



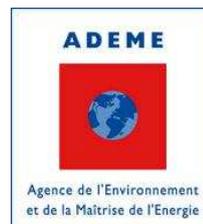
CETEF 56



## Etude de faisabilité pour la production de plaquettes forestières en Bretagne



Avec le soutien financier de :



CETEF - Chambre d'Agriculture du Morbihan  
Avenue du Général Borgnis Desbordes  
BP 398  
56009 VANNES Cedex  
Tél . 02 97 46 32 16  
Fax. 02 97 46 30 80  
samuel.leport@morbihan.chambagri.fr

*Rapport finalisé en septembre 2009*

# SOMMAIRE

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>I. Contexte</b>	<b>2</b>
1.1 Le bois énergie de l'Europe à la Bretagne	2
1.1.1 Le bois énergie en Europe	2
1.1.2 La situation française de la filière bois énergie	3
1.1.3 Quelques études menées en France	4
1.1.4 Situation actuelle du bois énergie en Bretagne	8
1.2 La gestion sylvicole des forêts	11
1.2.1 Une forêt bretonne gérée durablement	11
1.2.2 Exemple de la gestion sylvicole d'un peuplement de pin maritime	12
1.3 Différentes logistiques de chantiers bois énergie possibles	14
1.4 Problématiques et objectifs de ce travail	16
<b>II. Méthodologie</b>	<b>18</b>
2.1 Elaboration de la méthode	18
2.1.1 Principes de l'étude bretonne	18
2.1.2 Données recueillies pour chaque chantier	19
2.1.3 Analyses des échantillons	21
2.1.4 Discussion sur la méthode	21
2.2 Matériel utilisé lors des chantiers	22
2.3 Présentation des différents chantiers évalués	24
2.3.1 Première éclaircie et cloisonnements dans un peuplement de pin Laricio de Corse	24
2.3.2 Première éclaircie dans un peuplement de <i>Pterocarya rehderiana</i>	25
2.3.3 Récupération de houppiers sur une coupe rase de peuplier	26
2.3.4 Récupération de houppiers sur une coupe rase de pin maritime	27
2.3.5 Eclaircie sélective dans un peuplement de pin maritime	28
2.3.6 Cloisonnements dans un taillis de chêne, hêtre et bouleau	29
2.3.7 Première éclaircie et cloisonnements dans une plantation de chêne rouge d'Amérique	30
2.3.8 Eclaircie tardive et cloisonnements dans un peuplement de pin maritime	31

2.3.9 Coupe rase avec maintien de tiges éparses d'un peuplement de bouleaux cloisonné	32
2.3.10 Première éclaircie dans une plantation de mélèzes	33
2.3.11 Dépressage tardif dans un peuplement de pin maritime	34
<b>III. Résultats</b>	<b>35</b>
3.1 Synthèse des chantiers	35
3.1.1 Récapitulatif des chantiers	35
3.1.2 Rendements obtenus lors des chantiers	35
3.1.3 Méthode d'estimation du volume sur pied	38
3.1.4 Comparaison entre les estimations et les volumes obtenus	39
3.1.5 Bilan financier de l'ensemble des chantiers	40
3.1.6 Bilan énergétique des chantiers	44
3.1.7 Impact des opérations sylvicoles sur les parcelles	45
3.2 Débouchés des différents chantiers	46
3.3 Mise en place d'un tableau de conversions bois énergie en forêt	48
3.4 Comparaison des plaquettes obtenues avec d'autres sources d'énergie	49
<b>IV. Simulations et discussions</b>	<b>51</b>
4.1 Une meilleure valorisation des bois serait-elle possible pour certains chantiers ?	51
4.1.1 Valorisation « bois de sciage » à Néant sur Yvel	51
4.1.2 Vente de plaquettes sèches par le propriétaire à Ste Brigitte	52
4.1.3 Approvisionnement des chaudières en plaquettes humides	53
4.2 Améliorations techniques à apporter pour la production de plaquettes forestières en Bretagne	54
<b>Conclusion</b>	<b>56</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>57</b>
<b>Annexes</b>	<b>59</b>

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## Figures

<b>Fig. 1</b> - Photosynthèse et cycle du carbone dans la filière bois énergie	2
<b>Fig. 2</b> - Gisements bois énergie mobilisable en Bretagne et prélèvement de 2007	9
<b>Fig. 3</b> - Nombre de propriétaires et répartition de la surface boisée privée par taille de propriété	11
<b>Fig. 4</b> - Interventions sylvicoles préconisées sur le pin maritime	13
<b>Fig. 5</b> - Coordination de chantiers bois énergie en flux tendus	14
<b>Fig. 6</b> - Coordination de chantiers bois énergie en flux tendus	14
<b>Fig. 7</b> - Coordination de chantiers bois énergie avec rupture de charge	15
<b>Fig. 8</b> - Coordination de chantiers bois énergie avec rupture de charge	15
<b>Fig. 9</b> - Coordination de chantiers bois énergie avec rupture de charge	15
<b>Fig. 10</b> - Graphique présentant le rendement abattage / débardage en fonction du volume unitaire des arbres	36
<b>Fig. 11</b> - Graphique présentant le rendement déchiquetage en fonction du volume unitaire des arbres	37
<b>Fig. 12</b> - Méthode d'estimation du volume sur pied	38
<b>Fig. 13</b> - Graphique comparatif des volumes estimés et des volumes réels	39
<b>Fig. 14</b> - Récapitulatif par chantiers des coûts à tonne sèche	40
<b>Fig. 15</b> - Identification des consommations des différents postes de production	44
<b>Fig. 16</b> - Impacts des opérations sylvicoles sur les chantiers	46
<b>Fig. 17</b> - Comparaison des prix des énergies de différents combustibles domestiques	49
<b>Fig. 18</b> - Comparaison des prix des énergies de différents combustibles industriels	50

## Tableaux

<b>Tab. 1</b> - Classes de perturbations occasionnées au sol	20
<b>Tab. 2</b> - Prix des plaquettes forestières à différents stades de la production	41
<b>Tab. 3</b> - Moyenne des résultats par type d'opération sylvicole	42
<b>Tab. 4</b> - Tableau regroupant les acquéreurs et les lieux d'utilisation des plaquettes	47
<b>Tab. 5</b> - Simulation d'une livraison de plaquettes humides en chaufferie	54

## INTRODUCTION

Dans un contexte de hausses répétées des énergies fossiles et de lutte contre le réchauffement climatique, le bois apparaît comme une alternative à développer. Traditionnellement, le bois bûche était utilisé comme source de chaleur dans les foyers. Aujourd'hui, le bois énergie se décline en plusieurs combustibles et permet de d'alimenter des réseaux de chaleur, des usines de cogénération et des particuliers. Pourtant le bois sous ses différentes formes, ne couvre que 4 % des besoins énergétiques totaux de la France. Le bois énergie est un terme générique qui regroupe aussi bien les déchets industriels de bois, les connexes de scieries, le bois bûche, les granulés et les plaquettes de bois. Nous allons principalement nous intéresser aux plaquettes issus de l'exploitation forestière, couramment appelées plaquettes forestières.

La forêt représente la plus grande ressource en bois énergie, et pourtant certains bois issus d'opérations sylvicoles sont peu ou pas valorisés. Le CETEF du Morbihan, en partenariat avec le CRPF de Bretagne et l'association AILE, ont décidé de mener conjointement une étude sur la mobilisation de plaquettes forestières en Bretagne, financée par le Conseil Régional et l'ADEME. En parallèle de la gestion durable des forêts, le développement d'une filière durable de production de plaquettes forestières permettrait d'avoir des impacts positifs sur l'environnement (effet neutre sur les émissions de CO<sub>2</sub>), sur l'économie (diminution des importations d'énergie fossile) et permet de générer de nombreux emplois. Aujourd'hui une question se pose, avec les moyens présents en Bretagne, comment et à quelle prix pouvons nous produire des plaquettes forestières ?

Dans ce rapport, après avoir rappelé le contexte européen, national et régional, sur la filière bois énergie, nous allons aborder les différentes possibilités de logistiques pour la production de plaquettes forestières. Ensuite le protocole élaboré pour cette étude sera présenté, ainsi que les onze chantiers « pilotes » réalisés. En troisième partie de ce rapport, l'ensemble des chantiers feront l'objet d'une analyse technico-économique et énergétique, qui aboutira à la mise en place d'un tableau de conversions facilement utilisable pour effectuer des estimations lors d'une production de plaquettes forestières. Enfin, des simulations et quelques améliorations techniques seront proposées pour optimiser la production de plaquettes en forêt bretonne.

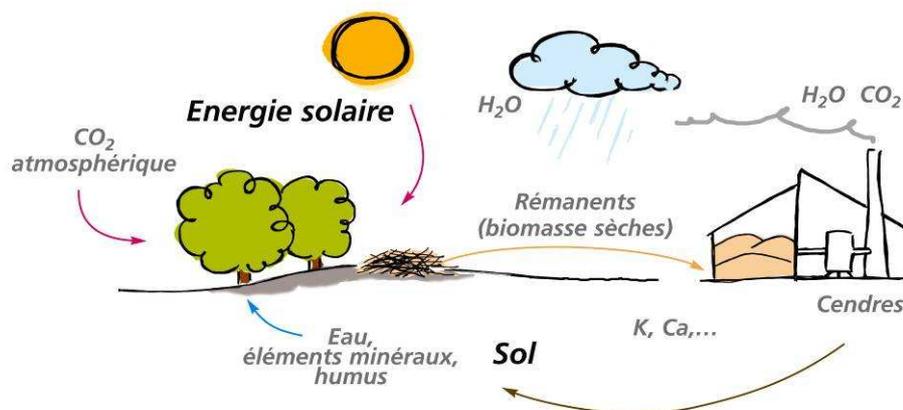
## I. CONTEXTE

### 1.1 Le bois énergie de l'Europe à la Bretagne

#### 1.1.1 Le bois énergie en Europe

La surface forestière en Europe représente 156 millions d'ha, soit 36 % du territoire, pour un volume de 22 milliards de m<sup>3</sup> et 12 milliards de tonnes de biomasse (Eurofernet, 2006). La gestion forestière européenne est tournée vers une production durable de bois de qualité (bois d'œuvre, panneaux, papier, ...). Pourtant, près de 35 % de la croissance annuelle des forêts ne sont pas valorisés en raison du marché restreint des éclaircies\*, dans certains pays, et du morcellement d'une grande partie des ressources disponibles.

Dans un contexte de hausses des prix des énergies fossiles en cours d'épuisement et de lutte contre le réchauffement climatique, le bois apparaît comme une alternative à développer. En effet, si les forêts sont gérées durablement, la combustion de plaquettes a un « effet neutre » sur les émissions de CO<sub>2</sub>. La quantité de carbone émise lors de la combustion est égale à la quantité de carbone absorbée pendant la croissance du bois (*cf.* figure 1), à la différence des énergies fossiles qui dégagent dans l'atmosphère du CO<sub>2</sub> jusqu'alors mobilisé en sous-sol. Avec un matériel de chauffage adapté, le bois énergie émet 12 fois moins de gaz à effet de serre (en équivalent carbone) que la filière « charbon », 8 fois moins que la filière « fioul domestique », 7 fois moins que la filière « gaz naturel » et 2 fois moins que la filière « électricité » (IDF : PICARD, 2006).



source : Chambre d'Agriculture du Finistère

Fig. 1 : Photosynthèse et cycle du carbone dans la filière bois énergie

L'Union Européenne affiche l'ambition d'atteindre une consommation de bois de 100 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) à l'horizon 2010 alors que la consommation actuelle est de 44 millions de tep par an. La filière n'est actuellement pas sur le bon rythme pour atteindre cet objectif, mais la situation n'est pas irrémédiable (DEFAYE, 2004). Les pays tel que la Finlande, la Suède et le Danemark font des efforts sur la structuration de leur marché bois énergie, les innovations technologiques, le développement de la cogénération bois et les réseaux de chaleurs. Ils montrent ainsi que cette filière peut participer à des niveaux élevés de production d'énergie.

L'Allemagne, quant à elle, a réussi à doubler sa consommation de bois énergie en 4 ans. Elle est passée à plus de 4 millions de tep supplémentaires, en développant les chaufferies collectives et la cogénération bois. La Suisse, depuis une quinzaine d'années, développe de nombreuses chaufferies collectives de dimensions de : 16 MW à Bulle, 3 MW à Saint-Aubin, 3 MW à Lausanne, .... Il y a actuellement, dans ce même pays, un projet de 3 nouvelles chaufferies bois qui généreront une puissance de 170 MW, avec une consommation de 150 000 tonnes de bois par année. Ce projet inquiète certains spécialistes suisses notamment par rapport à la ressource ligneuse disponible, aux flux irréguliers selon les saisons et au stockage à la mesure de ce gigantisme (RERAT, 2009).

### 1.1.2 La situation française de la filière bois énergie

La France est le principal pays producteur de bois énergie en Europe, avec une production de 10.2 millions de tep pour l'année 2008. Bien que le bois énergie corresponde à 55 % de la production d'énergie renouvelable, celui-ci n'a représenté, en 2007, que 7.8 % de la production nationale d'énergie primaire (MEEDDAT, 2008). L'Etat a cependant comme objectif, pour l'horizon 2020, une production avec le bois de 15 millions de tep par an (BLANC & al, 2007). Cet objectif a été signé dans le Grenelle de l'Environnement en 2008.

La forêt française occupe 27 % du territoire métropolitain (MAAPAR, 2003). Depuis les années 1950, celle-ci a augmenté de moitié. Seulement 60 % de l'accroissement naturel est prélevé chaque année (ADEME, 2009). Le potentiel forestier est important et peut permettre de répondre aux besoins qui lui sont demandés. Pour autant, la filière bois énergie doit être structurée de manière durable, économique, sociale et environnementale. C'est pourquoi

l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) a lancé et piloté un programme Bois-Energie 2000-2006.

Un premier programme Bois-Energie 2000-2006 avait comme objectif de structurer durablement la filière, tant au niveau de l'approvisionnement que de l'équipement en chaufferies collectives des secteurs résidentiel, tertiaire et industriel. L'objectif principal était de susciter l'installation de 1000 chaudières à bois, afin d'économiser 300 000 tep par an et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 700 000 tonnes. L'objectif a été largement atteint, car ce ne sont pas moins de 1400 chaufferies collectives et tertiaires et 480 chaufferies industrielles qui ont été construites entre 2000 et 2005 (ADEME, 2009). La filière s'est développée petit à petit avec plus de 60 sociétés organisant et livrant le bois, et 300 organisations institutionnelles et professionnelles intervenant sur le marché. Suite aux résultats concluants de ce programme, l'ADEME a lancé un autre programme Bois-Energie 2007-2013 qui fixe un objectif de 290 000 tep supplémentaires de bois pour cette même période. Aujourd'hui, l'objectif semble cependant ambitieux (ADEME, 2009).

Soulignons que le développement de cette filière de production de plaquettes forestières se fait, du point de vue de certains, au détriment de filières déjà existantes. Les papetiers et les panneautiers, gros acheteurs de bois d'industrie, se sentent en danger par rapport à une augmentation des prix de leur matière première. Les coopératives répondent que les forêts ont assez de « petits bois » pour tous. Les papetiers, eux, pensent qu'une concurrence existera et se fera sur les bois les plus facilement exploitables (DE BONAN, 2005). Certains scieurs spécialisés sur les petits bois en billon se méfient également de la filière bois énergie en forêt. Cependant, le développement d'une telle filière semble primordial pour répondre aux enjeux énergétiques de demain. Elle devra prendre sa place dans l'économie forestière sans pour cela devenir une concurrente des filières existantes.

### 1.1.3 Quelques études menées en France

Les plaquettes forestières ont un coût de production nettement plus élevé que certaines plaquettes actuellement disponibles, comme celles issues des connexes de scieries par exemple dont l'avantage est le regroupement sur site. Pour intéresser les propriétaires forestiers à la production de plaquettes, il est nécessaire d'apporter des réponses à propos de

la conduite et de la rentabilité des chantiers. C'est dans cet objectif principal que le Centre d'Etudes Techniques Forestières (CETEF) du Morbihan, en collaboration avec le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF) de Bretagne, l'Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement (AILE) et la Chambre d'agriculture du Morbihan, ont décidé de mener une étude technico-économique sur la production de plaquettes forestières en Bretagne.

Plusieurs études ont déjà été menées en France, ayant des objectifs similaires ou complémentaires à cette étude bretonne. Voici quelques exemples d'études françaises, avec leurs objectifs principaux et les résultats qui en découlent :

- « Etude visant à estimer le bilan technico-économique de la production et de la mobilisation de bois énergie dans les forêts lorraines »

La coopérative forestière Forêts & Bois de l'Est (F&BE), l'Office National des Forêts (ONF), le CRPF Lorraine-Alsace et la Chambre d'Agriculture des Vosges ont mené conjointement cette étude, qui a débuté en été 2005. L'objectif était de déterminer le bilan technico-économique de la production et de la mobilisation de bois énergie dans les forêts lorraines. Cette étude a fait l'objet de réalisations d'outils techniques d'information destiné aux propriétaires et aux gestionnaires forestiers.

Une douzaine de chantiers pilotes ont été mis en place. Ces chantiers ont été choisis de part la représentativité de la ressource régionale, en ayant également comme critères une superficie permettant de réaliser des chantiers à grandeur réelle, avec un minimum de 30 tonnes/ha de plaquettes mobilisables et une distance de moins de 50 km d'une chaufferie. Plusieurs itinéraires techniques ont été abordés pour être les plus opérationnels possibles par rapport aux peuplements. Un protocole de suivi des chantiers a été mis en place par les partenaires et a été testé sur les chantiers réalisés.

Les conclusions de cette étude ont été nombreuses. Tout d'abord, sur les aspects techniques, le déchiquetage\* sur parcelle avec une déchiqueteuse automotrice, combinée à un porteur à plaquettes, s'est avéré 30 % plus chère. L'utilisation conseillée pour ce type de logistique est d'avoir un chantier avec un rendement minimum de déchiquetage de 9 m<sup>3</sup>/h. Le déchiquetage en bord de route, quand à lui, semble avoir un coût très intéressant sur les

résineux, et n'a pas montré de grand intérêt dans les feuillus. Pour augmenter la rentabilité d'un chantier bord de route, le débardage\* est très important. Dans le cas de débardage de houppiers, il est favorable d'utiliser un matériel adapté (porteur avec grappin découpeur) et un chauffeur avec de l'expérience. Pour le transport, il est conseillé d'éviter le déchiquetage au sol, qui entraîne un coût de reprise compris entre 2 et 5 €/tonne. Les prix de revient finaux de ces chantiers sont compris entre 36.80 €/t sèche et 142.30 €/t sèche, pour une moyenne de 52.30 €/t sèche (F&BE, 2007).

➤ « Chantier de production de plaquettes forestières en Rhône Alpes »

Cette étude a été menée par l'Union Régionale des Associations des Communes Forestières de Rhône Alpes (URACOFRA), la Coopérative Forestière des Alpes (COFALP) et l'ONF, sur les années de 2005 et 2006. L'objectif de cette étude était d'apporter aux collectivités, consommatrices d'énergie, et aux propriétaires de forêts, des éléments de réponse sur la faisabilité de filière bois énergie locale, notamment sur la mobilisation des bois et sur les techniques d'exploitation différentes selon les ressources disponibles. En effet, cette région comporte beaucoup d'arbres morts sur pied, d'arbres très branchus situés dans les zones de déprise agricole, et également des bois issus d'opérations sylvicoles classiques.

Une dizaine de chantiers ont été réalisés, 9 en forêts communales et 2 en forêts privées, et sont situés dans différents départements de la région Rhône Alpes. Sur chaque chantier, un maximum de bois d'œuvre a été prélevé dans un but de ne pas vouer les forêts qu'à la seule production de bois énergie. Différents types de chantiers sylvicoles ont été conduits : éclaircies, coupes sanitaires, coupes rases, ou mise en valeur de zones en déprise agricole. Lors des coupes rases, seules les purges de grume ont été récupérées, correspondant aux parties endommagées par un champignon, le Fomes. Suivant les peuplements et les stations, ces purges ont représenté jusqu'à 40 % du volume total des grumes.

Les conclusions de cette étude ont principalement porté sur la bonne organisation du chantier, en évitant au maximum les ruptures entre les différentes interventions (abattage\*, débardage, déchiquetage...). A posteriori, le coût de production des plaquettes reste relativement élevé, allant de 70 à 120 €/tonne sèche, avec une moyenne d'environ 90 €/tonne sèche livrée chaufferie. Ces prix sont dus notamment aux conditions difficiles du milieu alpin. Mais produire des plaquettes à bas prix n'était pas le seul objectif visé. La mise en place

d'une filière durable et d'une bonne gestion des peuplements étaient également importante. Cependant, il est précisé que les coûts pourraient être réduits en améliorant l'organisation, en stockant les plaquettes sous un hangar et en utilisant une déchiqueteuse plus performante (URACOFRA, 2007).

➤ « Broyage plaquettes sur parcelle de peupliers en Maine et Loire »

En 2005, le CETEF de Maine et Loire a mis en place une étude visant à valoriser les sous-produits issus de l'exploitation forestière après abattage d'une peupleraie. Un chantier pilote sur une coupe rase de peupliers a été suivi avec pour objectif de produire des plaquettes à un prix de revient compétitif assurant une rémunération au propriétaire forestier.

L'étude a été menée sur une parcelle de 3 ha environ. Les peupliers ont été exploités en bois d'œuvre de sciage et déroulage jusqu'à un diamètre de 25-30 cm de diamètre fin bout et les houppiers ont été laissés sur la coupe, non démembrés. La démonstration a permis d'effectuer 3 essais :

- déchiquetage des houppiers un an après coupe ; la déchiqueteuse se déplace sur la parcelle, un tracteur la suit avec une remorque,
- déchiquetage des houppiers un an après coupe ; les houppiers sont débusqués et mis en bordure de parcelle où ils sont déchiquetés,
- déchiquetage d'arbres fraîchement coupés, contrairement aux deux autres modalités.

Cette étude a démontré que les meilleurs rendements se faisaient quand la déchiqueteuse était à poste fixe. Il est préférable de déchiqueter du bois qui a environ 2-3 mois de séchage, laissant le temps aux feuilles de tomber. Avec plus d'un an de séchage, la granulométrie des plaquettes est trop faible. Avec une estimation du coût de séchage à 8 €/tonne sèche, ces plaquettes ont un prix de départplate-forme de stockage de 53 à 58 €/tonne sèche, auquel il faut ajouter le coût de transport pour approvisionner la chaufferie. A posteriori, le propriétaire pourrait augmenter le prix de vente de la coupe de 2 à 3 €/m<sup>3</sup> sur pied, quand un chantier de déchiquetage des houppiers est prévu, puisque l'acheteur des grumes est déchargé de la remise en état de la parcelle (CETEF 49, 2005).

➤ « Emploi des chablis de pin maritime pour une utilisation énergétique industrielle »

Cette étude a été réalisée par l'AFOCEL suite à la tempête de 1999 qui avait dévasté la forêt Landaise. L'objectif de cette étude était d'évaluer les coûts d'exploitation des arbres chablis à destination du bois énergie, sur des chantiers représentatifs des parcelles qui n'étaient pas encore exploitées. Ces parcelles portaient des petits bois ou des bois moyens dont le taux de dégât était généralement très élevé.

L'étude a été menée sur 4 chantiers avec des taux de dégâts allant de 45% à 97 %. Les bois verts étaient destinés à l'industrie du sciage, lorsque les dimensions étaient suffisantes, ou à la trituration. Le bois dégradé quant à lui était destiné aux papeteries ou pour la production de bois énergie. La méthodologie de cette étude consistait à évaluer les coûts d'exploitation par chronométrage, lors du façonnage\* et du débardage. Pour le déchiquetage, deux scénarios ont été mis en place : avec un déchiquetage en bord de route ou sur le site industriel.

Les résultats ont montré que le façonnage et le débardage des bois destinés au déchiquetage entraînaient un surcoût de 13 à 19 % par rapport au bois vert. Cet écart est d'autant plus important lorsque les arbres ont des petits volumes. Le calcul des coûts de déchiquetage montre que l'opération sur site industriel est beaucoup plus avantageuse que le déchiquetage en bord de route. Les coûts finaux des plaquettes restent cependant relativement faibles car, pour le déchiquetage sur site industrielle, le prix est compris entre 20 et 30 € ht/tonne humide et le prix pour le déchiquetage en bord de route est compris entre 25 et 33 € ht/tonne humide. Ces coûts s'expliquent par un prix d'achat nul des bois chablis et par l'utilisation de matériels couramment utilisés pour le bois rond.

#### 1.1.4 Situation actuelle du bois énergie en Bretagne

Afin de continuer à structurer la filière bois énergie en Bretagne, un troisième « Plan bois énergie Bretagne » a été renouvelé sur la période 2007 – 2013. Ce programme est financé par 6 partenaires : l'ADEME, le Conseil Régional et les quatre Conseils Généraux de Bretagne. Les objectifs de ce plan bois énergie sont :

- faciliter la création de nouvelles chaufferies, en sélectionnant les projets les plus propices au bois,

- encourager l'autoconsommation du bois chez les agriculteurs,
- conforter les structures d'approvisionnement pour garantir une offre de bois en quantité et en qualité.

Ces objectifs ont pour but d'augmenter la consommation annuelle de bois déchiqueté de 100 000 tonnes, toutes sources confondues, en installant des chaudières pour une puissance cumulée de 100 MW. Cette consommation permettrait d'économiser 27 500 tep par an, de réduire les émissions de 70 000 tonnes de CO<sub>2</sub> et d'induire 30 millions d'euros de chiffre d'affaires dans le secteur (AILE, 2007). En 2008, environ 350 chaufferies étaient installées ou en construction, pour une consommation prévue de 144 000 tonnes de bois déchiqueté (PEDRON, 2009).

Au début de ce programme 2007 - 2013, la filière bois énergie en Bretagne représentait :

- 96 chaudières collectives et industrielles pour une puissance cumulée de 87 MW,
- 157 chaudières dans le milieu agricole pour une puissance cumulée de 6 MW,
- 3 plates-formes d'approvisionnement multi-produits,
- 4 plates-formes locales d'approvisionnement.

La consommation annuelle de ces chaudières représentait 85 000 tonnes de bois déchiquetés, principalement issues des connexes de scieries (60 %) et des déchets bois (33 %). La part des plaquettes forestières ne représentait que 4 % de la consommation, bien qu'elle soit la ressource mobilisable la plus importante dans la région (cf. figure 2).

