

PROGRAMME RÉGIONAL POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE



PARTENAIRES POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE LA GUYANE

QUALIFICATION DES ESSENCES FORESTIÈRES DE GUYANE POUR UN USAGE BIOCOMBUSTIBLE

Rapport final

Réalisé par
Jacques Beauchêne et François PINTA,
Chercheurs CIRAD



Edité le 30 09 2011

Résumé exécutif

La qualification des bois-énergie de forêt de Guyane a été réalisée en répertoriant, échantillonnant et caractérisant les 50 premières essences en termes de volume de bois exploitable par hectare en forêt de Guyane.

Les essences ont été répertoriées par analyses des données des inventaires forestiers papetier des années 1970. Cette caractérisation correspond à près de 80% du volume de bois énergie disponible sur la bande côtière.

La caractérisation du bois biocombustible en Guyane a été réalisée sur 150 échantillons de bois. Les résultats obtenus ont permis de déterminer les valeurs moyennes par essences, et plus généralement de 80% de la ressource (cf. § 4).

Les principaux enseignements des résultats de caractérisation des bois peuvent être résumés comme suit :

La densité moyenne pondérée à 12 % des 50 essences les plus fréquentes de Guyane est de 0,806 ce qui est élevée, pour comparaison elle est bien plus dense que les bois de résineux alimentant habituellement les centrales à bois-énergie.

L'humidité moyenne des essences les plus fréquentes a été mesurée sur les arbres sur pied à 37%, ce qui est une valeur assez faible comparée à celle habituellement citée dans la bibliographie (40 à 45%). Signalons ici que l'humidité moyenne des bois verts utilisés pour nos essais de stockage de plaquettes a été mesurée de 40%. Les valeurs moyennes de densité du bois et humidité sur pied sont positifs pour l'utilisation de bois énergie à partir de la biomasse ligneuse de forêt de Guyane.

Les essais de durabilité naturelle réalisés sur l'échantillonnage représentatif montrent dans les conditions d'un essai très sévère en contact permanent avec le sol une dégradation moyenne pondérée de 13 % au bout de six mois. Une source d'humidité permanente comme le contact avec un sol forestier influence grandement la reprise d'humidité de petits échantillons de bois telles les plaquettes forestières. Cette reprise d'humidité stimule assez rapidement l'activité fongique notamment et dans un premier temps, sur les bois non durables et les aubiers. Cette dégradation fait à son tour croître l'humidité du bois.

L'augmentation d'humidité est néfaste pour le Pouvoir Calorifique Inférieur du biocombustible ainsi stocké. Il est donc essentiel à veiller à ce qu'elle ne puisse pas avoir lieu, en évitant un stockage exposé à des sources d'humidité permanentes.

Concernant les analyses minérales, le taux de cendres des bois de Guyane, mesuré en moyenne à 1 % de la matière sèche, est élevé comparativement aux autres bois dans le monde (communément compris entre 0,5 et 1%), et on observe une forte variabilité avec des valeurs extrêmes mesurées de 0,1% et 4%.

Parmi les résultats de la détermination de la composition minérale des bois, on retiendra que la teneur moyenne en silice est de 0.36% avec des valeurs extrêmes allant de 0 à 3.2% selon les échantillons. Les bois du genre *Licania* (qui font partie des gaulettes) ont le taux de silice le plus élevé, presque toujours compris entre 1 et 3,2%.

Les autres composés les plus présents sont le calcium (Ca) avec un taux moyen de 0.16% et le potassium (K) dont la teneur moyenne est 0.1%.

Les autres macroéléments sont peu présents : Na et Mg ont un taux moyen de 0.034% de la matière sèche tandis que la teneur en phosphore (P) est encore plus faible à 0.005%.

Le pouvoir calorifique moyen des échantillons de bois de Guyane est de 18,8 MJ/kg de bois anhydre, légèrement plus élevée (d'environ 2%) que la valeur moyenne généralement citée pour le bois (18.4 MJ/kg).

La détermination de la température de fusibilité des cendres a été réalisée sur dix échantillons d'espèces forestières représentatives de volumes disponibles importants, en mélange afin de l'évaluer pour le combustible tel qu'il pourra être pour les chaudières. Les résultats montrent une température d'écoulement des cendres comprise entre 1140 et 1500°C selon les échantillons. Les deux valeurs les plus basses ont été obtenues avec les échantillons de bois blancs seuls et en mélange avec des bois rouges.

