si la récolte n'est pas faite quand la sensibilité du sol est ***modérée à forte*** :

- Les menus bois ne sont pas récoltés. Il n'y aura donc pas de profit pour l'acheteur.
- Le propriétaire préserve la fertilité de son sol sur le long terme. Cela se traduit par un gain (plus faible que dans le cas d'une faible sensibilité) qui peut provenir de la vente ultérieure des grumes.

- A contrario, si la sensibilité du sol est ***faible***, la récolte du bois peut s'effectuer en arbres entiers et peut se faire sans trop de précaution quant au prélèvement des menus bois. Le propriétaire forestier réalise un profit.

Pour savoir de quel type de sol il s'agit, l'acheteur de bois doit faire un diagnostic du sol avant de faire la récolte[1]. Les acheteurs de bois sont donc parfaitement informés des types de sol et sont en mesure de recommander aux propriétaires forestiers de récolter ou pas les menus bois[2]. Les acheteurs ont un profit seulement lorsqu'ils recommandent aux propriétaires forestiers de faire une récolte des arbres entiers indépendamment du type du sol. Par contre, les propriétaires forestiers préféreraient que les arbres entiers soient récoltés uniquement lorsque la sensibilité du sol est « faible », pourtant, ils ne peuvent pas observer avec précision le type de leur sol mais doivent s'appuyer sur le diagnostic des acheteurs. Si la récolte d'arbres entiers se fait quand la sensibilité du sol est « modérée à forte », le propriétaire forestier perd la fertilité de son sol sur le long terme.

Dans notre contexte, des problèmes de coordination surviennent car :

- L'agent (l'acheteur de bois) a le choix entre différents comportements : récolter les arbres entiers si la vulnérabilité du sol modérée à forte pour réaliser un profit de la récolte au détriment de la fertilité du sol sur long terme ou bien récolter seulement si la vulnérabilité du sol est faible pour ne pas nuire à la fertilité du sol sur le long terme.

- L'action de l'agent affecte le bien-être des deux parties : Si l'acheteur de bois décide de récolter les arbres entiers quand la vulnérabilité du sol modérée à forte, il réalise un profit, mais cette décision n'est pas dans l'intérêt du propriétaire forestier car son sol perdra sa fertilité sur le long terme.

- Les actions entreprises par l'agent sont difficilement observables : en effet, le propriétaire forestier ne peut pas observer le type de son sol. Par contre, l'acheteur de bois doit faire un diagnostic du sol avant de faire la récolte pour connaitre le type du sol. Donc, il y a une asymétrie d'information.

Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, il existe une concurrence entre les acheteurs de biomasse forestière qui augmente les incitations à ne pas suivre les recommandations. Comme l'a mentionné un acheteur de bois lors d'une de nos réunions avec les parties prenantes : « *J'aimerais suivre les recommandations mais si je le fais, un autre acheteur de bois donnera un prix plus élevé au propriétaire de la forêt et je perdrai le contrat* ». Par conséquent, pour rendre notre expérience aussi réaliste que possible, nous avons inclus la concurrence dans l'expérience. Dans chaque tour de l'expérience, les sujets jouaient par groupe de trois (figures 1 et 2). Si l'un d'entre eux décidait de ne pas récolter mais qu'au moins un des autres acheteurs du groupe récoltait, la forêt allouée à celui qui ne récoltait pas était récoltée par celui qui récoltait (si deux récoltent, la forêt non récoltée est allouée aléatoirement à l'un des deux récoltants). Par conséquent, la seule situation où la forêt ne sera pas récoltée est celle où aucun des trois n'a décidé de récolter. Cela implique une forte incitation à la récolte, car même si vous renoncez à un revenu en ne récoltant pas, il n'est pas certain que la fertilité du sol soit maintenue.

[1] En réalité, l'acheteur de bois aura le choix de faire ou non le diagnostic du sol avant de faire une offre d'achat du bois. Le diagnostic a un coût (essentiellement un coût d'opportunité en temps) et l'acheteur peut donc être incité à ne pas effectuer de diagnostic si le propriétaire de la forêt ne l'exige pas. Cependant, dans le cadre de notre expérience, cette décision de faire ou non un diagnostic n'est pas qualitativement différente de la décision de se conformer aux résultats du diagnostic.

[2] Dans la terminologie de l'expérience, nous supposons que l'acheteur de bois n'a que deux options lorsque le diagnostic indique que la sensibilité du sol est modérée à forte : récolter ou ne pas récolter. En réalité, l'acheteur de bois pourrait choisir de récolter mais en suivant les recommandations et en payant un prix inférieur au prix du marché pour compenser les coûts plus élevés. Toutefois, par souci de simplification, nous avons ignoré cette option. L'hypothèse est que si l'acheteur propose un prix inférieur au prix du marché, déterminé en fonction du coût de la récolte sur des sols peu sensibles, le propriétaire forestier rejettera l'offre et aucune récolte n'aura lieu.