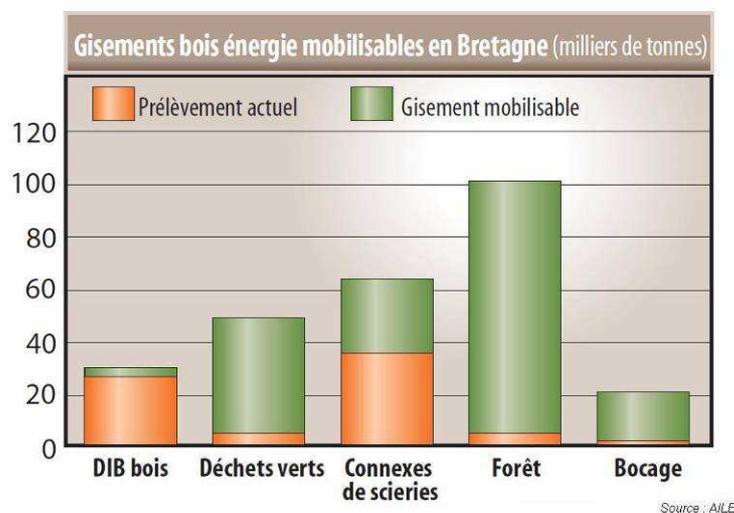


Fig. 2 : Gisements bois énergie mobilisable en Bretagne et prélèvement de 2007

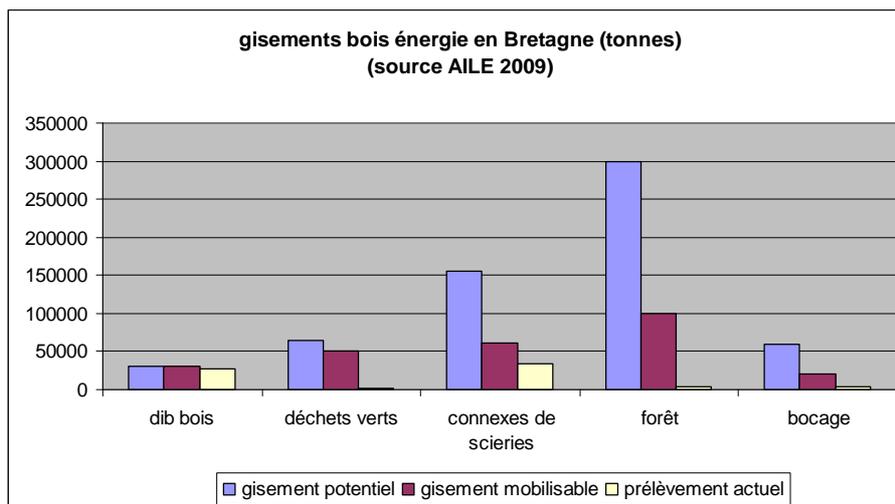


Fig. 2 bis : Gisements bois énergie en Bretagne

La part du gisement facilement mobilisable en forêt bretonne représente environ 100 000 tonnes de bois (*cf.* figure 2 et 2 bis), pourtant avec plus de contraintes d'exploitations, celle-ci peut atteindre les 300 000 tonnes mobilisable (PEDRON, 2009). Lorsqu'un bénéficiaire s'engage dans le Plan bois énergie Bretagne, celui-ci doit respecter quelques règles qui permettent de garantir une gestion durable de la ressource bois : les plaquettes doivent provenir du Grand Ouest ; les plaquettes forestières doivent être issues d'une gestion durable des forêts ; les plaquettes bocagères doivent provenir d'un engagement dans un plan de gestion du bocage ; les déchets doivent forcément provenir d'un bois de classe A, soit un bois non traité provenant de bois d'emballage, caisseries et palettes. Pour développer de nouveaux gisements et homogénéiser le prix des plaquettes, les plates-formes d'approvisionnement et les chaufferies qui gèrent elles-mêmes leur alimentation doivent respecter quelques conditions pour l'approvisionnement. Les plaquettes forestières doivent représenter au minimum 25 % de la consommation et les déchets industriels de bois ne doivent pas constituer plus de 50 % de la consommation, les déchets verts et les connexes de scieries assurant un éventuel complément (AILE, 2007)

C'est par rapport à ces obligations que la production de plaquettes forestières doit se développer en Bretagne. Cependant, la production de celles-ci demande des conditions d'exploitation spécifiques par rapport aux autres gisements, notamment ceux issus de scierie. Toutefois, les propriétaires forestiers bretons semblent très intéressés par le développement de cette filière. D'ailleurs, le CRPF de Bretagne, en collaboration avec le CETEF du Morbihan, a organisé cette année une réunion d'information avec pour thème « la mobilisation et

l'exploitation des plaquettes forestières pour le chauffage au bois » avec visite de la chaufferie de Sérent (56) et d'un chantier de production de plaquettes forestières montrant les différentes étapes, de l'abattage au déchiquetage. Cette réunion a rencontré un vif succès avec une centaine de propriétaires forestiers présents, sans compter les nombreuses réponses négatives de propriétaires regrettant de ne pas pouvoir assister à cette réunion. Cette expérience traduit l'intérêt des propriétaires forestiers bretons pour cette filière émergente.



## 1.2 La gestion sylvicole des forêts

### 1.2.1 Une forêt bretonne gérée durablement

La forêt privée bretonne couvre environ 300 000 ha, soit 90 % de la surface boisée régionale. Cette forêt est en augmentation constante, avec un accroissement de 3000 ha par année. Cependant avec un taux de boisement de 12 %, la Bretagne reste faible par rapport à la moyenne nationale qui est de 27 % (CRPF, 2005). Malgré quelques grands massifs distincts, la forêt privée bretonne est très morcelée et éclatée en de nombreuses petites unités appartenant à un grand nombre de propriétaires (cf. figure 3).

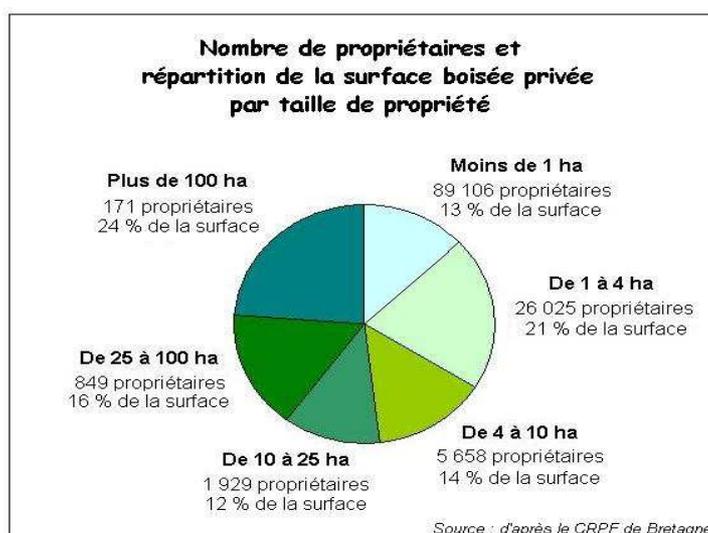


Fig. 3 : Nombre de propriétaires et répartition de la surface boisée privée par taille de propriété

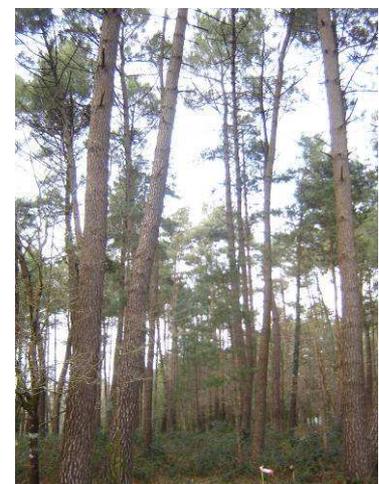
La forêt privée bretonne appartient à environ 124 000 propriétaires différents, dont moins d'un tiers possédant plus de 1 ha (CRPF, 2005). Le morcellement de cette forêt privée est un handicap majeur pour rationaliser sa gestion et pour son développement économique. Tout propriétaire, quelle que soit la surface détenue, peut désormais s'engager dans la gestion durable. Tout d'abord avec le Plan Simple de Gestion (PSG) qui est obligatoire pour les propriétés de plus de 25 ha d'un seul tenant. Il peut être également être volontaire, pour les propriétés d'une surface totale supérieure à 10 ha. Le PSG est un outil de travail qui programme les opérations sylvicoles sur une durée de 10 à 20 ans, il est réalisé par le propriétaire ou un maître d'œuvre (expert forestier ou coopérative) et doit recevoir l'agrément du CRPF.

Les propriétés ne rentrant pas dans le champ d'application du PSG peuvent adhérer au Code des Bonnes Pratiques Sylvicoles (CBPS) proposé depuis 2007 par le CRPF de Bretagne qui définit, suivant les types de peuplements, les différents itinéraires sylvicoles relevant de la gestion durable. Cette adhésion se fait pour une durée de 10 ans renouvelable, et permet d'accéder aux avantages fiscaux, à un système de certification et aux aides publiques.

Les propriétés peuvent également être confiées à un expert forestier ou une coopérative forestière qui établissent un Règlement Type de Gestion (RTG) et deviennent maître d'œuvre en gérant de manière durable la propriété.

### 1.2.2 Exemple de la gestion sylvicole d'un peuplement de pin maritime

Le pin maritime est la première essence résineuse de Bretagne. Originaire des landes de Gascogne, il a été introduit massivement dans la région à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle. Il occupe désormais 44 000 hectares, qui représentent environ 11 % de la surface boisée bretonne et près des trois quarts de ces peuplements se situent dans le département du Morbihan (CRPF, 2003). Le pin maritime est peu exigeant, colonise les stations les plus pauvres et ne craint pas les sols engorgés en eau. Cependant, cette essence a besoin de lumière, ce qui nécessite une sylviculture attentive avec des éclaircies précoces et rapprochées (CRPF, 2005).



La qualité de son bois dépend de la sylviculture reçue. Les arbres peuvent être flexueux et branchus lorsqu'ils sont mal suivis ou produire des sciages de qualité issus d'une sylviculture adaptée. En Bretagne, cette essence est beaucoup utilisée pour la fabrication de palettes, mais les usages peuvent être variés comme la menuiserie, les parquets, les lambris et les charpentes. Son bois à cœur rouge est assez sombre et très résineux. Dans les landes de Gascogne, le pin maritime a été également cultivé pour récolter sa résine, pratique qui n'a jamais existé en Bretagne.

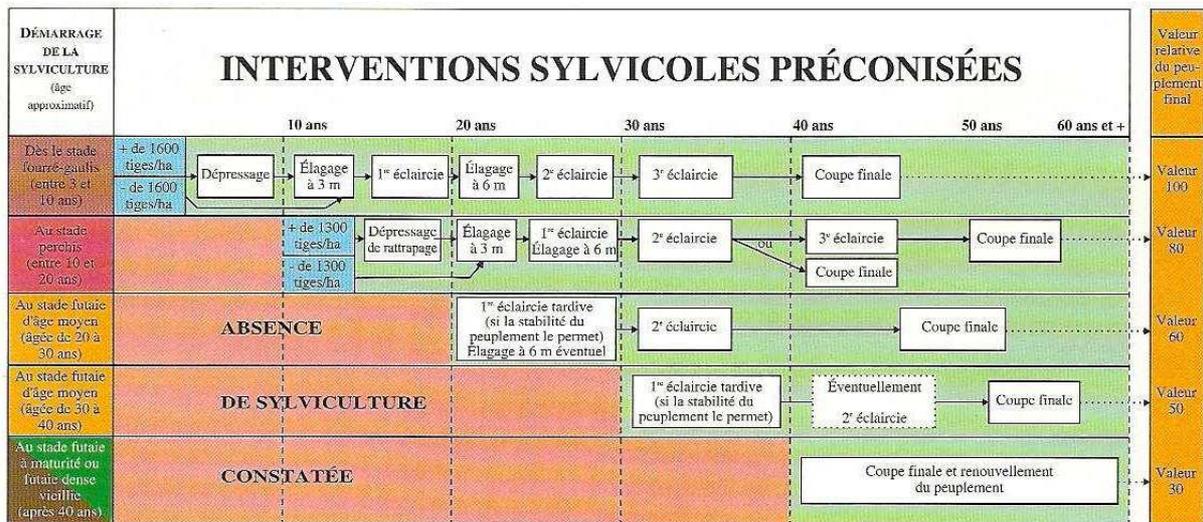


Fig. 4 : Interventions sylvicoles préconisées sur le pin maritime (source : CRPF de Bretagne)

La première ligne de la figure 4, nous montre les opérations sylvicoles à effectuer sur un peuplement de pins maritimes en fonction de son âge. Ces opérations se déroulent tout au long de la vie du peuplement : un dépressage\*, trois éclaircies et deux élagages. Seulement, dans de nombreux cas, les opérations sylvicoles sont négligées, au point de présenter parfois des densités de 4 000 tiges/ha à 20 ans. Il faut savoir qu'une régénération naturelle ou un semis de pin maritime peut aller au-delà d'une densité de 20 000 tiges/ha, alors que la densité d'une coupe finale se situe entre 300 et 400 tiges/ha. Tout retard sylvicole a pour conséquence la limitation de la croissance en diamètre des arbres et, au final, une dépréciation du bois. Si aucune intervention n'a été effectuée avant 25 – 30 ans, moitié de la durée de vie d'un peuplement correctement suivi, aucune expérience ne démontre que les arbres auront la capacité à réagir (CARREAU, 2009).

Lorsque les opérations sont correctement effectuées, les bois issus des éclaircies sont commercialisés en trituration lors de la 1<sup>ère</sup> éclaircie et en sciage à partir de la 2<sup>ème</sup> éclaircie. La filière bois énergie peut s'afficher comme un débouché potentiel pour les bois issus de dépressages tardifs, de premières éclaircies ou encore de houppiers obtenus après coupe rase. Cependant l'utilisation des rémanents (branches et système foliaire) représente une forte exportation minérale risquant d'appauvrir des terrains déjà très carencés. Les prélèvements ne doivent donc pas se renouveler automatiquement à chaque opération sylvicole et ne pas porter sur l'ensemble de la biomasse disponible. En fonction de la sensibilité du sol et suivant la nature du peuplement, un nombre maximum de récoltes des rémanents doit être établi.

### 1.3 Différentes logistiques de chantiers bois énergie possibles

Plusieurs coordinations de chantier de production de bois énergie sont possibles. Le choix se fait principalement selon le matériel disponible, le terrain, le peuplement et le produit à livrer. Dans un premier temps, le choix se fait soit en flux tendus (juste après le déchiquetage les plaquettes sont acheminées à la chaufferie), soit avec rupture de charge (les plaquettes sont stockées pour le séchage puis sont livrées à l'utilisateur prêtes à l'emploi).

➤ Logistiques en flux tendus :



Fig. 5 et 6 : Coordination de chantiers bois énergie en flux tendus

Ces deux types illustrés de logistiques en flux tendus permettent de réduire les coûts de production car elles comportent un minimum de manutentions et ne prévoient pas de stockage intermédiaire. Pour une production directement sur la coupe, l'entreprise doit être équipée d'une déchiqueteuse automotrice qui a un coût élevé (environ 460 000 €) et avec des rendements de déchiquetage constatés, de l'ordre de 50 MAP/h (COIC & al., 2008). Un porteur équipé d'un caisson doit effectuer la liaison entre la déchiqueteuse mobile et les caissons placés en bord de route, afin de rentabiliser au maximum le temps de travail de cette

déchetuse. Cependant pour utiliser ce type de machine, la bonne portance du sol est une condition indispensable car la machine une fois chargée atteint un poids élevé. Pour ces deux logistiques, il est important de laisser sécher les bois, au minimum 3 mois, soit directement sur la parcelle, soit en bord de route (cf. figure 6). Dans ce dernier cas, la zone de déchetage doit être déterminée en fonction du transport choisi (semi-remorques, caissons...) et doit être située dans un endroit accessible avec une bonne visibilité si les camions sont arrêtés sur une route passante.

➤ Logistiques avec rupture de charge :

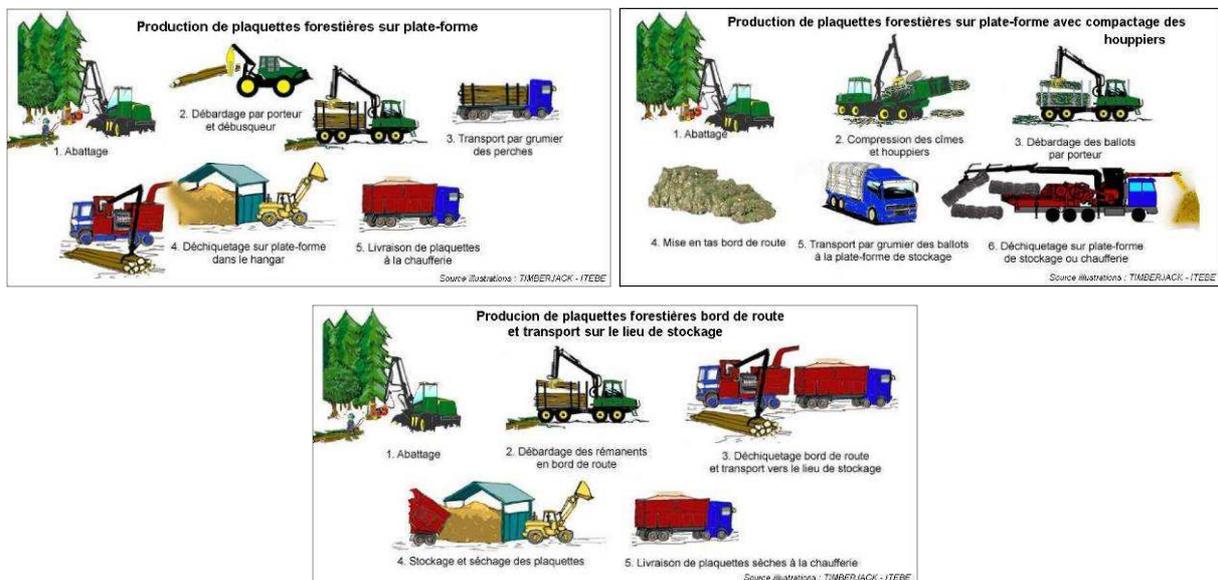


Fig. 7,8 et 9 : Coordination de chantiers bois énergie avec rupture de charge

Pour atteindre un taux d'humidité de 25 à 35 % répondant aux exigences des chaudières collectives de moins de 400 kW (AILE), cela nécessite un stockage des plaquettes, de préférence sous hangar ventilé, entre 4 et 6 mois, avant la livraison en chaufferie. On aura donc une rupture de charge (cf. figures 7, 8 et 9). La première solution est de transporter les perches par grumier, ce qui permet d'avoir un volume de bois inférieur au volume de ce même bois sous forme de plaquettes. De ce fait, le déchetage a lieu sur la zone de stockage/séchage des plaquettes. Dans le cas contraire, le déchetage se fait en bordure de route. Cette dernière logistique (cf. figure 9) permet d'avoir différents moyens de transport : si la zone de stockage se situe à une faible distance du chantier, le transport peut se faire avec des tracteurs équipés de bennes céréalières ; si la zone de stockage est éloignée le transport avec des semi-remorques ou des bennes semble le plus adapté. Seulement, comme dit précédemment le volume de bois sera plus important, en considérant qu'un stère\* correspond

à 1.75 MAP humide (cf. annexe 1). Une déchiqueteuse automotrice (cf. figure 5) peut également être utilisée, les bennes étant acheminées au lieu de stockage et non en chaufferie.

## 1.4 Problématiques et objectifs de ce travail

En France, le bois sous ses différentes formes couvre seulement 4 % des besoins énergétiques totaux du pays. D'après les données IFN de 2004, les rémanents (résidus laissés au sol après coupe en forêt) de l'exploitation forestière forment un gisement de 34 millions de mètres cube, soit 7.3 millions de tep. En Bretagne, la forêt couvre 12 % du territoire régional. Elle est très morcelée et parfois mal valorisée. Les produits issus des opérations d'entretien au cours de la vie du peuplement (éclaircies) et après leur exploitation (houppiers, rémanents) sont peu commercialisés ou laissés sur la parcelle. Afin de valoriser au mieux les bois sous forme de plaquettes et répondre à une demande croissante des collectivités pour alimenter leurs chaudières, il est nécessaire d'établir au préalable des références à partir de « chantiers types » représentatifs des peuplements forestiers de notre région et des opérations sylvicoles les plus courantes.

Ce travail construit autour de onze chantiers de production de plaquettes aura pour objectifs de :

- Réaliser une étude technico-économique (matériels, coûts, temps, rentabilité, contraintes...) sur chaque chantier, lors de nettoyage après coupe rase ou d'opérations sylvicoles classiques (éclaircie, cloisonnement),
  - o Etablir un prix de revient de la tonne sèche de plaquettes forestières prenant en compte la configuration de chaque chantier,
  - o Proposer un prix de vente à différents niveaux (map humide, map sec, tonne sèche) permettant d'avoir un rapport gagnant/gagnant entre le vendeur (propriétaire forestier) et l'acheteur (collectivité, entreprise).
- Aider à estimer le potentiel de production de plaquettes par type de peuplement forestier,
- Conseiller les propriétaires forestiers sur la faisabilité de chantiers de déchiquetage (rentabilité, contraintes...).

Ce travail devrait apporter des éléments concrets aux collectivités pour leur permettre de développer et créer des filières courtes d'approvisionnement en collaboration étroite avec les propriétaires forestiers de leur territoire. Ces derniers pourront valoriser leurs produits d'éclaircie difficilement commercialisables en tant que bois d'œuvre ou bois de trituration, ainsi que leurs rémanents après coupe.

## II. METHODOLOGIE

### 2.1 Elaboration de la méthode

#### 2.1.1 Principes de l'étude bretonne

Suite à un engouement des propriétaires forestiers du CETEF du Morbihan sur le sujet du bois énergie, le groupe de travail du CETEF avait mûri l'idée d'une étude sur ce thème. Parallèlement, le CRPF de Bretagne commençait à suivre quelques chantiers de déchiquetage, sans protocole précis. Afin d'axer la filière bois énergie sur l'utilisation de plaquettes forestières, l'association AILE souhaitait acquérir des données techniques et économiques régionales à partir de chantiers tests. A partir de novembre 2007, un groupe de travail réunissant propriétaires forestiers, ingénieurs et techniciens des différents organismes (CETEF, CRPF, AILE) s'est mis en place. Ce groupe de travail a décidé de s'appuyer sur des études françaises déjà existantes pour l'élaboration du protocole. En effet deux protocoles, l'un de l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) et l'autre de l'AFOCEL, ont servi de base pour l'élaboration de la présente étude. Le choix d'élaborer un protocole sur la base de deux protocoles existants a été pris afin de tenir compte des expériences passées et de comparer au plus juste les données des chantiers menés par l'IDF et AFOCEL à celles de la Bretagne.

La logistique choisie est celle de déchiqueter les bois bord de route (*cf.* figure 9, page 15) afin d'évaluer plus précisément les volumes produits et de simuler une production de plaquettes forestières possible pour les propriétaires. Dans la majorité des cas, l'ensemble des opérations sylvicoles sont mécanisées afin d'obtenir une productivité maximum. Le fait d'utiliser un abattage mécanisé permet également d'ébrancher les billons, d'avoir des plaquettes les plus homogènes possibles avec un minimum de particules fines et de laisser les rémanents fins pour le bon renouvellement des sols de la parcelle (ADEME, 2006). Une taille de 4 m pour les billons a été fixée ce qui permet d'optimiser les rendements lors de l'abattage (CACOT, 2009) et de diminuer la manipulation des bois. Afin de pouvoir comparer les différents chantiers et surtout la qualité des plaquettes, une seule entreprise pour le déchiquetage a été sollicitée. Le fait d'utiliser une même déchiqueteuse permet également de comparer le rendement de la machine en fonction des différentes essences et contextes. Deux

autres entrepreneurs ont été choisis pour assurer l'abattage mécanisé ou manuel et le débardage. Pour chaque chantier, le protocole prévoit une estimation du volume sur pied, le suivi des différents postes de travail, les perturbations occasionnées au sol et les blessures réalisées sur arbres restant.

### 2.1.2 Données recueillies pour chaque chantier

Comme pour l'élaboration du protocole, les fiches de suivi de chantier ont été réalisées sur la base des fiches de l'IDF et de l'AFOCEL. Au total, cinq fiches sont utilisées par chantier (*cf.* annexe 2). Elles correspondent à la description du site d'étude, aux matériels et méthodes de travail utilisés et aux mesures lors des opérations sylvicoles.

La fiche de description du site est effectuée préalablement au chantier. Elle permet de faire une description précise de la parcelle : la localisation, la surface traitée, l'historique des interventions, les caractéristiques de la station forestière, les contraintes pour le déroulement du chantier, l'état du sol avant intervention, la portance du sol, etc. Cette fiche prévoit également un descriptif du peuplement : une identification à partir d'une clef de détermination élaborée par le CRPF de Bretagne (*cf.* annexe 3), un âge moyen et des particularités telles qu'une mauvaise conformation des tiges ou un problème d'ordre sanitaire. Des mesures sont également effectuées et permettent d'estimer la densité du peuplement, d'avoir les données dendrométriques du peuplement (diamètre, hauteur...) et d'avoir une estimation du prélèvement et du volume moyen prélevé sur la parcelle.

Une seconde fiche concerne les matériels et méthodes utilisés. Le nom des différentes entreprises prestataires y est mentionné ainsi que le descriptif des matériels, leurs consommations moyennes de carburant et les réglages spécifiques potentiellement nécessaires. Le mode opératoire et la qualification des conducteurs est également relevé, afin de déterminer un impact potentiel sur la productivité.

Des fiches de relevés sont effectuées lors de chaque opération sylvicole : abattage (avec tête abatteuse ou tronçonneuse), débardage (récupération des bois sur la parcelle et stockage sur une place de dépôt) et déchiquetage (transformation des billons de bois en plaquettes). Elle prévoit le descriptif des conditions météorologiques, qui peuvent avoir un

impact sur la productivité ou sur des dégâts occasionnés pendant le chantier. La durée de chaque opération est également consignée : le travail productif, la fréquence des entretiens, des réparations potentielles, des temps de pauses et des informations diverses comme par exemple des visites. Après chaque opération, on estime le volume prélevé en stères (après abattage et débardage) et ensuite en MAP humides (après déchiquetage). Cela permet de voir la fiabilité des estimations préalables (en m<sup>3</sup> bois fort\*) et d'établir des équivalences (cf. annexe 1) entre différentes unités de mesure. L'estimation du volume des bois empilés après débardage conditionnera les besoins en transport, c'est-à-dire le nombre de semi-remorques ou bennes, et déterminera le temps de travail nécessaire pour l'opération de déchiquetage. Les perturbations occasionnées au sol sont également relevées en fin de chantier. On utilise les classes de perturbations élaborées par le CTBA :

Tab. 1 : Classes de perturbations occasionnées au sol (*source : CTBA*)

Classes de perturbations	Type de perturbation	Code
Pas de perturbation		1
Perturbations légères	Litière déplacée, horizon organique intact	2
	Litière et horizon organique mélangés	3
Perturbations sévères	Ornière inférieure à 5 cm de profondeur	4
	Ornière de 5 à 15 cm de profondeur	5
	Ornière de 16 à 30 cm de profondeur	6
	Ornière > 30 cm de profondeur	7
Couche de branches	Roche mère apparente	8
	10 à 30 cm d'épaisseur	9
Non sol	> 30 cm d'épaisseur	10
	Rocher, marécage, souche, arbre	11

Si l'on veut établir des références de productivité avec un comparatif par chantier, il est impératif de réunir les conditions suivantes, qui sont des principes bien connus en Organisation Scientifique du Travail :

- une parcelle homogène, représentative de la typologie que l'on veut étudier,
- une machine en bon état de fonctionnement, adaptée aux opérations à effectuer et à la taille des bois à traiter, correctement réglée,
- une méthode de travail bien définie qui ne varie pas au cours du temps,
- un conducteur formé, habitué à opérer sur la machine observée, maîtrisant bien son maniement, pratiquant la méthode de travail que l'on teste, et travaillant à un rythme normal.

### 2.1.3 Analyses des échantillons

Les analyses sont réalisées par la station expérimentale des Cormiers de la Chambre d'Agriculture 35 (cf. annexe 4). Pour chaque chantier, un échantillon de 50 L est prélevé et permet d'évaluer :

- Le taux d'humidité : Ce taux est connu après une mesure de la masse brute initiale puis de la masse sèche de plaquettes, par étuvage à 105 °C jusqu'à stabilisation de la masse. Au moins trois mesures d'humidité seront réalisées par modalité. La formule utilisée est la suivante :

$$\text{Taux d'humidité (en \%)} = (\text{masse brute} - \text{masse sèche}) / \text{masse brute} \times 100$$

- La densité : les mesures de densité apparente sont réalisées avec des flacons de volume connu qui sont pesés après remplissage puis complétés avec de l'eau et repesés. Au moins trois mesures de densité sont réalisées par modalité.
- La granulométrie : le tamis à plaquettes sera utilisé pour déterminer la répartition granulométrique de l'échantillon selon la norme européenne Cen 14961. Plusieurs répétitions seront réalisées selon les volumes prélevés.

