



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'ÉTUDE  
DES PROBLÈMES DE L'ÉNERGIE

# **Contenu énergétique des plaquettes de bois-énergie produites à Jussy (GE)**

## **RAPPORT FINAL**

Mandat réalisé pour le Domaine Nature et Paysage de l'Etat de Genève

Carouge, 8 mars 2007

J. Beck  
B. Lachal  
E. Pampaloni

**Site Battelle, bâtiment A**  
7 route de Drize - CH-1227 Carouge  
Tél. 022 379 06 61 - Fax 022 379 06 39  
[www.unige.ch/cuepe](http://www.unige.ch/cuepe)

# Table des matières

	<b>Page</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>4</b>
Contexte	4
Objectifs	4
<b>1. Introduction:</b>	<b>5</b>
1.1. Quelques définitions théoriques	5
1.2. Plaquettes	6
a) Description générale	
b) Caractéristiques des plaquettes forestières genevoises	
1.3. Contenu énergétique et facteurs de variabilité : schéma général	7
1.4. Etat des lieux de la filière bois-énergie sur le canton de Genève	8
<b>2. Échantillonnage</b>	<b>10</b>
2.1. Plan d'échantillonnage général	10
2.2. Phases d'échantillonnage	11
2.3. Nomenclature des échantillons	14
<b>3. Humidité</b>	<b>15</b>
3.1. Connaissances actuelles	15
3.2. Matériel et méthode	16
3.3. Résultats	16
3.4. Discussion	19
3.5. Conclusion	21
<b>4. Densité apparente</b>	<b>22</b>
4.1. Connaissances actuelles	22
4.2. Matériel et méthode	22
4.3. Résultats	23
4.4. Discussion	28
4.5. Conclusion	29
<b>5. Pouvoir calorifique</b>	<b>30</b>
5.1. Connaissances actuelles	30
5.2. Matériel et méthode	31
5.3. Résultats	31
5.4. Discussion	33
5.5. Conclusion	34
<b>6. Contenu énergétique</b>	<b>35</b>
6.1. Connaissances actuelles	35
6.2. Résultats	35
6.3. Discussion	36
6.4. Conclusion	36
<b>7. Conclusion générale</b>	<b>37</b>

## **8. Bibliographie**

**38**

## **9. Annexes**

**39-43**

1. Humidité brute et humidité anhydre des plaquettes de Jussy (GE)
2. Densité apparente brute et densité apparente anhydre des plaquettes de Jussy (GE)
3. Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur sur masse anhydres, et pouvoir calorifique inférieur brut sur masse humide des plaquettes de Jussy (GE).
4. Spécifications techniques de la déchiqueteuse

# **Avant-propos**

## **Contexte de l'étude**

Suite à l'exploitation des forêts propriétés de l'Etat, le Département du Territoire, Domaine Nature et Paysage du canton de Genève (DT-DNP) gère la production et la vente d'environ 10'000 m<sup>3</sup> de plaquettes de bois-énergie par année.

Jusqu'à présent, le bois vendu était facturé en fonction de son volume. Au vu de l'évolution des marchés, la facturation des plaquettes tend à se faire en fonction de l'énergie effectivement contenue dans le bois, mesurée par le compteur de chaleur de la chaudière (corrigée par le rendement annuel de la chaudière afin d'obtenir l'énergie livrée sous forme de bois).

Dans l'objectif de passer à ce nouveau mode de décompte, le DT-DNP mène actuellement un suivi afin de vérifier les hypothèses prises concernant le contenu énergétique des plaquettes livrées et le rendement des chaudières. Une différence apparaît alors entre quantité théorique de chaleur vendue (calculée sur la base de paramètres normés) et quantité de chaleur réellement obtenue après combustion des plaquettes. Ceci laisse donc penser que soit les plaquettes ont un contenu énergétique plus bas que prévu, soit que les rendements des installations sont inférieurs aux normes. Ces variations ayant une incidence directe sur le prix du combustible, il est approprié de les définir et d'en préciser les causes, et d'établir ainsi la valeur réelle des plaquettes de bois.

## **Objectifs**

Ce travail permettra, dans un premier temps, de définir le contenu énergétique des plaquettes issues de la forêt genevoise vendues par le DT-DNP. La variabilité de ce contenu énergétique sera également étudiée, ainsi que ses causes. Pour ce faire, des mesures seront effectuées sur des échantillons de plaquettes (séchage, calorimétrie, mesures de densités apparentes). Les résultats seront ensuite comparés à la littérature.

Grâce à ces informations, il sera alors possible d'évaluer la valeur des plaquettes genevoises par unité de volume.

# 1. Introduction

## 1.1. Quelques définitions théoriques

**Plaquettes forestières** : petits morceaux de bois de forme parallélépipède, produits par déchiquetage d'essences issus de l'entretien des forêts. Leur dimension standard en [mm] est de 40 x 20 x 10 environ.

**Humidité brute ( $w_{(h)}$ ), [%]** = humidité sur masse humide, [%]: quantité d'eau contenue dans le bois par rapport à sa masse totale ( $w_h = m_{\text{eau}} / (m_{\text{eau}} + m_{\text{bois anhydre}})$ ).

**Humidité sur masse anhydre ( $w_{(a)}$ ), [%]**: quantité d'eau contenue dans le bois par rapport à sa masse sèche ( $w_a = m_{\text{eau}} / m_{\text{bois anhydre}}$ ).

**Anhydre** : déshydraté en étuve à 105°C jusqu'à obtention d'une masse constante.

**Pouvoir Calorifique Supérieur sur matière anhydre ( $PCS_{(a)}$ ), [MJ/kg<sub>(a)</sub>] ou [kWh/kg<sub>(a)</sub>]**: quantité totale de chaleur dégagée à volume constant par la combustion d'une certaine masse de combustible anhydre.

**Pouvoir Calorifique Inférieur sur matière anhydre ( $PCI_{(a)}$ ), [MJ/kg<sub>(a)</sub>] ou [kWh/kg<sub>(a)</sub>]**: quantité réelle de chaleur pouvant être produite par un combustible anhydre dans un processus de combustion où la chaleur de vaporisation de l'eau n'est pas récupérable, (valable pour la plupart des systèmes de combustion classiques). Il se calcule sur la base du  $PCS_{(a)}$ .

**Pouvoir Calorifique Inférieur sur matière humide ( $PCI_{(h)}$ ), [MJ/kg<sub>(h)</sub>] ou [kWh/kg<sub>(h)</sub>]**: quantité réelle de chaleur pouvant être produite par un combustible brut (dont la teneur en eau  $\neq 0$ ) dans un processus de combustion où la chaleur de vaporisation de l'eau n'est pas récupérable (valable pour la plupart des systèmes de combustion classiques). Il se calcule sur la base du  $PCS_{(a)}$ .

**Masse volumique anhydre du bois ( $d_{\text{espèce}}$ ), [kg/m<sup>3</sup>]**: masse de bois anhydre d'une espèce donnée contenue dans une unité de volume.

**Densité apparent anhydre des plaquettes ( $D_{(pl) \text{ anhydre}}$ ), [kg/m<sup>3</sup><sub>(a)</sub>]**: masse de plaquettes à l'état anhydre par unité de volume, dont l'humidité brute = 0.

**Densité apparente brute des plaquettes ( $D_{(pl) \text{ brute}}$ ), [kg/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>]**: masse de plaquettes à l'état brut par unité de volume, dont l'humidité brute  $\neq 0$ .

**Granulométrie**: étude de la répartition statistique de la taille des plaquettes individuelles.

**Contenu énergétique des plaquettes anhydres, [MJ/m<sup>3</sup><sub>(a)</sub>] ou [kWh/m<sup>3</sup><sub>(a)</sub>]**: quantité d'énergie contenue dans une unité de volume de plaquettes anhydres de toutes espèces.

**Contenu énergétique des plaquettes brutes, [MJ/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>] ou [kWh/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>]**: quantité d'énergie contenue dans une unité de volume de plaquettes brutes (humide) de toutes espèces.

**Remarque** : le contenu énergétique sera toujours donné en m<sup>3</sup> de plaquettes. Lorsqu'il s'agira de m<sup>3</sup> de bois, cela sera spécifié.

## 1.2. Plaquettes

### a) Description générale

Ce sont des petits morceaux de bois de forme parallélépipède, produits par déchiquetage à l'aide d'une machine munie de couteaux, par opposition au broyat, qui ne sera pas traité ici.

Les plaquettes se caractérisent par: 1. la présence ou non d'écorce, de feuilles ou d'aiguilles, 2. leur essence, 3. leur humidité, 4. leur granulométrie.

#### 1. La présence ou non d'écorce, de feuilles ou d'aiguilles:

Selon ce critère, il existe trois types de plaquettes, présentés dans le tableau 1.

**Tableau 1:** Différents types de plaquettes en fonction des parties de l'arbre utilisée dans leur fabrication (ADEME, 1998).

Types	Partie de l'arbre utilisée
Plaquettes vertes	Arbre frais entier: écorce, branches, feuilles/aiguilles
Plaquettes grises	Arbre ébranché mais non écorcé
Plaquettes blanches	Arbre ébranché et écorcé

#### 2. Leur essence:

Chaque espèce possède sa composition chimique propre. Celle-ci influence le pouvoir calorifique du bois, sa granulométrie après déchiquetage, ainsi que sa teneur en eau (ADEME, 1998).

#### 3. Leur humidité:

L'humidité est définie dans le chapitre 1.1. (p. 2). Influençant de manière significative le contenu énergétique des plaquettes, l'humidité sera discutée de manière plus approfondie par la suite (voir chapitre 3).

#### 4. Leur granulométrie:

Les plaquettes sont relativement hétérogènes du point de vue granulométrique. En effet, seule leur longueur peut être stable suite au réglage de la déchiqueteuse (voir tableau 2), bien que l'humidité et la nature du bois jouent également un rôle important dans la taille des plaquettes. Leur largeur et leur épaisseur dépendent des aléas de la fragmentation (ADEME, 1998).

**Tableau 2:** Types de plaquettes en fonction de la granulométrie G, avec spécification de fractionnement en % de poids humide (Energie-bois suisse, 2003).

	Longueur max. [mm]	Part maximale de plaquettes fines	Part principale	Part maximale de surlongueur
<b>G 30</b>	90	< 2.8 mm : inf. à 5 %	5.6 à 31.5 mm : sup. à 80 %	45 à 90 mm : sup. à 1 %
<b>G 45</b>	125	< 2.8 mm : inf. à 5 %	8.0 à 45.0 mm : sup. à 80 %	63 à 125 mm : sup. à 1 %
<b>G 90</b>	250	< 2.8 mm : inf. à 5 %	11.2 à 90.0 mm : sup. à 80 %	125 à 250 mm : sup. à 1 %

## **b) Caractéristiques des plaquettes forestières genevoises**

Les plaquettes genevoises sont des "plaquettes grises", puisqu'elles sont fabriquées à partir de troncs non écorcés. Sur le site de Versoix, elles sont fabriquées majoritairement à partir de bois dur (80-85% de chêne, de frêne et de charme), avec un complément de bois tendre (15-20% d'épicéa, de pin et de tremble) (*Yaggi M., communication personnelle*). Sur le site de Jussy, elles sont issues de 90-95% de chêne et de 5-10% d'acacia. Ce sont les plaquettes provenant de ce dernier site qui seront étudiées ici.

Comme les troncs dont elles sont issues sont stockés une année environ en forêt, ceux-ci ont eu le temps de sécher partiellement. Par la suite, les plaquettes sont stockées brièvement sous toit (entre 0 et 2 mois). Elles appartiendraient donc à la classe des "plaquettes forestières à l'état naturel" ou à celle des " plaquettes forestières à l'état naturel stockées sous toit" dont les humidités brutes théoriques sont estimées à 30 à 60% et à 20 à 30% respectivement (*Nussbaumer T., 2000*), voir chapitre 3.1. Ce dernier paramètre sera vérifié dans ce travail.

La granulométrie des plaquettes genevoises est de type G 45, obtenue après déchiquetage par le camion déchiqueteur de la coopérative SODEFOR II (spécificités techniques, annexe 4).

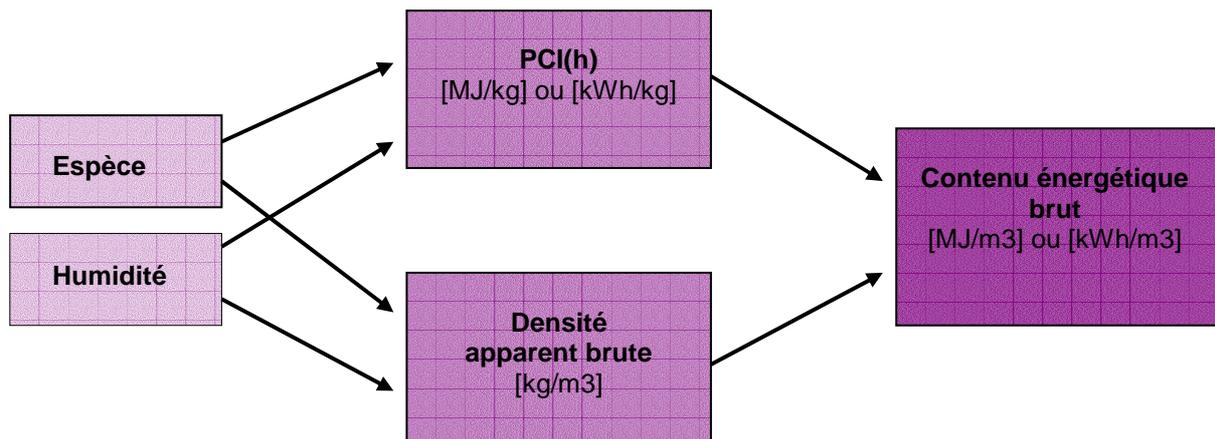
### **1.3. Contenu énergétique et facteurs de variabilité : schéma général**

L'humidité et la granulométrie (définis au chapitre 1.1.) sont les facteurs les plus importants dans le cadre du bois énergie; ce sont eux qui induisent la plus grande part de variabilité du contenu énergétique d'un volume donné de plaquettes (*ADEME, 1998*).

Dans le cas étudié, les troncs sont systématiquement déchiquetés par le camion de SODEFOR II mentionné ci-dessus. La taille des plaquettes est donc constante, comprise entre 8.0 et 45.0 mm pour le 80% d'entre elles (voir tableau 2). La granulométrie est alors fixe. La variabilité du contenu énergétique due à la granulométrie ne sera donc pas étudiée ici.

Dans le cadre de ce rapport, le contenu énergétique par m<sup>3</sup> de plaquettes brutes sera défini. Cette quantité s'exprime en MJ/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub> ou kWh/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>. Il sera donc nécessaire de connaître le pouvoir calorifique inférieur sur masse humide du bois [MJ/kg<sub>(h)</sub>], et la densité apparente brute des plaquettes [kg/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>]. Ces deux grandeurs sont elles-mêmes influencées par d'autres facteurs.

Le pouvoir calorifique du bois varie selon les essences considérées (dépendant du choix de coupe) et selon la teneur en eau des plaquettes (dépendant du temps d'entreposage du bois/des plaquettes, du climat). La densité apparente des plaquettes, elle, varie selon la compacité des plaquettes par espèces, de la densité du bois d'origine et de la granulométrie (ces trois facteurs dépendent également des essences considérées et de la teneur en eau). Du fait de l'abondance des facteurs de variabilité, et de l'impossibilité de modifier certains de ceux-ci (essences utilisées, granulométrie), seuls les grandeurs entrant directement dans le calcul du contenu énergétique et les facteurs ayant un impact important sur l'une de ces grandeurs seront étudiés. Il s'agit donc du pouvoir calorifique, de la densité apparente, et de l'humidité des plaquettes.