L'étude expérimentale du stockage et de plaquettes forestières en silo nous permet les conclusions suivantes :

Nous avons pu observer une montée en température des dispositifs dès la mise en silo avec un maximum de 41 °C, toutefois cette augmentation de la température n'a pas été aussi importante que ce qui est mentionnée dans la bibliographie en région tempérée ou la température monte jusqu'à 70°C. L'hypothèse pour justifier ce résultat est que la fermentation se fait beaucoup plus rapidement qu'en région à climat tempéré. La montée en température serait donc dépendante de la durée de stockage des grumes avant la mise en plaquettes : plus elle sera longue (+ 2 mois) moins la montée en température sera importante.

Si l'on veut donc profiter de cette phase de monter en température pour sécher naturellement les plaquettes forestières en tas, il faut absolument réduire le temps entre l'abatage et le broyage.

Les mesures d'humidité en début et en fin d'essai nous montre que les plaquettes ont bien séchées malgré leur confinement, les bois denses et durables ont séchés un peu moins vite que les bois légers et non durables, partant de 40 % l'humidité moyenne sur brut au cœur des silos varie de 22 à 26 % après 6 mois de stockage.

Les pertes de matière sèche au cours de l'essai ont varié de 0,5% pour les bois rouge à 3,1% pour les bois blancs. On peut donc considérer dans une première approximation que cette perte n'excédera 3 % de la matière sèche après 6 mois d'essai pour un tas de plaquettes forestières abrité de bois de bois rouge – bois blancs en mélanges.

L'analyse de l'itinéraire technique de production et stockage de bois a permis une actualisation d'ensemble des évaluations de l'étude ONF/Cirad de 2007 pour les parcelles à vocation principale le bois énergie, et les parcelles en défriche agricole. Ces travaux se sont appuyés sur la consultation des professionnels et du gestionnaire forestier, et sur les résultats des études concomitantes soutenues par l'Ademe et le PRME : étude sur l'organisation de la récupération des bois de défriche agricole (Guyane Consult) et expérimentation en parcelles forestière à Saut Léodade de l'exploitation bois énergie (ONF).

Les résultats techniques et économiques d'ensemble font ressortir une évaluation des coûts du bois issus de parcelles forestières entre 55 et 81 €/tonne et les coûts issus de la conversion de forêt en surface agricole sont évalués entre 41 et 54€/tonne, hors coût d'organisation de la mobilisation (cf. étude Guyane Consult).

Le coût est fortement dépendant de la productivité annuelle des engins en parcelles, et de la distance de transport jusqu'à la centrale.

Plusieurs facteurs ont conduit à une augmentation sensible des coûts au cours des 5 dernières années parmi lesquels on retiendra :

- L'amélioration des pratiques en exploitation forestière qui serait liée à la mise en place de la certification et l'amélioration des traitements du personnel travaillant en forêt (davantage qualifiés).
- La prise en compte des coûts spécifiques du gestionnaire de la forêt pour les « parcelles bois énergie »
- Les nouvelles pratiques en forêt, qui découlent de la charte d'exploitation forestière à faible d'impact établie en 2009 en préparation de la certification. Il s'agit en particulier de la suspension des travaux de sortie des bois en cas de périodes de fortes précipitations, La prise en compte de l'augmentation des coûts des intrants et consommables habituels de l'activité d'exploitation forestière depuis 2007.

Parmi les possibilités de limitation des coûts, on notera :

- La réduction de la distance moyenne de transport du bois passe par l'implantation des centrales au plus près de la ressource forestière ; ce qui se traduit par l'allongement des lignes de raccordement au poste source du réseau EDF, qui correspond à de l'investissement à réaliser au démarrage du projet – contrairement au coût d'acheminement de la biomasse. En outre, il ne faudrait pas que cette localisation de la centrale plus en forêt ne freine l'utilisation des bois de défriche agricole qui s'en trouveraient probablement plus éloignés.
- La prise en compte du coût des pistes à créer spécifiquement pour l'exploitation du bois énergie, qui correspond à 5 à 8€/m³ ne pourrait-elle pas être supportée par des fonds provenant de l'UE comme pour la filière bois œuvre ?