Des analyses du Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) sont effectuées pour deux chantiers : un échantillon de *Pterocarya rehderiana*, essence sur laquelle il existe peu d'informations et un échantillon de pin maritime, essence qui représente plusieurs chantiers de l'étude. Pour les autres essences des PCI moyens sont déterminés.

### 2.1.4 Discussion sur la méthode

Points positifs :

- La méthode utilisée a été mise en place suite à des préconisations de différents organismes ayant une expérience sur ce type d'étude. Le fait de tenir compte de ces préconisations semble important afin de ne pas commettre les mêmes erreurs que l'IDF et l'AFOCEL.

- L'ensemble des chantiers sont effectués avec des mêmes entreprises qui sont par ailleurs locales.
- Les chantiers étudiés sont suivis uniquement par le CETEF du Morbihan du début jusqu'à la fin, c'est-à-dire de l'analyse préalable du peuplement à la recherche du débouché et la vente des plaquettes. Ceci permet une homogénéité dans la façon d'appréhender chaque chantier.

Points négatifs :

- Un seul type de logistique est prévu dans cette étude. Le déchiquetage de bois frais oblige un stockage du produit fini et augmente donc le coût final de la plaquette forestière.
- Le déchiquetage en bordure de route oblige également une bonne coordination des opérations sylvicoles, surtout lors du déchiquetage par rapport au transport. Les estimations doivent donc être les plus fiables possibles afin de prévoir le bon nombre de semi-remorques ou bennes pour le transport des plaquettes.
- Avec un abattage mécanisé, les rémanents sont laissés sur la parcelle et ce volume est difficilement calculable, sauf si les arbres ne sont pas billonnés. Dans ce cas, les arbres sont mis bord de route à l'aide d'un débusqueur et sont déchiquetés entièrement, technique couramment utilisée lors de la production de plaquettes forestières.

## 2.2 Matériel utilisé lors des chantiers

Dans une optique d'avoir un maximum de rendement, l'utilisation de matériel mécanisé semble être la plus judicieuse. Dans la mesure du possible l'ensemble des chantiers est réalisé avec le même matériel et les mêmes chauffeurs, pour rendre les résultats comparables entre eux. Pour l'abattage mécanisé, l'entreprise MORIZO a été sollicitée, possédant une petite abatteuse avec des dimensionnements adaptés aux chantiers réalisés.



*Abatteuse Timberjack 870 B*

Le matériel est une abatteuse Timberjack 870 B, avec 4 roues motrices et une consommation moyenne de fioul de 11 L/h. Le personnel est qualifié, plus de 20 années d'expérience, et

connaît bien la machine. Malgré ses 18000 d'heures de travail, elle est en bon état et a peu de pannes qui pourraient nuire aux rendements des chantiers. Le débardage quant à lui est effectué par l'entreprise LOYER, qui gère également les abattages manuels retenus sur deux chantiers. Le matériel utilisé pendant le débardage est un tracteur forestier Valmet 8150 équipé d'un grappin et d'une remorque. La consommation de fioul lors du débardage peut aller de 16 à 18 L/h selon la distance de débardage. Le chauffeur a plus de 20 années d'expérience dans ce travail. Le débardage est d'une grande importance pour les chantiers de production de bois énergie, un minimum de terre doit être extrait afin de ne pas augmenter l'usure des couteaux de la déchiqueteuse.



*Tracteur Valmet pendant débardage*

La déchiqueteuse utilisée lors des chantiers est le modèle Wood Terminator 10 de la marque Mus-Max ; elle est couplée à un tracteur Valtra de 280 cv et appartient à l'entreprise Bois Energie Ouest Environnement. La consommation moyenne du tracteur lors du déchiquetage est de 40 L/h. Un chiffre relativement important, mais selon une étude menée par Mus-Max ce couple est celui qui affiche la consommation la plus faible avec ce modèle de déchiqueteuse. La marque affiche un rendement optimum de 160 MAP/h avec un tracteur de 400 cv. Il faut toutefois miser sur un rendement moyen d'environ 70 MAP/h avec le couple présent. Le rendement pendant le déchiquetage est très aléatoire, selon la préparation du chantier, la longueur des billons débardés et l'essence.



*Couple Mus-Max Wood Terminator 10  
et Valtra S280*

## 2.3 Présentation des différents chantiers

Les onze chantiers se situent tous en forêt privée, en grande majorité sur le département du Morbihan (cf. annexe 6).

### 2.3.1 Première éclaircie et cloisonnements dans un peuplement de pin Laricio de Corse

Ce chantier se situe à Néant sur Yvel (56), sur une propriété privée gérée par un groupement forestier. Les pins Laricio de Corse ont été plantés en 1994. Dans l'optique de produire du bois d'œuvre, ce peuplement nécessite dans un premier temps une première éclaircie. Les arbres à éclaircir ont été marqués préalablement pour atteindre un taux de prélèvement d'environ 30 %. Ils concernent les arbres fourchus ainsi que certaines tiges

dominées qui n'ont aucun avenir en bois d'œuvre. Les cloisonnements ont été réalisés perpendiculairement aux lignes. Ils permettent de faciliter la mécanisation des opérations sylvicoles futures. Ce chantier est réalisé sur une surface de 0.82 ha, qui ne représente pas la totalité de la parcelle. L'abattage et le débardage sont mécanisés. Les bois sont ensuite vendus après déchiquetage à l'entreprise « Bois Energie Ouest Environnement » qui participe à l'approvisionnement de plaquettes pour les chaufferies en Bretagne.

#### Chantier n° 1 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 82 ares

Nature du peuplement : jeune futaie\* de pin Laricio de Corse de 15 ans

Densité : 1174 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 16,8 cm

Hauteur moyenne : 13,4 m

Nature de l'intervention : première éclaircie sélective avec cloisonnement

Taux de prélèvement : 35%



Peuplement avant et après éclaircie



Chargement des plaquettes

### 2.3.2 Première éclaircie dans un peuplement de *Pterocarya rehderiana*

Ce chantier se situe à Inguiniel (56). Le *Pterocarya rehderiana* est un hybride entre le noyer du Caucase et le noyer de Chine. Ils ont été plantés, en 1989, par l'AFOCEL dans un but expérimental de production de biomasse. Cette parcelle est inscrite au Référentiel Forestier Régional (RFR) qui a pour objectifs d'expérimenter de nouveaux modèles sylvicoles et de les divulguer aux organismes et propriétaires forestiers. A l'origine, cette parcelle a été plantée pour produire de la biomasse. Dorénavant, elle est conduite pour une production du bois d'œuvre et nécessite donc des éclaircies. Pour la première, les arbres ont été marqués préalablement pour atteindre un taux de prélèvement de 40 %. Pour cette parcelle, la création de cloisonnements n'a pas été retenue, car les arbres ont été plantés avec un interligne de 3,5 m. Les machines peuvent donc y évoluer. Ce chantier est réalisé sur une surface de 0,5 ha qui concerne la totalité de la parcelle. L'abattage est réalisé par des bûcherons, le propriétaire voulant éviter au maximum le passage de machines sur sa parcelle, et le débardage quant à lui est mécanisé. Les bois sont ensuite vendus après déchiquetage par le propriétaire, à la ville de Lorient qui gère elle-même l'approvisionnement de ses chaudières, d'une capacité cumulée de 1,5 MW. Soulignons que leur consommation de plaquettes sèches s'élève à 1000 tonnes.

#### Chantier n° 2 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 49,5 ares

Nature du peuplement : jeune futaie feuillue

Densité : 1238 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 20,8 cm

Hauteur moyenne : 16.7 m

Nature de l'intervention : première éclaircie sélective

Taux de prélèvement : 42%



*Peuplement après et avant éclaircie*



*Débardage des billons de 4 mètres*

### 2.3.3 Récupération de houppiers sur une coupe rase de peuplier

Ce chantier se situe à Paimpont (35). Les peupliers ont été plantés en 1990, avec plusieurs types de clones, dont du Fritzi Pauley et du I 45-51. Les peupliers ont été plantés à densité finale, ce qui représente 171 tiges/ha (8 x 7,3 m). Pendant la vie du peuplement, il n'y a donc pas d'éclaircies à effectuer, seuls des élagages doivent être faits. Lorsqu'un exploitant forestier achète les peupliers sur pied, la parcelle doit en général être restituée en bon état, avec le

parterre de coupe nettoyé et prêt au reboisement. Il leur faut donc trouver un débouché. Le bois énergie semble très intéressant pour la valorisation de ces rémanents. Dans de très nombreux cas, les peupliers sont plantés sur des terrains humides, les coupes sont donc très souvent réalisées pendant la période estivale. Cette période oblige à couper les arbres en feuille. Il est donc préférable de laisser sécher les houppiers avant de les déchiqueter, afin d'éviter le compostage et un taux trop important de fines dans le volume de plaquettes. Ce chantier est réalisé sur une surface de 0,74 ha, soit la surface totale de la parcelle. Faute de débouchés locaux, les bois sont vendus après déchiquetage à l'entreprise « Bois Energie Ouest Environnement ». Les plaquettes seront commercialisées non pas pour alimenter une chaufferie mais sous forme de paillage pour les collectivités et particuliers.

#### Chantier n° 3 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 73,7 ares

Nature du peuplement : peupleraie exploitée

Densité : 171 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 44,3 cm

Hauteur moyenne : 29,7 m

Nature de l'intervention : reprise des rémanents de coupe rase

Taux de prélèvement : 100%



*Peuplement avant la coupe définitive*



*Déchiquetage des houppiers bord de route et chargement*

### 2.3.4 Récupération de houppiers sur une coupe rase de pin maritime

Ce chantier non réalisé se situe à Guer (56). L'âge de ce peuplement de pins maritimes est estimé entre 60 et 70 ans. Les grumes sont exploitées pour une utilisation en bois d'œuvre. Les houppiers peuvent être valorisés en bois de trituration ou sous forme de plaquettes. Le propriétaire, agriculteur, opte pour le second choix car il possède déjà une chaudière à plaquettes d'une puissance de 23 kW. Il consomme annuellement de 8,5 tonnes sèches de plaquettes. Après démantèlement des

#### Chantier n° 4 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 70 ares

Nature du peuplement : futaie de pin maritime à maturité

Densité : 425 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 38,4 cm

Hauteur moyenne : 19,5 m

Nature de l'intervention : reprise des rémanents de coupe rase

Taux de prélèvement : 100%

houppiers, le bois est débardé bord de route, puis déchiqueté et acheminé sur la zone de stockage aménagée par le propriétaire, proche de la parcelle. Soulignons que pour ce type de chantier, la valorisation en plaquettes peut entrer en concurrence directe avec la filière de trituration. Cette coupe de pins maritimes a été vendue sur pied à un exploitant début janvier. Cependant, elle a dû être différée à cause de la tempête Klaus (23/24 janvier 2009) qui a ravagé les forêts du Sud-Ouest, apportant un stock de bois important de pin maritime sur le marché. L'exploitant a donc été contraint de retarder la coupe. Les résultats de ce chantier seront donc diffusés postérieurement à ce rapport.



*Peuplement avant la coupe définitive*

### 2.3.5 Eclaircie sélective dans un peuplement de pin maritime

Ce chantier se situe à Sérent (56) au sein du massif forestier des Landes de Pinieux. Les pins maritimes ont un âge moyen de 24 ans, des cloisonnements d'une largeur de 3 m sont déjà ouverts, laissant des bandes arborées de 2 m. Ce chantier ne correspond pas à l'intégralité de la parcelle, seules trois bandes sont concernées. L'éclaircie dans ce peuplement est justifiée par une future production de bois d'œuvre. Elle est cependant effectuée tardivement. L'ensemble

des bois sont voués au déchetage, ceux-ci ayant un diamètre relativement faible pour produire des bois de sciages. Les opérations sylvicoles de ce chantier sont mécanisées. La mairie de Sérent possédant une chaudière à bois, d'une puissance de 250 kW, offre le débouché le plus local. C'est pourquoi la ville a décidé d'acheter après déchetage les bois de ce chantier. La consommation annuelle de la chaufferie de Sérent représente 200 tonnes sèches de plaquettes. Signalons que la commune de Sérent possède près de 250 ha de forêt majoritairement constitués de pins maritimes. Elle souhaite d'ailleurs se servir de son propre gisement pour réduire le coût du combustible et gagner en qualité de plaquettes.

#### Chantier n° 5 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 78 ares

Nature du peuplement : jeune futaie de pin maritime

Densité : 1153 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 17,8 cm

Hauteur moyenne : 11,5 m

Nature de l'intervention : première éclaircie sélective après cloisonnement

Taux de prélèvement : 30%



*Eclaircie sélective avec tête abatteuse*



*Déchetage bord de route avec chargement (remorque agricole)*

### 2.3.6 Cloisonnements dans un taillis de chêne, hêtre et bouleau

Ce chantier se situe à Sainte Brigitte (56), dans la forêt privée de Quénécan. L'âge approximatif du peuplement se situe entre 40 et 50 ans. Ce peuplement est destiné à produire du bois de chauffage. La production annuelle du bois de chauffage de la forêt se fait soit par une équipe de bûcherons, travaillant pour le propriétaire, soit par des particuliers qui achètent leur bois sur pied. Dans le PSG, ces parcelles doivent être éclaircies après l'ouverture de larges cloisonnements. Pour cette étude, ce type d'opération permet de connaître les volumes prélevés lors d'une coupe à blanc de ce type de peuplement. L'utilisation de ces bois pour une production de plaquettes forestières semble être une solution, notamment pour les parcelles les plus éloignées de chemins ou routes et où la production de bois de chauffage (pour des particuliers) est beaucoup plus contraignante. Ce chantier correspond à la réalisation de quatre cloisonnements d'une largeur de 5 m tous les 20 m, abattus et débardés mécaniquement. Pour le moment, il existe peu de débouchés locaux. La scierie « SARL Grouazel » de St Sauveur des Landes (35) chargée d'approvisionner plusieurs chaufferies du Grand Ouest achète les bois après déchiquetage.

#### Chantier n° 6 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 1,73 hectare

Nature du peuplement : taillis\* âgé de chêne et bois blancs

Densité : 1650 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 15,1 cm

Hauteur moyenne : 14,3 m

Nature de l'intervention : ouverture de cloisonnement

Taux de prélèvement : 20%



*Peuplement avant cloisonnement*



*Opération de déchiquetage*

### 2.3.7 Première éclaircie et cloisonnements dans une plantation de chêne rouge d'Amérique

Ce chantier se situe au Bono (56). Les chênes rouges d'Amérique ont été plantés en 1989. Dans un but de produire du bois d'œuvre, cette plantation nécessite plusieurs éclaircies. La première est sélective avec cloisonnement. L'ouverture de

cloisonnements une ligne sur cinq permet de mécaniser les opérations sylvicoles sur la parcelle. Les arbres marqués en éclaircie sont fourchus ou dominés et n'ont pas d'avenir en bois d'œuvre ou sont situés dans les

#### Chantier n° 7 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 80 ares

Nature du peuplement : jeune futaie de chêne rouge d'Amérique

Densité : 1725 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 13.3 cm

Hauteur moyenne : 13.3 m

Nature de l'intervention : première éclaircie sélective avec cloisonnement

Taux de prélèvement : 50%



*Débardage des billons de 4 mètres*



*Stockage des plaquettes en plein air sous bâche*

### 2.3.8 Eclaircie tardive et cloisonnements dans un peuplement de pin maritime

Ce chantier se situe à Carnac (56). Les pins ont un âge approximatif de 20 ans. L'éclaircie dans ce peuplement devient urgente pour une production future de bois d'œuvre et les cloisonnements sont réalisés afin de permettre la mécanisation des opérations sylvicoles. Les arbres ont été préalablement marqués. Les cloisonnements ont été positionnés en périphérie et au milieu de la parcelle. Le taux de prélèvement de 50 % est relativement élevé mais permettra aux arbres restants de poursuivre leur croissance. Ce chantier n'est pas réalisé sur l'intégralité de la parcelle, car une partie du peuplement présente une densité moindre ne nécessitant pas d'intervention. L'abattage et le débardage sont entièrement mécanisés. Les bois sont ensuite vendus après déchiquetage à la ville de Lorient pour alimenter ses chaudières.

#### Chantier n° 8 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 24,5 ares

Nature du peuplement : jeune futaie de pin maritime

Densité : 2003 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 17.3 cm

Hauteur moyenne : 13.4 m

Nature de l'intervention : première éclaircie sélective avec cloisonnement

Taux de prélèvement : 40%



*Peuplement avant éclaircie et cloisonnement*



*Opération de déchiquetage avec chargement en semi-remorque*

### 2.3.9 Coupe rase avec maintien de tiges éparses d'un peuplement de bouleaux cloisonné

Ce chantier se situe à Néant sur Yvel (56), sur une propriété privée gérée par un groupement forestier. Les arbres ont un âge moyen de 30 ans, avec aucune valorisation possible en bois d'œuvre et en bois bûche. Ce peuplement de bouleaux présente des cloisonnements de 4 m de large en moyenne, réalisés en 1987. Les bandes de bouleaux qui ont été conservées font en moyenne 5 m de large. Le taux de prélèvement sur ces bandes est de l'ordre de 90 %. Quelques belles tiges sont conservées sur la parcelle. L'abattage et le débardage, sont entièrement mécanisés. Les bois sont ensuite vendus après déchiquetage à l'entreprise « Bois Energie Ouest Environnement », car peu de débouchés locaux sont présents.

#### Chantier n° 9 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 42,2 ares

Nature du peuplement : taillis de bouleaux non améliorables

Densité : 1861 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 10.6 cm

Hauteur moyenne : 15.2 m

Nature de l'intervention : coupe à blanc avec maintien de sujets épars

Taux de prélèvement : coupe rase avec maintien de sujets épars



*Peuplement avant éclaircie*



*Eclaircie sélective avec tête abatteuse*

### 2.3.10 Première éclaircie dans un peuplement de mélèzes

Ce chantier se situe à Melrand (56). Les arbres ont 16 ans. Cette parcelle fait partie du RFR et a été mise en place pour comparer trois espèces de mélèzes : mélèze du Japon, mélèze hybride et mélèze d'Europe. Une éclaircie sélective, ainsi qu'un élagage ont été effectués en mars 2008 et les tiges prélevées ont été abandonnées sur la parcelle. Après un an et demi, ces bois seront donc déchiquetés pour produire des plaquettes, après avoir été billonnés (sans ébranchage) par un bûcheron

et débardés mécaniquement. Au final le prélèvement est de 26 %. Il n'y a pas eu de cloisonnements à effectuer car les arbres ont été plantés avec un interligne de 4 m, ce qui permet le passage de l'engin de débardage. Le façonnage manuel des arbres un an et demi après éclaircie augmente le temps de travail, avec une difficulté supplémentaire : la colonisation des tiges au sol par la ronce. Les bois sont vendus après déchiquetage à la ville de Lorient pour alimenter ses chaudières. L'année de séchage des bois sur la parcelle pourra se justifier si le taux d'humidité des plaquettes a significativement baissé. Si ce taux atteint au plus 35%, les plaquettes pourraient être livrées directement à la chaufferie, sans passer par une plate-forme de stockage, ce qui limiterait les coûts de transport et de séchage.

#### Chantier n° 10 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 2,11 hectares

Nature du peuplement : jeune futaie de mélèzes

Densité : 712 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 20.5 cm

Hauteur moyenne : 16 m

Nature de l'intervention : récupération des produits de la 1<sup>ère</sup> éclaircie sélective

Taux de prélèvement : 20%



*Opération de débardage*



*Opération de déchiquetage avec chargement en semi-remorque*

### 2.3.11 Dépressage tardif dans un peuplement de pin maritime

Ce chantier se situe à Sérent (56), au sein du massif forestier des Landes de Pinieux. L'âge des arbres est en moyenne de 23 ans. Mis à part la création de cloisonnements avec un broyeur forestier, le peuplement n'a subi aucune intervention sylvicole. Malgré un âge relativement avancé, les arbres ont un diamètre très faible. Ce dépressage tardif permettrait d'avoir une production future de bois d'œuvre. Le bois énergie semble être une solution pour valoriser les produits. Ce chantier n'est pas réalisé sur l'ensemble de la parcelle, seulement 51 ares font l'objet de l'étude. Malgré la forte densité, l'abattage est mécanisé. Il en est de même pour le débardage. Les bois sont ensuite vendus après déchiquetage à la ville de Sérent pour l'alimentation de sa chaudière.

#### Chantier n° 11 en quelques chiffres :

Surface d'étude : 51 ares

Nature du peuplement : jeune futaie de pin maritime

Densité : 2242 tiges/ha

Diamètre moyen à 1,30 m : 12,9 cm

Hauteur moyenne : 12,6 m

Nature de l'intervention : dépressage tardif

Taux de prélèvement : 25%



*Peuplement avant éclaircie*



*Dépressage tardif avec tête abatteuse*



*Déchiquetage bord de route avec chargement (remorque agricole)*

## III. RESULTATS

### 3.1 Synthèse des chantiers

#### 3.1.1 Récapitulatif des chantiers

L'ensemble des chantiers ont été menés courant 2009 (*cf.* annexe 5). Afin d'éviter les ruptures de charges, les différentes opérations (abattage, débardage et déchiquetage) ont été effectuées successivement, sauf pour le 11<sup>ème</sup> chantier au cours duquel fut organisé simultanément une réunion publique du CRPF, en collaboration avec le CETEF 56. L'abattage des feuillus a été effectué en priorité, par rapport aux chantiers résineux, en début de période de débourement. Comme l'ensemble des arbres sont ébranchés, le fait de couper ces arbres en feuilles n'a pas d'impact sur la qualité de la plaquette. Cependant, le taux de sève sera relativement plus élevé. Un tableau de synthèse récapitulant l'ensemble des informations des chantiers se situe en annexe 7, avec également l'ensemble des mesures effectuées.

#### 3.1.2 Rendements obtenus lors des chantiers

Lors de chaque opération, des mesures de durée sont effectuées. Celles-ci permettent, *a posteriori*, de connaître les rendements lors des différents postes. Le choix de représenter ces rendements par rapport au volume unitaire\* des arbres a été fait pour comparer les différents chantiers entre eux. Pour l'ensemble des chantiers, nous avons un volume unitaire moyen de 0.12 m<sup>3</sup>/arbre et, dans la majorité des cas, nous pouvons considérer que nous avons effectué des interventions de rattrapage, excepté les chantiers 1, 2, 3 et 7.

Lors de l'abattage, la comparaison de rendement entre les feuillus et les résineux est peu significative. Il en est de même entre les arbres flexueux / branchus et les arbres élancés / élagués. Les stères évoqués dans le graphique ci-dessous sont en réalité des mètres cube apparents du tas de billons. Ces billons, d'une longueur de 4 m, engendrent un fort taux de vides, ce qui explique des rendements abattage / débardage relativement élevés.

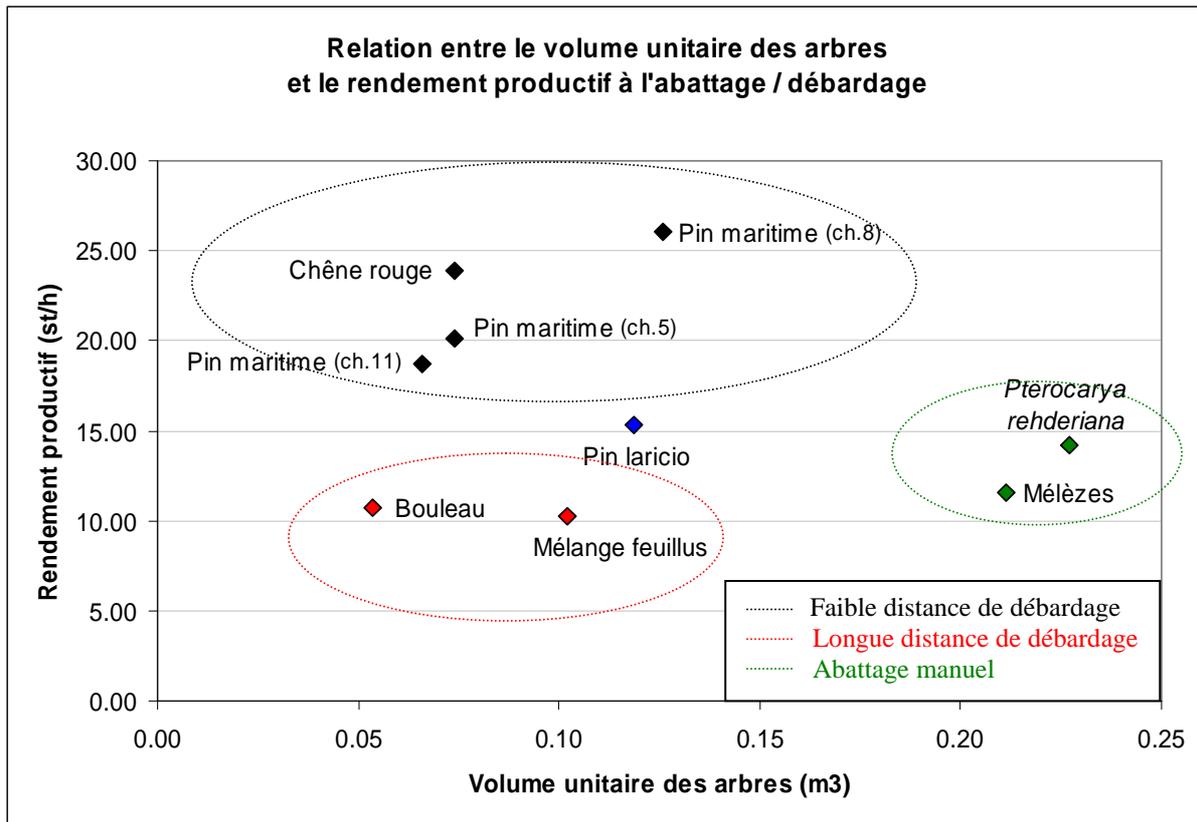


Fig. 10 : Graphique présentant le rendement abattage / débardage en fonction du volume unitaire des arbres

Les rendements, présentés dans la figure 13, comprennent l'abattage ainsi que le débardage. Le rendement, pour le débardage, est principalement fonction de la distance entre la parcelle et le lieu de vidange des billons. Les chantiers sur le peuplement de bouleau et le mélange de feuillus sont les chantiers avec une distance de débardage importante, et présentent par conséquent les rendements productifs les plus faibles. Les chantiers de *Pterocarya rehderiana* et des mélèzes ne sont pas comparables avec les autres chantiers car l'abattage a été effectué manuellement et, dans la majorité des cas, les rendements d'abattage manuel sont inférieurs à des rendements d'abattage mécanisé.

En ce qui concerne les pins maritimes, nous pouvons constater que le rendement productif est proportionnel au volume unitaire. De plus, le débardage de ces trois chantiers est effectué sur des distances relativement faibles et n'a donc pas d'effet sur la différence des rendements présentés. Pour le chantier de pins Laricio, le faible rendement lors de l'abattage peut être la conséquence d'une ouverture de cloisonnements perpendiculairement aux lignes. En revanche, le rendement relativement important sur le chantier de chêne rouge peut s'expliquer par la régularité des tiges prélevées et ébranchées à une hauteur d'environ quatre

mètres. C'est également le chantier le plus rentable en terme de coût de revient de la plaquette.