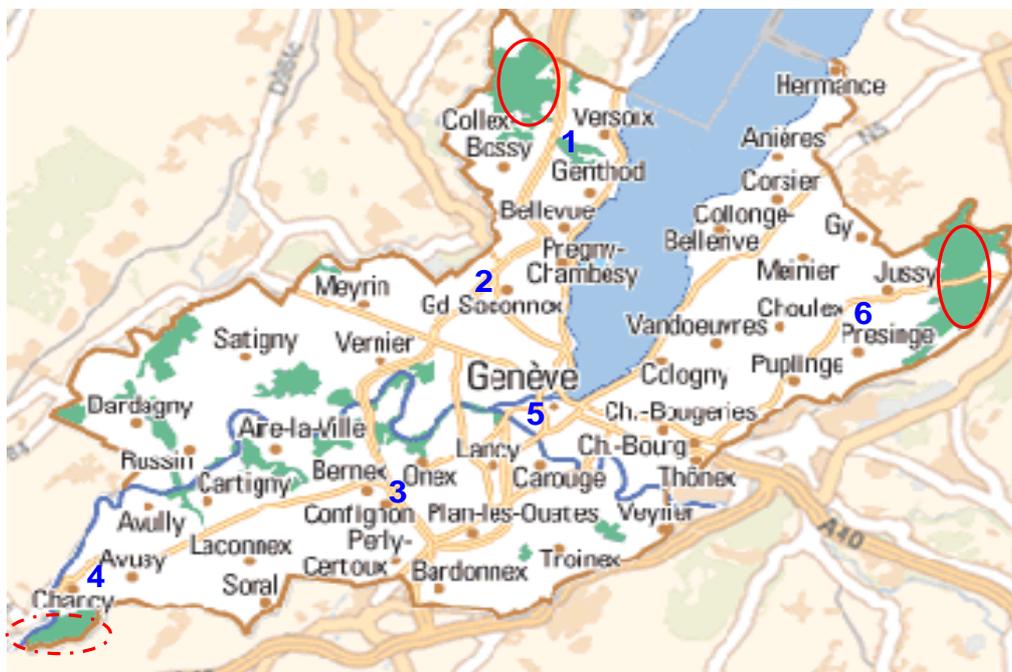


**Figure 1** : Schéma des facteurs principaux influençant le contenu énergétique des plaquettes.

#### 1.4. Etat des lieux de la filière bois-énergie sur le canton de Genève

Le Département du Territoire, Domaine Nature et Paysage (DT-DNP) de l'Etat de Genève gère environ la moitié des forêts recouvrant le territoire genevois, soit 1412 ha. Cette exploitation permet la fabrication de 10'000 m<sup>3</sup> de plaquettes par année ; le bois-énergie les constituant provient principalement des forêts de Jussy, Versoix et Chancy, à dominante feuillue (feuillus: 89%, résineux : 11%). L'autre moitié des forêts genevoises appartient à des privés, et le bois y est encore très peu exploité.

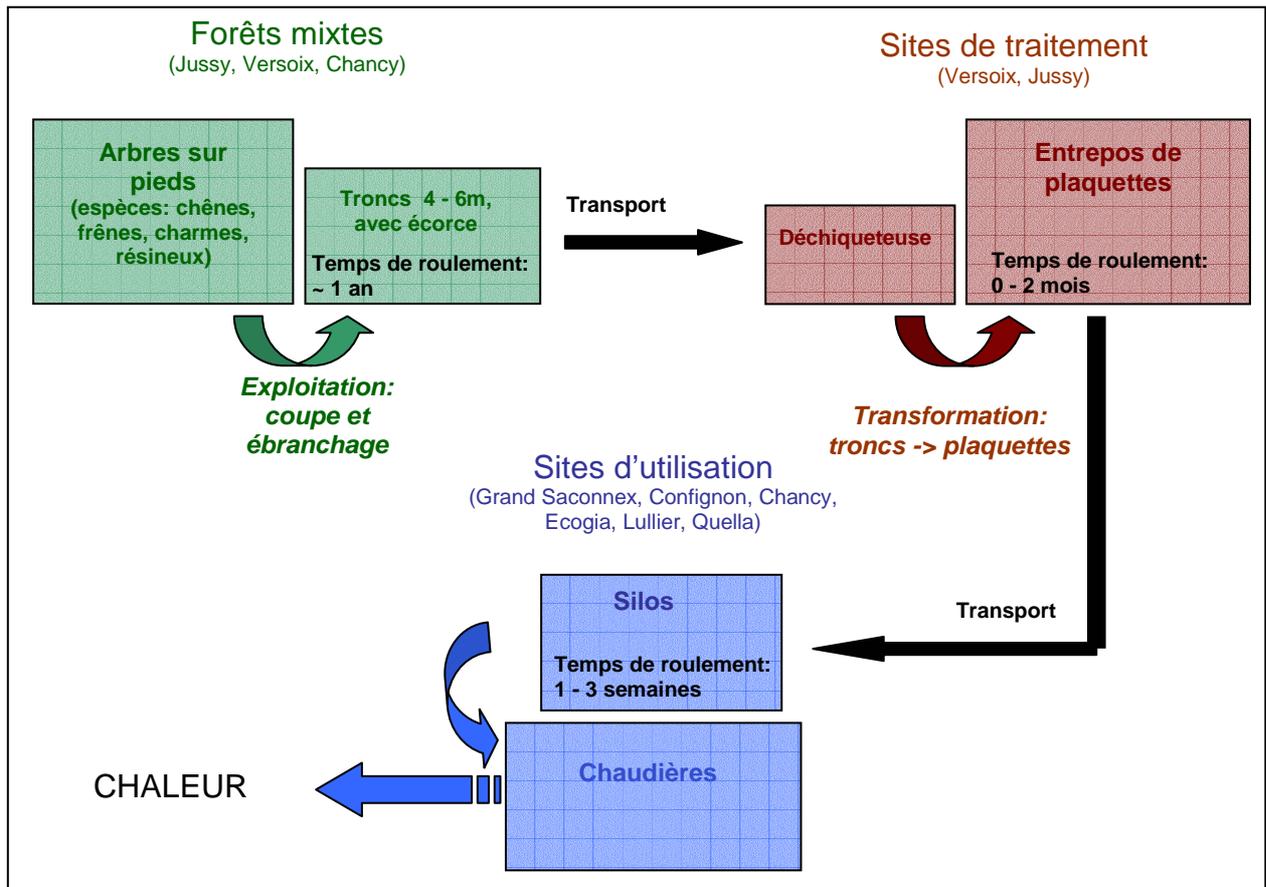
La répartition géographique des forêts exploitées par le DT-DNP, des sites de production ainsi que des lieux où les plaquettes sont livrées sont illustrées par la figure 2.



**Figure 2**: Carte du canton de Genève. Les trois forêts principales exploitées (Versoix, Jussy, Chancy) sont entourées. Les traits pleins signifient que le bois y est transformé. Les numéros indiquent les sites où les plaquettes sont acheminées (1: Ecogia, 2: Grand-Saconnex, 3: Confignon, 4: Chancy, 5: Collège de Cayla, 6: Ecole d'Ingénieurs de Lullier).

Les arbres abattus destinés à la fabrication de plaquettes sont d'abord ébranchés, avant d'être stockés en forêts pendant une année en moyenne, sous forme de troncs avec écorce de 4 à 6 m de long. Ils sont ensuite transportés sur le site de transformation, où ils sont déchiquetés; les plaquettes sont stockées sous toit pendant une durée de 0 à 2 mois en attendant d'être acheminées vers les sites d'utilisation. La filière de préparation du bois est illustrée par la figure 3.

Les plaquettes, livrées par camions de 30 m<sup>3</sup>, sont brûlées dans des chaudières alimentant des systèmes de chauffage à distance communaux (Ecogia, Grand-Saconnex, Confignon, Chancy) ou chauffant des bâtiments appartenant à l'Etat (Collège de Cayla, Ecole d'Ingénieurs de Lullier).



**Figure 3** : Schéma général de la filière genevoise de fabrication de plaquettes.

## 2. Echantillonnage

### 2.1. Plan d'échantillonnage général

Le but de cette étude étant de déterminer le contenu énergétique des plaquettes de bois issues des forêts genevoises, les échantillons devront être récoltés de manière à être représentatifs de la diversité des plaquettes constituant le tas exploité. Cette diversité est notamment dépendante du temps de stockage et de l'espèce constituante des plaquettes. Ces facteurs influencent l'humidité, la densité apparente et le pouvoir calorifique de la ressource, caractéristiques qui seront étudiées par la suite

Afin de caractériser au mieux les plaquettes forestières, plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été menées. Le site de fabrication et de stockage de Jussy a été investigué, de même que le silo de la chaudière de l'Ecole d'Ingénieurs de Lullier, où sont consommées la plupart des plaquettes produites à Jussy. Le tableau 3 montre les différentes étapes d'échantillonnage, la nature des échantillons récoltés, ainsi que les mesures à effectuer sur ces échantillons.

**Tableau 3** : Plan d'échantillonnage des plaquettes forestières genevoises.

Lieu et date	Éléments échantillonnés	Échantillons	Nombre	Mesures à effectuer
Jussy 30.11.06	Ancien tas de plaquettes	Plaquettes représentatives de l'ancien tas	- 10 seaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> <li>• Calorimétrie</li> <li>• Densité apparente</li> </ul>
Jussy 30.11.06	Camions de livraison des plaquettes provenant du vieux tas	Plaquettes représentatives des livraisons	- 5 seaux - 4 pesées de camions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume du camion</li> <li>• Poids vide/plein du camion</li> <li>• Humidité</li> <li>• Calorimétrie</li> <li>• Densité apparente</li> </ul>
Jussy 08.12.06	Troncs en attente du déchiquetage	Rondelles	- 4 de chênes - 1 d'acacia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> </ul>
Jussy 08.12.06	Troncs en cours de déchiquetage	Plaquettes d'espèces définies	- 4 seaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> <li>• Densité apparente pl./espèce</li> </ul>
Jussy 08.12.06	Nouveau tas de plaquettes	Plaquettes représentatives du nouveau tas	- 8 seaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> <li>• Calorimétrie</li> <li>• Densité apparente</li> </ul>
Jussy 14.12.06	Camions de livraison des plaquettes provenant du nouveau tas	Plaquettes représentatives des livraisons	- 4 seaux - 4 pesées de camions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume du camion</li> <li>• Poids vide/plein du camion</li> <li>• Humidité</li> <li>• Calorimétrie</li> <li>• Densité apparente</li> </ul>
Lullier 14.12.06 21.12.06 29.01.07	Silos	Plaquettes juste avant d'être consommées	- 3x 2 seaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> <li>• Calorimétrie</li> <li>• Densité apparente</li> <li>• Relever les compteurs</li> </ul>
		<b>TOTAL</b>	<b>- 37 seaux (20l)</b> <b>- 5 rondelles</b> <b>- 8 pesées camion</b>	

## 2.2. Phases d'échantillonnage

### 1<sup>ère</sup> phase d'échantillonnage

La 1<sup>ère</sup> phase d'échantillonnage s'est déroulée sur le site de fabrication et de stockage de plaquettes de Jussy, le 30 novembre 2006. Tout d'abord, un tas issu de deux déchetages (printemps 2006, 14 novembre 2006) à été échantillonné.

#### Description du tas échantillonné, présenté par la figure 4:

- Volume approximatif de 740 m<sup>3</sup> de plaquettes (= 370 stères) (*Parcino T., communication personnelle*),
- Plaquettes de chêne (90-95%) et d'acacia (5-10%),
- Constitué de plaquettes issues de deux déchetages : la partie avant du tas provient du broyage du 14 novembre, la partie arrière d'un broyage effectué au printemps 2006. Les plaquettes de la partie arrière du tas ont donc été stockées 7 mois de plus environ que la partie avant,
- La surface supérieure du tas est recouverte de poussière, sur une épaisseur de 2 cm environ.



**Figure 4 :** Tas de plaquettes du site de transformation et de stockage de Jussy (GE), échantillonné le 30 novembre 2006. Les échantillons 1.1 à 1.5 ont été pris en surface, alors que les échantillons 1.6 à 1.10 (désignés ainsi : ⊗) ont été pris plus en profondeur, au fur et à mesure que la pelle mécanique extrayait les plaquettes. L'échantillon 1.10 est issu de la profondeur la plus importante.

10 échantillons représentatifs de la diversité du tas ont été récoltés. Un échantillon correspond à un seau de 20 litres de plaquettes, rempli de manière à ce que le tassement soit le plus identique possible entre chaque seau.

Afin de vérifier si les plaquettes livrées comportent les mêmes caractéristiques que le tas de plaquettes, des échantillons ont été récoltés lors du remplissage des bennes (1 seau par benne, dont les plaquettes proviennent des godets de la pelle mécanique utilisée pour remplir les bennes, voir image 1). 5 bennes ont été échantillonnées ; 4 d'entre elles ont été pesées vides, puis pleines



**Image 1 :** Pelle mécanique remplissant une benne de plaquettes. Le godet contient environ 2 m<sup>3</sup> de matière.

### ***2<sup>ème</sup> phase d'échantillonnage***

La 2<sup>ème</sup> phase d'échantillonnage s'est également déroulée sur le site de fabrication et de stockage de plaquettes de Jussy, le 8 décembre 2006.

Lors de cette campagne, 8 seaux de plaquettes représentatives du tas constitué le même jour ont été récoltés. Sur ces 8 seaux, 2 sont remplis par des plaquettes constituant la couche ancienne (2.1 et 2.2), et 6 de plaquettes fraîches, prises à différents endroits du tas (voir image 4). Cependant, puisque la majeure partie du tas est constituée de plaquettes fraîches, il n'a pas été nécessaire de diversifier autant la récolte que pour le premier tas échantillonné.

L'image 2 illustre les troncs en attente du déchiquetage à côté du hangar de stockage. A partir de ces troncs, 4 rondelles de chêne et 1 rondelle d'acacia de diamètres différents sont découpées à la tronçonneuse. Leur masse brute est relevée.

La déchiqueteuse souffle directement les plaquettes dans le hangar. Les nouvelles plaquettes viennent ainsi s'ajouter à celles qui restaient du tas précédent (image 4).

#### Description du tas échantillonné, présenté par l'image 4:

- Le reste des plaquettes de l'ancien tas a été étalé sur le sol, il constitue ainsi la couche de base du nouveau tas, sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur,
- Les plaquettes fraîches soufflées par la déchiqueteuse viennent recouvrir les anciennes,
- Volume approximatif de 380 m<sup>3</sup> de plaquettes (= 190 stères) (*Parcino T., communication personnelle*),
- Plaquettes de chêne (90-95%) et d'acacia (5-10%).

Le 14 décembre 2006, de même que lors de la phase I, des échantillons ont été récoltés lors du remplissage des bennes (1 seau par benne, dont les plaquettes proviennent des godets de la pelle mécanique utilisée pour remplir les bennes), afin de vérifier si les plaquettes livrés comportent les mêmes caractéristiques que le tas de plaquettes. 4 bennes ont été échantillonnées ; elles ont également été pesées vides, puis pleines. Notons que la livraison a eu lieu 6 jours après le déchiquetage.