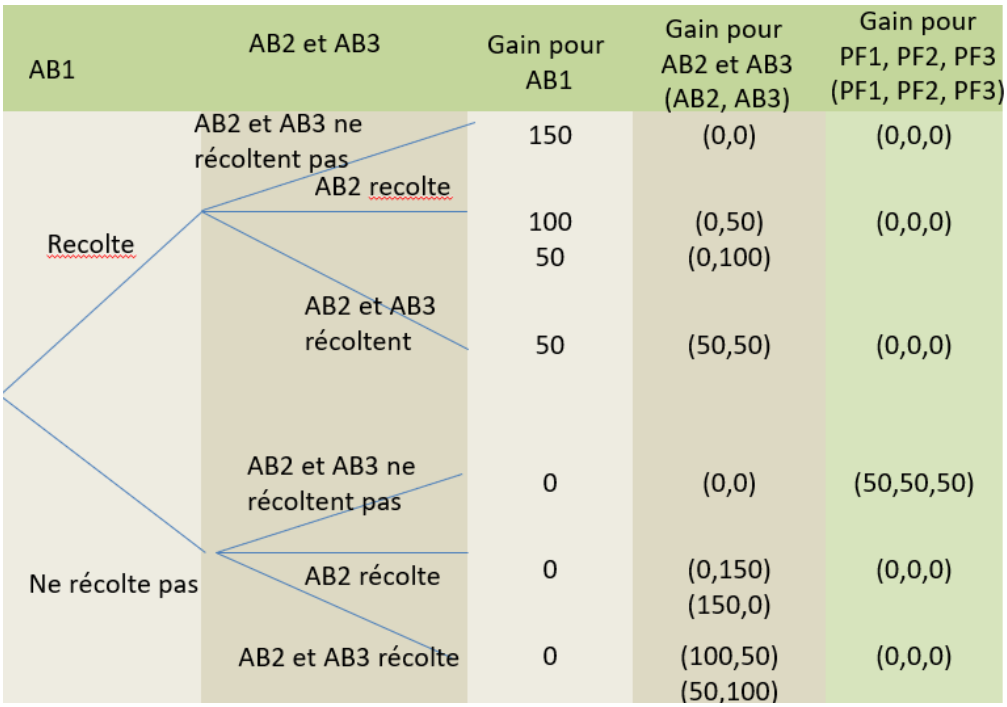


Figure 1 : Des gains dans le cas de sols présentant une sensibilité modérée à forte. AB : Acheteur de bois, PF : Propriétaire forestière (Reforest'action). Notez que la figure ne montre pas le cas où seul AB3 récolte. Cependant, le même raisonnement que lorsque seul AB2 est le seul à récolter

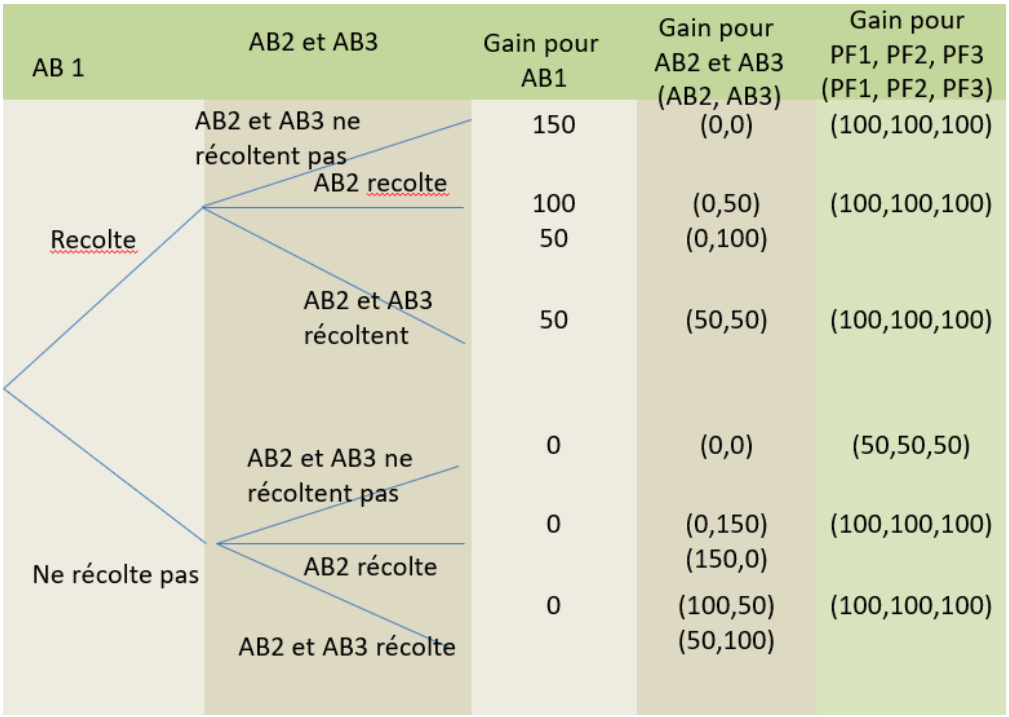


Figure 2 : Des gains dans le cas de sols présentant une sensibilité faible. AB : Acheteur de bois, PF : Propriétaire forestière (Reforest'action). Notez que la figure ne montre pas le cas où seul AB3 récolte. Cependant, le même raisonnement que lorsque seul AB2 est le seul à récolter

Entre-temps, après avoir constaté qu'il n'était pas possible de réaliser des expériences avec des professionnels de la forêt, nous avons décidé de répéter nos expériences sans élément de concurrence pour vérifier la robustesse des résultats à l'hypothèse de la concurrence. Le gain en l'absence de concurrence entre les acheteurs de bois est illustré à la figure 3.