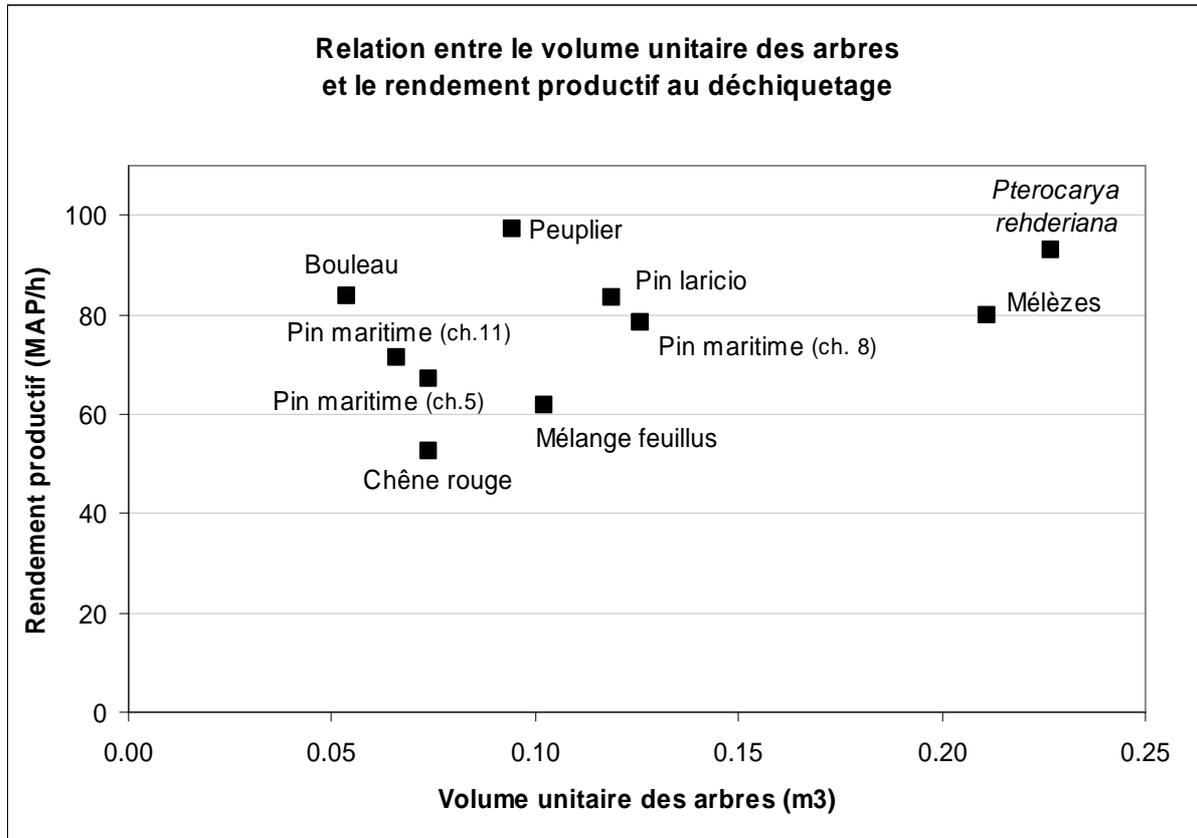


Fig. 11 : Graphique présentant le rendement déchetage en fonction du volume unitaire des arbres

Les rendements lors du déchetage, présentés dans la figure 14, montrent que ceux-ci sont d'autant meilleurs que le volume unitaire des arbres est important. Le fait d'avoir façonné les billons de la même longueur permet de comparer ces différents résultats. De plus les prestataires pour le débardage et le déchetage sont les mêmes pour l'ensemble des chantiers, excepté les chantiers 5 et 11 qui ont été réalisés par une autre entreprise de débardage, avec une longueur de billons de 2.5 mètres. Ces données de rendement sont spécifiques au matériel utilisé et ne peuvent donc pas être extrapolées pour différents chantiers ; la maîtrise de la machine par le chauffeur affecte également les rendements constatés.

Les rendements de déchetage pour les chênes rouges et le mélange de feuillus, dont plus des deux tiers sont composés de chênes pédonculés et hêtre, sont relativement moins importants que les autres rendements. Le chêne et le hêtre sont connus pour être des bois « durs », ce qui augmente le temps passé lors du déchetage. En revanche les bois

blancs (Bouleau, Peuplier et *Pterocarya rehderiana*) obtiennent des rendements très importants. Pour conclure les rendements obtenus sont principalement dû aux essences, au matériel utilisé, aux réglages spécifiques de celui-ci, à la maîtrise du chauffeur et à l'organisation du chantier, effectué au préalable avec l'entreprise de débardage. Les heures de travail non productif de la déchiqueteuse sont fonction de l'organisation et du type de transport utilisé.

### 3.1.3 Méthode d'estimation du volume sur pied

Il est très difficile d'effectuer des estimations de volumes sur pied, en forêt. Pour cette étude nous avons utilisé la méthode d'estimation du Référentiel Forestier Régional, qui consiste à effectuer une placette de mesure la plus représentative du peuplement. Sur cette placette, d'une surface connue, la hauteur ainsi que la circonférence, à 1,30 mètre, de chaque arbre sont relevées. Les mesures sont très importantes et peuvent varier selon la personne qui les effectue. La placette de mesures permet de gagner du temps et d'extrapoler à la surface réelle de la parcelle.

**Méthode d'estimation du volume sur pied**

Calcul de la surface terrière de la placette :      Calcul de la surface terrière par hectare :

$$g_p = \sum \left( \frac{C^2}{4 \times \pi \times 10\,000} \right) \qquad g = 10\,000 \times \left( \frac{g_p}{S_p} \right)$$

Calcul du volume bois fort\* par hectare :

$$V_{bf} = g \times h \times f$$

Avec :

C : circonférence de l'arbre (en cm)	h : hauteur moyenne des arbres (en m)
f : coefficient de forme (compris entre 0 et 1)	S <sub>p</sub> : surface de la placette de mesure (en m <sup>2</sup> )
g <sub>p</sub> : surface terrière de la placette (en m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	g : surface terrière par hectare (en m <sup>2</sup> /ha)
V <sub>bf</sub> : volume de bois fort par hectare (en m <sup>3</sup> /ha)	

Fig. 12 : Méthode d'estimation du volume sur pied

A partir de la mesure de la surface terrière\* de la placette extrapolée à l'hectare, le volume de bois fort est obtenu avec la hauteur moyenne des arbres et l'utilisation d'un coefficient de forme\*. Cette estimation peut ensuite être convertie en stères ou MAP suivant le devenir des bois (cf. annexe 1).

### 3.1.4 Comparaison entre les estimations et les volumes obtenus

Pour chaque chantier, une ou plusieurs placettes d'estimation du volume ont été effectuées. Les cloisonnements, présents ou marqués avant intervention, sont pris en compte dans le calcul. Après chantier, elles ont été conservées afin de définir le pourcentage de prélèvement réalisé. Cependant il s'est avéré que ce pourcentage était difficilement mesurable pour les peuplements irréguliers et pour ceux où les cloisonnements sont effectués perpendiculairement aux lignes. Le coefficient de forme utilisé forfaitairement est de 0,4. Celui-ci est souvent utilisé lors des mesures du RFR, mais peut être réajusté suivant l'aspect et le type du peuplement. Tel à été le cas pour le chantier 2, où nous avons utilisé un coefficient de 0.45 car les arbres étaient élancés.

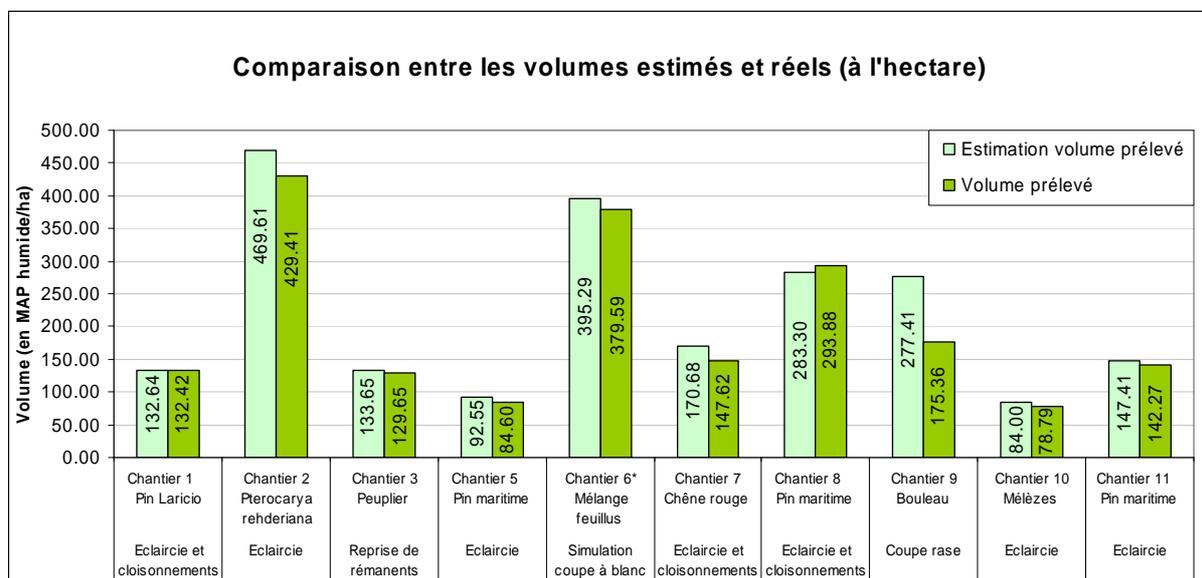


Fig. 13 : Graphique comparatif des volumes estimés et des volumes réels

Les estimations ainsi que les volumes réellement prélevés ont été ramenés en MAP humide / ha. Il s'est avéré que les estimations des volumes prélevés étaient relativement justes par rapport aux volumes déchiquetés. En effet, le pourcentage d'erreur est en moyenne de 6.2 %, ce qui est tout à fait acceptable. Ceci peut s'expliquer par la prise en compte du volume de bois laissé sur la coupe dans l'estimation du volume à prélever. Signalons que les résultats du chantier 9 n'ont pas été pris en compte car le pourcentage d'erreur est de 58.2%. Cette différence entre volume estimé et volume réel pour ce chantier doit s'expliquer par une erreur dans la prise de mesure sur la placette.

Malgré des résultats concluants, nos estimations restent dépendantes de variables difficilement calculables. En effet, le pourcentage réel de prélèvement n'est pas connu pour certain chantier, le coefficient de forme n'est pas le coefficient réel de l'arbre et la placette peut ne pas être parfaitement représentative du peuplement. Cependant, ce type d'estimation permet au préalable d'un chantier de connaître approximativement les volumes sortants. Lors d'un chantier, il semble intéressant de cuber le volume du tas de billons pour estimer le nombre de remorques ou bennes à prévoir pour le transport des plaquettes. Pour cela, à partir du cubage du tas de bois, un volume approximatif des plaquettes peut être avancé en utilisant le tableau de conversions de l'annexe 1.

### 3.1.5 Bilan financier de l'ensemble des chantiers

Sur la majorité des chantiers mécanisés, nous avons appliqué un coût horaire d'abattage mécanisé de 115 € ht/h, de débardage de 75 € ht/h et de déchiquetage de 240 € ht/h. Pour les chantiers 2 et 10, les coûts d'abattage manuel s'élèvent quant à eux à 250 € ht/bûcheron/jour. Pour le chantier de récupération des houppiers de peuplier, le coût abattage / débardage correspond à ¼ du coût d'exploitation des grumes qui est de 8 €/m<sup>3</sup>. Les coûts de transports, de chargement et de stockage sont ceux transmis par les acquéreurs des plaquettes. Nous avons également établi un prix d'achat du bois correspondant à 2.5 €/st, en prenant en compte un stère de billon de 4 m. L'ensemble de ces coûts a permis d'établir un prix de vente des plaquettes à 25 % d'humidité, cf. figure 17. Les prix à la tonne sèche ont été calculés grâce aux densités et aux taux d'humidité qui résultent des analyses des échantillons.

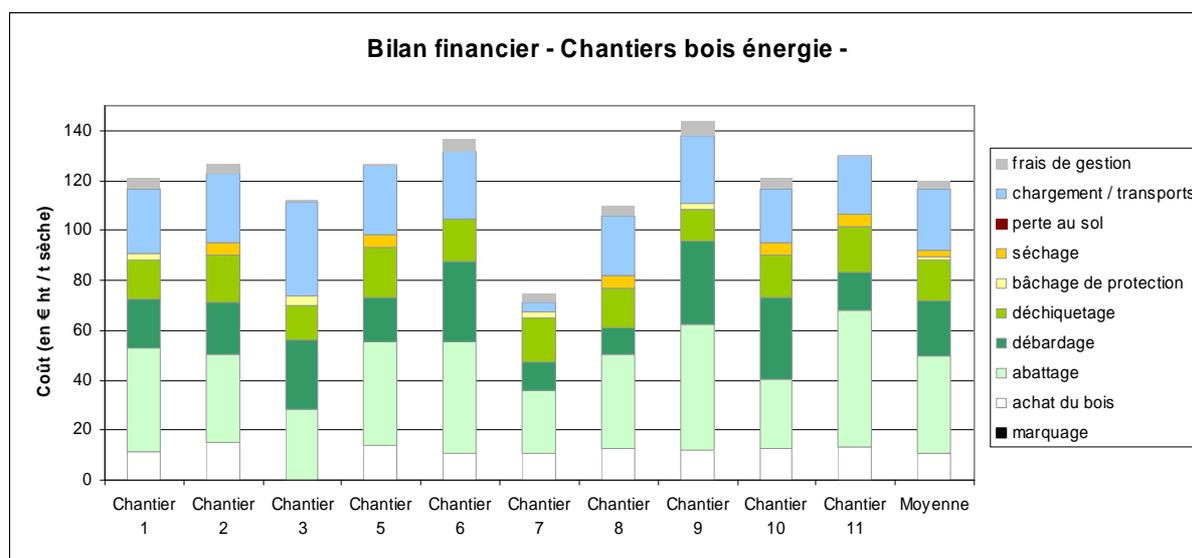


Fig. 14 : Récapitulatif par chantiers des coûts à tonne sèche

Ce graphique indique les coûts des différents postes pour chaque chantier, une fiche récapitulative par chantier se trouvant en annexe 8. *A posteriori*, nous pouvons remarquer que l'ensemble des résultats est relativement élevé ; en effet, la moyenne du prix de revient d'une tonne de plaquettes sèches livrée à la chaufferie est de 120,27 €. Ces chiffres sont la conséquence d'une mobilisation des différentes machines, avec des coûts horaires importants compte tenu des rendements effectifs. En effet la part de l'abattage est en moyenne d'environ 32 % et la part de l'abattage / débardage d'environ 50 %, par rapport au prix final de la tonne sèche.

Il est important de préciser que le fait d'avoir travaillé sur des petites surfaces n'influe pas sur les coûts finaux, les coûts de déplacement des machines n'étant pas compris dans ces résultats. Le prix final élevé peut également s'expliquer par la réalisation de chantiers peu productifs, du fait d'un faible volume unitaire moyen par arbre.

Tab. 2 : Prix des plaquettes forestières à différents stades de la production

N° de chantier	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11
<b>Coût au stère en billons de 2 m (en considérant que 1 stère correspond à 1.75 MAP humide)</b>										
<b>Stère bord de route *</b> (en € ht/st)	27.33	17.17	15.21	22.72	37.89	22.85	22.53	40.43	24.80	27.41
<b>Après achat du bois, abattage, débardage et déchiquetage</b>										
<b>MAP humide</b> (en € ht/MAP humide)	18.49	12.39	12.85	16.56	25.54	17.63	15.93	25.97	17.17	19.02
<b>Tonne humide</b> (en € ht/t humide)	59.44	55.60	39.05	47.03	85.71	51.86	48.12	96.54	60.90	51.26
<b>Arrivé chaufferie (avec : transports, chargement et stockage)</b>										
<b>MAP sec</b> (en € ht/MAP sec)	24.67	18.62	22.50	27.17	34.57	20.84	23.07	35.60	23.88	26.71
<b>Tonne sèche</b> (en € ht/t sèche)	121.01	127.00	112.46	126.99	136.64	74.18	109.53	143.15	122.23	130.38
<b>Au kWh</b> (en € ht/kWh)	0.034	0.035	0.031	0.035	0.038	0.021	0.030	0.040	0.034	0.036

\* : avec achat du bois au propriétaire à 4.40 €/st

Produire des plaquettes à 25 % d'humidité oblige d'avoir un stockage, qui n'a pas forcément un coût très élevé, mais qui nécessite deux transports et un chargement. En effet, un premier transport permet d'acheminer les plaquettes humides vers la plate-forme de stockage et un chargement des plaquettes sèches est nécessaire pour le deuxième transport vers la chaufferie. Ces coûts représentent environ 23 % du prix final de la tonne sèche. En utilisant une autre logistique, notamment celle à flux tendu, ces coûts peuvent être réduits. Cela dépendra des exigences des chaufferies sur les caractéristiques des plaquettes livrées (taux d'humidité, granulométrie...).

Les coûts du stère bord de route (*cf.* tableau 2) sont pour la majorité des chantiers supérieurs aux coûts du stère bord de route de trituration, généralement constaté entre 14 et 16 €/st, avec un prix d'achat de 1 €/st. Ces coûts importants sont la conséquence d'une exploitation de chantiers peu rentable et/ou dus à une rémunération, des opérateurs, trop importante. On remarque les coûts très élevés, des chantiers 6 et 9, qui peuvent être expliqués par une longue distance de débardage. L'ensemble de ces circonstances fait que le coût final des plaquettes de nos chantiers est élevé. Les prix du stère bord route présentés dans le tableau 3, démontrent bien que le prix horaire utilisé est beaucoup plus important que les prix actuels du marché. Concernant les chantiers 7 et 8, nous avons un coût final relativement correct surtout pour le chantier 7 qui a peu de frais de transport. En effet, les plaquettes sont stockées et consommées sur la propriété. Le fait d'avoir établi un prix d'achat du bois augmente en moyenne le prix de 11.2 €/tonne sèche. Ce prix d'achat du bois est environ quatre fois supérieur au prix de la trituration qui est actuellement aux alentours de 1 €/st, en considérant un stère avec des billons de 2 m.

Tab. 3 : Moyenne des résultats par type d'opération sylvicole

		1ère éclaircie résineuse		1ère éclaircie feuillue	Coupe à blanc de taillis
		Normale	Tardive	(chantier 7 : chêne rouge)	(chantier 6 : mélange feuillus)
Quantité récoltée	en st/ha*	97.3	63.2	84.3	216.9
	en t humide/ha	56.1	37.5	50.2	113.1
	% de prélèvement	35	22.5	50	100
Rendements (en t humide/h)	Abattage	5.2	3.9	6.0	3.3
	Débardage	9.2	6.8	8.9	3.0
	Déchetage	25.2	24.6	17.9	18.4

\*: en st billons de 2 m (en considérant 1 st = 1.75 MAP humide)

Certains chantiers, dont le 6 et le 7, sont représentatifs à eux seuls de part leur peuplement et le type d'opération réalisé. On remarque (cf. tableau 3), que le rendement en abattage mécanisé sur la coupe à blanc de taillis est relativement faible, avec des souches généralement coupées hautes. Pour ce type de peuplement, il serait préférable de procéder à un abattage manuel pour réduire le volume de bois restant sur la coupe et effectuer des coupes propres, le plus bas possible. Pour ce type de chantier, d'autres matériels mécanisés pourraient également être utilisés, comme une tête abatteuse-groupeuse par exemple.

Pour le chantier de première éclaircie de chêne rouge, nous avons pu comparer nos quantités récoltées par rapport à d'autres éclaircies de chêne rouge effectuées sur les chantiers bois énergie en Lorraine. La quantité récoltée sur le chantier 7 est 50,2 tonnes humides/ha. Pour les deux chantiers de Lorraine, nous avons des valeurs comprises entre 46.5 et 52 tonnes humides/ha. Ainsi, il existe une forte correspondance entre les chantiers lorrains et le chantier 7 de l'étude. Cependant, les rendements pour les opérations ne sont pas comparables entre eux car, pour les chantiers lorrains, l'abattage était manuel et les bois ont été déchiquetés directement sur la parcelle.

Sur les onze chantiers réalisés pour l'étude, cinq d'entre eux concernaient une première éclaircie de résineux. Nous avons regroupé ces chantiers en deux catégories : éclaircie dite « normale » (chantiers 1, 5 et 8) et tardive (chantier 10 et 11). Le tableau 3 révèle un pourcentage de prélèvement plus faible sur les éclaircies tardives. Cette différence de pourcentage n'était pas forcément voulue car le choix des arbres à prélever était laissé à l'abatteur. Les rendements pour les éclaircies tardives sont nettement inférieurs à une éclaircie normale. Le surdimensionnement de l'abatteuse pourrait être un des facteurs principal de cette observation. Les chiffres du déchiquetage sont quant à eux relativement similaire entre ces deux catégories. Par contre, la différence de rendement, lors du déchiquetage, est facilement observable entre les feuillus et les résineux.

### 3.1.6 Bilan énergétique des chantiers

Lors de chaque chantier, les consommations de fioul des machines ont été relevées. Cela permet d'effectuer un comparatif entre la consommation totale de chaque opération et le pouvoir énergétique des plaquettes produites. Nous allons considérer qu'une tonne sèche de plaquettes correspond à 360 équivalent L de fioul (*cf.* annexe 1).

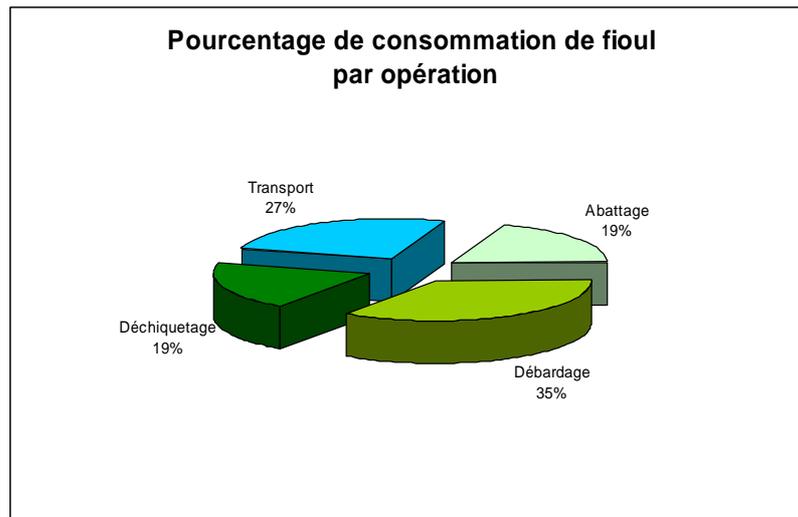


Fig. 15 : Identification des consommations des différents postes de production

Le graphique ci-dessus représente la consommation moyenne pour chaque poste en prenant en compte les 11 chantiers pilotes. Il révèle le fort pourcentage de consommation lors du débardage. Cependant, cette consommation varie fortement en fonction de la distance parcourue entre la parcelle et le lieu de vidange des billons. Le temps passé pour le ramassage des billons est peu significatif. En ce qui concerne le transport, celui-ci comprend le trajet vers le lieu de stockage, ainsi que la livraison des plaquettes sèches. Le type de transport fait varier fortement la quantité de fioul consommé, en effet, pour une même distance parcourue, un tracteur consomme plus qu'un camion, nous avons pris respectivement 45 et 38 L de gazole pour parcourir 100 km. Cette différence est proportionnellement accentuée en fonction de la capacité de la benne du tracteur. La consommation lors du déchiquetage varie peu entre les différents chantiers, il en est de même pour l'abattage mécanisé. En revanche, pour un même volume produit, la consommation d'une abatteuse est très nettement supérieure à celle d'un bûcheron. L'annexe 8 comprend le même type de graphique de la figure 18, mais individualisé pour chaque chantier.

Sur l'ensemble des chantiers réalisés, la consommation totale de carburant est d'environ 3000 L de fioul, pour une production d'environ 200 tonnes de plaquettes sèches. Pour produire une tonne de plaquettes sèches, la consommation moyenne de fioul est de 14,21 L. En utilisant le ratio précédemment cité, la quantité de plaquettes produite représente environ 70 000 équivalent L de fioul, pour les chantiers réalisés, 1 L de fioul consommé génère en moyenne 26.55 équivalent L de fioul.

### 3.1.7 Impact des opérations sylvicoles sur les parcelles

Lors des suivis de chantiers, nous avons estimé l'impact de l'intervention sylvicole sur le sol et sur les arbres sur pied restants. Sur l'ensemble des chantiers, excepté le chantier 10, les billons ont été ébranchés et coupés à un diamètre fin bout d'environ 7 cm. Il en résulte donc une couche de branches. Ces branches, après quelques années, seront dégradées et serviront à renouveler l'humus. Cet impact est donc temporaire et n'est pas forcément négatif. En revanche, les ornières laissées par les machines ont un impact plus important et perturbe le sol. Malgré des opérations effectuées pour la majorité au printemps, certaines parcelles restaient relativement humides et les ornières semblaient donc inévitables. Pour les chantiers concernés, les ornières ne sont pas présentes sur la totalité de la parcelle, mais seulement sur un ou deux endroits localisés. Seulement deux chantiers sur dix ont quelques ornières supérieures à 5 cm de profondeur, cf. figure 19, ce chiffre reste donc faible.

Sans déterminer un pourcentage précis d'arbres abîmés, nous avons essayé d'évaluer le nombre de chantiers avec cette problématique. L'utilisation d'un abattage mécanisé augmente ce risque, surtout lorsque les densités sont élevées. Les arbres sont généralement abîmés par un coup produit par le grappin ou par un arbre abattu. De nombreux arbres présentent des blessures, sur le chantier 11, car l'abatteuse était surdimensionnée par rapport à l'opération sylvicole réalisée. Sur le chantier 10, les arbres ont été marqués par le porteur. Comme aucun cloisonnement n'avait été réalisé lors de l'éclaircie, le débardeur devait naviguer entre les lignes, espacées de 4 m et perpendiculaires à la pente, régulièrement un rancher\* de la remorque abîmait un arbre.

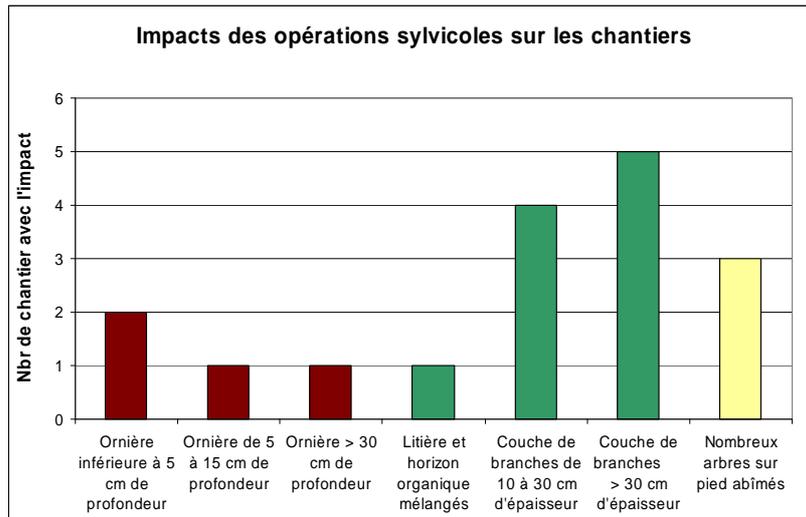


Fig. 16 : Impacts des opérations sylvicoles sur les chantiers

### 3.2 Débouchés des différents chantiers

Dans un souci d'avoir des débouchés les plus locaux possibles, ceux-ci ont été étudiés indépendamment pour chaque chantier. Au début de l'étude, les parcelles recherchées se limitaient à celles appartenant à des propriétaires équipés d'une chaufferie plaquettes. Au final seul deux chantiers sont dans ce cas, dont la récupération des houppiers de pins maritimes qui se fera postérieurement à ce rapport. Par la suite nous avons essayé de traiter directement avec des chaufferies collectives, qui sont dans la majorité des cas munies de contrats d'approvisionnement.