**Figure 2 :** Tas de troncs en attente du déchetage ; récolte de rondelles à partir des troncs.  
**Figures 3 et 4:** Déchetage par le camion de l'Association SODEFOR II. Les troncs entiers passent dans les couteaux et sont directement injectés dans le hangar de stockage sous forme de plaquettes. Sur la figure 4, on constate une différence dans l'apparence des restes de plaquettes du tas précédent (au premier plan) et des plaquettes du nouveau tas.

### *3<sup>ème</sup> phase d'échantillonnage*

La 3<sup>ème</sup> phase d'échantillonnage s'est déroulée à Lullier, les 14 et 21 décembre 2006, ainsi que le 29 janvier 2007. Le silo de la chaudière de l'école d'Ingénieurs de Lullier a été échantillonné. Les plaquettes ont été récoltées juste avant leur entrée dans la chaudière (voir image 6).



**Image 5 :** Remplissage du silo de l'Ecole d'Ingénieurs de Lullier.

**Image 6 :** Amenée de bois du silo à la chaudière. Fenêtre donnant accès au combustible juste avant son entrée dans la chaudière (lieu d'échantillonnage des plaquettes de Lullier).

Puisque le temps de roulement de la chaudière (durée de stockage des plaquettes) est d'une à trois semaines, selon les besoins de consommation, les plaquettes récoltées le 14 décembre devraient provenir du 1<sup>er</sup> tas échantillonné, et celles récoltées le 21 du 2<sup>ème</sup> tas échantillonné. Cependant, au vu des mécanismes se déroulant à l'intérieur du silo (apport de nouveau combustible par-dessus, drainage des plaquettes relativement aléatoire), il n'est pas possible de savoir exactement quelles plaquettes sont incinérées à quel moment.

### 2.3. Nomenclature des échantillons

Afin de clarifier la situation, le tableau 4 présente un descriptif concis des échantillons ultérieurement analysés.

**Tableau 4 :** Résumé des échantillons récoltés.

Séries	Noms des échantillons	Description	Dates de récolte
1	1.1 à 1.10	Plaquettes provenant du 1er tas échantillonné	30.11.06
2	2.1 à 2.8	Plaquettes provenant du 2ème tas échantillonné	08.12.06
A	A1 à A5	Plaquettes provenant des camions de livraison remplis avec le 1er tas	30.11.06
B	B1 à B4	Plaquettes provenant des camions de livraison remplis avec le 2ème tas	14.12.06
Chêne	Chêne 1 à chêne 4	Plaquettes de chêne seulement issues du 2ème tas	08.12.06
Lullier	Lullier 1 à Lullier 6	Plaquettes échantillonnées dans le silo de la chaudière de Lullier juste avant leur combustion	14.12.06 21.12.06 29.01.07
R chêne R acacia	R chêne 1 à R chêne 4 R acacia 5	Rondelles de chênes et d'acacia découpées à la tronçonneuse sur des troncs en attente du déchiquetage	08.12.06

### 3. Humidité

#### 3.1. Humidité du bois : connaissances actuelles

L'humidité varie en fonction de l'espèce considérée, de la proportion de branches et de feuilles, du temps et du mode de séchage du bois, ainsi que des conditions climatiques environnantes. L'humidité du bois sur pieds varie également, pour une même espèce, suivant la partie de l'arbre considérée; le tronc étant la partie la plus sèche.

Au moment de l'abattage, le bois contient environ 40% de son poids d'eau (pourcentage calculé en fonction du poids total du bois vert). Si les troncs sont déchiquetés peu de temps après l'abatage, l'humidité brute des plaquettes équivaldra quasiment à celle du bois sur pieds (ADEME, 1998). Par la suite, le pourcentage d'humidité brute diminue, en fonction de l'hygrométrie et de la température ambiante, jusqu'à obtention d'une valeur stable, établie entre 15 et 20% après 2 ans environ (Nussbaumer T., 2000). Le bois est alors dit « sec à l'air ». La dessiccation du bois s'accompagne d'une variation plus ou moins considérable de poids selon les espèces. Les bois écorcés et débités perdront rapidement beaucoup plus d'eau que les bois conservés sous écorce (Beck J., 2006).

Deux grandeurs, exprimées en pourcentages, sont utilisées pour indiquer la quantité d'eau présente dans un bois (voir définition, chapitre 1.1.):

- L'humidité sur masse anhydre (souvent appelée "humidité du bois" dans la littérature),
- L'humidité brute (souvent appelée "teneur en eau" dans la littérature).

La masse totale du bois brut humide vaut donc:

$$m_{\text{tot}} = m_{\text{bois anhydre}} + m_{\text{eau}}$$

Pour calculer l'humidité brute, la masse de l'eau est rapportée à la masse du bois brut humide:

$$w_{(h)} = (m_{\text{eau}} / (m_{\text{eau}} + m_{\text{bois anhydre}})) * 100$$

Pour calculer l'humidité sur masse anhydre, la masse de l'eau est rapportée à la masse du bois anhydre:

$$w_{(a)} = (m_{\text{eau}} / m_{\text{bois anhydre}}) * 100$$

L'humidité brute ainsi que l'humidité sur masse anhydre de différentes variétés de plaquettes sont présentées dans le tableau 5. Il est alors possible de constater que le stockage sous toit, induisant un séchage naturel des plaquettes, diminue de près de moitié l'humidité brute du combustible. Un séchage de 2 ans à l'air amène encore une diminution d'humidité supplémentaire d'un tiers. De ce fait, il apparaît judicieux de stocker le combustible sous toit avant utilisation.

**Tableau 5** : Valeurs caractéristiques de l'humidité des plaquettes (Nussbaumer T., 2000).

Variétés	Humidité brute $w_{(h)}$ [%]	Humidité anhydre $w_{(a)}$ [%]
Plaquettes forestières à l'état naturel	30-60	43-150
Plaquettes forestières à l'état naturel stockées sous toit	20-30	25-43
Plaquettes forestières à l'état naturel séchées à l'air (sous forme de bûches ou troncs) pendant 2 ans	15-20	18-25

Au vu du tableau 5, on pourrait s'attendre à une humidité brute des plaquettes genevoises située entre 20% et 60%, puisque elles sont à l'état naturel, et stockées entre 0 et 2 mois sous toit.

## **3.2. Matériel et méthode**

### a) Troncs en attente du déchiquetage

Afin de mesurer l'humidité brute et l'humidité sur masse anhydre des troncs utilisés pour la fabrication des plaquettes, des rondelles de diamètres différents ont été prélevées (4 chênes et 1 acacia). Celles-ci ont tout d'abord été pesées à l'état brut, avant d'être séchées en étuve (étuve universelle UNB 100-500, Memmert) pendant 48 heures. Une fois une masse constante obtenue (la matière est considérée comme anhydre), les rondelles ont à nouveau été pesées.

### b) Plaquettes

Pour mesurer l'humidité brute et l'humidité sur masse anhydre des plaquettes, environ 1000g de chaque échantillon (contenu dans des seaux de 20 litres) ont été pesés exactement. La masse humide brute d'une quantité déterminée de plaquettes pour chaque échantillon est ainsi connue.

Ces quantités sont ensuite séchées à l'étuve pendant 48 heures afin d'obtenir une masse constante. Une fois sorties de l'étuve, elles sont à nouveau pesées. La masse des mêmes quantités de plaquettes à l'état anhydre est ainsi connue.

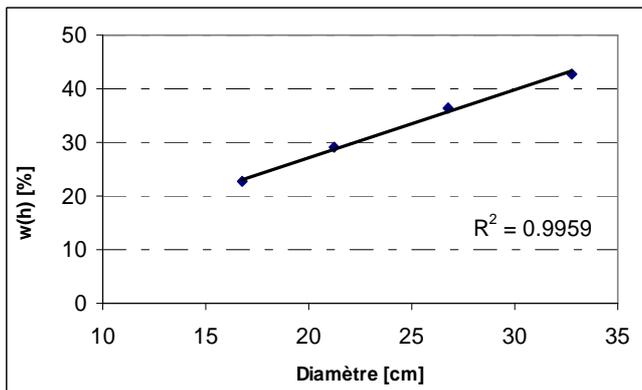
A partir des masses brutes et des masses anhydres des rondelles et des plaquettes de bois, il est alors possible de calculer leur humidité brute ( $w_{(h)}$ ), ainsi que leur humidité sur masse anhydre ( $w_{(a)}$ ) (voir chapitre 3.1.)

## **3.3. Résultats**

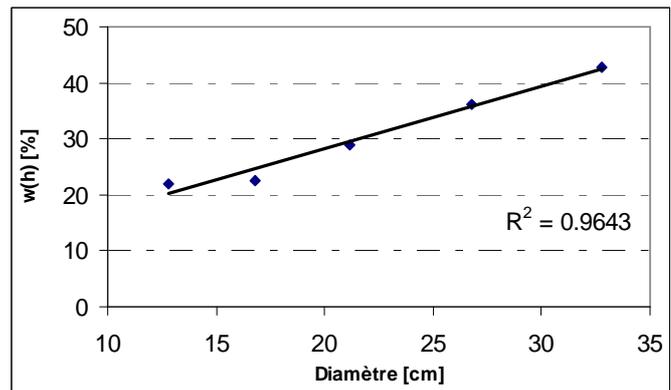
### a) Troncs en attente du déchiquetage

L'humidité brute moyenne des rondelles échantillonnées est de 30.5 %, ce qui correspond à une humidité anhydre moyenne de 46%.

Le graphique 1 montre une corrélation presque parfaite entre le diamètre des rondelles de chêne et leur humidité. Une fois la rondelle d'acacia prise en compte (point à gauche du graphique 2), la corrélation est légèrement moins bonne. L'acacia serait donc naturellement plus humide que le chêne, bien que des mesures supplémentaires seraient nécessaires pour le vérifier.



**Graphique 1 :** Humidité brute des rondelles de bois de chênes en fonction de leur diamètre.

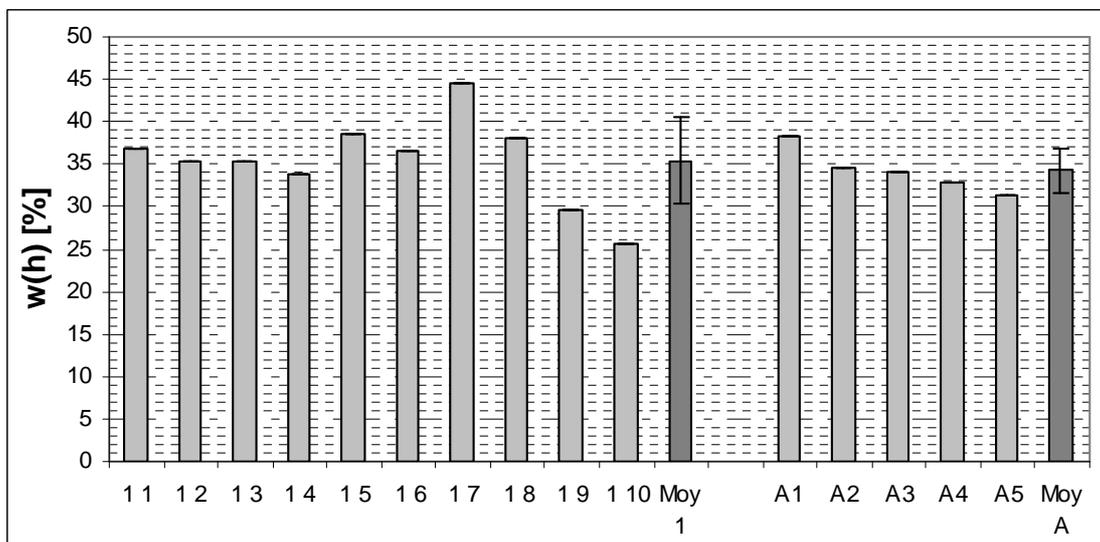


**Graphique 2 :** Humidité brute des rondelles de bois de chênes et d'acacia (point de gauche) en fonction de leur diamètre.

### b) Plaquettes

D'un point de vue général, les plaquettes ont une humidité variable selon l'échantillon considéré.

Le graphique 3 montre les humidités brutes de plaquettes issues d'un tas ancien (description au chapitre 2.2.). L'humidité brute moyenne de ce tas s'établit à 35.4%. Cependant, la variabilité inter échantillon est importante, avec un écart-type de 5.1 ; le pourcentage d'humidité oscille entre un minimum de 25.6% et un maximum de 44.42%. L'humidité moyenne des échantillons représentatifs des livraisons faites à partir du tas discuté est plus stable, à 34.3%, avec un écart-type de 2.6. Les humidités brutes moyennes des groupes d'échantillons 1 et A sont très proches.

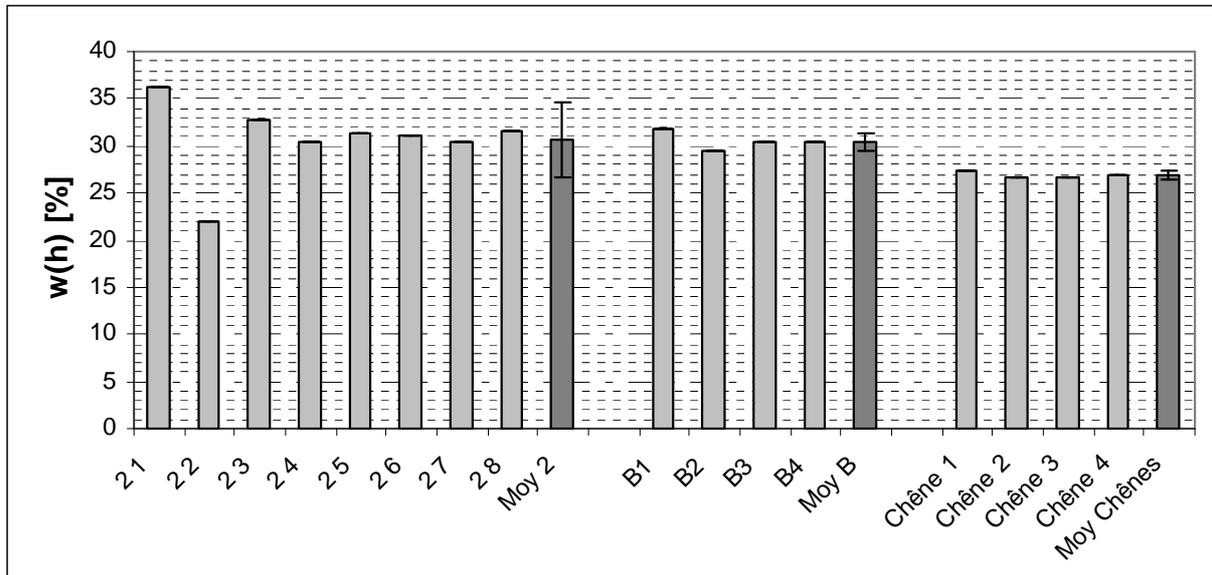


**Graphique 3 :** Humidité brute ( $w_{(h)}$ ) des plaquettes échantillonnées sur un ancien tas (1 1-1 10), et des plaquettes représentatives des livraisons (A1-A5). Echantillonnage du 30.11.06. L'écart type des différentes séries est donné sur chaque moyenne.

Sur le graphique 4, on remarque que l'humidité brute des échantillons pris sur un tas frais (plaquettes juste déchetées) est relativement constante. L'humidité de l'échantillon 2.2 (22.0%) est cependant très au dessous de la moyenne du groupe 2, qui se situe à 30.7%. L'échantillon 2.1 se distingue également, avec l'humidité maximale de 36.3%. Les humidités brutes moyennes des groupes d'échantillons 2 et B sont très proches, avec des valeurs respectives de 30.7% et 30.5%.