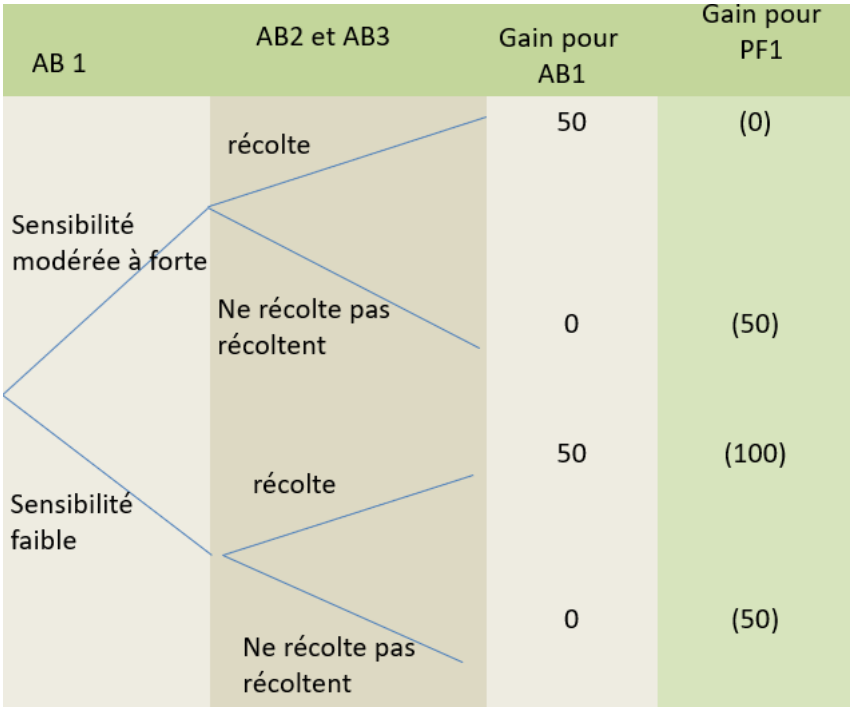


Figure 3 Le gain en l'absence de concurrence entre les acheteurs de bois. AB : Acheteur de bois, PF : Propriétaire forestière (Reforest'action).

2.3.2. Les incitations

Pour résoudre ce dernier problème de la non-observabilité de l'action de l'Agent i.e. l'acheteur de bois, il faut trouver des incitations adéquates. La littérature récente a mis en évidence un large éventail de situations dans lesquelles les incitations monétaires échouent à orienter les comportements dans le sens désiré (Jacquemet et al., 2016, Ouvrard et Stenger 2018). Donc, nous utiliserons une incitation non monétaire, inspirée de la psychologie sociale de l'engagement, pour inciter les acheteurs de bois à récolter les arbres entiers seulement quand la sensibilité du sol est faible.

2.3.3. La signature d'une déclaration

La procédure d'engagement testée est la signature d'une déclaration où les participants s'engagent à faire des recommandations conformes aux pratiques de récolte durable tout au long du jeu. A la fin de l'expérience, nous pourrons connaître le nombre de participants qui a signé cette déclaration. En revanche, nous ne pouvons pas savoir quel participant en particulier a signé la déclaration. La signature de cette déclaration est susceptible d'engendrer un effet d'engagement, au sens de la psychologie sociale. La décision d'accepter de se conformer à cette procédure constitue un acte préparatoire, susceptible de modifier les comportements dans le cadre de décisions ultérieures. La déclaration signée avant de commencer l'expérience est présentée ci-après (Fig 4).

Je m'engage à faire des recommandations conformes aux pratiques de récolte durable tout au long du jeu.

☐Oui ☐Non

Signature

.....

Figure 4 Exemple de formulaire de déclaration

La littérature confirme notamment la capacité de ce type de mécanisme à se substituer aux incitations monétaires dans un certain nombre de situations où celles-ci s'avèrent insuffisantes, défaillantes ou contre-productives (Jacquemet, 2016). C'est le cas, par exemple, de l'évasion fiscale et de la sincérité des revenus déclarés, ou encore de la collecte et du report d'informations privées à l'intérieur des organisations.

2.3.4. Conceptual priming

Une deuxième incitation non monétaire que nous testerons avec les étudiants est *« l'amorçage conceptuel »* ou « conceptual priming ». C'est un paradigme expérimental qui consiste à activer un concept (le concept de la durabilité dans notre expérience) pour en étudier l'impact sur le comportement de l'individu dans un autre contexte. Il est bien démontré dans la psychologie sociale que l'amorçage peut inconsciemment influencer la perception des gens, les évaluations, le comportement et le choix. Avant de commencer le jeu forestier, les sujets feront face à 24 phrases. Ils compléteront chacune de ces phrases par le mot adéquat d'une liste déroulante de 3 mots. Le thème de ces phrases est la durabilité. L'activation du concept de la durabilité chez les participants les incitera à prendre des décisions plus « durables », donc de ne pas récolter les arbres entiers quand le sol est de sensibilité modérée à forte car cela a un effet négatif sur la fertilité des sols sur le long terme. Pour tenir compte de la possibilité que l'utilisation de l'exercice d'amorçage puisse avoir un impact en soi, indépendamment de l'utilisation de mots liés à la durabilité, nous appliquons un traitement d'amorçage « contrôle » où les mots ne sont pas liés à la durabilité. Cela permet de vérifier l'effet de l'amorçage de la durabilité. La figure 5 présente un exemple de tâche d'amorçage. Les mots en gras présentaient la bonne réponse. Les sujets n'ont pas vu les mots en gras mais en police normale

Vous allez faire face à 24 phrases. Vous devrez compléter chaque phrase par le mot adéquat d'une liste déroulante de 3 mots. Vous aurez 4 minutes pour compléter cette tâche. Une fois le temps écoulé, nous vous afficherons les bonnes réponses. Votre performance dans ce jeu n'affectera pas votre paiement à la fin de la session.

Exemple :

Ils regardent un (boulevard-**spectacle**-chat) d'humour.

Réponse : Ils regardent un **spectacle** d'humour.

Figure 5 Exemple de traitement de l'amorçage

La sélection des mots d'amorçage de la durabilité a été basée sur un pré-test dans lequel 33 mots ont été jugés quant à leur relation avec la durabilité. Nous avons demandé à un groupe de 25 personnes de choisir 15 des 33 mots qui sont les plus liés à la durabilité. Les mots sélectionnés sont ceux qui ont été choisis le plus souvent (la liste complète des 33 mots utilisés est fournie, ainsi que le nombre de fois où ils ont été choisis, à l'annexe C, Tableau C1.