Tab. 4 : Tableau regroupant les acquéreurs et les lieux d'utilisation des plaquettes

N° de chantier	Acquéreur des plaquettes humides	Statut de l'acquéreur	Lieu d'utilisation des plaquettes
1	Bois Energie Ouest Environnement	Entreprise prestataire du déchetage, qui gère également des contrats d'approvisionnement.	COPEDOM, Domagné (35)
2	Ville de Lorient	Ville, équipée de chaufferies à combustible bois, qui gère elle-même son approvisionnement.	Chaufferies de Lorient, Lorient (56)
3	Bois Energie Ouest Environnement	Entreprise prestataire du déchetage, qui gère également des contrats d'approvisionnement.	COPEDOM, Domagné (35)
5	Commune de Sérent	Commune, dotée d'une chaufferie à combustible bois, qui souhaite gérer son approvisionnement.	Chaufferie de Sérent, Sérent (56)
6	Bois 2 R	Entreprise qui gère des contrats d'approvisionnement.	COPEDOM, Domagné (35)
7	Propriétaire	-	Chaufferie personnelle, Le Bono (56)
8	Ville de Lorient	Ville, équipée de chaufferies à combustible bois, qui gère elle-même son approvisionnement.	Chaufferies de Lorient, Lorient (56)
9	Bois Energie Ouest Environnement	Entreprise prestataire du déchetage, qui gère également des contrats d'approvisionnement.	COPEDOM, Domagné (35)
10	Ville de Lorient	Ville, équipée de chaufferies à combustible bois, qui gère elle-même son approvisionnement.	Chaufferies de Lorient, Lorient (56)
11	Commune de Sérent	Commune, dotée d'une chaufferie à combustible bois, qui souhaite gérer son approvisionnement.	Chaufferie de Sérent, Sérent (56)

Sur les dix chantiers réalisés, cinq d'entre eux ont une utilisation des plaquettes dans un rayon de moins de 50 km par rapport à la localisation de la parcelle. Les chantiers 1 et 9 auraient dû être récupérés par la commune de Sérent, qui finalement avait atteint sa capacité maximale de stockage. Cependant pour l'ensemble des chantiers, l'utilisation des plaquettes se situe dans la région Bretagne (*cf.* annexe 6), il n'y a donc pas eu d'exportation du gisement régional. Le transport en semi-remorques à fond mouvant a été privilégié pour les longues distances, et pour cinq chantiers des tracteurs agricoles équipés de bennes ont été utilisés, notamment pour les chantiers 5 et 11, où la zone de stockage des plaquettes se situait à environ 7 km des parcelles et le chantier 7 où la distance de transport était d'environ 300 mètres.

Dans la recherche de débouchés, nous nous sommes rendu compte que la majorité des chaufferies était alimentées via un contrat d'approvisionnement. Cela réduit donc considérablement la possibilité de débouchés pour des chantiers mis en place par un propriétaire forestier. Les collectivités, avec qui nous avons traité, étaient dans une démarche de valorisation des bois locaux avec en parallèle la mise en place d'une filière locale, qui permet de générer une activité locale et la création d'emplois. L'objectif de ces collectivités n'est donc pas d'avoir un combustible à un coût le plus réduit possible. Pour la ville de Lorient, l'objectif est d'avoir un coût du kWh final, avec utilisation de plaquettes, inférieur à celui du gaz. Cela permet donc l'achat, à un coût raisonnable, de plaquettes humides vendues par un propriétaire forestier. C'est dans ce type de démarche que la filière bois énergie a toute ses chances d'être durable.

### **3.3 Mise en place d'un tableau de conversions bois énergie en forêt**

L'un des objectifs de cette étude est de mettre en place un tableau de conversions simple et utilisable lors de chantier bois énergie (*cf.* annexe 1). Ce tableau a été effectué sur un modèle existant, élaboré par la Chambre d'Agriculture de Bretagne. Certaines valeurs communiquées par le CEMAGREF ou AILE ont été utilisées. La mise en place d'un tel tableau demande un maximum de données pour ajuster le plus précisément possible les équivalences. C'est pourquoi ce tableau peut être considéré comme un première ébauche et ne demande qu'à être affiné.

Les valeurs inscrites dans ce tableau sont calculées à partir des références du CEMAGREF et de l'association AILE. Elles peuvent différer fortement en fonction des essences, de l'aspect des bois, du taux d'humidité, ainsi que de la granulométrie des plaquettes. Dans le milieu forestier, l'unité de volume « stère » est couramment utilisée. Elle représente réellement un mètre cube de bois empilés. Cependant, cette unité peut porter souvent à confusion. De ce fait, elle n'est plus considérée comme unité légale depuis le 31 décembre 1977 (DEBRE M. & *al*, 2003). Pour que le tableau soit simple d'utilisation, notamment pour les propriétaires et entrepreneurs forestiers, nous avons tout de même utilisé cette unité, pour des billons de 2 m et de 4 m. Les résultats varient fortement sur le volume d'un tas de billons de 4 m. Il en est de même pour les résultats des MAP humides, qui varient principalement en fonction de la densité et de la granulométrie présentes.

### 3.4 Comparaison des plaquettes obtenues avec d'autres sources d'énergie

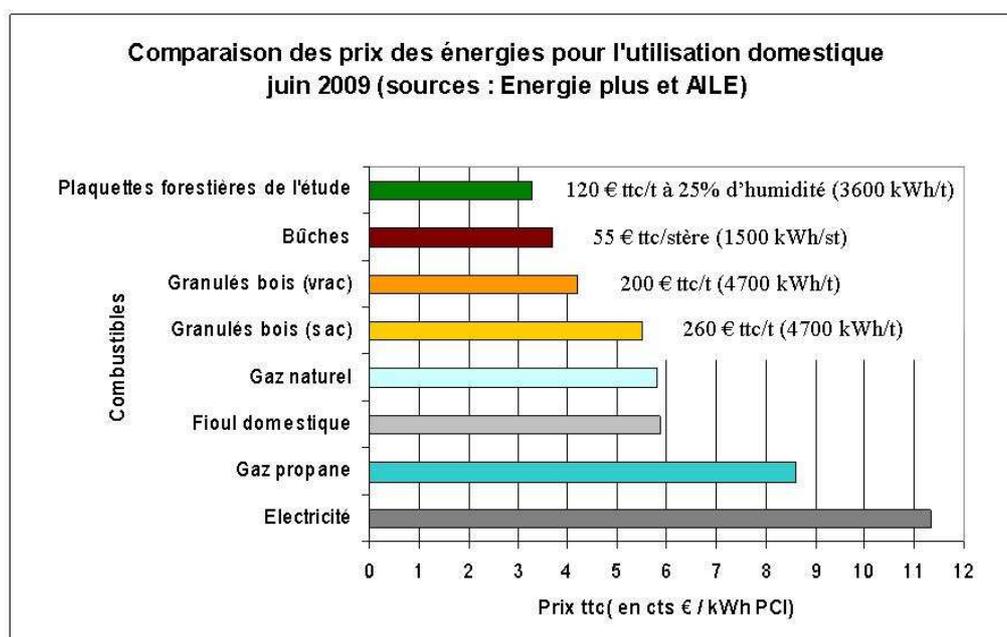


Fig. 17 : Comparaison des prix des énergies de différents combustibles domestiques

La figure 20 met en évidence la différence des prix des énergies, de plusieurs combustibles domestiques. La moyenne du prix de revient des plaquettes de l'étude est de 120 € ttc par tonne sèche. Les combustibles bois ont les prix au kWh les plus faibles. Il faut cependant prendre en considération que l'installation d'une chaudière bois à un coût plus élevé qu'une chaufferie fioul ou gaz. Dans le graphique ci-dessus l'amortissement du surcoût de la chaudière n'est pas pris en compte. Avec un PCI moyen de 3600 kWh/t, les plaquettes des chantiers de cette étude restent compétitives par rapport aux autres combustibles malgré leur prix relativement élevé par rapport à d'autres chantiers français, entre 74 et 140 € ttc/tonne sèche. Voici quelques prix communiqués à l'échelon national :

- ITEBE : entre 31 et 85 € ttc/tonne sèche
- MINEFE : entre 42 et 50 € ttc/tonne sèche
- UCFF : entre 45 et 65 € ttc/tonne sèche (DUCRAY, 2007)

Ces chiffres confirment le prix de revient élevé des plaquettes des chantiers. Avec quelques améliorations techniques et logistiques à apporter aux chantiers, il est possible d'arriver à un prix revient proche de ceux précédemment cités, surtout si on adopte une logistique en flux tendus, sans stockage et second transport (voir simulation page 48). Il faut

également rappeler que la majorité des chantiers étaient des premières éclaircies qui influent sur les rendements des travaux et les volumes de bois sortis.

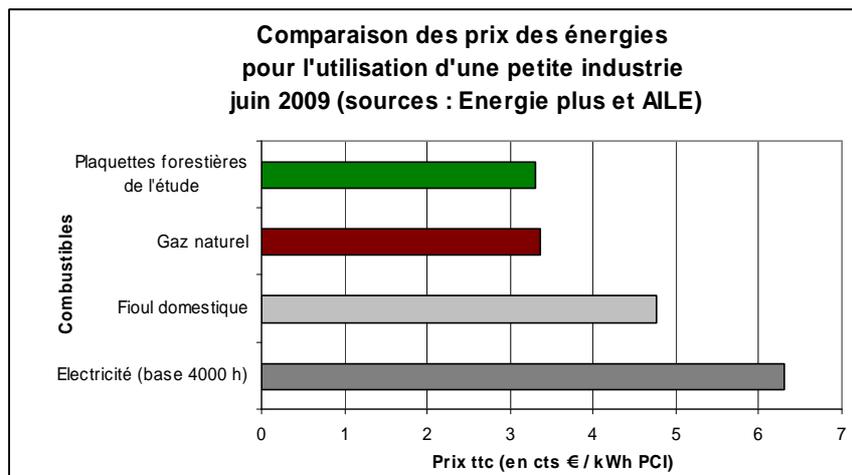


Fig. 18 : Comparaison des prix des énergies de différents combustibles industriels

Compte tenu de l'investissement d'une chaudière à plaquettes, le coût des plaquettes, produites pendant les chantiers réalisés, n'est pas compétitif par rapport aux autres énergies, notamment le gaz, mentionnées dans la figure 21. Ce graphique confirme le coût de production élevé pratiqué pour cette étude. Pour un bon développement de la filière, les prix de revient de plaquettes forestières doivent donc être inférieurs aux prix obtenus lors de l'étude.

## IV. SIMULATIONS et DISCUSSIONS

### 4.1 Une meilleure valorisation des bois serait-elle possible pour certains chantiers ?

#### 4.1.1 Valorisation « bois de sciage » à Néant sur Yvel

La production de plaquettes forestières doit se mettre en place en évitant au maximum de concurrencer les filières existantes, notamment les bois de petits sciages et les bois de trituration. De plus les bois de sciage permettent un revenu plus important au propriétaire, puisque que ces billons se vendent aux alentours de 8 €/st. Cependant il faut un minimum 40 st pour rentabiliser le déplacement d'un grumier. Nous avons donc relevé le volume des grumes d'un diamètre supérieur à 15 cm, sur le chantier 1.

Chantier 1 en quelques chiffres :

- surface d'étude : 0,82 ha
- diamètre moyen des arbres à 1,30 m : 16,8 cm
- longueur des billons : 4 m
- nombre de stères débardés : 61,6
- nombre de billons avec diamètre > 15 cm : 110
- nombre de stère bois de sciage : 11.6

Pour ce type de chantier plus de 40 st de bois de sciage sont récupérés pour une surface de 3 ha, volume nécessaire pour le déplacement d'un grumier, les autres billons ayant pour vocation la production de plaquettes forestières. Si la rémunération d'un stère décheté est de 4 € et si l'ensemble des bois sont déchetés, le propriétaire récupérera un revenu d'environ 300 €/ha. Or si les bois de sciage sont dissociés des bois à décheté, le revenu du propriétaire s'élèvera à environ 357 €/ha. Ce chiffre est obtenu grâce aux 200 € des 50 st de bois déchetés et aux 92.80 € des 11.6 st des bois de sciage, le tout ramené à l'hectare. Ces chiffres révèlent la faible importance économique de la séparation des bois de sciage lors d'une première éclaircie. Mais quand ceux-ci permettent le déplacement d'un grumier, il semble judicieux de les valoriser par ce biais.

#### 4.1.2 Vente de plaquettes sèches par le propriétaire à Ste Brigitte

Avec le développement de nouveaux marchés, le stockage des plaquettes par le propriétaire peut être une solution pour augmenter les revenus sur la vente de ses bois. En effet le prix vente des plaquettes sèches est plus important que celui des plaquettes humides, voire même pour le propriétaire, plus important que le prix de vente du bois sur pied ou du stère bord de route. Différentes possibilités de stockage s'offrent alors au propriétaire.

Les plaquettes peuvent être stockées sous un hangar ventilé ou à l'extérieur, le tas étant recouvert d'une bâche spéciale ou non. Le stockage en tas sans bâche occasionne une très forte perte de volume. Du fait des précipitations, l'eau s'infiltré dans le tas et une part de celui-ci a tendance à noircir. Le taux d'humidité des plaquettes peut même, dans certains cas, être plus important qu'au moment du déchiquetage (Administration Forestière de l'Etat de Bavière, 2005). Pour éviter cela, il existe plusieurs modèles de bâches qui protègent le tas de plaquettes des précipitations. Elles ont une caractéristique spéciale car elles sont perméables à l'air et à la vapeur d'eau dégagée par le tas. Pour un coût de l'ordre de 2 €/m<sup>2</sup>, ces bâches conservent une bonne qualité de plaquettes. Les bâches ont cependant une durée de vie de l'ordre de trois années.

Comme dit précédemment, les plaquettes peuvent également être stockées sous un hangar ventilé. Ce type de logistique permet de réduire les contraintes liées à l'utilisation d'une bâche. Des hangars existants peuvent être utilisés, permettant d'augmenter la marge sur le prix de vente de la plaquette, surtout quand le hangar est déjà amorti. Ci-dessous, nous avons simulé les coûts d'amortissement, pour la création d'un hangar à vocation de stockage de plaquettes. Les différents chiffres nous ont été communiqués par Mr Stéphane du PONTAVICE, propriétaire forestier sur le massif de Quénécan où s'est déroulé le chantier 6 de l'étude.

- création d'une plate forme goudronnée de 2000 m<sup>2</sup> : 47 800 € ht
- construction d'un hangar de 1033 m<sup>2</sup> : 44 174 € ht
- permis de construire via un architecte : 1 400 € ht

Avec un coût final de 93 374 € ht, la question du prix de stockage se pose. Quel serait ce prix si on considérait un amortissement du bâtiment sur 15 années, de la même durée que

le prêt ? Et après combien d'années le bâtiment est-il amorti, lorsque nous établissons un coût de stockage de 6 € ht par tonne sèche ?

Nous avons émis l'hypothèse d'une capacité de stockage d'environ 2500 MAP secs/an. Avec une telle capacité et en considérant qu'une tonne sèche correspond à 4 MAP secs, le coût de stockage, pour un amortissement sur 15 ans, s'élèverait à 9.96 € ht/tonne sèche. Ce coût est relativement élevé d'autant qu'il n'a pas pris en compte le coût de gestion du stockage. Parallèlement, il faudrait 25 années de production de 2500 MAP secs/an, avec un coût de stockage de 6 € ht/tonne sèche, pour amortir ce type d'investissement.

Un projet de construction d'un hangar de séchage de plaquettes nécessite d'avoir une fiabilité sur les quantités de volume stocké. En effet l'approvisionnement doit être régulier et doit être au niveau de la capacité maximale de stockage du hangar, les coûts d'amortissement seront donc d'autant moins importants. Lorsqu'un propriétaire décide d'effectuer le stockage des plaquettes, il semblerait plus judicieux de commencer par utiliser un hangar déjà existant. Malheureusement tous les hangars ne sont pas adéquats pour le stockage de plaquettes et peuvent engendrer des contraintes d'exploitation, comme par exemple une faible hauteur de toit qui oblige un approvisionnement avec des semis remorque à fond mouvant ou oblige beaucoup de manutention avec un tracteur ou un chariot télescopique. De plus certains accès aux hangars ne sont pas prévus pour des semis remorque et limite donc des possibilités d'approvisionnements.

#### 4.1.3 Approvisionnement des chaudières en plaquettes humides

Les chaufferies, à partir d'une capacité de 1000 kW, peuvent être alimentées par des plaquettes entre 40 et 45 % d'humidité et celles avec une capacité supérieure à 10 MW peuvent être alimentées par des plaquettes au dessus de 45 % d'humidité (AILE, 2007). Si de telles infrastructures venaient à se développer en Bretagne, le stockage des plaquettes s'avérerait inutile, par conséquent le coût final des plaquettes serait moins élevé.

Tab. 5 : Simulation d'une livraison de plaquettes humides en chaufferie

N° de chantier	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11
<b>Quantité totale produite (tonnes humides)</b>	33.7	48.9	31.6	23.1	39.5	20.2	23.8	20.0	46.7	26.9
<b>Taux d'humidité (en %)</b>	50.83	53.00	54.39	59.45	36.33	38.02	52.27	30.67	48.03	58.53
<b>PCI moyen (en kWh / t) source : CTBA</b>	2250	2000	2000	1750	3000	3000	2250	3400	2250	1750
<b>Coût après déchiquetage (en € ht / t humide)</b>	59.44	55.60	39.05	47.03	85.71	51.86	48.12	96.54	60.90	51.26
<b>Coût de livraison à la chaufferie (en € ht / t humide)</b>	8.02	9.20	7.92	12.99	12.67	9.89*	8.42	13.51	7.71	11.15
<b>Coût final arrivé chaufferie (en € ht / t humide)</b>	67.46	64.80	46.97	60.02	98.38	61.75*	56.54	110.05	68.61	62.41
<b>Coût final arrivé chaufferie (en € ht / kWh)</b>	0.030	0.032	0.023	0.034	0.033	0.021*	0.025	0.032	0.030	0.036

\* : Simulation avec un coût de livraison par camion (200 €/tour)

Sur les chantiers réalisés, ce type de logistique en flux tendu permettrait d'arriver à un coût moyen de 70 €/tonne humide livrée. Avec un stockage, le coût moyen est de 120 €/tonne sèche, mais avec un PCI plus important. Les bois, déchiquetés après quelques mois de séchage sur la parcelle ou en tas, verraient leur taux d'humidité diminuer et en parallèle leur PCI augmenter (cf. annexe 9). Une logistique en flux tendu demande, cependant, une gestion coordonnée des livraisons de bois à la chaufferie. Celle-ci peut être alimentée directement par des plaquettes ou par des billons qui seraient déchiquetés sur place.

## 4.2 Améliorations techniques à apporter pour la production de plaquettes forestières en Bretagne

Pour améliorer les coûts de production de plaquettes forestières, il serait préférable de travailler avec une rémunération à la tonne produite. Ce type de rémunération est déjà présent dans certaines régions françaises. Les entrepreneurs forestiers acceptent d'être payés par un système d'acompte et rémunérés en fonction du tonnage produit. Après discussion avec

Damien FRANCOIS, Ingénieur Forestier Responsable Recherche à F&BE, nous avons retenu les coûts moyens pratiqués lors de leurs chantiers :

- Abattage / débardage : 20 – 30 €/tonne sèche
- Broyage : 10 – 15 €/tonne sèche
- Transport : 10 – 15 €/tonne sèche
- Revenu propriétaire : 5 €/tonne sèche
- Marge d'un éventuel opérateur : 10 %

Pour mettre en place ce système de rémunération, une certaine confiance entre l'opérateur et les entrepreneurs forestiers doit être affichée. Pour augmenter les rendements lors de l'abattage, le matériel doit également s'adapter et se développer par rapport la demande. Si la filière bois énergie venait à se développer fortement en Bretagne, certains entrepreneurs devraient par exemple investir dans une tête abatteuse-groupeuse. Ce type de tête abatteuse permet de prélever plusieurs tiges à la fois et peut répondre aux éclaircies et dépressages pratiqués sur les tiges à faible volume unitaire. De plus, elle n'ébranche pas et ne façonne pas les arbres abattus, ce qui n'est pas indispensable dans la production de plaquettes forestières. Pour faciliter la logistique de transport des plaquettes, les entrepreneurs de déchiquetages devraient investir dans des camions bennes. Le risque de ruptures de charges entre ces deux opérations serait ainsi réduit.

Aujourd'hui, il existe plusieurs possibilités de produire des plaquettes forestières avec des prix de revient modérés. Cependant, des investissements importants, en terme de matériel, doivent être réalisés. Bien que de nombreux entrepreneurs soient intéressés par cette nouvelle filière, ceux-ci investiront que lorsqu'un grand nombre de débouchés seront présents.

## CONCLUSION

La filière bois énergie en Bretagne reste peu développée par rapport à d'autres régions françaises. Pourtant, les professionnels de la sylviculture et de nombreuses collectivités s'intéressent au développement de cette filière. Aujourd'hui, il existe peu de références régionales sur la production de plaquettes forestières. C'est dans ce contexte que le CETEF du Morbihan, en collaboration avec le CRPF de Bretagne et l'association AILE, a conduit une étude de faisabilité visant à acquérir des références techniques et économiques sur la production de plaquettes forestières. Cette étude, financée par le Conseil Régional et l'ADEME, a pour objectif de valoriser au mieux les produits forestiers hors bois d'oeuvre et bois bûche et d'accroître l'utilisation des plaquettes forestières dans les filières d'approvisionnement des chaufferies collectives et industrielles, existantes et à venir.

Onze chantiers pilotes ont été suivis intégralement lors de cette étude. Plusieurs peuplements représentatifs de la forêt bretonne ont été sélectionnés. Après une estimation des volumes à prélever, le suivi des chantiers a permis de déterminer les consommations de carburant et les rendements par opérations sylvicoles. Une seule logistique de production a été étudiée, allant de l'abattage à la livraison des plaquettes à 25 % d'humidité.

Les prix de revient des plaquettes sèches, produites sur ces chantiers, se sont révélés relativement élevés par rapport aux prix pratiqués dans certaines régions françaises. D'une part, le coût élevé de cette production est *a posteriori* la conséquence d'un volume prélevé à l'hectare modéré et de rendements faibles, en appliquant une rémunération horaire pour l'abattage et le débardage. D'autre part, l'accessibilité de la parcelle joue un rôle important sur les coûts de production finaux.

Pour motiver les acteurs de la filière bois et ses utilisateurs, il est essentiel de montrer la faisabilité de produire des plaquettes forestières en Bretagne en ayant un rapport gagnant-gagnant entre le propriétaire, l'entrepreneur et l'acheteur (collectivité ou industriel). Ce nouveau débouché en plein essor permettra de dynamiser la sylviculture, notamment celle des résineux, et de valoriser les rémanents après coupe rase. Suite à cette étude, des améliorations techniques et logistiques seront à apporter au cours de chantiers complémentaires qui auront lieu début 2010.

## BIBLIOGRAPHIE

**ADEME, 2006.** La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers, 36 pages.

**ADEME, 2009.** La filière Bois-Energie et le fonds de chaleur pour les collectivités et les entreprises – Dossier de presse. Ecully, 6 pages.

**Administration Forestière de l'Etat de Bavière, 2005.** Essais de séchage de plaquettes de bois à Wadlhausen. Freiseng, 7 pages.

**AILE, 2007.** Plan bois énergie Bretagne 2007 - 2013. Rennes, 6 pages.

**BADJI L., BORNSCHEIN F., COLLIN X. & DOUARD F., 2007.** La production de sources d'énergies renouvelables en milieu rural – Le bois-énergie dans l'agriculture. Pro Aere, ITEBE, Paris, 88 pages.

**BASTIEN Y., 2002.** Taillis et taillis sous futaie. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts de Nancy, 13 pages.

**BLANC P., BURIN des ROZIERS E., POULIQUEN H. & ROSSINOT P., 2007.** Le Grenelle de l'Environnement – Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie – Rapport Synthèse du Groupe 1. Paris, 108 pages.

**CACOT E., 2009.** La mécanisation du bûcheronnage dans les peuplements feuillus – Synthèse opérationnelle. FCBA, Paris, 31 pages.

**CARREAU J.M., 2009.** Réunion d'information du CRPF de Bretagne – La sylviculture de rattrapage du Pin maritime. CRPF, Rennes, 2 pages.

**CETEF 49, 2005.** Réunion CETEF 49- Bois énergie du 03/10/05 - Broyage plaquettes sur parcelle de peupliers. Saint-Melaine / Aubance, 6 pages.

**CHENE AVENIR.** La surface terrière – Une mesure simple à mieux connaître. Programme de développement des chênes en région Centre. 1 page

**COIC A. et GRENIE X., 2008.** Danemark 2008 - Voyage d'étude organisé par le CETEF du Finistère. CETEF 29 et CRPF 56, 22 pages.

**CRPF, 1995.** Le pin maritime (*Pinus pinaster*) – Mise en valeur et renouvellement des peuplements de pins maritimes en Bretagne méridionale. Rennes, 8 pages.

**CRPF, 2003.** Le Pin maritime (*Pinus pinaster*) Ar Binenn. Rennes, 2 pages.

**CRPF, 2005.** Schéma régional de gestion sylvicole de Bretagne. Rennes, 192 pages.

**CRPF, 2006.** Code des bonnes pratiques sylvicoles. Rennes, 22 pages.

**DEBRE M., JEANNENEY J.M., LECOURT R., JOXE L. & PAYE L., 2003.** Décret n°61-501 du 3 mai 1961 relatif aux unités de mesure et au contrôle des instruments de mesure – Version consolidée au 1 mars 2003. République française, Paris, 17 pages.

**DEFAYE S., 2004.** Le bois énergie en Europe. *Le cahier du bois énergie*, Caen, n°26, 1.

**DOUARD F., 2007.** Les différents combustibles bois en France. *Forêt-entreprise*, Paris, n°172, 13-15.

**DUCRAY P., 2007.** Colloque Sénat : « L'énergie, quelles nouvelles opportunités pour les territoires ». UCFF, Paris, 5 pages.

**Euroforenet, 2006.** Réseau Européen Forêt Energie. Bruxelles, 20 pages.

**F&BE, 2007.** Etude visant à estimer le bilan technico-économique de la production et de la mobilisation de bois énergie dans les forêts lorraines – Rapport intermédiaire n°2. 75 pages

**MAAPAR, 2003.** « Forêt et territoire » agriculture.gouv.fr. 24/03/2003. 06/08/2009 <<http://agriculture.gouv.fr/sections/thematiques/foret-bois/panorama/foret-et-territoire/#>>

**MEEDDAT, 2008.** Bilan énergie de la France pour 2007. République Française, Paris, 30 pages.

**PEDRON M., 2009.** Rapport d'activité Plan Bois Energie 2008. AILE, Rennes, 10 pages.

**PICARD O., 2006.** Forêt = puits de carbone ?. *Forêt-entreprise*, Paris, n°168, 50-51.

**RERAT B., 2009.** En Suisse – le bois énergie, un rempart aux turbulences. *Forêts de France*, Paris, n°524, 9-13.

**SILVIN M., LEON P., DUCRAY P., KLOTZ J., MICHON F., VAUTHERIN P. & GORGET Y., 2004.** Condition techniques économiques et juridiques de la constitution d'une filière intégrée de production et de commercialisation de chaleur à partir de la production de plaquettes forestières. UCFF, Paris, 175 pages.

**URACOFRA, 2007.** Redynamisation et relocalisation des territoires ruraux par le bois énergie – Bilan des chantiers de production de plaquettes forestière. Grenoble, 21 pages.