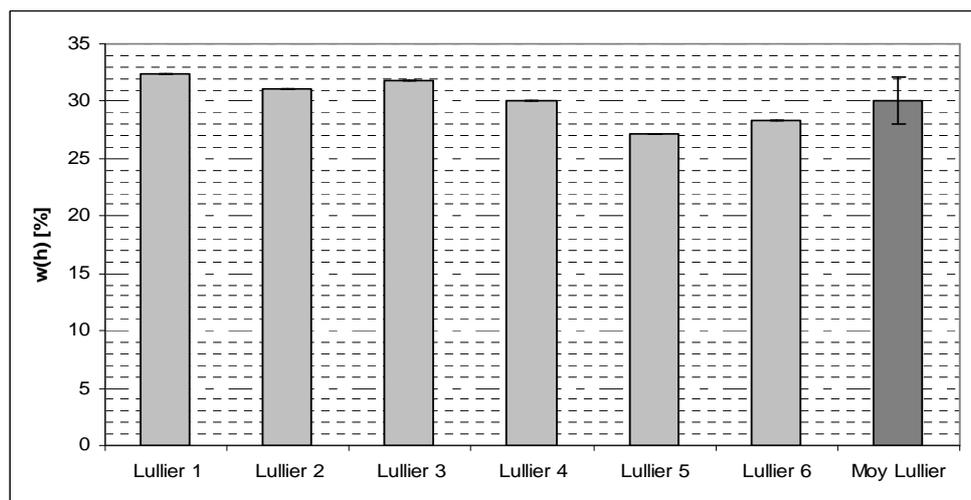
L'humidité brute des échantillons de plaquettes de chêne uniquement est très stable, et plus faible que pour les autres échantillons ; sa moyenne se situe à 26.9%.

En comparant les graphiques 3 et 4, on constate que la variabilité de l'humidité brute est plus importante dans les groupes 1 et A, provenant d'un tas ancien, que dans les groupes 2 et B, provenant d'un tas frais.



**Graphique 4 :** Humidité brute ( $w_{(h)}$ ) des plaquettes échantillonnées sur un tas frais (2 1-2 8), des plaquettes de chênes uniquement (chêne 1-4) prélevées au même moment (08.12.06), et des plaquettes représentatives des livraisons (B1-B4) (14.12.06). L'écart type des différentes séries est donné sur chaque moyenne.

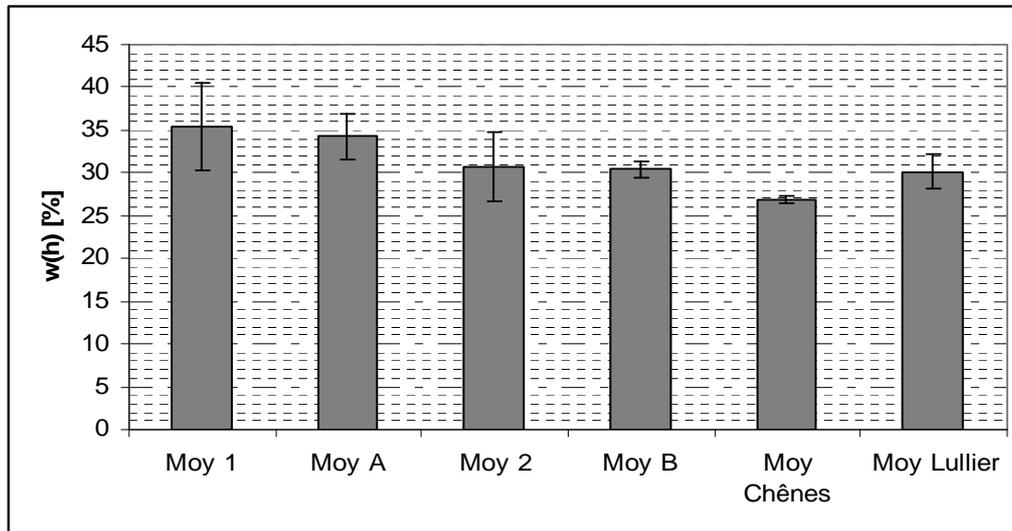
Le graphique 5 illustre l'humidité brute des plaquettes l'instant précédent leur combustion. Elles ont été récoltées à l'entrée de la chaudière de Lullier. L'humidité brute des plaquette dans le silo de la chaudière semble alors stable (écart type de 2.2), se situant autour de 30.1%.



**Graphique 5 :** Humidité brute ( $w_{(h)}$ ) des plaquettes échantillonnées dans le silo de la chaudière de Lullier. L'écart type de la série est donné sur la moyenne.

Finalement, le graphique 6 montre les humidités brutes moyennes des différents groupes d'échantillons étudiés (1, A, 2, B, Chênes et Lullier), avec leur écart type respectif.

Le groupe 1 a l'humidité brute la plus élevée (35.4%), avec un écart type important (5.1), alors que le groupe Chêne possède l'humidité la plus faible (26.9%) et un écart type également très petit (0.4). On peut noter que les tas de plaquettes échantillonnés montrent les variabilités les plus importantes concernant le facteur humidité, et que les plaquettes récoltées à l'entrée de la chaudière ont une humidité moyenne relativement stable, située à mi chemin entre les humidité maximale (groupe 1) et minimale (groupe Chêne).



**Graphique 6 :** Humidité brute ( $w(h)$ ) moyenne des plaquettes des différents groupes d'échantillons cités précédemment. L'écart type des différentes séries est donné sur chaque moyenne.

Un test statistique (ANOVA, test de F) a montré que les moyennes des différents groupes d'échantillons sont significativement différentes en ce qui concerne l'humidité.

### 3.4. Discussion

#### Relation humidité brute des troncs-humidité brute des plaquettes

Les rondelles étudiées proviennent de troncs à l'origine des échantillons du groupe 2. L'humidité brute moyenne des rondelles se situant à 30.5% et l'humidité brute moyenne des plaquettes du groupe 2 à 30.7%, on peut donc dire que la correspondance entre humidité des troncs et humidité des plaquettes est excellente, ce à quoi nous pouvions nous attendre.

Cependant, le petit nombre de rondelles analysées (5) pourrait ne pas être représentatif du tas ; il serait donc judicieux de vérifier ce résultat avec un plus grand nombre de rondelles.

#### Variabilité de l'humidité au sein des tas

Au vu du graphique 3, on constate que les échantillons issus du premier tas sont différents entre eux du point de vue de l'humidité. L'échantillon 1.7 présente la valeur la plus haute (44.4%), et l'échantillon 1.10 la valeur la plus basse (25.6%). L'humidité brute de 1.9 (29.7%) est également bien inférieure à la moyenne.

Dans le cas du premier tas, la variabilité de l'humidité entre échantillons est probablement due au temps de stockage différent des plaquettes. En effet, comme expliqué dans le chapitre 2.2., le premier tas est constitué de plaquettes issues de deux déchetages, l'un au printemps 2006, l'autre le 14 novembre 2006. Les plaquettes déchetées au printemps ont donc eu les mois d'été pour sécher, ce qui correspond aux résultats obtenus, puisque les échantillons les plus secs (1.9 et 1.10) ont été récoltés dans la partie arrière droite du tas, partie la plus ancienne (*Hartmeyer E., communication personnelle*). L'échantillon le plus humide (1.7) a été

récolté dans le dessous du milieu du tas (voir figure 4). Issues d'un déchiquetage plus récent, les plaquettes, n'étant pas en contact direct avec l'air, n'ont pas pu sécher et ont donc conservé une part importante de leur humidité brute. De plus, lorsque de la matière organique est entreposée, une dégradation bactérienne de la cellulose se met en marche (Faessler J., 2001). Ce processus naturel dégage du CO<sub>2</sub>, de la chaleur et de l'eau, ce qui augmentera momentanément l'humidité ambiante. Ce phénomène expliquerait donc l'humidité importante des plaquettes situées dans le centre d'un tas. Une aération adéquate du tas permettrait néanmoins à l'humidité produite de s'évaporer.

Dans le cas du deuxième tas échantillonné, on constate que l'humidité est globalement plus faible et plus homogène que dans le cas du premier tas. Seuls les échantillons 2.1 (36.2%) et 2.2 (22%) diffèrent significativement. Ces échantillons proviennent du reste d'un déchiquetage antérieur, étalé avant d'être recouvert par des plaquettes fraîchement déchiquetées. Pour ces 2 échantillons, les mêmes explications que dans le paragraphe précédent peuvent être envisagées ; 2.2 serait constitué de plaquettes très anciennes et donc particulièrement sèches, et 2.1 de plaquettes ayant séjourné quelques jours dans le centre du tas, peu aéré, et où la décomposition bactérienne était à l'œuvre.

Ont été tiré du deuxième tas des échantillons de plaquettes constitués de chêne uniquement. Ces échantillons ont une humidité brute moyenne plus faible (26.9%) que les échantillons du groupe 2 (30.7%). Comme ce tas était constitué de plaquettes de chêne à 90% et d'acacia à 10%, on pourrait faire l'hypothèse que l'acacia est naturellement plus humide que le chêne de par sa constitution, et augmente d'humidité globale du tas. Ceci resterait néanmoins à vérifier. Il serait aussi possible que les quatre échantillons de chêne uniquement aient été pris par hasard à des endroits du tas un peu moins humides.

Suite aux remarques précédentes concernant l'hétérogénéité de l'humidité à l'intérieur d'un tas, l'hypothèse pourrait être faite que le temps de stockage des plaquettes ainsi que leur situation dans le tas (surface/profondeur) influencent de manière importante le facteur humidité. Une étude bibliographique et/ou technique serait néanmoins nécessaire afin de confirmer cette hypothèse. Suite à cela, dans le but d'obtenir une humidité minimale, les plaquettes devraient être entreposées quelques jours au plus, ou alors quelques mois, afin d'éviter la phase de décomposition bactérienne responsable d'une production de vapeur d'eau. Dans le premier cas, une humidité brute de 30% environ serait obtenue, dans le deuxième cas l'humidité pourrait s'abaisser jusqu'à 22%. Une aération contrôlée des plaquettes pourrait également faire diminuer l'humidité. De manière générale, on peut remarquer que les conditions d'humidité dans un tas de plaquettes sont très hétérogènes.

#### Variabilité de l'humidité entre le tas et ses livraisons correspondantes

Au regard des graphiques 3 et 4, il est possible d'affirmer que les livraisons de plaquettes issues d'un tas propre sont représentatives de ce tas. En effet, autant dans le cas de la première campagne que dans celui de la deuxième, l'humidité moyenne du tas se retrouve dans l'humidité moyenne des livraisons (première campagne :  $w_{(h)} \text{ moy}_{(\text{tas } 1)} = 35.4\%$  et  $w_{(h)} \text{ moy}_{(\text{camions A})} = 34.3\%$ , deuxième campagne :  $w_{(h)} \text{ moy}_{(\text{tas } 2)} = 30.7\%$  et  $w_{(h)} \text{ moy}_{(\text{camions B})} = 30.5\%$ ). A nouveau la variation d'humidité entre tas et camion est plus importante dans le cas de la première campagne, ceci probablement parce que le premier tas était plus hétérogène que le deuxième.

#### Humidité des plaquettes à leur entrée dans la chaudière de Lullier

Suite à l'étude de l'humidité brute des plaquettes juste avant leur combustion, il est possible de dire que celle-ci est stable (écart type faible) et se situe aux alentours de 30%. Cependant,

les échantillons Lullier 1 à 4 sont plus humides que les échantillons Lullier 5 et 6. Ceci pourrait être dû au fait que les deux derniers échantillons ont été récoltés pendant une panne de la chaudière, ce qui laisse supposer que les plaquettes ont pu perdre de l'humidité en attendant leur combustion dans le silo, ou même dans le conduit les menant à la chaudière. Cependant, les conditions dans le silo étant peu connues, il n'est pas possible de confirmer cette hypothèse.

De manière générale, on peut dire que l'humidité des plaquettes entrant dans la chaudière est peu différente de l'humidité globale des tas et des camions de livraison échantillonnés, bien que légèrement inférieure. Le temps passé dans le silo ne semble pas permettre aux plaquettes de sécher de manière significative.

### **3.5. Conclusion**

Tout d'abord, il a été démontré ici que l'humidité des plaquettes était fonction de l'humidité des troncs les constituant, et que l'humidité d'un tronc était positivement corrélée à son diamètre.

Après l'étude de deux groupes de plaquettes, d'humidités brutes moyennes respectives de 35.4% et de 30.7%, il ressort que l'humidité peut être très hétérogène à l'intérieur d'un tas. Ainsi, une différence maximale de 42% a été observée entre des plaquettes échantillonnées sur un même tas. Il est ainsi possible d'affirmer que l'humidité des plaquettes dépend de la durée de stockage et de leur situation dans le tas. La variabilité de l'humidité pourrait être réduite en optimisant le temps de stockage, ou/et en aérant les plaquettes de manière contrôlée.

Deux campagnes différentes ont permis de constater que l'humidité moyenne des plaquettes livrées est équivalente à celle des plaquettes constituant un tas. De même, l'humidité des plaquettes à l'entrée de la chaudière n'est que légèrement inférieure à celle des plaquettes livrées.

Il semblerait également que les plaquettes de chêne soient moins humides que les plaquettes de chêne et d'acacia mélangées ; ceci resterait néanmoins à vérifier.

Avec une humidité brute moyenne de 35.4% et de 30.7% selon la campagne, les plaquettes de bois-énergie genevoises se situent à la limite inférieure de la fourchette décrivant les plaquettes forestières à l'état naturel (voir tableau 5). Leur qualité est donc bonne du point de vue de l'humidité.

## 4. Densité apparente

### 4.1. Densité apparente : connaissances actuelles

La densité apparente anhydre des plaquettes de bois dépend notamment de la ou les essences constituantes. La densité apparente brute dépend, en plus de l'essence considérée, de l'humidité brute des plaquettes. La granulométrie influence également la densité apparente, bien que dans une moindre mesure. Ce caractère ne sera pas discuté ici, puisque la granulométrie des plaquettes genevoises est fixée.

L'essence influence la densité apparente par sa masse volumique propre. A l'état anhydre, les feuillus ont une masse volumique plus importante que les résineux. Le tableau 6 donne quelques masses volumiques d'espèces fréquentes dans les forêts genevoises.

**Tableau 6 :** Masse volumiques anhydre de différentes essences. En italique, les espèces exploitées à Jussy (GE) (www.cedotec.ch, 2006, ITEBE 2004).

Essence	Masse volumique anhydre [ $\text{g/m}^3_{(a)}$ ]
<i>Acacia</i>	0.66-0.77
<b>Aulne</b>	0.46-0.53
<i>Chêne</i>	0.60-0.70
<b>Epicéa</b>	0.40-0.43
<b>Frêne</b>	0.64-0.70
<b>Hêtre</b>	0.64-0.72
<b>Pin sylvestre</b>	0.46-0.51

La densité apparente des plaquettes de bois, aussi bien brute qu'anhydre, a été étudiée à plusieurs reprises par divers organismes. Bien que les ordres de grandeur soient respectés, les données divergent quelque peu. Le tableau 7 montre ces résultats.

**Tableau 7 :** Densités apparentes anhydre des plaquettes de bois issues de différentes études.

	D. app. anhydre [ $\text{kg/m}^3_{(a)}$ ]		
	Bois tendre	Bois dur (hêtre)	Bois mixte
<b>ASEB, 1997</b>			200
<b>Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992</b>	170	232	
<b>Xylon SA, 2002</b>			218

Par hypothèse relative au tableau ci-dessus, comme les plaquettes de bois étudiées dans ce rapport proviennent d'essences à bois dur (majoritairement du chêne), leur densité apparente anhydre devrait avoisiner les 230  $\text{kg/m}^3_{(a)}$ . La densité apparente brute croît avec l'augmentation de l'humidité. A 32.4% d'humidité brute (valeur moyenne pour les groupes A et B), la densité apparente brute attendrait 344  $\text{kg/m}^3_{(h)}$  (*Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992*).