L'amorçage neutre

1. Le (livre-**tiroir-**boulevard) du bureau fonctionne bien.
2. Il promène son (**chien**-cahier-légume) ce matin.
3. Le **(**stylo**-douanier**-balai) inspecte le sac rapidement.
4. Il (nage-**remplit**- promène) sa feuille d'impôts.
5. Les (**bronches-**tables-rues**)** du malade sont encombrées.
6. L'enfant regarde un dessin (**animé**-tôt-glacé) joyeux.
7. La (**somme-**tasse-bouteille) demandée est très élevée.
8. Son (affiche**-**drapeau-**ordinateur)** tombe en panne fréquemment.
9. Le (lait- **panneau**-clavier) indique un village médiéval.
10. Les affiches (judiciaires-spécialisés**-publicitaires**) envahissent les murs.
11. Je pars en voyage en (**octobre**-absence- haut).
12. Il faut (**entretenir-**manger-promener) la chaudière régulièrement.
13. Ils regardent un (arbre-**film**-réseau) au cinéma.
14. Les baleines vivent dans les **(**parcs-semaines- **océans**).
15. Il attendit son collègue au premier (soleil- **étage**-choix).
16. Les travaux de construction prennent du (**retard-**livre**-**conseil).
17. Elle remercie les (murs-parcs-**bénévoles**) pour leur participation.
18. Les salariés étaient en (hibernation- **congé** -appelant) hier.
19. Ils iront demain à la (parole-fonction**-piscine**).
20. L'étudiant cherche ses (parcs-**livres** -ballons**)** à la bibliothèque.
21. La (**volonté-**table-rue) est un acte réflexif.
22. Il avait une **(**totale-catégorie- **leçon**) de conduite.
23. Le premier (téléphone- **objectif** -marché**)** a été atteint.
24. Cette (**procédure-**vitesse-montagne) prend environ deux mois.

L'amorçage de la durabilité

1. **(**Dessiner**-Recycler-**Regarder) réduit la quantité de déchets.
2. Son **(**affiche-drapeau-**ordinateur)** tombe en panne fréquemment.
3. Le développement (**durable-**célèbre-joyeux) est l'affaire de tous.
4. La **(somme-**tasse-bouteille**)** demandée est très élevée.
5. Les énergies (**renouvelables-**solidaires-disponibles) concernent le long terme.
6. L'enfant regarde un dessin (**animé**-tôt-glacé) joyeux.
7. L'énergie (**propre-**bleue-sage) a un coût abordable.
8. Nous devons (donner- **préserver-**chanter) le patrimoine naturel.
9. Il (nage-**remplit**- promène) sa feuille d'impôts.
10. Les abeilles sont essentielles à la (**biodiversité**-rue-volonté)
11. La production nécessite des (sciences-**ressources-**activités**)** naturelles.
12. Le **(**stylo-**douanier**-balai**)** inspecte le sac rapidement.

13. Il faut agir pour le (**climat-**téléphone-possible).
14. Le gaspillage est un problème (calme-**éthique-**tard)**.**
15. Les **(bronches**-tables-rues**)** du malade sont encombrées.
16. Il faut agir aujourd'hui pour **l'(avenir-**information-idée).
17. L'(automobile-**écologie-**orchestre) concerne l'ensemble des êtres vivants.
18. L'environnement est généralement un bien (**commun-**immobilier-culturel).
19. Le (livre-**tiroir-**boulevard**)** du bureau fonctionne bien.
20. La **(nature-**terrasse-dépense**)** est essentielle à l'homme.
21. Nous devons tous (**respecter-**dessiner-boire**)** nos descendants.
22. Il promène son (**chien**-cahier-légume) ce matin.
23. L'éducation garantit un monde plus (**viable-**frais**-**sucré)**.**
24. L'école**-équilibre-**équipe**)** économique et environnemental est primordial.

Questionnaires

Pour mieux comprendre les décisions des sujets, nous avons inclus après l'expérience un questionnaire sur la sensibilité environnementale et un autre sur les préférences sociales.

Sensibilité à l'environnement

Les sujets ont rempli un questionnaire pour déterminer leur sensibilité à l'environnement. Pour gagner du temps, nous avons sélectionné 28 des 40 items (détaillés en annexe D) de l'échelle de *General Ecological Behavior* (GEB) (Kaiser, 1998). La version réduite à 28 questions qui a été proposée est utilisée dans My et Ouvrard (2019). Dix-sept items étaient formulés de manière positive et les onze autres de manière négative. Les sujets devaient donner leur niveau d'accord à chaque item en utilisant 5 réponses possibles : jamais, rarement, de temps en temps, souvent et toujours. Les réponses ont été recodées de 1 pour jamais à 5 pour toujours pour les items écologiques et l'inverse pour les items non écologiques.

Social Value Orientation

Pour obtenir les préférences sociales, nous avons utilisé la mesure de *Social Value Orientation* (SVO) (Murphy et al., 2011). Cette mesure permet de classer les participants dans différentes catégories : compétitif (maximise la différence entre son propre gain et celui de l'autre), individualiste (maximise son propre gain), prosocial (maximise le gain conjoint), et altruiste (maximise le gain de l'autre). La mesure SVO consiste en 15 décisions d'allocation entre un décideur et un joueur passif. Les réponses déterminent l'angle SVO d'un sujet où une valeur plus élevée indique une plus grande pro-socialité. Tous les participants ont fait 15 choix en tant que décideur. Ils ont été rémunérés pour deux périodes choisies au hasard : une en tant que décideur, une en tant que joueur passif. Dans l'analyse, nous utilisons l'angle continu SVO comme variable prédictive car il a une résolution plus élevée que les dimensions catégorielles.

Questions de suivi

Nous avons inclus des questions concernant leur réflexion sur les expériences et les variables sociodémographiques de base qui peuvent être utilisées pour expliquer leur choix dans une analyse statistique de leurs réponses (Annexe E).

Pilotes et organisation

L'expérience principale - avec concurrence

Nous réalisons les expériences en laboratoire avec des étudiants de l'Université de Strasbourg. Sur la base des résultats, l'idée est de déterminer l'incitation la plus efficace qui devra être testée sur le terrain (*lab-in-the-field-experiment*) avec des professionnels de la forêt. Cette dernière partie n'a finalement pas été mise en œuvre en raison des restrictions de COVID19.