## Sites internet

**AILE :** <http://www.aile.asso.fr/>

**ADEME :** <http://www2.ademe.fr/>

**CRPF Bretagne :** <http://www.crfp.fr/bretagne/>

**FCBA :** <http://www.fcba.fr/accueil.php>

**IFN :** <http://www.ifn.fr/spip/>

**ITEBE :** <http://www.itebe.org/>

**MINEFE :** <http://www.industrie.gouv.fr/>

## ANNEXES

<b><u>Annexe 1</u></b> : Tableau de conversions	I
<b><u>Annexe 2</u></b> : Fiches de relevés	II
<b><u>Annexe 3</u></b> : Clef de détermination des peuplements forestiers	IX
<b><u>Annexe 4</u></b> : Fiche descriptive de la Station des Cormiers (35)	X
<b><u>Annexe 5</u></b> : Tableau chronologique des dates des chantiers	XI
<b><u>Annexe 6</u></b> : Cartographies	XII
<b><u>Annexe 7</u></b> : Tableau de synthèse	XIII
<b><u>Annexe 8</u></b> : Descriptif par chantier	XV
<b><u>Annexe 9</u></b> : PCI en fonction du taux d'humidité	XXVI
<b><u>Annexe 10</u></b> : Organismes, sigles, unités et lexique forestier	XXVII

# ANNEXE 1

## TABLEAU DE CONVERSIONS

UNITE		Equivalent volume					Equivalent poids		Equivalent Bois Energétique		
		Bois plein (m3)	MAP humide	MAP sec (H°=25%)	Stère (billon de 2m)	Stère * (billon de 4m)	Tonne humide	Tonne sec (H°=25%)	kWh	L fioul	tep (tonne équivalent pétrole)
Equivalent volume	Bois plein (m3)	1	2.33	2.00	1.50	2.33	1.05	0.75	2707	270.7	0.233
	MAP humide	0.43	1	0.86	0.65	1	0.30	0.21	756	75.6	0.065
	MAP sec (H°=25%)	0.5	1.16	1	0.75	1.16	0.35	0.25	900	90.0	0.078
	Stère (billon de 2m)	0.67	1.55	1.33	1	1.55	0.52	0.37	1332	133.2	0.115
	Stère * (billon de 4m)	0.43	1	0.86	0.65	1	0.30	0.21	756	75.6	0.065
Equivalent poids	Tonne humide	0.95	3.33	2.86	1.92	3.33	1	0.71	2571	257.1	0.222
	Tonne sec (H°=25%)	1.33	4.76	4.00	2.70	4.76	1.40	1	3600	360	0.310
Equivalent Bois Energétique	kWh	3.69E-04	1.32E-03	1.11E-03	7.51E-04	1.32E-03	3.89E-04	2.78E-04	1	0.1	8.62E-05
	L fioul	3.69E-03	1.32E-02	1.11E-02	7.51E-03	1.32E-02	3.89E-03	2.78E-03	10	1	8.62E-04
	tep (tonne équivalent pétrole)	4.29	15.34	12.89	8.71	15.34	4.51	3.22	11600	1160	1
H° = taux d'humidité (calcul sur brut)											
* = valeur aléatoire en fonction des billons (courbure, diamètre, ...)											
				Données variables				Pas de donnée fiable			

## **ANNEXE 2**

<b>Fiche 1</b>	p.III
<b>Fiche 2</b>	p. V
<b>Fiche 3a</b>	p. VI
<b>Fiche 3b</b>	p. VII
<b>Fiche 3c</b>	p. VIII

## Fiche 1 - Description du site d'étude (avant intervention)

Date du descriptif : \_\_ / \_\_ / 20\_\_

N° Chantier : .....

### Localisation

Département : --

Commune : .....

Forêt : .....

N° Parcelles : .....

Surface totale : ..... hectares

Surface étudiée : ..... hectares

Historique des interventions : .....

### Caractéristiques générales de la station (pour l'ensemble du site d'étude)

Situation topographique : plateau  versant  vallée  autre : .....

Exposition : Nord  Sud  Ouest  Est  autre : .....

% de pente : 0 - 1%  1 - 3%  3 - 5%  > 5%

Type humus : mull  moder  mor  précision : .....

Sol (texture dominante) : limons  argiles  sables  précision : .....

Présence d'hydromorphie : .....

Relevé floristique : .....

Référence Station (guide CRPF) : .....

Remarque(s) particulière(s) : .....

(obstacles, portance du terrain, .....

propreté du sous-bois) .....

.....

Accessibilité de la parcelle : .....

Distance moyenne de débarquement à la place de dépôt : .....

Caractéristiques de la place de dépôt : .....

Etat du sol avant intervention : .....

### Site étude : opération sylvicole (éclaircie, cloisonnement, dépressage)

Type de peuplement (nomenclature CRPF Bretagne) : .....

Essences : .....

Age moyen : .....

Intervention : .....

Hauteur moyenne : ..... mètres

Diamètre moyen à 1.30 m : ..... cm

Etat sanitaire : .....

Densité initiale : ..... tiges/ha

Surface terrière avant exploitation : ..... m<sup>2</sup>/ha

Surface terrière après exploitation : ..... m<sup>2</sup>/ha

Estimation du volume prélevé à l'hectare : ..... m<sup>3</sup>

Si production de « bois bûche », estimation du volume : ..... m<sup>3</sup>

**Site étude : nettoyage après coupe rase**

Superficie du peuplement homogène exploité : ..... ha

Type de peuplement (nomenclature CRPF Bretagne) : .....

Etat sanitaire : .....

Estimation du peuplement avant exploitation :

Essence	si peuplement régulier				si peuplement irrégulier : nombre					
	Age	Densité t/ha	H moy.	Ø moy.	Perches	PB	EM	GB	TGB	G *

Perches : Ø de 12,5 à 17,5 cm

BM : Ø de 27,5 à 47,5 cm

TGB : Ø > 77,5 cm

PB : Ø de 17,5 à 27,5 cm

GB : Ø de 47,5 à 77,5 cm

\* surface ternière (m<sup>2</sup>/ha)

Nombre de tiges prélevées (peuplement régulier) : .....

Si peuplement irrégulier

Nombre de perches : .....

Nombre de PB : .....

Nombre de EM : .....

Nombre de GB : .....

Nombre de TGB : .....

Estimation du volume « bois d'œuvre » à l'hectare : ..... m<sup>3</sup>

Caractéristiques des houppiers et rémanents (prendre l'arbre moyen par catégorie et par essence si peuplement irrégulier) :

Caractéristiques	si peuplement régulier	si peuplement irrégulier				
	Arbre moyen	Perches	PB	EM	GB	TGB
Nombre de branche						
Longueur moyenne						
Diamètre moyen (médian)						

Disposition : en andains  en tas  dispersé  autres : .....

Estimation du volume « bois déchiqueté » à l'hectare : ..... map (m<sup>2</sup> apparent plaquette)

**Carte IGN/ Photographie aérienne**

Localiser le site d'étude (matérialiser sur place par les piquets de couleur vive), la place de dépôt, l'emplacement de la déchiqueteuse.



**Fiche 2 - Matériels et méthode de travail**

N° Chantier : .....

**Description : matériels d'abattage :**

Nom de l'entreprise : .....  
 Statut entreprise : .....  
 Marque du matériel : .....  
 Type du matériel : .....  
 Mode opératoire : .....  
 Qualification du personnel : .....  
 Effectif présent : .....  
 Donnée rendement moyen \* : ..... m<sup>3</sup>/heure  
 Consommation moyenne essence \* : ..... litres/heure  
 Remarques :  
 .....

Schéma et photos

**Description : matériels de débardage :**

Nom de l'entreprise : .....  
 Statut entreprise : .....  
 Marque du matériel : .....  
 Type du matériel : .....  
 Mode opératoire : .....  
 Qualification du personnel : .....  
 Effectif présent : .....  
 Donnée rendement moyen \* : ..... m<sup>3</sup>/heure  
 Consommation moyenne essence \* : ..... litres/heure  
 Remarques :  
 .....

Schéma et photos

**Description de la déchiqueteuse :**

Nom de l'entreprise : .....  
 Statut entreprise : .....  
 Marque : .....  
 Type : .....  
 Régime de prise de force (ou du moteur auxiliaire) \* :  
 ..... tours/min  
 Réglages spécifiques : .....  
 Vitesse des rouleaux d'alimentation\* : ..... tours  
 Nombre de couteaux : .....  
 Ecart couteaux contre couteau : ..... mm  
 Régime de rotation \* : ..... tours  
 Type de grille utilisée (si plusieurs) : .....  
 Section de la maille : ... x ...  
 Ecartement de la grille : ..... cm  
 Nombre d'heures depuis la dernière intervention sur  
 le groupe broyeur : ..... heures  
 Dernier affûtage : .....  
 Donnée rendement moyen \* : ..... m<sup>3</sup>/heure  
 Consommation moyenne essence \* : ..... litres/heure  
 Effectif présent : .....

Schéma et photos

**Fiche 3a - Mesures pendant le chantier « Abattage »**

Date du chantier d'abattage: \_\_ / \_\_ / 20\_\_

N° chantier : .....

Température min/max (en °C)	
Condition météo Très ensoleillé - ensoleillé - nuageux - pluie - grosse pluie - neige - grosse neige	
Visibilité (en m)	
Vent (force et direction)	

Temps de travail	Temps de travail Productif	Travail principal	Abattage	Durées en heures et minutes						
		Travail complémentaire	Abattage							
			Abattage							
			Vidange sur place de dépôt							
			Déplacement pour vidange							
		Temps de travail Auxiliaire	Service	Tronçonnage						
				Réparations						
				Entretien						
				Ravitaillements						
				Transfert matériel						
				Planification						
	Temps de dérangement	Interférence	Préparation opérationnel							
			Temps conversion (montage - démontage)							
			Attente							
			Autres							
	Temps de retard liés au travail	Repos et autres	Transfert parking / coupe							
			Repas							
			Intempéries							
			Visites							
			Blessures							
Consommation essence (travaux d'abattage)										
Total Heure et minute de travail réel Abattage										
Coût horaire										
Coût total										

## Fiche 3b - Mesures pendant le chantier « Débardage »

Date du chantier de débardage : \_\_ / \_\_ / 20\_\_

N° chantier : .....

Température min/max (en °C)	
Condition météo Très ensoleillé - ensoleillé - nuageux - pluie - grosse pluie - neige - grosse neige	
Visibilité (en m)	
Vent (force et direction)	

				Durées en heures et minutes						
Temps de travail	Temps de travail Productif	Travail principal	Débardage							
			Débardage							
			Travail complémentaire	Vidange sur place de dépôt						
				Déplacement pour vidange						
				Tronçonnage						
	Temps de travail Auxiliaire	Service	Réparations							
			Entretien							
			Ravitaillements							
		Temps de préparation	Transfert matériel							
			Planification							
Préparation opérationnel										
Temps conversion (montage - démontage)										
Temps de non travail	Temps de retard liés au travail	Interférence	Attente							
			Autres							
		Repos et autres								
		Transfert parking/coupe								
	Temps de dérangement	Repas								
		Intempéries								
		Visites								
		Blessures								
Consommation essence (travaux débardage)										
Total Heure et minute de travail réel Débardage										
Coût horaire										
Coût total										

### Fiche 3c – Mesures pendant le chantier « Déchiquetage »

Date du chantier de déchiquetage : \_\_ / \_\_ / 20\_\_

N° chantier : .....

Température min/max (en °C)	
Condition météo Très ensoleillé - ensoleillé - nuageux - pluie - grosse pluie - neige - grosse neige	
Visibilité (en m)	
Vent (force et direction)	

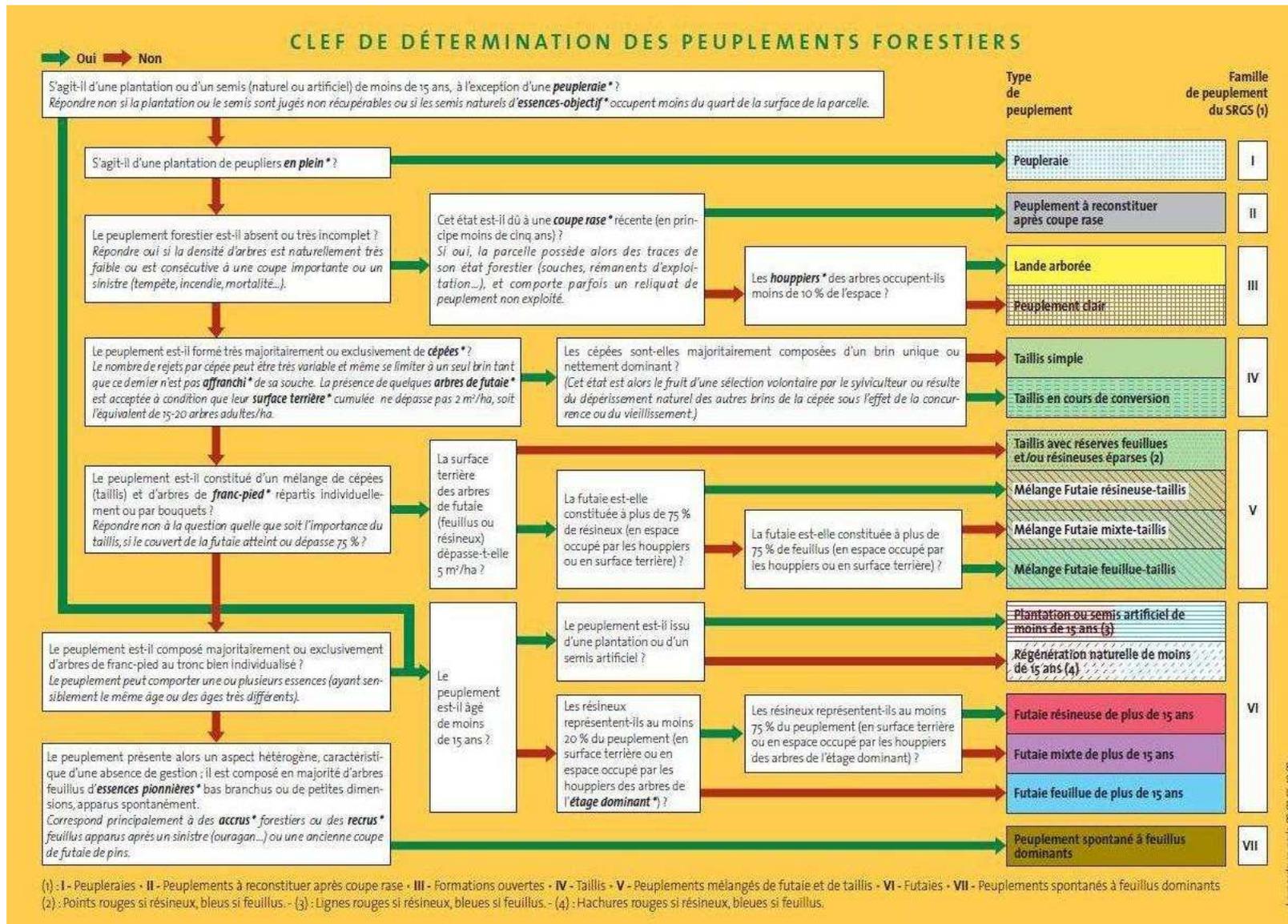
\* Remplir les temps en heures et minutes par benne

\*\* Prendre largeur et longueur des différentes bennes

				Durées en heures et minutes														
N° Benne*				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Code de la benne **																		
Temps de travail	Temps de travail Productif	Travail principal	Déchiquetage															
			Déplacement															
		Travail complémentaire	Vidange benne															
			Déplacement pour vidange															
	Tronçonnage																	
	Temps de travail Auxiliaire	Service	Réparations															
			Entretien															
			Ravitaillements															
		Temps de préparation	Transfert matériel															
	Planification																	
Préparation opérationnel																		
Temps conversion (montage - démontage)																		
Temps de non travail	Temps de retard liés au travail	Interférence	Attente															
			Autres															
		Repos et autres																
		Transfert parking/coupe																
	Repas																	
	Temps de dérangement	Intempéries																
		Visites																
Blessures																		
Hauteur de plaquette dans la benne (en m)																		
Consommation essence déchiqueteuse																		
Volume plaquette (en MAF)																		
Total Heure et minute de travail réel Déchiquetage																		
Productivité (MAF/heure)																		
Coût horaire																		
Coût total																		

Classe de perturbation du sol après chantier (voir protocole) : .....

# ANNEXE 3



## Vie du pôle

**Les Cormiers**  
St Aubin des  
Cormiers (35)

*Station Expérimentale  
Agro-machinisme*

**Bancs d'essai d'épandage**  
- Epandage de fumiers  
- Epandage de lisiers

**Essais énergie**  
- TTCC  
- consommation de fuel

**Essais-terrain "matériel"**  
- Techniques alternatives de désherbage  
- Diverses adaptations sur matériel existant

**Réalisation de prototypes**

Contact : Pierre HAVARD - 02 99 39 72 91

### Station des Cormiers (35)

## Des essais sur le Bois

**La filière bois plaquette d'origine bocagère doit prendre toute sa place dans l'approvisionnement des chaudières collectives ou individuelles. Plusieurs freins limitent son développement. Les travaux de la Station des Cormiers visent à favoriser le développement du bois plaquette.**

**L**a plaquette est un produit d'une grande variabilité au niveau de plusieurs critères :

- les essences (mélange d'essences dans les haies),
- les tailles des particules unitaires,
- les humidités
- les densités
- les capacités calorifiques.

A partir de là, la tentation est grande de rédiger des cahiers des charges d'approvisionnement assez minimalistes et à priori peu contraignants pour le fournisseur. Mais cette situation peut se retourner en sa défaveur car la qualité méconnue des plaquettes peut être considérée comme responsable des problèmes rencontrés par l'installation de chauffage. Il ne faut pas oublier qu'un cahier des charges a pour vocation de clarifier les éléments de contrat et donc de protéger le client mais également le fournisseur.

**Des caractéristiques qui évoluent**

De plus, certaines caractéristiques évoluent dans un sens négatif pour le producteur. En effet, les transactions ayant lieu le plus souvent à la tonne, la densité (poids unitaire des plaquettes) influe directement sur le prix payé à

chaque livraison. Or, au fur et à mesure du séchage, la densité a tendance à diminuer, suivant en cela le taux d'humidité des plaquettes. A contrario, la capacité calorifique (chaleur contenue) a alors tendance à augmenter, toujours en liaison avec le taux d'humidité des plaquettes, ce qui intéresse grandement l'utilisateur. En résumé, l'acheteur a intérêt à acheter des plaquettes très sèches, peu denses et très riches en calories à l'inverse du vendeur. Cette divergence d'intérêt n'est pas propice à des relations commerciales saines.

**La caractérisation du produit**

La caractérisation d'un produit est pour le producteur un passage obligé pour mieux maîtriser sa filière et un des moyens pour améliorer sa valorisation. Un des outils pour la caractérisation est la norme européenne n° 14961 : Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles. Elle indique les éléments à prendre en compte pour caractériser les combustibles de différentes origines dont les plaquettes de bois. Les principaux éléments concernent la granulométrie des plaquettes, leur taux d'humidité, leur densité et leur Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). La Station des Cormiers a mis en place des méthodes d'essai pour permettre cette caractérisation.

**La granulométrie des plaquettes**

Elle se mesure en tamisant des plaquettes avec des tamis à trous ronds de différentes tailles : 1, 3, 15, 16, 45, 63, 100 ou 200mm. On pèse ensuite les différentes fractions ainsi séparées en les ramenant en pourcentage du



Des plaquettes de bois issues de haies bocagères pour des chaudières collectives ou individuelles.

## Vie du pôle

**Les Cormiers**  
St Aubin des  
Cormiers (35)

*Station Expérimentale  
Agro-machinisme*

**Bancs d'essai d'épandage**  
- Epandage de fumiers  
- Epandage de lisiers

**Essais énergie**  
- TTCC  
- consommation de fuel

**Essais-terrain "matériel"**  
- Techniques alternatives de désherbage  
- Diverses adaptations sur matériel existant

**Réalisation de prototypes**

Contact : Pierre HAVARD - 02 99 39 72 91

### Station des Cormiers (35)

## Des essais sur le Bois

# plaquette

**La densité**

Différentes classes de densité sont retenues dans la norme : 200, 300 et 450 kg/m<sup>3</sup>. La Station des Cormiers a défini une procédure de mesure de la densité au moyen d'un récipient d'environ 3 litres. La densité est fortement dépendante du niveau de séchage des plaquettes. Dans les ventes par unité de poids, l'évolution du séchage fait que le vendeur est amené à fournir de plus en plus de volume de plaquettes pour arriver au même poids.

**L'humidité**

L'humidité est présentée sous 3 classes principales :

- inférieur ou égal à 20 % correspondant à un produit sec,
- inférieur ou égal à 30 % pour un produit adapté au stockage,
- inférieur ou égal à 40 % pour un produit à stockage limité.

L'humidité est une des caractéristiques principales des plaquettes, que ce soit lors du stockage pour suivre l'état de séchage ou avant la livraison pour vérifier l'adéquation au cahier des charges. Ses effets sur la densité et sur le PCI sont très importants. Un suivi est indispensable avec un niveau de précision supérieur à celui demandé par la norme. La Station des Cormiers utilise une étuve pour obtenir un niveau de précision de l'ordre de 1 %.

**Le pouvoir calorifique inférieur**

Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) est la quantité de chaleur nette dégagée par le combustible. C'est une caractéristique qui conditionne la consommation de plaquettes. Comme

dit plus haut, des plaquettes plus sèches présentent un PCI plus important améliorant l'efficacité de combustion et diminuant par là même la consommation. Pour le calculer, deux étapes sont nécessaires : première étape, on fait brûler une quantité de plaquettes sèches et on mesure la chaleur dégagée. Seconde étape, on mesure le taux d'humidité des plaquettes brutes. Enfin, on ramène la chaleur dégagée à l'unité de poids et on lui enlève la chaleur à utiliser pour évaporer l'humidité des plaquettes. Le principal facteur de variation est le taux d'humidité. La chaleur dégagée par unité de poids change peu selon les essences de bois (globalement moins de 10 % d'écart entre les principales essences). Contrairement à ce que l'on entend souvent, les résineux et autres feuillus tendres ont un PCI (ramené au poids) de même niveau voire supérieur aux feuillus durs (chêne, châtaignier, hêtre par exemple). Par contre, leur densité inférieure fait qu'une bûche de feuillus tendres ou de résineux est moins riche en chaleur qu'une bûche de feuillus durs de même diamètre. Dans ce cas, c'est le volume qui est comparé.

**Didier DEBROIZE**  
Pôle Agro PV

**La caractérisation des plaquettes**

La caractérisation des plaquettes est un des éléments devant permettre de mieux maîtriser le processus de vente de plaquettes. Elle doit permettre de préciser le contenu des cahiers des charges et de se différencier pour améliorer la rémunération des différentes fonctions des plaquettes de haies : assurer le chauffage mais aussi participer à l'entretien des haies et à la gestion du paysage. C'est indispensable pour que la filière se développe pour le bien de tous.



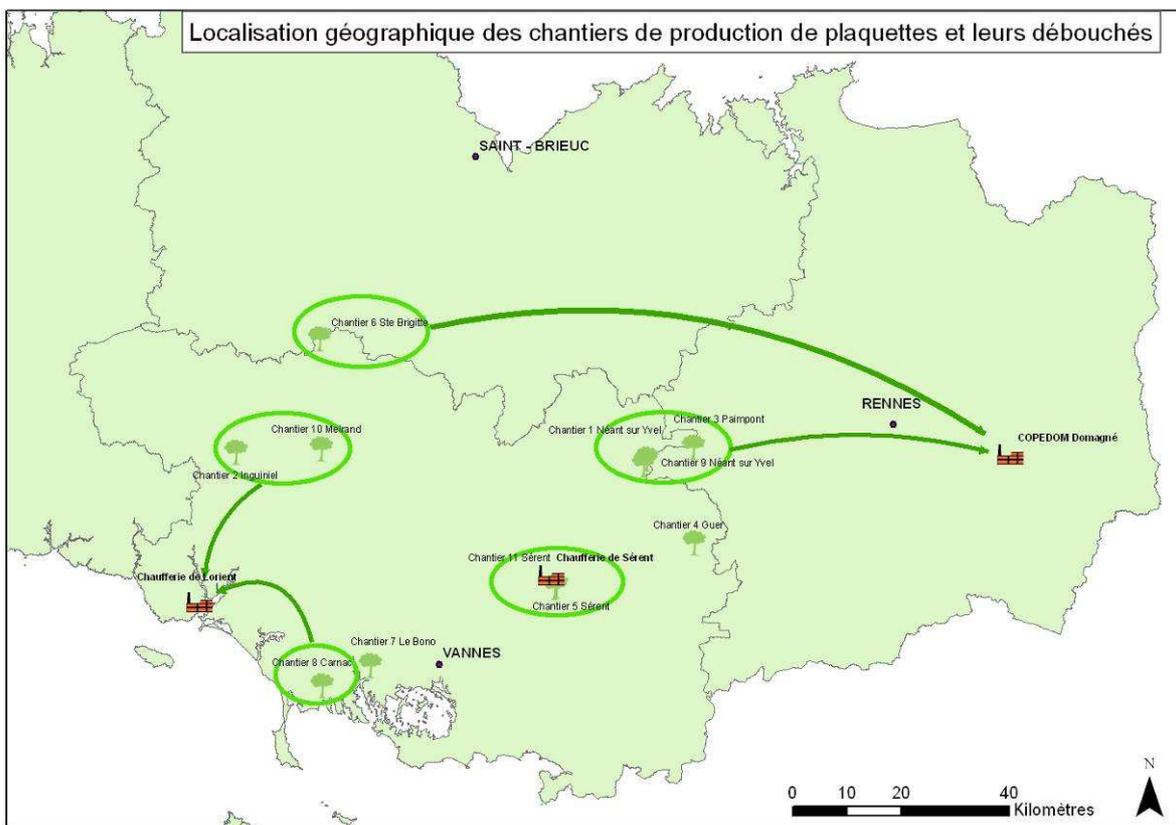
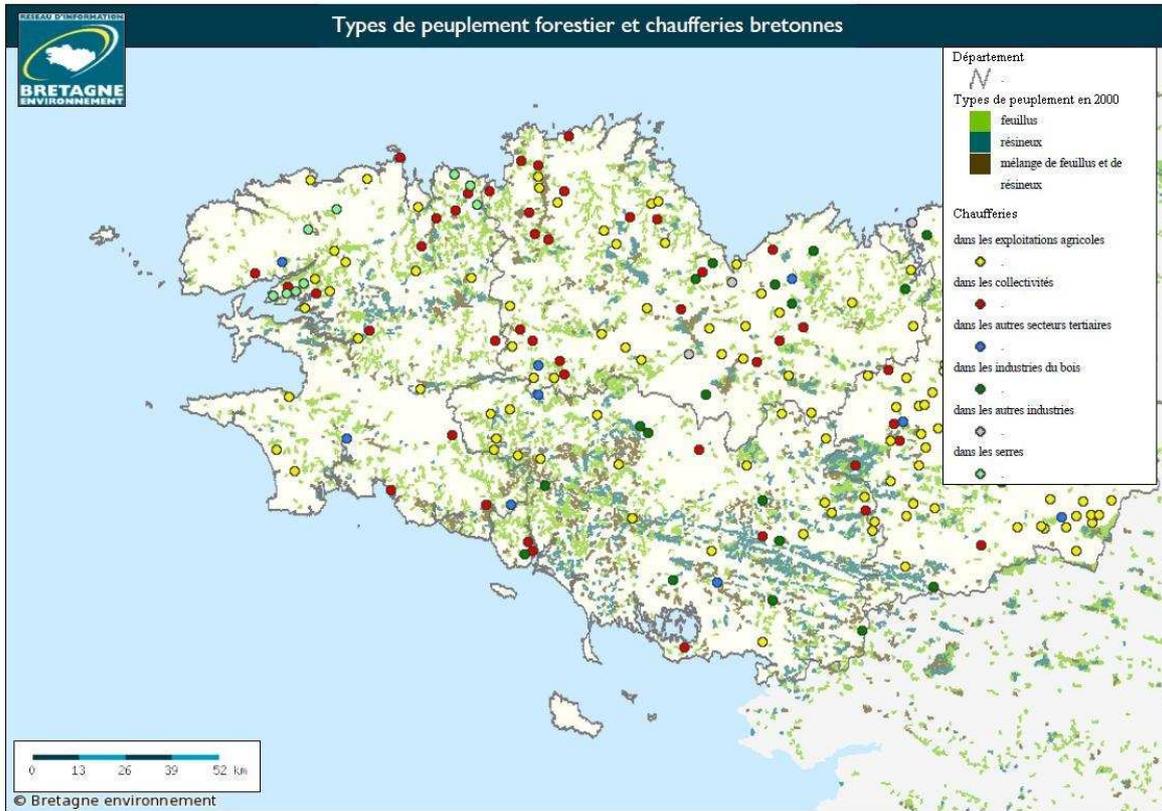
Le banc de caractérisation de la granulométrie des plaquettes mis au point à la station des Cormiers.