### 4.2. Matériel et méthode

La densité apparente brute des plaquettes de bois s'exprime en [ $\text{kg/m}^3_{(h)}$ ]. Afin de mesurer cette grandeur pour les plaquettes issues du bois des forêts de Jussy (GE), deux méthodes ont été utilisées.

#### Méthode « camions » :

Les bennes utilisées pour les livraisons de plaquettes, dont le volume est calculé, ont été pesées à vide, puis pleines ; les bennes ont été remplies à raz bord, de la manière la plus régulière possible. La différence de masse donne la masse brute des plaquettes. La densité apparente brute<sub>(camions)</sub> se calcule alors ainsi :

$$D. \text{ app.brute}_{(camions)} [\text{kg}/\text{m}^3_{(h)}] = m_{(plaquettes \text{ brutes contenues dans la benne})} [\text{kg}_{(h)}] / \text{volume}_{(benne)} [\text{m}^3_{(h)}]$$

Cette méthode de mesure a été conduite sur deux jours de livraisons. Les densités mesurées le 1<sup>er</sup> jour se nomment CamA et sont issues du tas 1, celles mesurées le 2<sup>ème</sup> jour CamB et sont issues du tas 2 (voir chapitre 2.2., échantillonnage).

#### Méthode « seaux » :

Cette deuxième méthode attribue une densité apparente propre à chaque échantillon récolté (voir chapitre 2.2, échantillonnage). Les seaux, dont le volume est connu, sont pesés vides, puis pleins ; la différence de masse représente la masse des plaquettes. La densité apparente brute<sub>(seaux)</sub> se calcule alors ainsi :

$$D. \text{ app. brute}_{(seaux)} [\text{kg}/\text{m}^3_{(h)}] = m_{(plaquettes \text{ brutes contenues dans le seau})} [\text{kg}_{(h)}] / \text{volume}_{(seau)} [\text{m}^3_{(h)}]$$

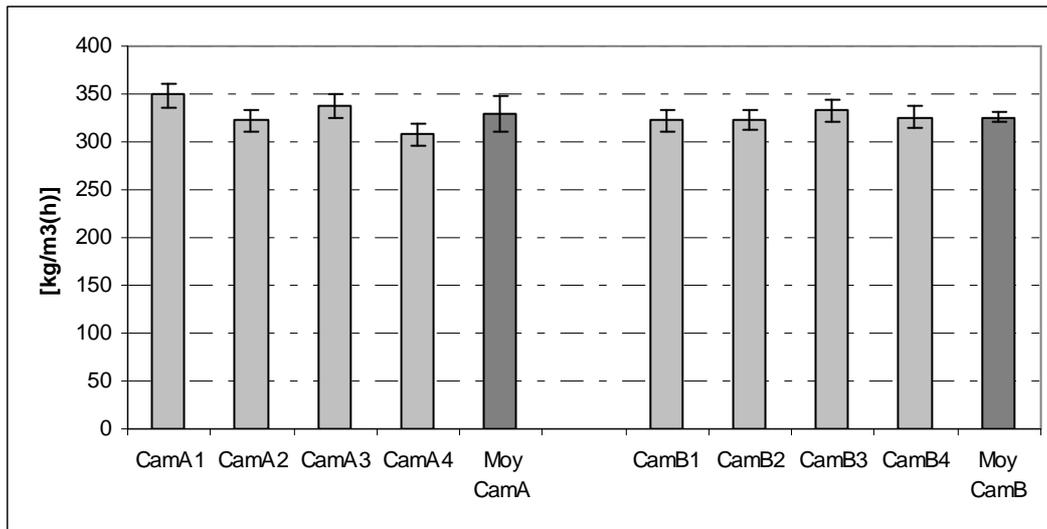
### **4.3. Résultats**

#### Méthode « camions » :

Le volume de la benne du camion, dont la hauteur, la largeur et la longueur ont été mesurées, est de 29.4 m<sup>3</sup>.

Les densités apparentes brutes des plaquettes de Jussy calculées à partir des masses et volumes des bennes de livraison sont représentées dans le graphique 7. On constate que pour le groupe CamA, les densités apparentes brutes des plaquettes sont plus variables que pour le groupe CamB. La densité brute moyenne de CamA est de 329.5 kg/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>, avec un écart-type de 18.2. Celle de CamB est légèrement inférieure, fixée à 326 kg/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub> avec un écart type de 4.6. La différence entre ces moyennes est de 1%.

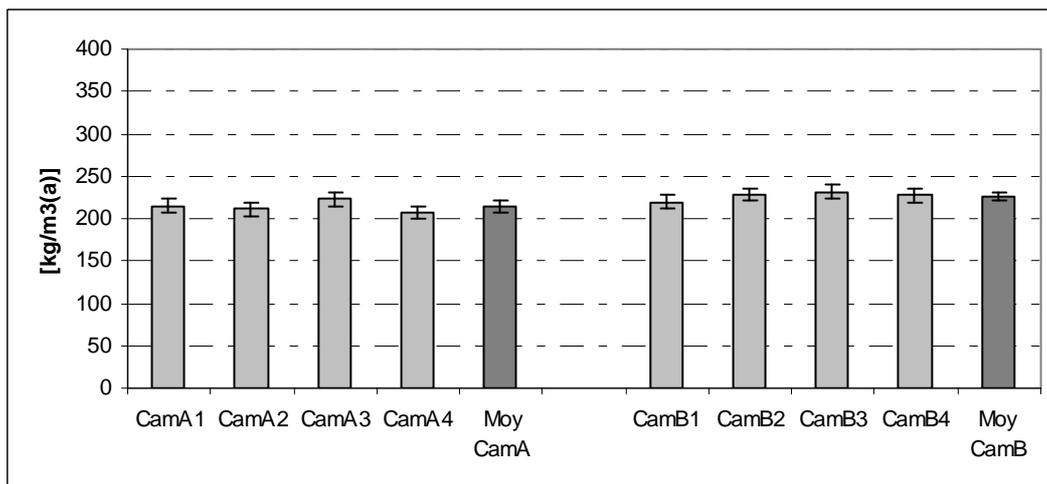
En se référant à la méthode « camions », la densité apparente brute moyenne des plaquettes est de 328 kg/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub>. L'erreur sur ces mesures, provenant des différences de remplissage des bennes, est estimée à +/- 3.5%.



**Graphique 7 :** Densités apparentes brutes des plaquettes de Jussy. Le groupes CamA provient du tas de plaquettes n°1, alors que le groupe CamB provient du tas n°2. (L'erreur sur les mesures est représentée sur les données individuelles, l'écart types entre données sur la moyenne).

A partir des densités apparentes brutes et de l'humidité brute (l'humidité brute des échantillons A1 à A4 ont été inférées aux bennes CamA1 à CamA4, de même pour B1 à B4 et CamB1 à CamB4), il a été possible de calculer les densités apparentes anhydres des plaquettes de bois. Celles-ci sont représentées par le graphique 8. CamA obtient une densité apparente anhydre moyenne de  $214 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ , alors que celle CamB s'établit à  $227 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ . La différence entre les moyennes des deux groupes est alors de 5%. Et, avec des écarts types respectifs de 6.9 et 5, la variabilité de la densité apparente anhydre est inférieure à celle de la densité apparente brute.

En comparant les résultats de densité brute et apparente, on constate que la différence entre les moyennes des deux groupes (A et B) est plus importante pour la densité anhydre, dont les écarts types sont par contre plus faibles.



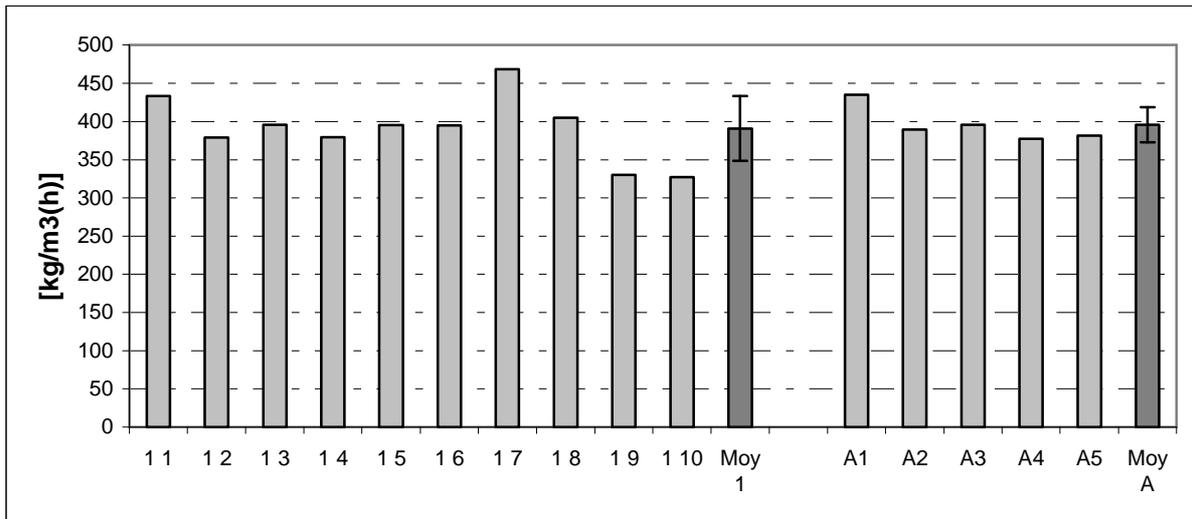
**Graphique 8 :** Densités apparentes anhydres des plaquettes de Jussy. Le groupes CamA provient du tas de plaquettes n°1, alors que le groupe CamB provient du tas n°2. (L'erreur sur les mesures est représentée sur les données individuelles, l'écart types entre données sur la moyenne).

En se référant à la méthode « camions », la densité apparente anhydre moyenne des plaquettes est de  $220 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ .

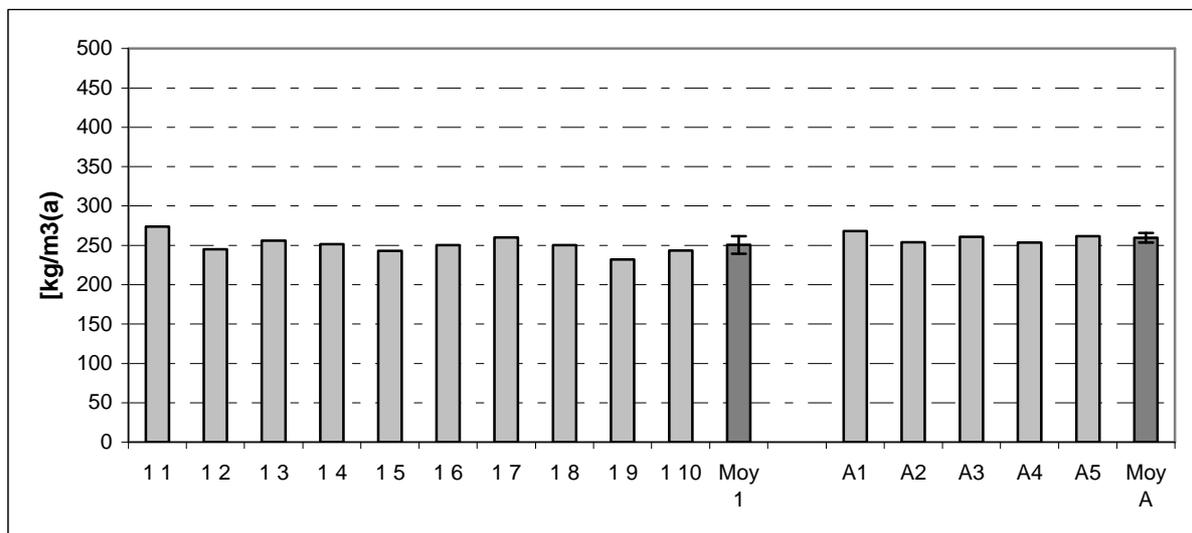
### Méthode « seaux » :

Seules sont représentées ici les densités apparentes brutes et anhydres des groupes d'échantillons 1 et A (voir graphique 9 et 10). Ce sont ceux qui ont les valeurs moyennes les plus élevées, et les écarts-types les plus importants.

En comparant les graphiques 9 et 10, on peut dire que les densités apparentes brutes relevées par la méthode « seaux » sont beaucoup plus hétérogènes que les densités apparentes anhydres.



**Graphique 9 :** Densités apparentes brutes des échantillons des groupes 1 et A, issus du tas n°1.



**Graphique 10 :** Densités apparentes anhydres des échantillons des groupes 1 et A, issus du tas n°1.

Les densités apparentes brutes et anhydres moyennes de tous les groupes d'échantillons sont répertoriées dans le tableau 8.

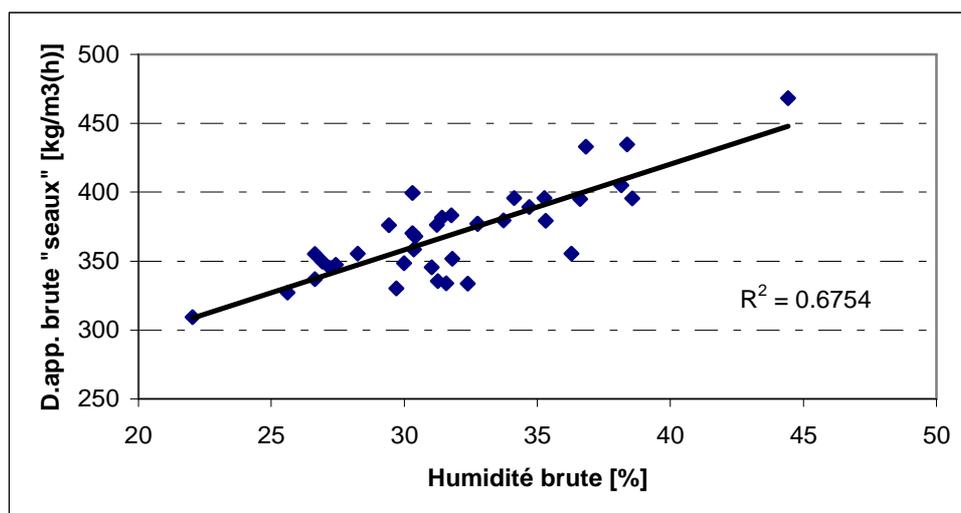
**Tableau 8 :** Densités apparentes brutes et anhydres moyennes des différents groupes d'échantillons.

Groupes	D. app. brutes moyennes [kg/m <sup>3</sup> <sub>(h)</sub> ]	D. app. anhydres moyennes [kg/m <sup>3</sup> <sub>(a)</sub> ]
1	391	251
A	396	260
2	352	243
B	382	266
Chênes	347	254
Lullier	347	242

Au vu du tableau 8, on remarque que les densités apparentes brutes et anhydres mesurées avec la méthode « seaux » sont très élevées.

Une erreur sur le tassement des plaquettes dans les seaux, induite par des différences de mode de remplissage des seaux, a été mesurée ; elle est de +/- 6.5%. Une erreur sur le taux de remplissage des seaux aurait du être mesurée.