Nous avons organisé un pilote avec 48 étudiants à l'Université de Strasbourg, 24 étudiants ont fait partie du groupe « contrôle » et 24 étudiants ont fait partie du groupe « traitement ». La signature de la déclaration est présentée au groupe « traitement ». Les résultats préliminaires montrent qu'il existe un effet significatif de cette incitation sur le comportement des participants. La signature de la déclaration diminue le pourcentage des participants qui décident de récolter les arbres entiers quand le sol est de sensibilité modérée à forte ce qui nuit à la fertilité du sol sur le long terme.

La prochaine étape était une expérience pilote avec le traitement de l'amorçage (avec un amorçage contrôle et amorçage de durabilité) et l'expérience complète avec le traitement de déclaration et avec les traitements d'amorçage (si le pilote indique des résultats prometteurs).

Au total, nous avons mené 24 sessions expérimentales au Laboratoire d'économie expérimentale de Strasbourg (LEES) où au total 384 sujets ont participé pour l'expérience principale avec la concurrence[3]. Dans un design inter-sujets, nous avons mis en place 4 traitements : baseline, déclaration de signature, amorçage neutre et amorçage de durabilité. Dans chaque traitement, 96 sujets ont participé. Alors que 30 sujets par traitement est souvent utilisé comme règle empirique dans les expériences économiques (List et al., 2011), nous avons voulu tenir compte de la dépendance potentielle entre les sujets car ils sont appariés en groupes et avons décidé d'avoir 96 sujets par traitement.

Les sujets ont été recrutés à partir d'une liste de sujets expérimentaux du LEES à l'aide du logiciel ORSEE. Les instructions ont été lues à haute voix par l'expérimentateur et avant de commencer, un questionnaire de compréhension a été administré pour vérifier la compréhension des sujets de la tâche de décision. Si un sujet donnait une mauvaise réponse, la bonne réponse était mise en évidence et expliquée pour s'assurer qu'il comprenait bien la tâche.

L'expérience de suivi - sans concurrence

Dans l'expérience de la concurrence entre les acheteurs de bois, les conséquences des choix des acheteurs étaient indépendantes des décisions des autres acheteurs de bois. Dans cette expérience, nous n'avons testé qu'un seul traitement, la signature d'un engagement, car nous n'avons trouvé aucun effet statistiquement significatif du traitement d'amorçage dans l'expérience précédente. Dans l'expérience sans compétition, nous avons estimé que nous avions besoin d'un échantillon plus petit pour avoir la même puissance statistique, car nous pourrions considérer que chaque sujet est indépendant des autres sujets, comme sans interactions. Nous avons effectué le test avec 55 sujets dans la base de référence et avec 54 individus pour le traitement d'engagement.

Principaux résultats

L'expérience principale - avec concurrence

Dans cette section, nous présentons les principaux résultats des expériences avec concurrence. Une analyse plus approfondie est donnée dans l'article publié dans "*Resource and Energy Economics*"[4].

Dans le tableau 1, nous présentons les principaux résultats, c'est-à-dire que nous indiquons les cas où l'acheteur de bois a suggéré de récolter même s'il avait l'information que la sensibilité du sol est modérée à forte. Cela n'a pas de sens de rapporter la décision lorsque la sensibilité du sol était faible, car les intérêts de l'acheteur de bois et du propriétaire de la forêt étaient alignés. On a supposé que les sols avaient une vulnérabilité modérée à forte 60 % du temps, ce qui correspond approximativement à ce qui a été estimé pour la France par Augusto et al. (2018).

[3] Nous avons mené 8 sessions en 2020 et 16 sessions en 2021. En raison des contraintes de COVID-19, les sessions ont été reportées en 2020. Nous avons ensuite pu mener nos sessions à partir de février 2021.

[4] Attallah, M., Abildtrup, J., & Stenger, A. (2022). Non-monetary incentives for sustainable biomass harvest: An experimental approach. *Resource and Energy Economics*, *69*, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101317

Tableau 1, Proportion de choix recommandant de récolter lorsque la sensibilité du sol est modérée à forte.

Traitement	Proportion d'acheteurs de bois qui récoltent	Nombre de décisions
Référence	0,822	585
Signer l'engagement	0,697, valeur P= 0,009	561
Amorçage neutre	0,828	588
Amorçage de la durabilité	0,750, valeur P=0,123	576

Nous constatons que la part des décisions de récolte où les acheteurs de bois décident de récolter est la plus élevée dans le scénario de base sans aucun traitement, c'est-à-dire que 82,2% des sujets décident de récolter même si cela a un effet négatif sur la fertilité (aucun paiement pour la restauration de la forêt), alors qu'avec le traitement d'engagement cette part n'est que de 67,7%. Cette différence est statistiquement significative au niveau de 1 % en appliquant un test de proportion et en tenant compte des clusters (plus de choix par le même sujet). Même si le nombre de fois où les sujets ont décidé de récolter était plus faible avec l'amorçage de durabilité (75,0 %), la différence entre l'amorçage de durabilité et l'amorçage neutre n'est pas significative sur le plan statistique.

Pour étudier les résultats plus en détail, nous avons effectué une régression logit où la variable dépendante était la décision de récolter et les variables exploratoires étaient les traitements, les réponses aux questionnaires sur la sensibilité environnementale et les préférences sociales, et le contexte de décision. Différents modèles ont été estimés et rapportés dans Attallah et al. (2022). Dans le tableau 2, nous rapportons l'effet marginal des variables explicatives à la valeur moyenne pour notre modèle principal. Pour un sujet moyen, le fait d'être en train de signer une déclaration diminue la probabilité de recommander la récolte de 13,3 %. De plus, le fait d'avoir une sensibilité environnementale élevée par rapport à une faible sensibilité diminue la probabilité de recommander la récolte de 6,6 %. De plus, le fait d'avoir 1 ou 2 partenaires dans le groupe qui a recommandé la récolte au cours de la période précédente augmente la probabilité de recommander la récolte au cours de la période actuelle de 6 % et 8,5 % respectivement. Enfin, la période de temps augmente la probabilité de recommander la récolte de 1,4% par période.