## ANNEXE 5

### Dates d'intervention sur les chantiers

N° de chantier	Abattage	Nbr de jours entre les opérations	Débardage	Nbr de jours entre les opérations	Déchiquetage	Nbr de jours entre l'abattage et le déchiquetage
1	13-mai-09	20	03-juin-09	35	10-juil.-09	56
2	15 et 16-avr.-09	6	23-avr.-09	1	24-avr.-09	8
3	juil-09	simultanément	juil-09	6	06-août-09	6
5	01 et 02-avr.-09	0	02-avr.-09	0	02-avr.-09	0
6	06 et 07-mai-09	31	09 et 15-juil.-09	13	30-juil.-09	51
7	11-mai-09	35	17-juin-09	0	18-juin-09	36
8	12-mai-09	33	16-juin-09	1	18-juin-09	35
9	14 et 15-mai-09	11	27-mai-09	42	10-juil.-09	54
10	déc-07	1 an et demi	29 et 30-juil.-09	3	03-août-09	1 an et demi
11	01-avr.-09	0	02-avr.-09	0	02-avr.-09	0

# ANNEXE 6



# ANNEXE 7

## Bilan technique - Chantier

N° de chantier	1	2	3	5
Commune	Néant sur Yvel (56)	Inguiniel (56)	Paimpont (35)	Sérent (56)
Peuplement	jeune futaie de pin laricio de Corse	jeune futaie feuillue	peupleraie exploitée	jeune futaie de pin maritime
Opération	première éclaircie sélective avec cloisonnements	première éclaircie sélective	reprise des rémanents de coupe rase	première éclaircie après cloisonnements
Modalités	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous bâche	abattage manuel, débardage mécanisé, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar	démantèlement manuel des houppiers, débuscage mécanisé, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous bâche	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar
Surface (ha)	0.62	0.50	0.74	0.76
Situation topographique	plateau	plateau	bord de ruisseau	plateau
Desserte	piste à 100 m ; route à 300 m	piste mitoyenne ; route à 150 m	route à 100 m	piste et route mitoyennes
Zone de débardage	distante de 400 m	mitoyenne	distante de 100 m	mitoyenne
Zone de stockage	distante de 25 km	distante de 30 km	distante de 65 km	distante de 7 km
Région forestière de Bretagne	forêt de Paimpont - Coëtquidan	centre ouest Bretagne	forêt de Paimpont - Coëtquidan	vannetais - Landes de Larvaux
Référence de la station (guides CRPF Bretagne)	absence de guide pour cette zone géographique	absence de guide pour cette zone géographique	absence de guide pour cette zone géographique	Guide Vannetais : Unité V10
Contrainte d'exploitation	parcelle relativement humide par endroits et cloisonnements effectués perpendiculairement aux lignes, plantées sur ados	pas d'abattage mécanisé par choix du propriétaire	-	-
Densité moyenne (nb tiges/ha)	1174	1238	230	1153
Diamètre à 1.30 m (cm)	16.6	20.8	20	17.8
Hauteur moyenne (m)	13.4	16.7	7.5	11.5
Temps au marquage (heures)	4	2	-	-
Temps à l'abattage (minutes)	435	1674	338	247
Temps au débardage (minutes)	315	466	337	156
Temps au déchiquetage (minutes)	78	137	59	59
Quantité totale produite (tonnes humides)	33.7	48.9	31.6	23.1
Quantité produite (MAP humides/ha)	132.4	429.4	129.7	84.6
Densité apparente* (t/MAP humide)	0.311	0.234	0.329	0.352
Quantité produite (tonnes humides/ha)	41.2	100.5	42.7	29.8
Taux d'humidité* (%)	50.83	53.00	54.39	59.45
Rendement horaire de l'abattage (st/h)	12.89	6.16	16.4	15.72
Rendement horaire du débardage (st/h)	17.79	22.15	16.45	24.57
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	63.5	93.1	97.3	67.1
Dégâts occasionnés au sol	ornières dans les parties humides	aucun	quelques ornières présentes sur la parcelle quelques petits chênes présents, conservés et arbres de la plantation voisine marqués par le débuscage	aucun
Dégâts occasionnés au peuplement	négligeables	aucun		négligeables

\* : après résultats d'analyses d'échantillons

\*\* : simulation si coupe à blanc sur le peuplement

## tier bois énergie 2009 -

6	7	8	9	10	11
Ste Brigitte (56)	Le Bono (56)	Camac (56)	Néant sur Yvel (56)	Melrand (56)	Serent (56)
taillis âgé de chêne et bois blanc	jeune futaie de chêne rouge d'Amérique	jeune futaie de pin maritime	taillis de bouleaux non améliorables	jeune futaie de mélèzes	jeune futaie de pin maritime
ouverture de cloisonnements	première éclaircie sélective avec cloisonnements	première éclaircie sélective avec cloisonnements	coupe à blanc avec réserves éparses	récupération des produits de la première éclaircie sélective	dépressage tardif
abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, stockage sous bâche par le propriétaire	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous bâche	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar	abattage et débardage mécanisés, déchiquetage bord de route, livraison après stockage sous hangar
1.73	0.61	0.25	0.42	2.12	0.51
plateau	plateau	plateau	plateau	fond de vallée	plateau
piste mitoyenne ; route à 900 m	piste mitoyenne ; route à 200 m	route mitoyenne	piste mitoyenne ; route à 800 m	piste à 50 m ; route à 250 m	piste mitoyenne ; route à 200 m
distante de 900 m	mitoyenne	mitoyenne	distante de 1200 m	distante de 250 m	distante de 200 m
distante de 158 km	distante de 300 m	distante de 50 km	distante de 25 km	distante de 57 km	distante de 7 km
centre ouest Bretagne	littoral	littoral	forêt de Palmont - Coëtquidan	centre ouest Bretagne	vannetais - Landes de Lanvaux
Guide Bretagne Centrale : Station 5	Guide Vannetais : Unité V6	Guide Vannetais : Unité V6	absence de guide pour cette zone géographique	Guide Vannetais : Unité V6	absence de guide pour cette zone géographique
taillis avec des rejets serrés, ne facilitant pas l'abattage mécanisé	parcelle relativement humide par endroits	-	-	lignes serrées, pas de cloisonnement, ne facilitant pas le débardage	jeune futaie dense avec beaucoup de petits bois
1650	1725	2003	1861	712	2242
15.1	13.3	17.3	10.6	20.5	12.9
14.27	13.3	13.4	15.2	16	12.6
5	4	6	-	-	-
706	201	273	440	780	389
780	136	115	450	780	162
126	66	55	53	125	61
39.5	20.2	23.6	20.0	46.7	26.9
75.9 (coupe à blanc** : 379.6)	147.6	293.9	175.4	78.8	142.3
0.298	0.34	0.331	0.269	0.262	0.371
22.6 (coupe à blanc** : 113.1)	60.2	97.3	47.2	22.2	52.8
36.33	38.02	62.27	30.67	48.03	58.53
10.81	19.25	15.43	10.8	11.54	10.99
9.76	26.46	36.63	10.56	11.54	26.4
61.7	52.5	78.5	83.6	80	71.5
négligeables	quelques omières dans les parties humides	aucun	aucun	aucun	aucun
négligeables	négligeables	négligeables	négligeables	beaucoup d'arbres marqués pendant le débardage	beaucoup d'arbres marqués part la tête la tête abatteuse surdimensionnée

## **ANNEXE 8 :**

<b>Chantier 1 : Néant sur Yvel</b>	p. XVI
<b>Chantier 2 : Inguiniel</b>	p. XVII
<b>Chantier 3 : Paimpont</b>	p. XVIII
<b>Chantier 5 : Sérent</b>	p. XIX
<b>Chantier 6 : Ste Brigitte</b>	p. XX
<b>Chantier 7 : Le Bono</b>	p. XXI
<b>Chantier 8 : Carnac</b>	p. XXII
<b>Chantier 9 : Néant sur Yvel</b>	p. XXIII
<b>Chantier 10 : Melrand</b>	p. XXIV
<b>Chantier 11 : Sérent</b>	p. XXV

# Chantier 1 : Néant sur Yvel

## Bilan technique

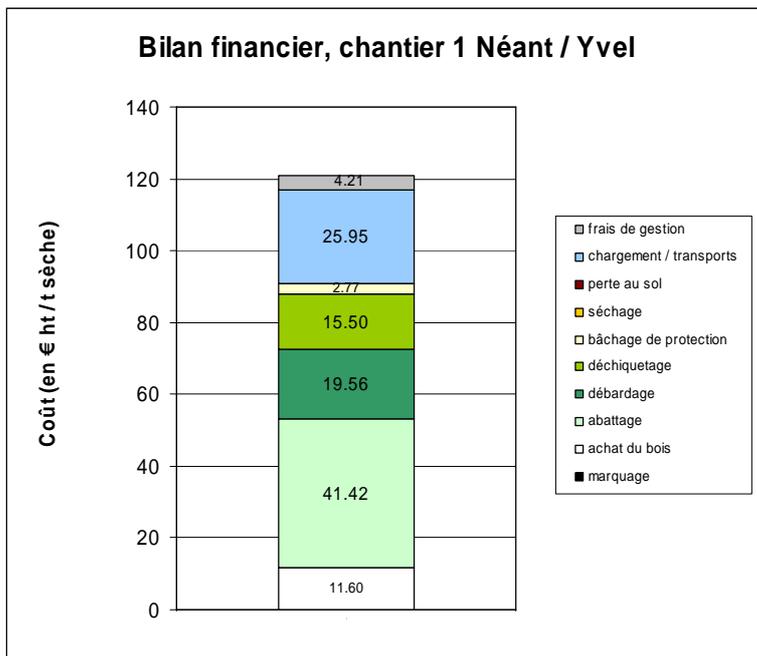
### Quantités récoltées

- 108.6 MAP humide  
→ 33.7 tonnes à 51 % d'humidité  
→ 20.1 tonnes à 25 % d'humidité
- 132.4 MAP humide / ha  
→ 41.2 tonnes humides / ha  
→ 24.5 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.31 tonne
- 1 MAP sec = 0.20 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.86 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchiquetage :

- 18.49 € ht / MAP humide
- 59.44 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 67.46 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 24.67 € ht / MAP sec
- 121.01 € ht / tonne sèche
- 0.034 € ht / kWh

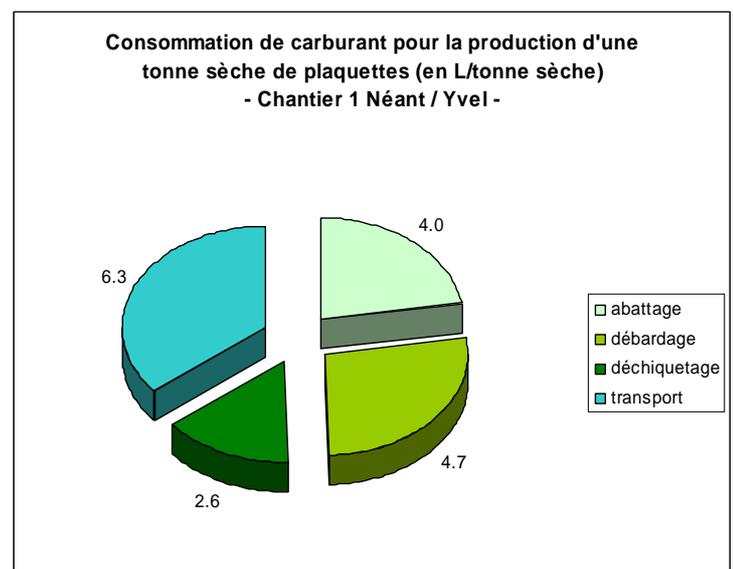


Eclaircie et cloisonnements dans une jeune futaie de pin Laricio

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	12.89
Rendement horaire du débardage (st/h)	17.79
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	83.5

## Bilan énergétique



Consommation totale : 17.6 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
**19.5 équivalent L de fioul**

# Chantier 2 : Inguiniel

## Bilan technique

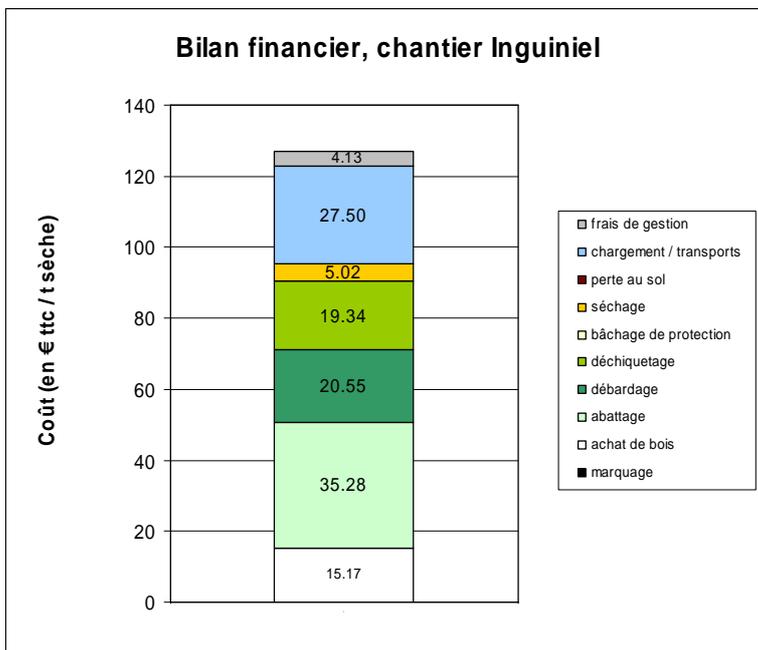
### Quantités récoltées

- 212.4 MAP humide  
→ 48.9 tonnes à 53 % d'humidité  
→ 28.3 tonnes à 25 % d'humidité
- 429.4 MAP humide / ha  
→ 100.5 tonnes humides / ha  
→ 57.2 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.23 tonne
- 1 MAP sec = 0.15 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.81 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchiquetage :

- 13.01 € ht / MAP humide
- 55.60 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 64.80 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 18.62 € ht / MAP sec
- 127 € ht / tonne sèche
- 0.035 € ht / kWh



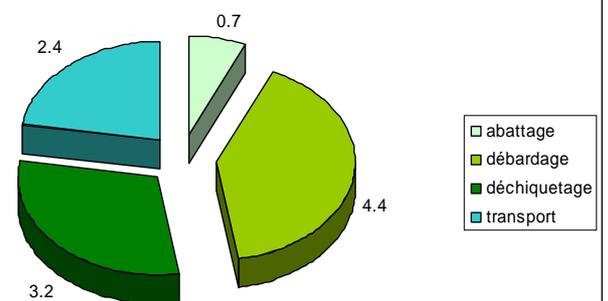
Première éclaircie dans une jeune futaie de *Pterocarya rehderiana*

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	6.16
Rendement horaire du débardage (st/h)	22.15
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	93.1

## Bilan énergétique

Consommation de carburant pour la production d'une tonne sèche de plaquettes (en L/tonne sèche) - Chantier Inguiniel -



Consommation totale : 10.7 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
32.6 équivalent L de fioul

# Chantier 3 : Paimpont

## Bilan technique

### Quantités récoltées

- 246 m<sup>3</sup> de grumes
- 95.7 MAP humide
  - 31.6 tonnes à 54 % d'humidité
  - 17.4 tonnes à 25 % d'humidité
- 129.7 MAP humide / ha
  - 42.7 tonnes humides / ha
  - 23.6 tonnes sèches / ha

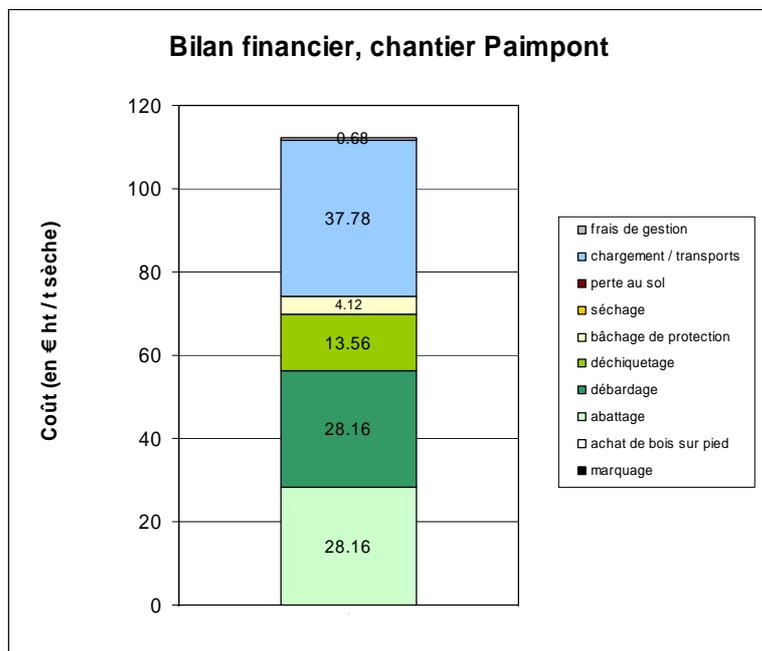


Reprise des rémanents d'une coupe rase de peupliers

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.33 tonne
- 1 MAP sec = 0.20 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.97 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchetage :

- 12.85 € ht / MAP humide
- 39.05 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 46.97 € ht / tonne humide

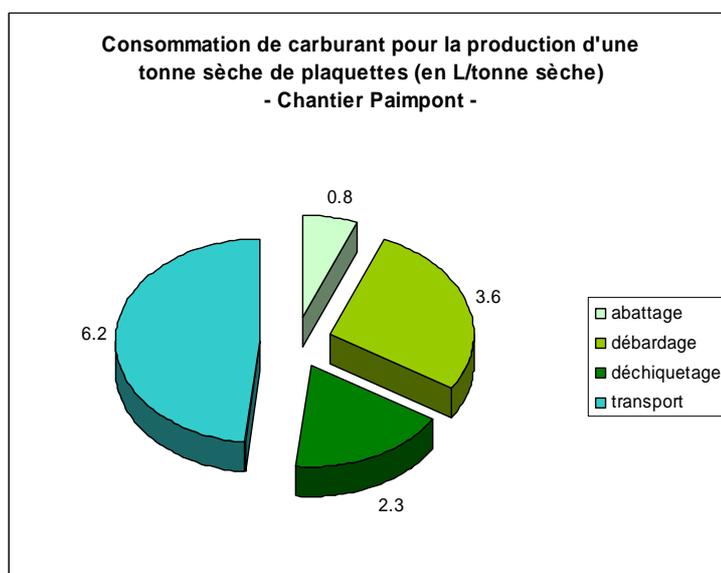
### Après stockage et livraison :

- 22.50 € ht / MAP sec
- 112.46 € ht / tonne sèche
- 0.031 € ht / kWh

### Rendements (pour le déchetage)

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	16.45
Rendement horaire du débardage (st/h)	16.45
Rendement horaire du déchetage (MAP/h)	97.3

## Bilan énergétique



Consommation totale : 12.9 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
26.9 équivalent L de fioul

# Chantier 5 : Sérent

## Bilan technique

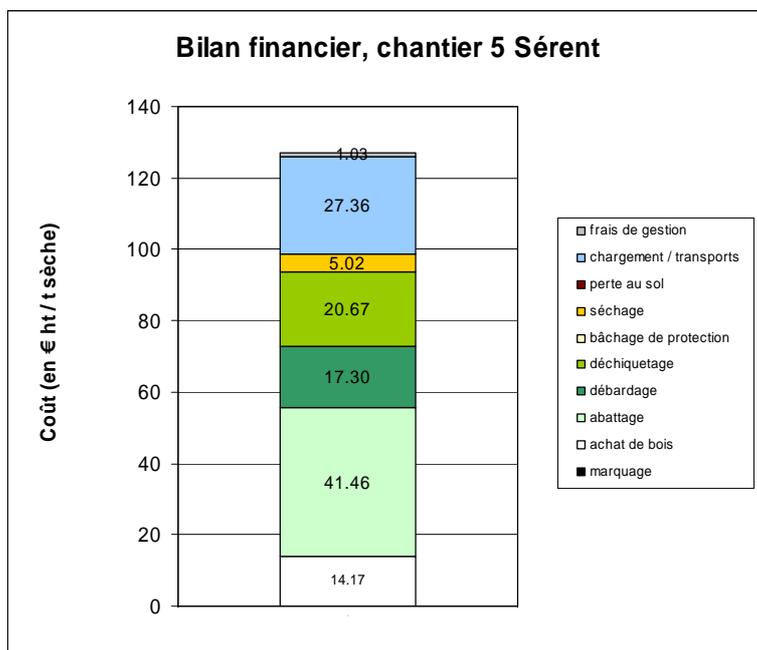
### Quantités récoltées

- 66 MAP humide  
→ 23.1 tonnes à 59 % d'humidité  
→ 11.4 tonnes à 25 % d'humidité
- 84.6 MAP humide / ha  
→ 29.8 tonnes humides / ha  
→ 14.6 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.35 tonne
- 1 MAP sec = 0.19 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.98 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchetage :

- 16.56 € ht / MAP humide
- 47.03 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 60.02 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 24.17 € ht / MAP sec
- 126.99 € ht / tonne sèche
- 0.035 € ht / kWh



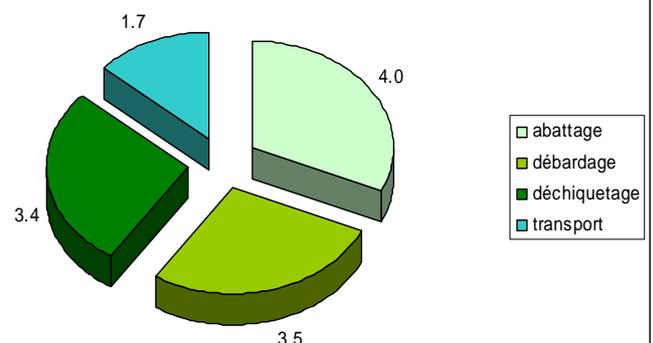
Eclaircie dans une jeune futaie de pin maritime

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	15.72
Rendement horaire du débardage (st/h)	16.45
Rendement horaire du déchetage (MAP/h)	97.3

## Bilan énergétique

Consommation de carburant pour la production d'une tonne sèche de plaquettes (en L/tonne sèche) - Chantier 5 Sérent -



Consommation totale : 12.6 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
27.6 équivalent L de fioul

# Chantier 6 : Ste Brigitte

## Bilan technique

### Quantités récoltées

- 131.6 MAP humide
  - 39.5 tonnes à 36 % d'humidité
  - 30.3 tonnes à 25 % d'humidité
- 75.9 MAP humide / ha
  - 22.6 tonnes humides / ha
  - 17.5 tonnes sèches / ha

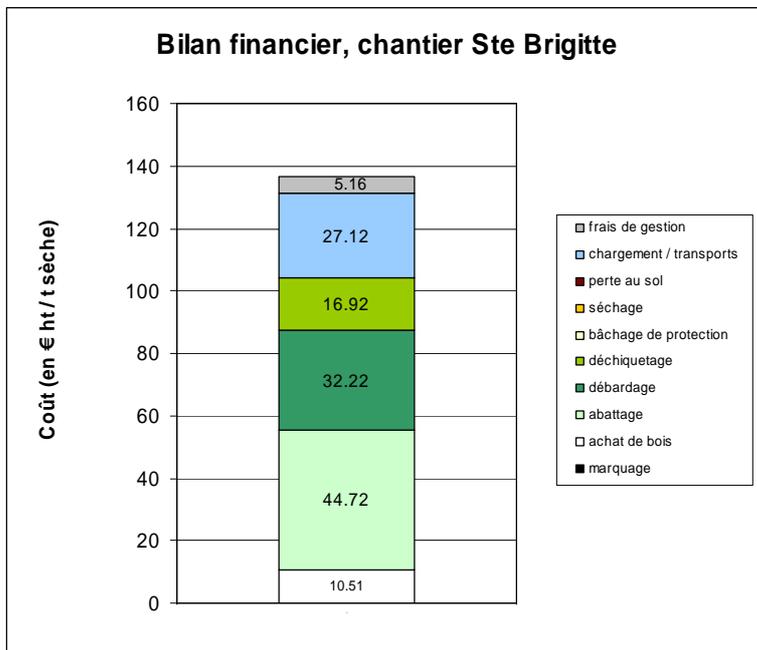
### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.30 tonne
- 1 MAP sec = 0.25 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.97 MAP humide



Ouverture de cloisonnements dans un taillis de feuillus

## Bilan financier



### Après déchiquetage :

- 25.54 € ht / MAP humide
- 85.71 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 98.38 € ht / tonne humide

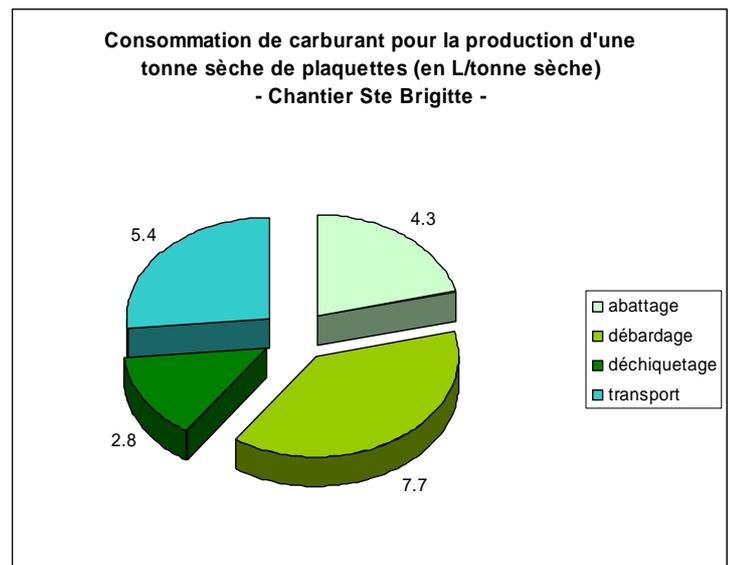
### Après stockage et livraison :

- 34.57 € ht / MAP sec
- 136.64 € ht / tonne sèche
- 0.038 € ht / kWh

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	10.81
Rendement horaire du débardage (st/h)	9.78
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	61.7

## Bilan énergétique



Consommation totale : 20.2 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
16.8 équivalent L de fioul