Le graphique 11 montre une corrélation entre densité apparente brute et humidité brute (R = 0.822)

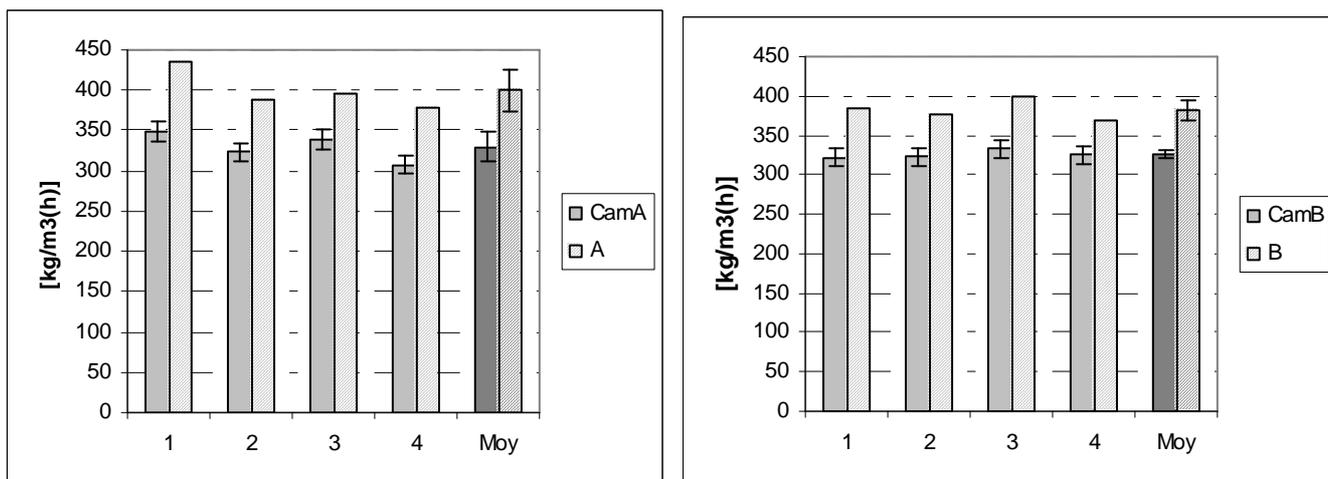


**Graphique 11 :** Corrélation entre la densité apparente brute mesurée par la méthode « seaux » et l'humidité brute.

#### Comparaison des deux méthodes :

Au vu des résultats concernant les densités apparentes brute et anhydre mesurées avec la méthode « camions » et avec la méthode « seaux », une brève comparaison s'avère nécessaire.

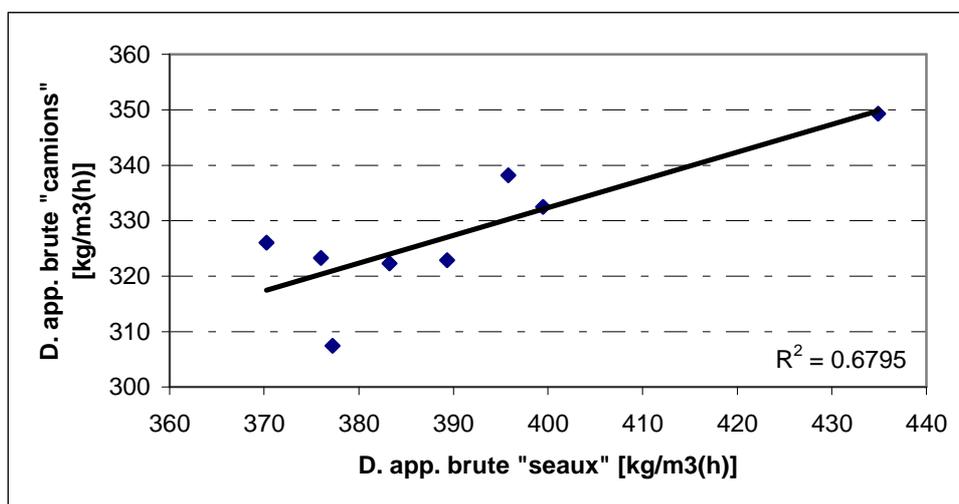
En effet, les densités apparentes brutes mesurées par la méthode « seaux » sont systématiquement plus élevées que celles mesurées par la méthode « camions » (voir graphiques 12 et 13), d'une proportion moyenne de 17.5% pour le groupe A et de 14.7% pour le groupe B. Bien que l'erreur sur les mesures par la méthode « camion » ait été estimée à +/- 3.5%, et celle par la méthode « seaux » à +/- 6.5%, les différences de 17.5% et de 14.7% ne sont pas couvertes. Resterait l'erreur sur le taux de remplissage des seaux, qui n'a pas été mesurée, qui pourrait expliquer la différence restante entre les mesures. Cependant, les volumes de plaquettes contenus dans les seaux ne peuvent être qu'abaissés, ce qui augmenterait encore la différence de résultats entre les deux méthodes de mesure.



**Graphique 12 et 13 :** Densités apparentes brutes des plaquettes de Jussy, mesurées par la méthode « camions » et par la méthode « seaux ». (L'erreur sur les mesures est représentée sur les données individuelles, l'écart types entre données sur la moyenne).

Pour aller plus loin, le graphique 14 montre que les densités apparentes brutes des groupes A et B mesurées avec les méthodes « seaux » et « camions » sont corrélées ( $R = 0.824$ ). Notons cependant que si le point isolé à droite en haut (représentant A1) était ôté, la corrélation en serait affaiblie ( $R = 0.661$ ). Le rapport existant entre les densités apparentes brutes établies par les méthodes « seaux » et « camions » vaut 1.19, avec un écart-type de 0.036. Soit :

$$D. \text{ app. brute } \ll \text{ camions } \gg = D. \text{ app. brute } \ll \text{ seaux } \gg / 1.19$$



**Graphique 14 :** Corrélation entre les densités apparentes brutes mesurées avec deux méthodes différentes (méthodes « seaux » et « camions »).

Puisqu'en conditions réelles ce sont les densités apparentes brutes des plaquettes contenues dans les bennes de livraison qui sont les plus importantes, toutes les discussions concernant les densités apparentes se feront désormais sur les résultats de la méthode « camions ».

## 4.4. Discussion

Avec des densités apparentes brutes respectives de  $329.5 \text{ kg/m}^3_{(h)}$  et de  $326 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ , les deux campagnes d'échantillonnage donnent des résultats très proches. La densité apparente brute moyenne des plaquettes de bois de Jussy est donc de  $328 \pm 11.5 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ . Ce résultat, bien que légèrement inférieur, correspond à la valeur prédite par la littérature (voir chapitre 4.1.), qui est de  $344 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ . (*Remarque* : il faut savoir que la densité anhydre utilisée pour calculer cette densité brute est également plus élevée ( $232 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ )(*Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992*)).

Cependant, dans la discussion de ces résultats, il faut tenir compte du fait que les bennes de livraison ne sont pas remplies de la même manière en situation expérimentale qu'en situation réelle. Les images 7 et 8 illustrent bien cette différence. En situation expérimentale, les camions sont remplis à raz bord, afin de rapprocher le plus possible le volume des plaquettes contenues des  $29.4 \text{ m}^3$  de la benne. L'erreur sur le remplissage a tout de même été estimée à  $\pm 1 \text{ m}^3$ , ce qui équivaut à  $\pm 3.5\%$  du volume.

D'après les images 7 et 8, il a été estimé qu'en situation réelle, le volume des plaquettes est inférieur de 1 à  $2 \text{ m}^3$  au volume expérimental. De ce fait, le volume de plaquettes livré devrait être ajusté à  $28 \text{ m}^3$ . Afin de livrer un volume de plaquettes constant, il serait judicieux de définir un mode de remplissage applicable à chaque livraison.



**Images 7 et 8 :** Bennes de livraisons remplies de manière expérimentale et en situation réelle.

Concernant la densité apparente anhydre des plaquettes, les mesures effectuées ici donnent également des résultats concluants. La série de mesures CamA indique une densité apparente anhydre moyenne de  $214 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ . La série de mesures CamB donne des résultats 5% plus élevés, soit de  $227 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ . La densité apparente anhydre moyenne des plaquettes de Jussy s'établit alors à  $220 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ .

La différence entre les moyennes des densités apparentes anhydres de CamA et de CamB est plus importante que celle entre les moyennes des densités apparentes brutes. Ceci serait dû au facteur humidité ; l'humidité brute étant plus élevée de 13% dans le cas de la série CamA, la densité apparente anhydre de cette série sera donc abaissée de manière proportionnelle (la densité apparente anhydre ayant été calculée à partir de la densité apparente brute et de l'humidité brute). Ce résultat paraît cependant quelque peu étonnant, puisqu'on se serait plutôt attendu à ce que les densités apparentes anhydres soient plus stables que les densités apparentes brutes (les plaquettes étant constituées des mêmes essences de base et traitées de la même manière, ce qui suppose une variabilité induite par le facteur humidité uniquement). Cette différence de densité anhydre entre les groupes A et B pourrait s'expliquer par les

erreurs posées sur les mesures des densités apparentes brutes, alors reportées sur le calcul des densités apparentes anhydres.

Concernant les différences de densités apparentes anhydre à l'intérieur des groupes, la variabilité de l'humidité n'étant pas reportée sur la densité apparente anhydre, les résultats entre échantillons pour cette grandeur sont plus lisses que dans le cas de la densité apparente brute (comparer les graphiques 7 et 8). Ce phénomène est appuyé par le fait que les écarts types sont plus faibles pour la densité apparente anhydre que pour la densité apparente brute.

A titre indicatif, les densités apparentes mesurées par la méthode « seaux » montrent les mêmes tendances. Un rapport moyen de 1.19 a également été observé entre densités apparentes brutes mesurées avec les différentes méthodes (« seaux » et « camions »). Ce chiffre pourrait être utilisé pour définir la densité apparente brute de plaquettes de bois par une méthode simple. Cependant, la corrélation entre les résultats issus de ces deux différentes méthodes n'étant pas solide (voir graphique 14 et coefficients de corrélation), des tests devraient être conduits afin de confirmer ce rapport. De plus, une corrélation a été établie entre densité apparente brute et humidité brute (voir graphique 11).

## 4.5. Conclusion

L'étude des densités apparentes brutes et anhydres des plaquettes de bois genevoises a montré que, avec une valeur moyenne de  $328 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ , la densité apparente brute est proche des valeurs de la littérature ( $344 \text{ kg/m}^3_{(h)}$ ). De même pour la densité apparente anhydre ( $220 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ ), qui est légèrement inférieure à la valeur donnée par la littérature ( $232 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ , voir tableau 7). Notons que la densité apparente anhydre mesurée pour les plaquettes de Jussy (GE) est très proche de celle mesurée sur les plaquettes de bois de Versoix (GE) en 2002 ( $218 \text{ kg/m}^3_{(a)}$ ).

Il a également été montré que la densité apparente brute et l'humidité brute sont corrélées (voir graphique 11); la variabilité de l'humidité augmente la variabilité de la densité apparente brute.

Du point de vue pratique, le volume de plaquettes livrées estimé devrait être abaissé à  $28 \text{ m}^3$ , et un protocole de remplissage des bennes devrait être appliqué.

Il serait également envisageable de connaître la densité apparente brute de plaquettes de bois en utilisant la méthode « seaux », facilement applicable, en divisant le résultat obtenu par 1.19 (rapport établi entre densités apparentes mesurées avec les méthodes « seaux » et « camions »). Il serait néanmoins nécessaire de consolider ce chiffre par des mesures supplémentaires.

## 5. Pouvoir calorifique

### 5.1. Connaissances actuelles

Le pouvoir calorifique d'un échantillon de bois représente la quantité de chaleur dégagée par cet échantillon lors de la combustion. Il se mesure en MJ/kg ou en kWh/kg. Sont différenciés les pouvoirs calorifiques supérieur (PCS) et inférieur (PCI), définis au chapitre 1.1.

Le  $PCS_{(a)}$  se mesure par calorimétrie sur de la matière anhydre. Le  $PCI_{(a)}$  et le  $PCI_{(h)}$  en découlent ; ils se calculent ainsi :

$$PCI_{(a)} [MJ/kg_{(a)}] = PCS_{(a)} - \text{Chaleur latente d'évaporation}$$

$$PCI_{(h)} [MJ/kg_{(h)}] = [PCS_{(a)} * (1-(w_{(h)}/100))] - [2.447 * w_{(h)}/100] - [(h/(100*2)) * (18.02 * 2.447 * (1-w_{(h)}/100))]$$

Avec : Chaleur latente d'évaporation =  $m_{(eau\ condensée)} * \text{chaleur latente d'évaporation de l'eau}$

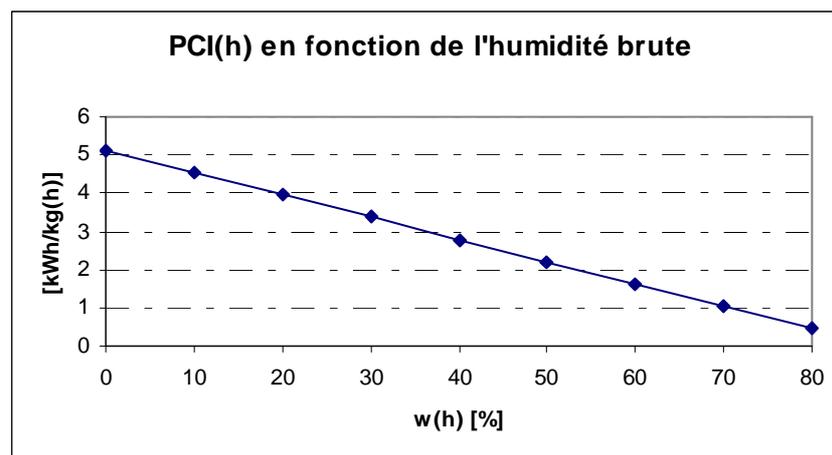
Chaleur latente d'évaporation de l'eau à 23 C° = 2.447 J/kg

w : humidité du bois ( $w_{(a)}$  : sur la masse anhydre,  $w_{(h)}$  : sur la masse humide )

h : contenu en hydrogène (= 6% de la masse)

18.02 g/mol : masse molaire de l'eau

Le calcul du  $PCI_{(h)}$ , qui sera plus spécialement discuté dans ce rapport car représentant mieux la réalité, est donné par la soustraction de l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau contenue dans le bois (2<sup>ème</sup> accolade) et de l'énergie nécessaire à la libération des molécules d'eau du bois (3<sup>ème</sup> accolade) au  $PCS_{(h)}$  (1<sup>ère</sup> accolade). De ce fait, il est aisé de comprendre pourquoi plus un bois est humide, plus son  $PCI_{(h)}$  sera faible. Le graphique 15 illustre le phénomène.



Graphique 15 : Décroissance du  $PCI_{(h)}$  en fonction de l'humidité brute.

Le  $PCS_{(a)}$  du chêne, essence constitutive principale des plaquettes de bois de Jussy, donné par la littérature (*base de données BIOBIB*) est de 19.99 MJ/kg<sub>(a)</sub>. Un  $PCS_{(a)}$  pour les plaquettes de chêne est également donné : 19.36 MJ/kg<sub>(a)</sub>. Le  $PCS_{(a)}$  moyen des échantillons analysés dans cette étude devrait alors avoisiner cette dernière valeur. Le  $PCS_{(a)}$  de l'acacia n'étant pas disponible sur cette base de données, il ne sera pas possible de prendre en compte son influence.

## 5.2. Matériel et méthode

Le PCS<sub>(a)</sub> de tous les échantillons récoltés ont été mesurés par calorimétrie (1341 Oxygen Bomb Calorimeter, Parr).