Tableau 2. Effets marginaux aux moyennes.

Variable	L'effet marginal	
Amorçage neutre (=1 si traitement, =0 si non)	-0,0125	(−0,28)
Signer l'engagement (=1 si traitement, =0 si non)	-0,133	(−2,57) **
Amorçage de la durabilité (=1 si traitement, =0 si non)	-0,0495	(−1,06)
Haute sensibilité environnementale (=1 si supérieur à la moyenne, =0 si non)	-0,0658	(−2,34)**
Valeur Social Value Orientation	0,000971	(0,59)
Un autre AB récolte en dernière période	0,0605	(1,96)**
Deux autres AB récoltent en dernière période	0,0854	(2,69)***
Période	0,0144	(5,07)***
N – nombre de choix	1926	

Statistiques *t* entre parenthèses, * p < 0.10, ** p < 0.05, *** p < 0.01

L'expérience de suivi - sans concurrence

Nous présentons ici les principaux résultats de l'expérience de suivi. Les résultats ne sont pas encore publiés mais la valorisation des résultats par une publication dans une revue scientifique internationale est en cours. Cependant, nous sommes assez sûrs que les principales conclusions ne changeront pas. Dans le tableau 3, nous présentons les résultats de l'expérience de suivi où les acheteurs de bois ne sont pas en concurrence pour le bois des propriétaires forestiers et nous les comparons aux résultats de l'expérience précédente avec concurrence. Nous constatons que sans concurrence, les sujets étaient beaucoup moins enclins à recommander la récolte dans le cas des sols à sensibilité modérée à forte. Elle n'est recommandée que dans 46,1% et 48,8% des cas dans le scénario de référence et dans le scénario d'engagement, respectivement. Toutefois, la différence entre le scénario de référence et le scénario de traitement des engagements n'est plus statistiquement significative. Le traitement de la déclaration ne réduit la recommandation de récolte que de 2,4%. Nous pouvons donc conclure que l'effet du traitement de déclaration dépend du contexte. Sans concurrence entre les acheteurs de bois, il est plus probable qu'ils ne recommandent pas la récolte, ce qui n'est pas surprenant car il est plus probable que leur décision de soutenir la fertilité de la forêt (restauration de la forêt) ait un impact positif puisqu'il n'y a pas le risque que des acheteurs de bois concurrents récoltent la forêt qu'ils recommandent de ne pas récolter. Nous avons également

réalisé un modèle de régression logit avec l'expérience de suivi (non présenté ici) et nous avons constaté que la période a un effet positif sur la probabilité de récolte, tandis que la sensibilité environnementale n'a aucun effet statistiquement signifiant sur le comportement de récolte.

Tableau 3, Proportion de choix recommandant de récolter lorsque la sensibilité du sol est modérée à forte, avec et sans concurrence.

Traitement	Avec concurrence (tableau 1)		Sans concurrence	
	Proportion d'acheteurs de bois qui récoltent	Nombre de décisions	Proportion d'acheteurs de bois qui récoltent	Nombre de décisions
Référence	0,822	585	0,485	330
Signer l'engagement	0,697, valeur P= 0,009	561	0,461 valeur P= 0,38	321

Mise en œuvre - une discussion

Comme mentionné dans la section *Les incitations*, il existe de multiples incitations non monétaires qui pourraient être envisagées pour modifier le comportement des acteurs de la filière bois-énergie (faire prendre conscience de l'appartenance à un réseau, faire connaître ce qui est fait dans la région, autour de soi…, communiquer sur ce qu'il serait optimal de faire pour la société…). Cependant, nous avons dû faire un choix quant aux éléments à tester en raison des ressources limitées. Le choix des incitations finalement testées a été basé sur une longue discussion avec les parties prenantes, les membres de l'équipe et les chercheurs spécialisés en économie comportementale. Nous avons choisi les incitations les plus pertinentes en fonction de l'effet souhaité (inciter les individus à changer de comportement), l'application à notre contexte (amener les professionnels du secteur à récolter le bois différemment) et la possibilité de les implémenter de manière expérimentale.

Nous avons constaté que le traitement consistant à signer un engagement avait un effet statistiquement significatif dans le contexte de la concurrence. Même si nous n'avons pas trouvé d'effet statistiquement significatif dans le cas sans concurrence, nous pensons que le cas le plus réaliste est celui avec concurrence. L'étape suivante sera la conversion des traitements en politique réelle. Bien que la mise en œuvre concrète n'ait pas encore été discutée et analysée, nous estimons qu'il serait possible d'utiliser les résultats plus ou moins directement. Il semble assez facile d'implémenter un outil tel qu'une déclaration d'engagement au niveau d'un collectif de propriétaires ou même de manière individuelle. On pourrait imaginer que l'ADEME propose aux acheteurs de forêts de signer une déclaration-privée ou publique-concernant la volonté de suivre les recommandations. On pourrait imaginer une charte administrée par l'ADEME et des organismes comme FIBOIS selon le même concept que la *Charte Energie bois région centre*[5] où les producteurs et les utilisateurs de biomasse forestière s'engagent à suivre les recommandations et les restrictions légales relatives à la production et à l'utilisation de la biomasse forestière. Toutefois, cette transposition des résultats de la recherche en politique et gestion réelles devrait se faire en interaction avec les parties prenantes concernées. Cependant, une question importante, qui n'a pas été testée dans les expériences actuelles, est la persistance des effets du traitement dans le temps (Lefebvre and Stenger, 2020). Par exemple, une déclaration devrait-elle être signée à chaque fois qu'une récolte a lieu, une fois par an, ... ? Cette question de la fréquence des incitations et des rappels des bonnes règles n'est pas sans lien avec celles de la reformulation des incitations et de la combinaison possible de différentes incitations. En effet, une recommandation peut sous l'effet du temps, ne plus être suivie conformément à l'engagement initial. Une reformulation des messages initiaux peut alors être envisagée, sinon une combinaison avec d'autres outils développés : (re)prendre connaissance de ses engagements initiaux avec la prise de connaissance des performances déployées par ses voisins par exemple.