# Chantier 7 : Le Bono

## Bilan technique

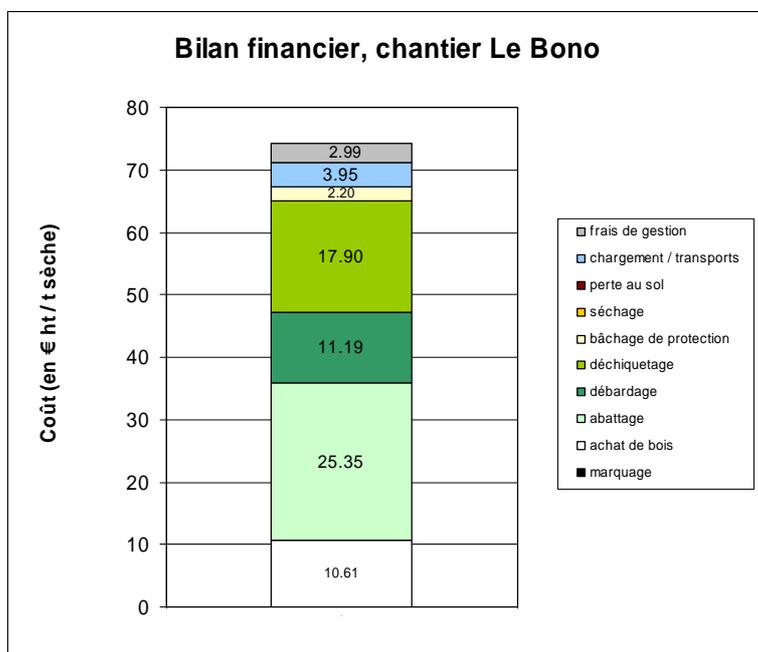
### Quantités récoltées

- 59.5 MAP humide  
→ 20.2 tonnes à 38 % d'humidité  
→ 15.2 tonnes à 25 % d'humidité
- 147.6 MAP humide / ha  
→ 50.2 tonnes humides / ha  
→ 18.9 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.34 tonne
- 1 MAP sec = 0.28 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 1.09 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchetage :

- 17.63 € ht / MAP humide
- 51.86 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 54.83 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 20.84 € ht / MAP sec
- 74.18 € ht / tonne sèche
- 0.021 € ht / kWh

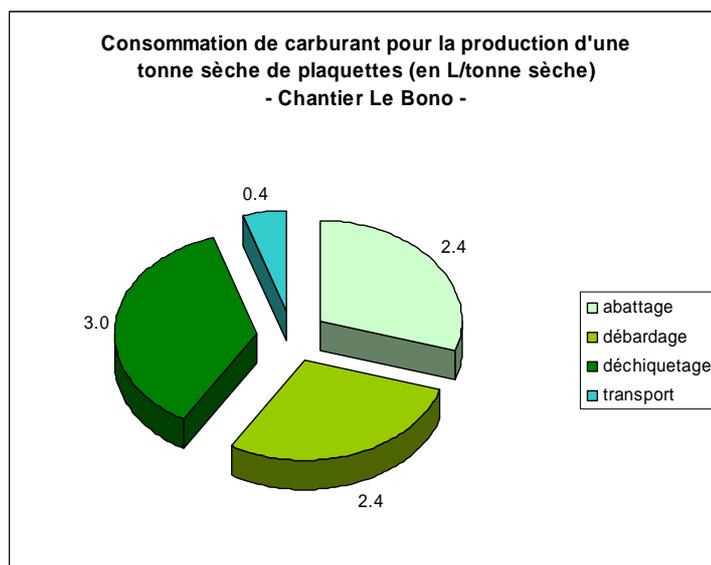


Eclaircie et cloisonnements dans une jeune futaie de chêne rouge

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	19.25
Rendement horaire du débardage (st/h)	26.46
Rendement horaire du déchetage (MAP/h)	52.5

## Bilan énergétique



Consommation totale : 8.2 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
42.8 équivalent L de fioul

# Chantier 8 : Carnac

## Bilan technique

### Quantités récoltées

- 72 MAP humide  
→ 23.8 tonnes à 52 % d'humidité  
→ 13.8 tonnes à 25 % d'humidité
- 293.9 MAP humide / ha  
→ 93.3 tonnes humides / ha  
→ 56.3 tonnes sèches / ha

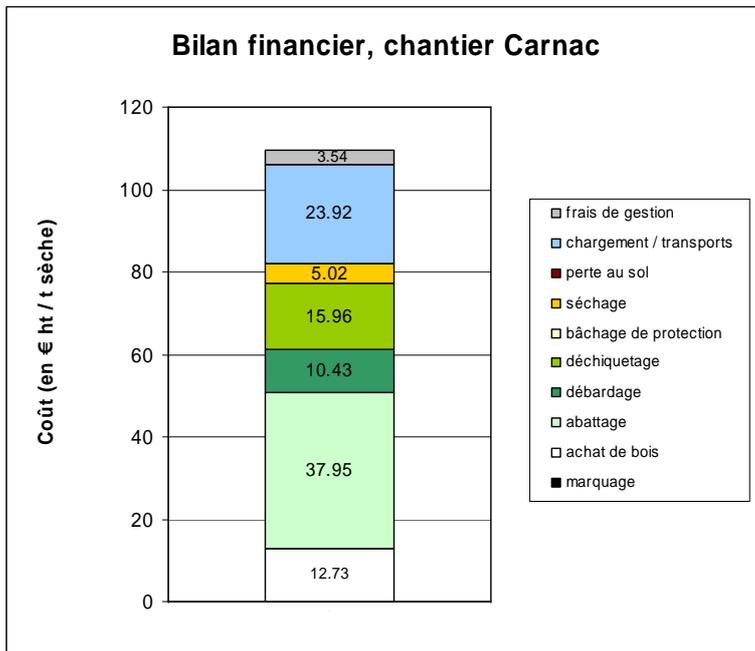


Eclaircie et cloisonnements dans une jeune futaie de pin maritime

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.33 tonne
- 1 MAP sec = 0.21 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.98 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchetage :

- 15.93 € ht / MAP humide
- 48.12 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 56.54 € ht / tonne humide

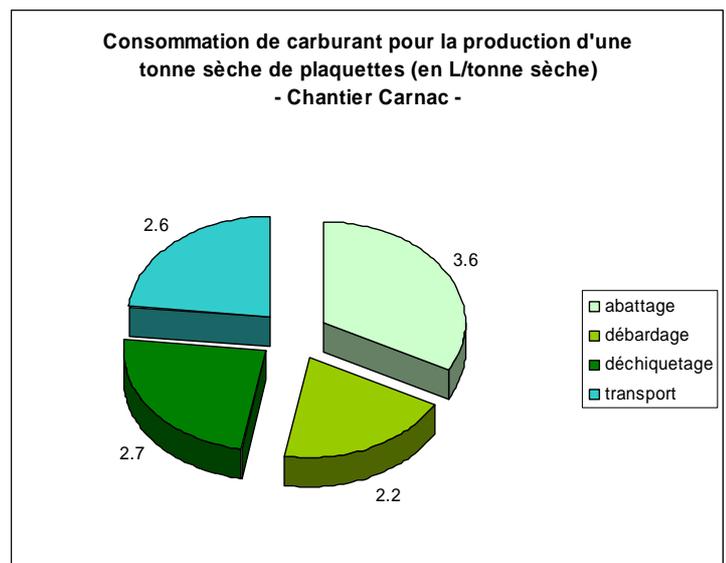
### Après stockage et livraison :

- 23.07 € ht / MAP sec
- 109.53 € ht / tonne sèche
- 0.030 € ht / kWh

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	15.43
Rendement horaire du débardage (st/h)	36.63
Rendement horaire du déchetage (MAP/h)	78.5

## Bilan énergétique



Consommation totale : 11.1 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
**31.4 équivalent L de fioul**

# Chantier 9 : Néant sur Yvel

## Bilan technique

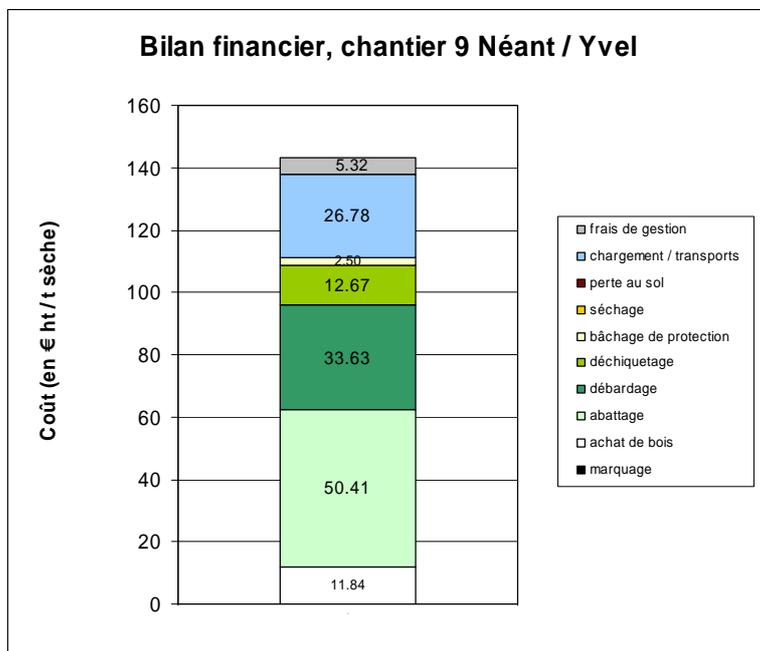
### Quantités récoltées

- 74 MAP humide  
→ 20 tonnes à 31 % d'humidité  
→ 16.7 tonnes à 25 % d'humidité
- 175.4 MAP humide / ha  
→ 47.2 tonnes humides / ha  
→ 39.6 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.27 tonne
- 1 MAP sec = 0.25 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 1.08 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchiquetage :

- 25.97 € ht / MAP humide
- 96.54 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 110.05 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 35.60 € ht / MAP sec
- 143.15 € ht / tonne sèche
- 0.040 € ht / kWh

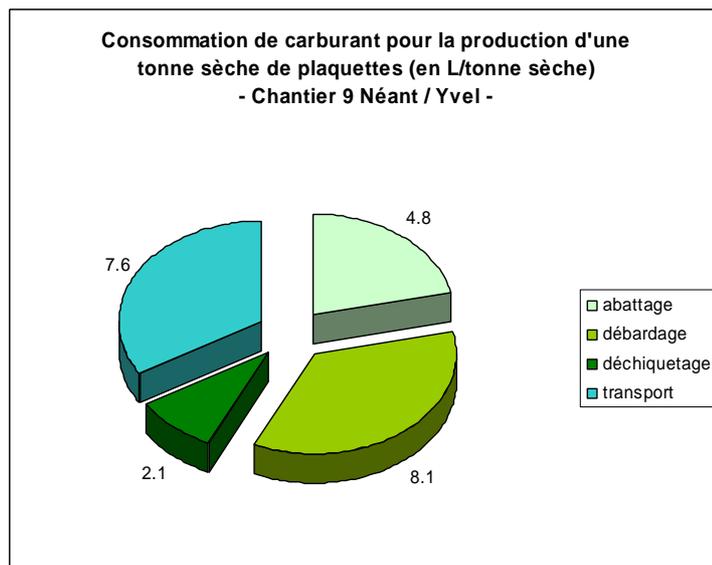


Coupe à blanc d'une futaie âgée de bouleaux avec maintien de sujets épars

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	10.8
Rendement horaire du débardage (st/h)	10.56
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	83.8

## Bilan énergétique



Consommation totale : 22.6 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
14.9 équivalent L de fioul

# Chantier 10 : Melrand

## Bilan technique

### Quantités récoltées

- 166.7 MAP humide  
→ 46.7 tonnes à 48 % d'humidité  
→ 29.6 tonnes à 25 % d'humidité
- 78.8 MAP humide / ha  
→ 22.2 tonnes humides / ha  
→ 14 tonnes sèches / ha

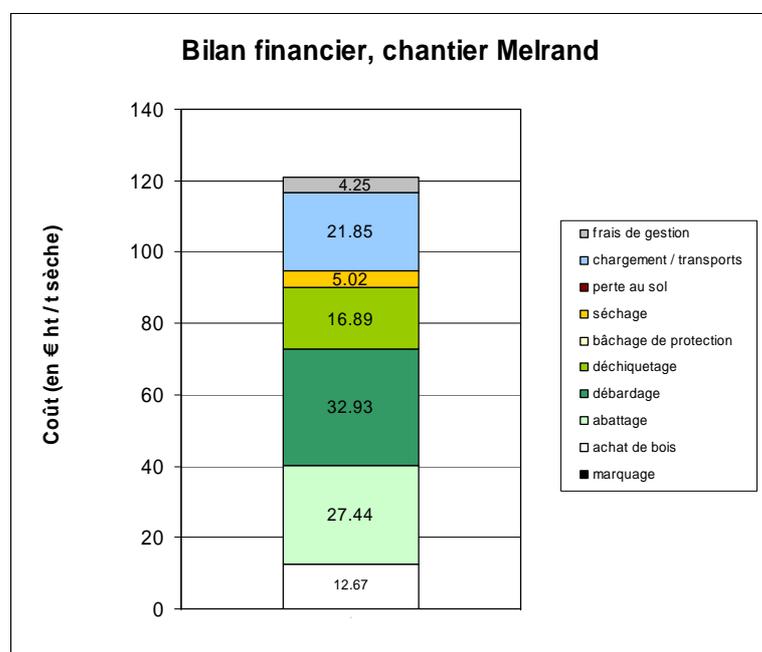
### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.28 tonne
- 1 MAP sec = 0.20 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.90 MAP humide



Récupération de produits d'une première éclaircie sélective d'une jeune futaie de mélèzes

## Bilan financier



### Après déchetage :

- 17.17 € ht / MAP humide
- 60.90 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 68.61 € ht / tonne humide

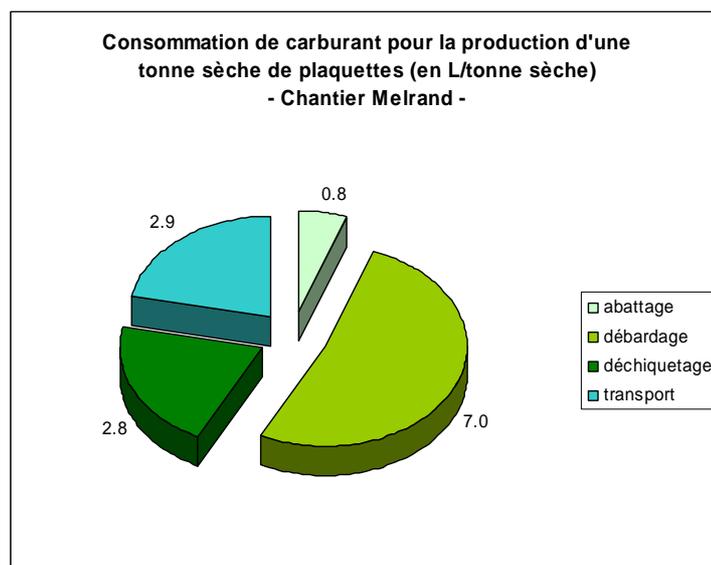
### Après stockage et livraison :

- 23.65 € ht / MAP sec
- 121.04 € ht / tonne sèche
- 0.034 € ht / kWh

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	11.54
Rendement horaire du débardage (st/h)	11.54
Rendement horaire du déchetage (MAP/h)	80

## Bilan énergétique



Consommation totale : 13.5 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
**25.7 équivalent L de fioul**

# Chantier 11 : Sérent

## Bilan technique

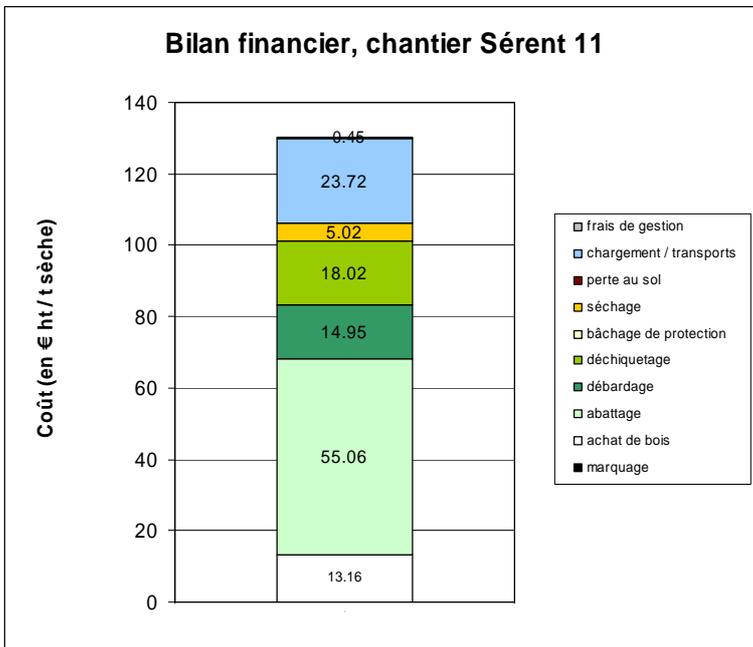
### Quantités récoltées

- 72.7 MAP humide  
→ 26.9 tonnes à 58 % d'humidité  
→ 13.5 tonnes à 25 % d'humidité
- 142.3 MAP humide / ha  
→ 52.8 tonnes humides / ha  
→ 26.5 tonnes sèches / ha

### Equivalences

- 1 MAP humide = 0.37 tonne
- 1 MAP sec = 0.20 tonne
- 1 st (billons de 4 m) = 0.98 MAP humide

## Bilan financier



### Après déchiquetage :

- 19.02 € ht / MAP humide
- 51.26 € ht / tonne humide

### Après premier transport :

- 62.41 € ht / tonne humide

### Après stockage et livraison :

- 26.71 € ht / MAP sec
- 130.38 € ht / tonne sèche
- 0.036 € ht / kWh

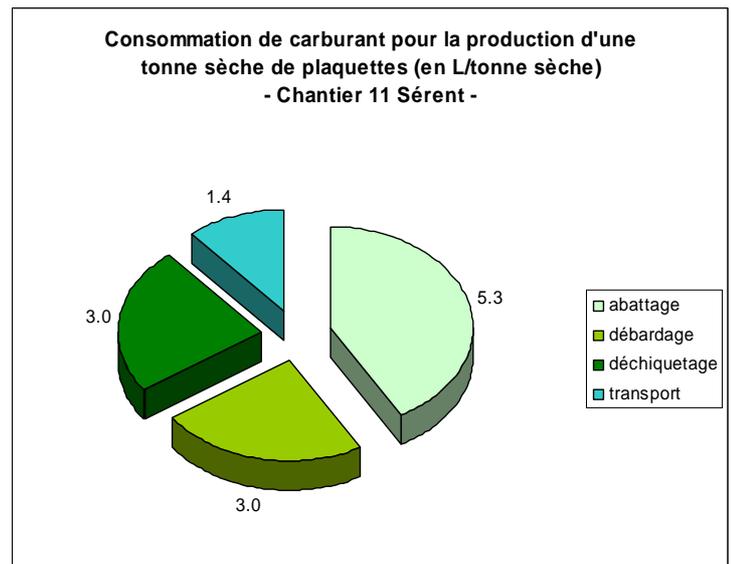


Eclaircie et cloisonnements dans une jeune futaie de pin maritime

## Rendements

Rendement horaire de l'abattage (st/h)	10.99
Rendement horaire du débardage (st/h)	26.4
Rendement horaire du déchiquetage (MAP/h)	71.5

## Bilan énergétique



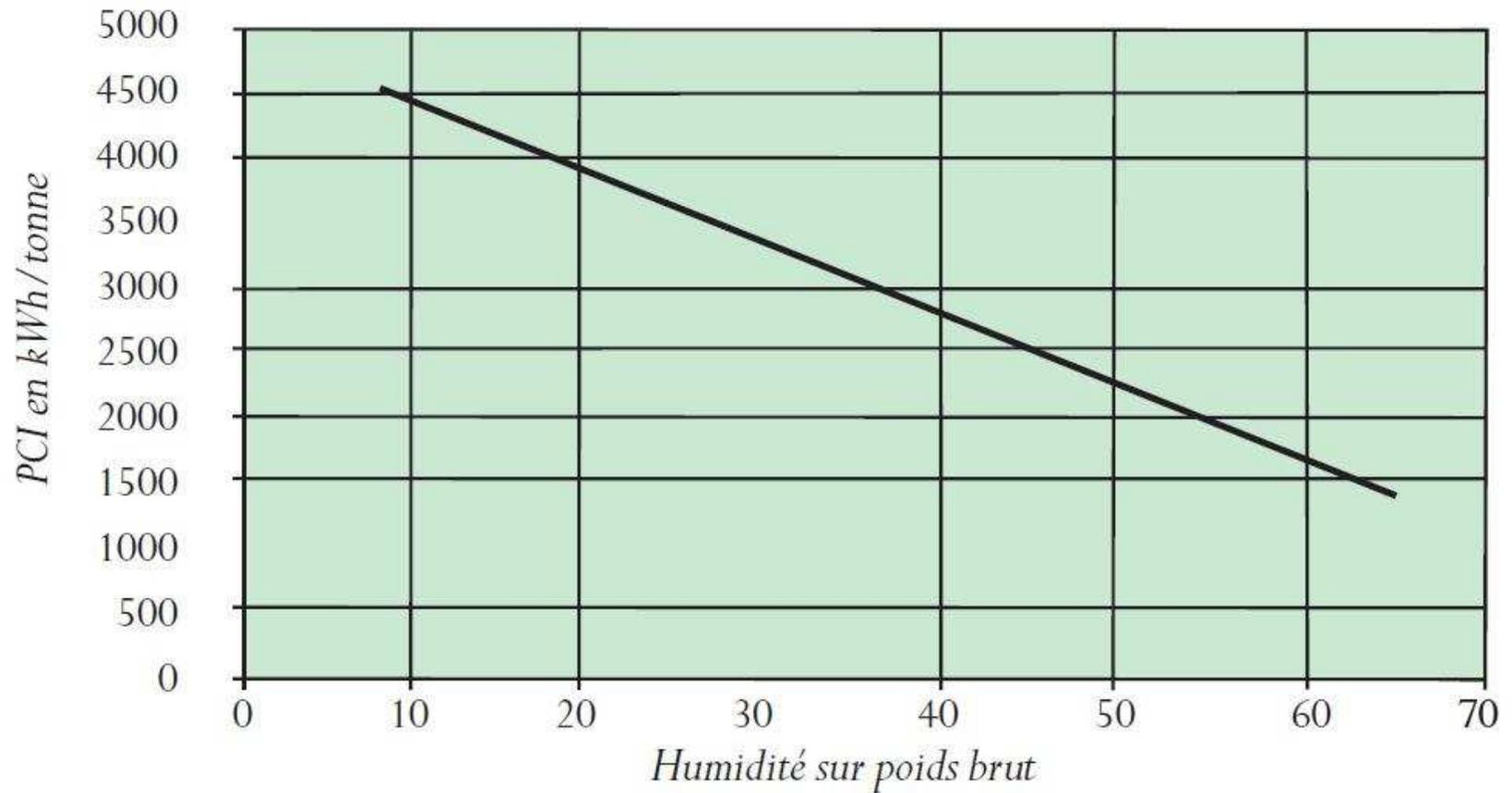
Consommation totale : 12.7 L de fioul / tonne sèche

### Bilan du chantier

1 L de fioul consommé génère :  
27.3 équivalent L de fioul

## ANNEXE 9

Tableau 9 : Humidité du bois en fonction du PCI (CTBA)



(Source : BADJIL. & al., 2007)

## ANNEXE 10

### Organismes intervenant dans le domaine de la forêt

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

**AILE** : l'Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'Environnement

**AFOCEL** : organisme de recherche chargé d'améliorer la compétitivité des approvisionnements de l'industrie et de la filière forêt-bois-papier. Aujourd'hui l'AFOCEL a fusionné avec le CTBA pour former le FCBA.

**CETEF** : Centre d'Etudes Techniques Forestières

**COFALP** : Coopérative Forestière des Alpes

**CRPF** : Centre Régional de la Propriété Forestière

**CTBA** : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

**DRAF** : Direction Régionale de l'Agriculture et des Forêts

**F&BE** : coopérative forestière Forêts & Bois de l'Est

**FCBA** : Forêt, Cellulose, Bois, Ameublement

**ONF** : Office National des Forêts

**URACOFRA** : Union Régionale des Associations des Communes Forestières de Rhône Alpes

### Sigles et unités technique forestier / bois énergie

**a** : are, correspond à 1 000 m<sup>2</sup>

**CBPS** : Code des Bonnes Pratiques Sylvicoles

**DIB** : Déchets industriels banals bois

**ha** : hectare, correspond à 10 000 m<sup>2</sup>

**MAP** : mètre cube apparent plaquette

**PSG** : Plan Simple de Gestion

**RTG** : Règlement Type de Gestion

**st** : stère

**tep** : tonne équivalent pétrole

### Lexique forestier

**Abattage** : Opération consistant à faire tomber un arbre sur pied.

**Coefficient de forme** : Cette valeur est le rapport du diamètre du haut du fût divisé par celui du bas du fût et varie donc en fonction de la forme de l'arbre. Plus l'arbre sera cylindrique et plus le coefficient de forme sera proche de 1.

**Débardage** : Opération consistant à transporter les bois jusqu'au lieu de stockage.

**Déchiquetage** : Opération consistant à déchiqeter du bois pour produire des plaquettes utilisées en énergie combustible ou en paillage.

**Dépressage** : Action sylvicole durant laquelle on sélectionne les jeunes arbres et élimine ceux que l'on ne conservera pas.

**Éclaircie** : Action sylvicole destinée à abaisser la densité d'un peuplement non arrivé à maturité et ainsi améliorer la croissance des arbres restants.

**Façonnage** : Ensemble des opérations permettant de transformer un arbre abattu en une pièce prête à être mise en œuvre, à savoir, ébranchage, choix des découpes et tronçonnage.

**Futaie** : Peuplement forestier constitué de tiges provenant de semis.

**Rancher** : Montants en fer du porteur.

**Stère** : Quantité de bois correspondant à 1 m<sup>3</sup> de bois empilés, billonnés en 1 m.

**Surface terrière** : Pour un arbre, c'est la surface de la section transversale de son tronc à 1,30 mètre de hauteur. Pour un peuplement : c'est la somme des surfaces terrières de tous les arbres qui le composent.

**Taillis** : Peuplement issu de la multiplication végétative par rejets de souche et drageons.

**Taillis sous futaie** : Peuplement juxtaposant deux régimes : le taillis et la futaie. Il est caractérisé par deux niveaux : un étage inférieur et un étage supérieur.

**Volume bois fort** : Volume tige jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre.

**Volume unitaire** : Volume d'un arbre moyen dans un peuplement.

## RESUME

Suite aux hausses répétées du prix des énergies fossiles et au développement des énergies renouvelable, le bois énergie semble être une alternative à développer. En Bretagne, le bois issu des forêts couvre actuellement 4 % de la consommation en bois énergie. Face aux autres sources de bois, le milieu forestier représente le gisement le plus important. La production de plaquettes forestières permettra de répondre aux demandes croissantes des chaufferies collectives et industrielles. Aujourd'hui, il existe peu de données régionales sur la mobilisation de ces plaquettes.

Suite à l'engouement des propriétaires forestiers sur ce sujet, le CETEF du Morbihan, le CRPF de Bretagne et l'association AILE ont décidé de mener conjointement une étude de faisabilité sur la mobilisation de ces bois. Onze chantiers pilotes ont été menés sur différents types d'interventions sylvicoles et sur des peuplements caractéristiques de la forêt bretonne. Ces chantiers ont permis de réaliser une étude technico-économique et un bilan énergétique. Des propositions sont proposées pour améliorer les chantiers bois énergie en Bretagne.

**Mots clefs :** Bretagne, bois énergie, plaquettes forestières, chantiers pilotes, étude technico-économique, bilan énergétique

## ABSTRACT

With the rise of the price of the fossil energy and the development of sustainable energy, the wood appears to be a good alternative and should be developed. In Britani the forest's wood covers currently 4% of the consumption of wood energy. In comparison with the other source of energy, the wood deposit is the most important. The production of woodchips would provide wood to the collective and industrial boilers; this demand is growing more and more. Nowadays, these are few regional data about the woodchip production.

After the infatuation of forestry owner about this subject the CETEF of Morbihan, the CRPF of Britani and the AILE association decided to run a survey of feasibility on the woodchip mobilisation. Eleven pilot working have been lead on different type of silvicultural intervention and on different characteristic of Britani forest. These working permitted the realisation of a technical economic study and energetic balance. Some propositions have been proposed to improve the energy wood working in Britani.

**Keywords :** Britani, energy wood, woodchips, pilot working, technical economic study, energetic balance