Pour ce faire, des plaquettes anhydres de chaque échantillon ont été broyées finement. Des pastilles de 1 g environ ont été conçues à partir de ce broyat. Elles ont ensuite été pesées exactement avant d'être introduites dans la bombe calorimétrique (1108 Oxygen Combustion Bomb, Parr), où la combustion a lieu. La variation de température provoquée par la combustion est relevée. Cette valeur est directement utilisée pour calculer le PCS<sub>(a)</sub>.

## 5.3. Résultats

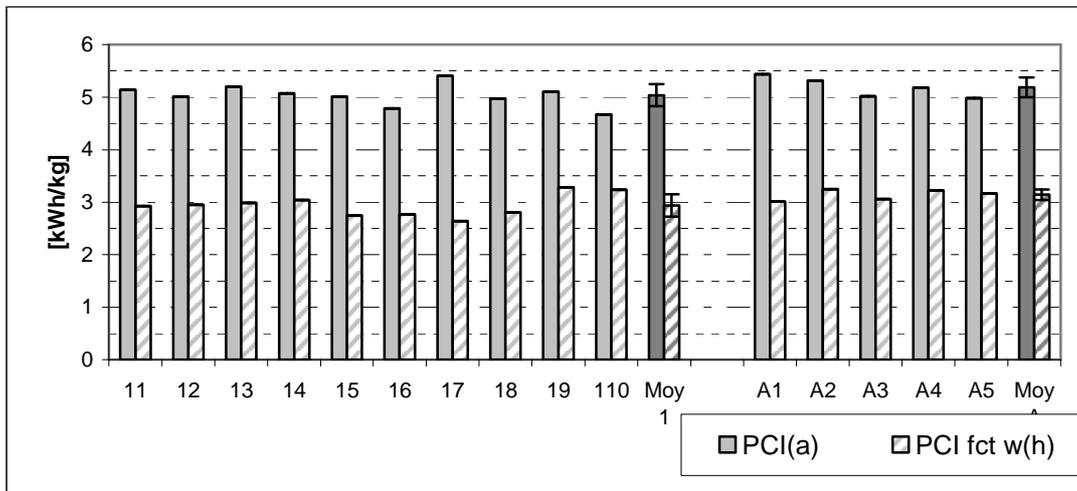
Les résultats par groupes d'échantillons sont présentés dans le tableau 9 sous forme de PCS<sub>(a)</sub> [MJ/kg<sub>(a)</sub>]. Les PCI<sub>(a)</sub> [kWh/kg<sub>(a)</sub>] et PCI<sub>(h)</sub> [kWh/kg<sub>(h)</sub>] associés y figurent également. Il est alors possible de constater que les valeurs de PCS<sub>(a)</sub> sont comprises entre 19.13 MJ/kg<sub>(a)</sub> (groupe 1) et 19.74 MJ/kg<sub>(a)</sub> (groupe A), avec un PCS<sub>(a)</sub> moyen de 19.5 MJ/kg<sub>(a)</sub>. La variation maximale de PCS<sub>(a)</sub> entre les groupes d'échantillons est donc de 3.1%.

**Tableau 9 :** PCS<sub>(a)</sub> mesuré, PCI<sub>(a)</sub> et PCI<sub>(h)</sub> calculés.

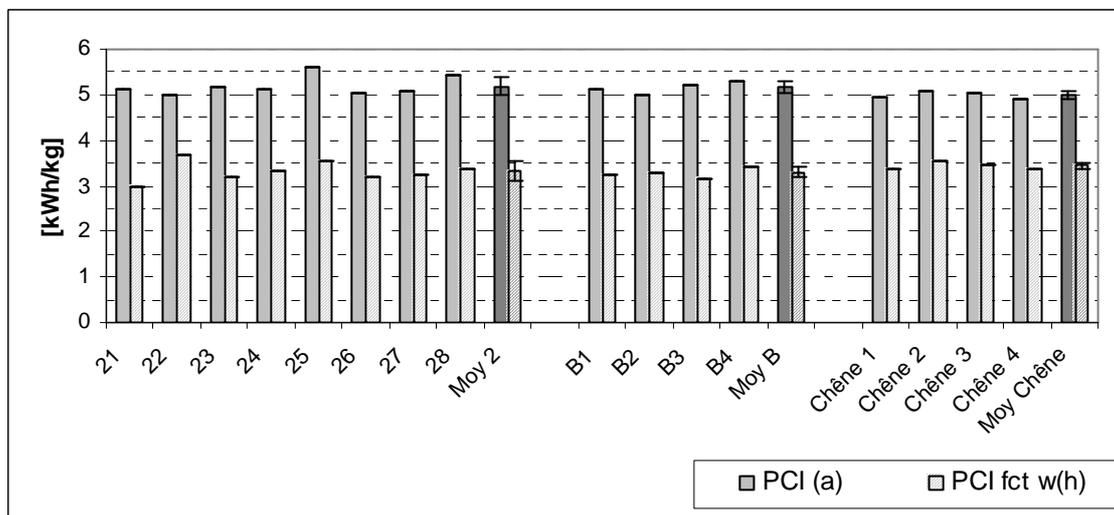
<b>Groupes d'échantillons</b>	<b>PCS<sub>(a)</sub> [MJ/kg<sub>(a)</sub>]</b>	<b>PCI<sub>(a)</sub> [kWh/kg<sub>(a)</sub>]</b>	<b>PCI<sub>(h)</sub> [kWh/kg<sub>(h)</sub>]</b>
<b>1</b>	19.13	5.04	2.94
<b>A</b>	19.74	5.19	3.14
<b>2</b>	19.68	5.19	3.31
<b>B</b>	19.71	5.17	3.29
<b>Chêne</b>	19.21	5.00	3.44
<b>Lullier</b>	19.45	5.11	3.32
<b>Moyenne</b>	<b>19.5</b>	<b>5.1</b>	<b>3.2</b>

Les graphiques 16, 17 et 18 illustrent les PCI<sub>(a)</sub> et les PCI<sub>(h)</sub> associés de tous les échantillons. On observe globalement peu de variations ; la variabilité la plus importante s'observe dans les groupes 1, 2 et Lullier (groupes possédant des écarts types de 0.22). Les différences de PCI<sub>(a)</sub> semblent être plus importantes à l'intérieur des groupes qu'entre les groupes.

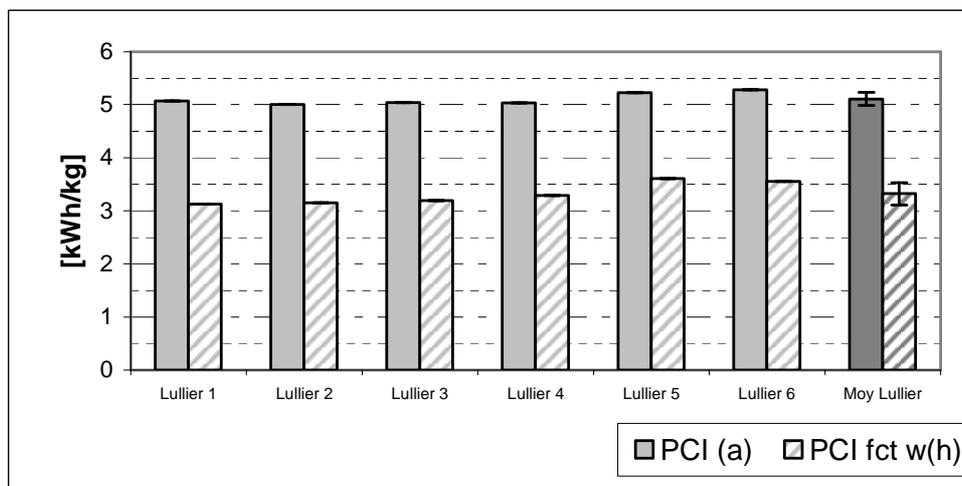
En effet, suite à un test statistique (ANOVA , test de F), les moyennes entre groupes ne sont pas significativement différentes en ce qui concerne les PCS<sub>(a)</sub> et PCI<sub>(a)</sub>. Par contre, lorsque l'humidité entre en jeu, les moyennes sont différentes ; c'est le cas des PCI<sub>(h)</sub>.



**Graphique 16 :**  $PCI_{(a)}$  et  $PCI_{(h)}$  des échantillons des groupes d'échantillons 1 et A, avec leurs écarts types respectifs sur les moyennes.



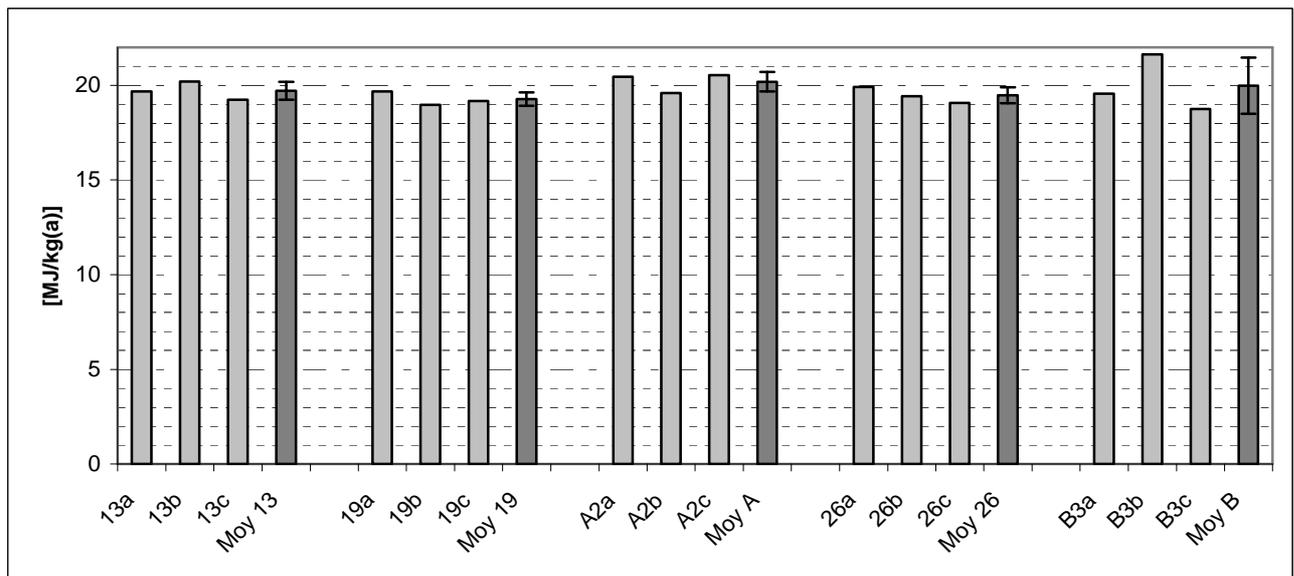
**Graphique 17 :**  $PCI_{(a)}$  et  $PCI_{(h)}$  des échantillons des groupes d'échantillons 2, B et Chêne, avec leurs écarts types respectifs sur les moyennes.



**Graphique 18 :**  $PCI_{(a)}$  et  $PCI_{(h)}$  des échantillons des groupes d'échantillons de Lullier, avec leurs écarts types respectifs sur les moyennes.

Au vu des graphiques 16, 17 et 18, on peut constater qu'un  $PCI_{(a)}$  élevé n'a pas forcément un  $PCI_{(h)}$  associé élevé. L'échantillon 1.7, par exemple, a le  $PCI_{(a)}$  le plus élevé, et le  $PCI_{(h)}$  le plus bas.

Afin de s'assurer de la justesse des mesures calorimétriques, une mesure par groupe d'échantillons a été tripliquée (1.3-1.9-A2-2.6-B3-Chêne2-Lullier3). Les erreurs se situent toutes entre 1.3 et 2.5%, sauf celle de B3, spécialement importante, qui est de 7.4%. Le graphique 19 montre une partie de ces résultats. L'erreur totale moyenne testée sur les mesures s'élève alors à 2.8%. Une partie de cette erreur provient de l'appareillage, dont les variations de mesures sont de 0.7%. L'autre partie de cette erreur peut provenir de l'inhomogénéité de la poudre de bois utilisée pour concevoir les pastilles.



**Graphique 19 :** Mesure de l'erreur sur les calorimétries. Les échantillons 1.3, 1.9, A2, 2.6, B3, Chêne2 et Lullier3 ont été tripliqués. Chêne2 et Lullier3 ne sont pas représentés ici.

## 5.4. Discussion

Le  $PCS_{(a)}$  moyen obtenu pour les plaquettes de bois de Jussy (19.5 MJ/kg<sub>(a)</sub>) correspond bien aux valeurs proposées par la littérature (*base de données BIOBIB*) (19.36 MJ/kg<sub>(a)</sub> pour les plaquettes de chêne). La légère différence pourrait provenir de la présence de plaquettes d'acacia mélangées à celles de chêne, dont le  $PCS_{(a)}$  théorique n'est pas donné par BIOBIB. Néanmoins, le  $PCS_{(a)}$  de l'acacia serait légèrement supérieur à celui du chêne (*ITEBE, 2004*), ce qui appuierait l'hypothèse précitée.

Le  $PCI_{(a)}$  moyen pour les même groupes de plaquettes est de 5.1 kWh/kg<sub>(a)</sub>. Le calcul du  $PCI_{(h)}$  nécessite la prise en compte de l'humidité brute. Celle-ci étant très variable entre échantillons, elle implique une variabilité non négligeable des  $PCI_{(h)}$ , qui représentent le pouvoir calorifique en situation réelle des plaquettes de bois. L'humidité brute est donc responsable d'une perte de qualité thermique des plaquettes.

## 5.5. Conclusion

Le  $PCS_{(a)}$  moyen de 19.5 MJ/kg<sub>(a)</sub> obtenu pour les plaquettes de bois de Jussy correspond bien aux valeurs proposées par la littérature (19.36 MJ/kg<sub>(a)</sub>). Les moyennes des groupes d'échantillons ne sont pas significativement différentes.

Le  $PCI_{(h)}$ , pouvoir calorifique réel des plaquettes, est variable selon les échantillons, puisque dépendant de l'humidité brute.

## 6. Contenu énergétique

### 6.1. Connaissances actuelles

Le contenu énergétique d'un volume de plaquettes se mesure en  $[MJ/m^3]$  ou en  $[kWh/m^3]$ . Cette grandeur sera discutée ici en  $[kWh/m^3]$ . Le contenu énergétique peut être donné soit sur masse anhydre (il expose ainsi la qualité du bois), soit sur masse brute (dont l'humidité brute masque la qualité intrinsèque du bois). Ils se calculent ainsi :

$$\text{CE anhydre } [kWh/m^3_{(a)}] = \text{Densité apparente anhydre } [kg/m^3_{(a)}] * \text{PCI}_{(a)} [kWh/kg_{(a)}]$$

$$\text{CE brut } [kWh/m^3_{(h)}] = \text{Densité apparente brute } [kg/m^3_{(h)}] * \text{PCI}_{(h)} [kWh/kg_{(h)}]$$

Le tableau 10 donne quelques valeurs de CE anhydres proposés par la littérature. Aucun chiffre sur le CE brut n'est présenté ici, car comme dit précédemment, cette grandeur dépend de l'humidité brute, qui est différente dans chaque cas de figure. Signalons tout de même que le CE brut des plaquettes de bois fabriquées à Versoix (GE) a été estimé à  $950 kWh/m^3_{(h)}$  (Xylon SA, 2002). De plus, pour une humidité brute de 32% (équivalente à l'humidité moyenne des groupes A et B), la littérature (*Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992*) donne un CE brut de  $1112 kWh/m^3_{(h)}$ .