[5] https://www.fibois-cvl.fr/non-classe/charte-bois-energie/

Références

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. Ph.D. thesis. ADEME

Alekseev, A., Charness, G., Gneezy, U., (2017). Experimental methods: When and why contextual instructions are important. Journal of Economic Behaviour and Organisation. 134, 48–59.

Attallah, M., Abildtrup, J., & Stenger, A. (2022). Non-monetary incentives for sustainable biomass harvest: An experimental approach. Resource and Energy Economics, 69, 1–21. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101317

Grossman, S. J., & Hart, O. D. (1983). Implicit contracts under asymmetric information. *The Quarterly Journal of Economics*, 123-156.

Harrison, G. W., & List, J. A. (2004). Field experiments. Journal of Economic literature, 42(4), 1009-1055.

Hölmstrom, B. (1979). Moral hazard and observability. *The Bell journal of economics*, 74-91.

Jacquemet, N., Joule, R. V., Luchini, S., & Malézieux, A. (2016). Engagement et incitations: Comportements économiques sous serment. L'Actualité économique, 92(1-2), 315-349.

Kaiser, F.G., 1998. A general measure of ecological behavior 1. Journal of Applied Social Psychology. 28, 395–422

Krawczyk, M., Bartczak, A., Hanley, N., Stenger, A., (2016). Buying spatially-coordinated ecosystem services: an experiment on the role of auction format and communication. Ecol. Econ. 124, 36–48

Lefebvre, M., Stenger, A. (2020). Short- & long-term effects of monetary and non-monetary incentives to cooperate in public good games: An experiment. PloS One 15(1)

List, J.A., Sadoff, S., Wagner, M., (2011). So you want to run an experiment, now what? some simple rules of thumb for optimal experimental design. Experimental Economics. 14, 439–457.

My, K.B., Ouvrard, B., 2019. Nudge and tax in an environmental public goods experiment: does environmental sensitivity matter? Resource and Energy Economics. 55, 24–48

Murphy, R.O., Ackermann, K.A., Handgraaf, M., 2011. Measuring social value orientation. Judgment and Decision Making. 6, 771–781.

Ouvrard, B. & Stenger, A., Politiques environnemental et incitations. De la théorie à l'innovation empirique. ISTE editions, London.

2.4. Lot 4 : Communication des résultats et outils de transfert

Responsable : GIP ECOFOR

Partenaires : Il s'agit d'une part des partenaires du projet (FCBA, INRAE, ONF, GCF, COPACEL) et, d'autre part, des représentants des propriétaires (CNPF-IDF en sous-traitance, GCF, ONF), des organismes de certification (PEFC), des mobilisateurs de bois (FNEDT en sous-traitance, ONFE, GCF, COPACEL), des industriels utilisant la plaquette forestière (Soven), de l'ADEME et des ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement.

L'objectif du Lot 4, à savoir : « Développer puis déployer une stratégie de communication pour diffuser i) les recommandations à l'intention des opérateurs de terrain et ii) les résultats scientifiques issus du projet » n'a été que partiellement atteint du fait du retard pris par l'ensemble du projet, de la faible activité dans le domaine des réunions physiques régionales (période de Covid) et de l'absence, à ce stade, de nouvelles recommandations pratiques à diffuser auprès des acteurs de terrain.

Les activités du Lot 4 se sont concentrées sur cinq points décrits ci-après.

2.4.1. Contribution à la brochure ADEME « Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières »

En concertation avec l'ADEME, les experts du projet Tamobiom ont, durant la première année du projet, largement contribué à la réalisation de la Brochure ADEME publiée en 2020 intitulée « Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières », développée à partir du « Guide Gerboise » (Gestion raisonnée de la récolte de bois-énergie) publié en mars 2019. Très largement diffusé sur support papier et par voie électronique, ce document a contribué à mieux faire connaître les notions essentielles communes au domaine concerné (et largement communes aux projets Gerboise et Tamobiom).

2.4.2. Collecte des informations auprès des responsables des différents Lots

Cette collecte a concerné les matériaux produits par le Lot 3, les activités du Lot 2 n'ayant pas encore fait l'objet de publications. Par la même occasion, des publications issues d'autres projets sur la thématique du bois énergie (ex. : Defiforbois) ont été récoltées, et sont mises à disposition sur le « portail Gerboise » (voir plus loin).

2.4.3. Stratégie en matière de diffusion des informations auprès du public professionnel

Le projet prévoyait le transfert des résultats issus du projet vers (i) les exploitants, entrepreneurs forestiers, agents de développement, et énergéticiens consommateurs de la biomasse forestière, (ii) les scientifiques intéressés par la problématique du bois énergie, des sols forestiers, etc.

Le mode opératoire est nécessairement déconcentré (et non une diffusion générale par les acteurs du Lot 4) car les règles de la CNIL ne permettent plus de constituer des fichiers pour une telle diffusion. Le travail consiste donc à établir des relations avec les organismes compétents afin qu'ils assurent, chacun pour ce qui le concerne, le relai des informations. Cela nécessite d'une part l'implication des professionnels représentants des propriétaires (CNPF-IDF en sous-traitance, GCF, ONF), les organismes de certification (PEFC), les mobilisateurs de bois (FNEDT en sous-traitance, ONFE, GCF, COPACEL), les industriels utilisant la plaquette forestière (Soven), l'ADEME et les ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement et d'autre part, des partenaires du projet (FCBA, INRAE, INRAE-NOGENT, ONF, GCF, COPACEL).