**Tableau 10 :** Quelques valeurs de contenus énergétiques anhydres.

	CE anhydre $[kWh/m^3_{(a)}]$	
	Bois dur (hêtre)	Bois mixte
<b>ASEB, 1997</b>		1002
<b>Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992</b>	1188	

Nous nous attendons donc à rencontrer un CE anhydre d'environ  $1188 kWh/m^3_{(a)}$  et un CE brut proche de  $1111 kWh/m^3_{(h)}$  dans le cas des plaquettes de Jussy (GE).

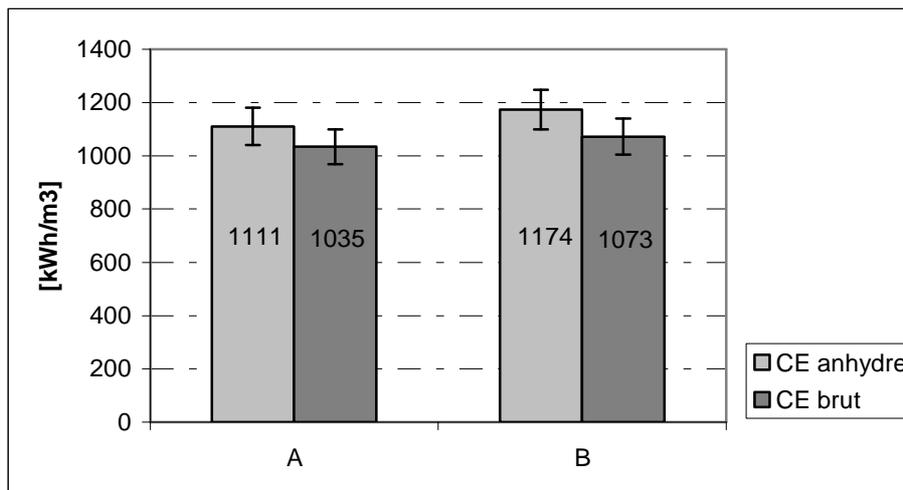
### 6.2. Résultats

Les contenus énergétiques anhydre et brut, qui figurent sur le graphique 20, ont été calculés à partir des données de densités apparentes anhydre et brute, ainsi que des  $PCI_{(a)}$  et  $PCI_{(h)}$  respectifs des groupes A et B présentés dans ce rapport.

Les CE anhydres des groupes A et B sont respectivement de  $1111 kWh/m^3_{(a)}$  et de  $1174 kWh/m^3_{(a)}$ , avec un CE anhydre moyen des plaquettes de Jussy de  $1142 kWh/m^3_{(a)}$  ; cette dernière valeur est légèrement inférieure à celle proposée dans le tableau 10. Concernant les CE bruts, ils sont de  $1035 kWh/m^3_{(h)}$  pour le groupe A et de  $1073 kWh/m^3_{(h)}$  pour le groupe B, avec un CE brut moyen des plaquettes de Jussy de  $1054 kWh/m^3_{(h)}$ . Ce résultat est à nouveau quelque peu inférieur à ceux proposés par la littérature (voir chapitre 6.1.)

Le CE anhydre varie de 5.5 % entre les groupes A et B, et le CE brut de 3.5 %.

L'erreur de +/- 6.3 % sur les valeurs de CE représente les erreurs cumulées posées sur les  $PCI$  (2.8 %) et sur les densités apparentes (3.5 %).



**Graphique 20 :** Contenus énergétiques anhydre et brut des groupes de plaquettes A et B. (L'erreur sur les mesures est représentée sur les données individuelles).

### 6.3. Discussion

Les CE anhydre et brut moyen des plaquettes de Jussy sont légèrement inférieurs à ceux proposés par la littérature (*Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992*). Ceci est dû au fait que les densités apparentes anhydre et brute, ainsi que les  $PCI_{(a)}$  et  $PCI_{(h)}$  utilisés pour les calculs des CE diffèrent quelque peu entre les études. Les résultats restent néanmoins proches. Les CE anhydre et brut des deux campagnes de mesures (groupes A et B) sont également proches ; les différences respectives de 5.5 % et 3.5 % sont couvertes par l'erreur sur les mesures estimée à 6.3 %.

A titre d'exemple, en abaissant l'humidité brute des plaquettes à 20%, on obtient une augmentation du CE de 3.2 %. Le tableau 11 montre cette différence.

**Tableau 11 :** Contenu énergétique des plaquettes en fonction de l'humidité.

Groupes d'échantillons	CE anhydre [kWh/m <sup>3</sup> <sub>(a)</sub> ]	CE brut [kWh/m <sup>3</sup> <sub>(h)</sub> ]	CE (h = 20%) [kWh/m <sup>3</sup> <sub>(h)</sub> ]	Différence CE brut/CE(20%)
<b>A</b>	1111	1035	1070	3.3 %
<b>B</b>	1174	1073	1107	3.1 %
<b>Moyenne</b>	<b>1142</b>	<b>1054</b>	<b>1089</b>	<b>3.2 %</b>

### 6.4. Conclusion

Bien que légèrement inférieurs aux valeurs proposées par la littérature, les contenus énergétiques anhydre et brut mesurés dans cette étude, avec des valeurs moyennes respectives de 1142 kWh/m<sup>3</sup><sub>(a)</sub> et 1054 kWh/m<sup>3</sup><sub>(h)</sub> demeurent bons.

A titre d'exemple, avec une humidité brute abaissée à 20%, le CE brut des plaquettes augmente de 3.2 %. Il serait donc intéressant de travailler sur le facteur humidité pour augmenter la qualité du bois-énergie genevois ; la chaleur produite par combustion serait ainsi augmentée.

## 7. Conclusion générale

Suite aux différentes mesures effectuées sur les plaquettes de bois échantillonnées sur le site de production et de stockage de Jussy (GE), il est possible d'affirmer que la qualité des plaquettes de bois-énergie produites à Jussy est bonne. Le tableau 12 résume les caractéristiques des plaquettes étudiées.

Cependant, il a été démontré que l'humidité est le facteur principal responsable de la variabilité du contenu énergétique. En effet, comme l'humidité influence de manière non négligeable le  $PCI_{(h)}$  et la densité apparente brute, grandeurs utilisées dans le calcul du contenu énergétique, sa variabilité se reporte donc sur cette dernière grandeur. Plus l'humidité est élevée, plus le contenu énergétique est faible ; ceci cependant dans une moindre mesure puisque le  $PCI_{(h)}$  augmente et la densité apparente diminue avec la diminution de l'humidité.

**Tableau 12 :** Caractéristiques moyennes des plaquettes de bois de Jussy. Ces chiffres proviennent des données récoltées suite à l'analyse des groupes d'échantillons A et B uniquement, groupes représentatifs des livraisons.

Caractéristiques des plaquettes	Données anhydres	Données de la littérature	Sur matière brute	Données de la littérature
<b>Humidité [%]</b>	48.1	25-150*	<b>32.4</b>	<b>20-60*</b>
<b>Densité apparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>	220	232**	<b>328</b>	<b>344***</b>
<b>PCI [kWh/kg]</b>	5.18	5.12**	<b>3.22</b>	<b>3.23***</b>
<b>Contenu énergétique [kWh/m<sup>3</sup>]</b>	1142	1188**	<b>1054</b>	<b>1111***</b>

\* Nussbaumer T., 2005-2006

\*\* Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992 (page 100) ; valeurs anhydres.

\*\*\* Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992 (page 100) ; extrapolations pour une humidité brute de 32.4 %.

A titre d'exemple, si l'humidité brute était abaissée à 20 %, le contenu énergétique serait augmenté de 3.2 %. Au vu de la quantité de bois consommée, cette amélioration serait significative.

En effet, un contenu énergétique des plaquettes de bois plus élevé amènerait un avantage considérable, soit la combustion d'une quantité plus faible de bois pour une même quantité de chaleur produite. Le DT-DNP disposerait alors de plus de plaquette de bois pour satisfaire à la demande croissante de ce type de combustible.

Finalement, dans l'optique de facturer les plaquettes de bois énergie au m<sup>3</sup>, le volume livré devrait être standardisé. Suite à certaines observations, le volume de plaquettes actuellement livré est estimé à 28 m<sup>3</sup> par camion.

## 8. Bibliographie

### Littérature :

Beck J., « *Valorisation des bois flottants s'accumulant aux retenues, cas du barrage de Verbois (GE) : caractérisation et étude des filières* », 2006.

Faessler J., « *Gestion des déchets verts dans le canton de Genève : choix technologiques, aspects énergétiques et impacts environnementaux* », 2001.

Nussbaumer T., « *Energie du bois* », Schweizerbau Dokumentation, 2002.

Nussbaumer T., « *Technische Energienutzung von Biomasse* », Vorlesung ETH Zürich WS, 2005-2006.

Sell J., Kropf F., « *Propriétés et caractéristiques des essences de bois* », Ed. Lignum, 1990.

« *Bois-énergie : le déchiquetage en forêt* », ADEME, 1998.

« *Approche technique et pratique d'un chauffage automatique au bois* », ASEB, 1997.

« *AQ chauffage au bois* », Energie-bois suisse, 2003.

« *Memento du bois-énergie 2004* », ITEBE 2004.

« *L'approvisionnement en bois énergie* », Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992.

« *L'offre de bois énergie de l'Etat de Genève* », Xylon SA, 2002.

### Personnes de contact :

Un grand merci à ces personnes pour leur collaboration, leur disponibilité et leur motivation :

- Baans Pieter, responsable de la chaudière de Lullier (DIP)
- Hartmeyer Eric, forestier au DT-DNP
- Parcino Thierry, forestier au DT-DNP
- Steinmann Philippe, ingénieur cantonal des forêts au DT-DNP
- Viquerat Pierre-Alain, assistant au CUEPE
- Yaggi Michel, forestier au DT-DNP

### Sites Internet :

- [www.cedotec.ch](http://www.cedotec.ch) (nov. 2006)
- BIOBIB, a data base for biofuels (<http://www.vt.tuwien.ac.at/Biobib/biobib.html>, fév. 2007)

## **9. Annexes**

## Annexe 1

### Humidité brute et humidité anhydre des plaquettes de Jussy (GE)

Nom échantillon	H humide [%]	H anhydre [%]
R chêne 1	36.3	56.9
R chêne 2	42.7	74.6
R chêne 3	22.6	29.2
R chêne 4	29.0	40.8
R acacia 5	22.1	28.3
<b>Moy Rondelles</b>	<b>30.5</b>	<b>46.0</b>
1 1	36.8	58.3
1 2	35.3	54.6
1 3	35.3	54.5
1 4	33.7	50.9
1 5	38.6	62.8
1 6	36.6	57.7
1 7	44.4	79.9
1 8	38.2	61.7
1 9	29.7	42.2
1 10	25.6	34.4
<b>Moy 1</b>	<b>35.4</b>	<b>55.7</b>
A1	38.4	62.3
A2	34.7	53.1
A3	34.1	51.8
A4	32.7	48.7
A5	31.4	45.8
<b>Moy A</b>	<b>34.3</b>	<b>52.3</b>
2 1	36.3	56.9
2 2	22.0	28.3
2 3	32.8	48.7
2 4	30.4	43.7
2 5	31.3	45.5
2 6	31.2	45.4
2 7	30.4	43.6
2 8	31.6	46.1
<b>Moy 2</b>	<b>30.7</b>	<b>44.8</b>
B1	31.8	46.6
B2	29.4	41.7
B3	30.3	43.5
B4	30.3	43.5
<b>Moy B</b>	<b>30.5</b>	<b>43.8</b>
Chêne 1	27.4	37.8
Chêne 2	26.6	36.3
Chêne 3	26.6	36.3
Chêne 4	26.9	36.8
<b>Moy Chênes</b>	<b>26.9</b>	<b>36.8</b>
Lullier 1	32.4	47.9
Lullier 2	31.0	45.0
Lullier 3	31.8	46.6
Lullier 4	30.0	42.9
Lullier 5	27.2	37.4
Lullier 6	28.2	39.4
<b>Moy Lullier</b>	<b>30.1</b>	<b>43.2</b>

## Annexe 2

### Densité apparente brute et densité apparente anhydre des plaquettes de Jussy (GE)

Camions	D app brute [kg/m <sup>3</sup> (h)]	D app anhydre [kg/m <sup>3</sup> (a)]
CamA1	349.3	215.3
CamA2	322.9	210.8
CamA3	338.2	222.8
CamA4	307.5	206.8
<b>Moy CamA</b>	<b>329.5</b>	<b>214.2</b>
CamB1	322.3	219.9
CamB2	323.3	228.2
CamB3	332.5	231.7
CamB4	326.0	227.2
<b>Moy CamB</b>	<b>326.0</b>	<b>226.7</b>

## Annexe 3

**Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur sur masse anhydres, et pouvoir calorifique inférieur brut sur masse humide des plaquettes de Jussy (GE).**

Echantillons	PCS(a) [MJ/kg(a)]	PCI(a) [kWh/kg(a)]	PCI(h) [kWh/kg(h)]
11	19.41	5.39	2.92
12	19.07	5.30	2.95
13	19.71	5.48	2.98
14	19.08	5.30	3.04
15	18.94	5.26	2.74
16	18.46	5.13	2.77
17	20.37	5.66	2.64
18	19.13	5.31	2.80
19	19.27	5.35	3.28
110	17.82	4.95	3.23
<b>Moy 1</b>	<b>19.13</b>	<b>5.31</b>	<b>2.94</b>
A1	20.42	5.67	3.01
A2	20.19	5.61	3.25
A3	19.29	5.36	3.06
A4	19.76	5.49	3.22
A5	19.06	5.30	3.17
<b>Moy A</b>	<b>19.74</b>	<b>5.48</b>	<b>3.14</b>
21	19.49	5.41	2.97
22	19.04	5.29	3.69
23	19.60	5.44	3.19
24	19.50	5.42	3.31
25	20.93	5.81	3.53
26	19.47	5.41	3.18
27	19.15	5.32	3.24
28	20.24	5.62	3.38
<b>Moy 2</b>	<b>19.68</b>	<b>5.47</b>	<b>3.31</b>
B1	19.62	5.45	3.25
B2	19.13	5.31	3.29
B3	19.99	5.55	3.17
B4	20.12	5.59	3.43
<b>Moy B</b>	<b>19.71</b>	<b>5.48</b>	<b>3.29</b>
Chêne 1	19.01	5.28	3.38
Chêne 2	19.38	5.38	3.54
Chêne 3	19.20	5.33	3.46
Chêne 4	18.91	5.25	3.39
<b>Moy Chêne</b>	<b>19.21</b>	<b>5.34</b>	<b>3.44</b>
Lullier 1	19.14	5.32	3.13
Lullier 2	18.88	5.24	3.15
Lullier 3	19.05	5.29	3.19
Lullier 4	19.30	5.36	3.29
Lullier 5	20.08	5.58	3.61
Lullier 6	20.25	5.63	3.56
<b>Moy Lullier</b>	<b>19.45</b>	<b>5.40</b>	<b>3.32</b>

## **Annexe 4**

### **Spécifications techniques de la déchiqueteuse**

- Camion 4 essieux : 40 T
- Largeur déplacement : 2.5 m
- Largeur en travail : 3.5 m
- Puissance du moteur : 850 CV
- Diamètre du tambour : 1.40 m
- Poids du tambour : 4 T
- Rayon d'action de la grue : 8.5 m
- Diamètre des bois : jusqu'à 70 cm
- Ejection adaptable : pour bennes ou hangars
- Deux dimensions de plaquettes

Propriétaire : coopérative SODEFOR II, Président : M. Reichard (021 315 42 77)