Un mode de diffusion complémentaire aisé est celui des réseaux sociaux, prévu dans le cadre du projet. Le GIP Ecofor utilisera LinkedIn et Twitter qui sont assez complémentaires. Une information via « Les Echos d'ECOFOR » (plus de 2000 abonnés) est également prévue.

2.4.4. Elaboration d'un « portail Gerboise » à partir du site Gerboise

Le site Gerboise, conçu sous Drupal, a fait l'objet d'une migration vers Wordpress qui permet une prise en main et des modifications plus aisées.

Le site conçu dans le contexte du projet Gerboise a été modifié afin qu'il soit identifié comme un portail permettant d'accéder aux principales informations disponibles dans le domaine de la récolte de bois pour la production de plaquettes forestières principalement, ce qui n'exclut pas, à l'avenir, d'autres usages.

Concernant l'intitulé du portail, le choix du titre peut encore faire l'objet de discussions. Le « guide Gerboise 2019 » s'intitule « Gestion raisonnée de la récolte de Bois Energie » tandis que la brochure ADEME 2020 (sensiblement le même contenu) s'intitule « Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières ». La formulation

proposée (hybride) est Portail Récolte durable de bois pour la production d'Energie, avec pour sous-titre « Gerboise ». Une formulation plus contractée comme « Récolte durable de biomasse » (cf. titre du projet Tamobiom) pourrait être adoptée, mais évoque une thématique plus large (récolte de tous types de biomasse).

Le portail comporte les entrées (« onglets ») suivantes :

- Accueil : présentation du portail, objectifs, structuration.
- Projets français : présentation et ressources concernant la dizaine de projets recensés, dont Tamobiom, Gerboise, INSENSE, Defiforbois pour les plus récents, les projets les plus anciens remontant à 2008. La plupart des projets récents ont été financés par l'ADEME (les sources de financements sont mentionnées pour tous les projets). Cette partie est enrichie (liens vers les rapports finaux notamment) par rapport à la version « 2019 » du site Gerboise.
- Recommandations : présentation du Guide Gerboise 2019 et de la Brochure ADEME 2020, en attendant d'autres éléments, même minimaux, issus du projet Tamobiom (inefficacité du ressuyage, recherches concentrées sur l'épointage des cimes).
- Guides pratiques et synthèses des connaissances : la base de données internationale constituée en 2019 a été actualisée : les liens ont été vérifiés et le contenu enrichi (assez faiblement car la production de guides semble s'être ralentie). Ce sont environ 80 références qui sont proposées.

A noter qu'avec le projet Tamobiom, un type particulier d'information, que l'on souhaite plus accessible que le reste des informations, est mis à disposition ; il s'agit d'entretiens (« interviews écrites ») avec les responsables des Lots, qui seront disponibles sous quelques jours sur le site (dans la partie « Tamobiom » et, éventuellement sur la page d'Accueil.

2.4.5. Action de formation du secteur coopératif (webinaire) par INRAE- BEF (Nancy)

Une action de sensibilisation spécifique a été conçue par l'INRAE-BEF (Sols - Cycles biogéochimiques) à l'intention du secteur coopératif. Cette action s'appuie sur un Webinaire conçu par Laurent Saint-André, Delphine Derrien, Bernhard Zeller, Arnaud Legout, et Gregory Van der Hejden, constitué de 3 séries de 16 à 20 diapos sur les cycles biogéochimiques, sur l'impact de la gestion sur ces cycles et sur le tassement des sols. La première session a eu lieu le 18 janvier 2023, et a reçu un bon accueil, répondant aux attentes des coopératives pour ensuite diffuser l'information au sein de leurs organismes. Les deux autres auront lieu les 25 janvier 2023 et le 7 Février 2023.

Conclusion

Le projet a suivi son cours et a obtenu des résultats avec différentes difficultés liées à la crise sanitaire du printemps 2020 et des problèmes dans les équipes de production (maladies, PSE, démissions …).

Les résultats montrent que la problématique est complexe et mérite des investigations complémentaires pour adapter autant que faire se peut les modalités pratiques de la récolte des bois pour limiter les impacts sur les exportations des sols. Si la modalité RESSUYAGE peut être écartée car ne pouvant faire l'objet d'instructions claires pour les ETF selon les essences et la météorologie, les différentes modalités MENUS-BOIS testées dans de ce projet n'ont pas permis de conclure. Il s'agit de mieux cadrer les modalités techniques de coupe (et en envisager de nouvelles), augmenter le nombre de chantiers tests et par voie de conséquences consolider le protocole d'évaluation et le rendre opérationnel sur un grand nombre de situations.

De la même manière, les expériences comportementales indiquent que les incitations non monétaires (par exemple la signature d'une déclaration) peuvent contribuer à une meilleure adoption des recommandations de récolte de biomasse. Cependant, ces résultats doivent être consolidés par des expériences de terrain avec des professionnels de la forêt.

Le projet TAMOBIOM est une progression importante par rapport au projet GERBOISE dans la mesure où il a permis d'identifier les limites opérationnelles de quantification des restitutions des menus bois en forêt. Une approche complémentaire est nécessaire et demande de changer d'échelle (consolider et alléger le protocole d'évaluation et de suivi, augmenter le nombre de chantiers) pour la caractérisation des chantiers et l'équipe projet (GCF, ONF, COPACEL, FCBA, INRAE, ECOFOR) souhaite pouvoir poursuivre ces travaux dans ce sens. Un projet (GOLD) a été déposé en ce sens pour pouvoir aboutir à des recommandations pratiques adaptées aux opérateurs de l'exploitation.

Annexes

Sont annexés au rapport final les documents ci-dessous :

Annexe 1 : TAMOBIOM : CR suivi chantiers Lot 2

Annexe 2 : TAMOBIOM : Annexes Lot 3

Annexe 3 : TAMOBIOM : Valorisations Scientifiques

EXPERTISES

Rapport Final du projet TAMOBIOM

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

https://www.ademe.fr/

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
www.ademe.fr