Les deux **itinéraires techniques de stockage** du bois durant 6 mois (en saison des pluies) ont été comparés au plan technique et économique stockage du bois en grumes en extérieur, stockage en plaquettes forestières sur plateforme abritée. L'étude a permis d'évaluer les principaux atouts et inconvénients aux plans techniques et économiques (.

Il ressort que l'intérêt principal de l'itinéraire de stockage de plaquettes forestières est :

- d'améliorer ainsi la qualité du combustible tant en termes de :
 - o pouvoir calorifique avec une augmentation de près de 40% du PCI qui passe approximativement de 2,7 à 3,7 kWh/Kg de bois brut.
 - o Contenu énergétique : en considérant une perte de masse totale de 24%, le contenu énergétique (PCI x masse des plaquettes) est amélioré de 4%.
 - o Présence réduite de minéraux d'origine exogène (moins de terre mêlée à la biomasse) évitant d'augmenter inutilement la quantité de cendres (à gérer en sortie chaudière) et réduisant les quantités de mâchefer dans le foyer et la corrosion dans la centrale. Cet élément positif est lié à l'itinéraire envisagé qui prévoit l'utilisation de porteurs forestiers et au broyage en parcelle limitant la salissure des bois due à une traine sur de longues distances des troncs,
- de permettre un séchage naturel efficace : l'essai réalisé a permis de réduire l'humidité du bois de 40% à 25% (sur poids brut) en 6 mois tout en limitant la perte de matière à 2% de la masse sèche. On estime par ailleurs que le séchage naturel des plaquettes jusqu'à 25% d'humidité pourrait être réalisé en 3 mois, ce qui a été pris en compte dans l'évaluation économique.
- de régulariser le taux d'humidité, donc le PCI du combustible alimentant la chaudière tout au long de l'année.

Parmi les inconvénients du stockage en plaquettes forestières, on retiendra la gestion du risque incendie qui est vraisemblablement plus élevé en plaquettes de bois par rapport aux grumes du fait de l'échauffement du tas, et du stockage de bois en copeaux relativement sec.

Mais l'inconvénient majeur est de nature économique : ce mode de stockage nécessite un investissement très élevé en infrastructure (plateforme bétonnée et couverte par un hangar) qui augmente le coût du bois de 24€/T. Ce coût est principalement dû aux coûts d'infrastructures pour le stockage de plaquettes forestières sur sol bétonné abritées sous hangar. La solution du stockage en plaquette n'est donc pas recommandée sur longue durée.

Par contre, une solution intéressante pour améliorer le contenu énergétique du bois combustible serait de mettre en œuvre un système de ventilation d'air chaud à la base du silo de plaquettes forestières qui sert de stock tampon pour quelques jours de fonctionnement de la centrale.

L'itinéraire de stockage en grumes présente l'avantage d'être la pratique habituelle pour la filière bois œuvre qui stocke ainsi les essences de bois ayant une bonne durabilité naturelle dans les parcs à grumes des scieries.

Cependant, le bois énergie présente des spécificités : près de 10% du volume de bois est constitué d'essences à faible durabilité naturelle, d'une part, et de manière générale, l'aubier de chaque grume a une valeur aussi importante que le duramen pour l'usage énergétique. ce qui n'est pas le cas pour la filière bois œuvre. On cherchera donc tout particulièrement à réduire les pertes de matières liées aux attaques d'insectes et champignons en :

- cherchant à conserver les écorces sur les grumes,
- évitant le contact du sol (utilisation de grumes durables comme support) et en
- limitant la durée de stockage des grumes les plus sensibles à ces attaques : essences à faible durabilité naturelle, grumes à forte proportion d'aubier et grumes dont l'écorce est abimée ou enlevée sur une grande partie de la surface.

SOMMAIRE

1. Rappel des objectifs généraux et contenu de l'étude	9
2. Sélection des essences à tester	10
2.1. <i>Préambule</i>	10
2.2. <i>Résultats de la sélection</i>	10
2.3. <i>Conclusion</i>	11
3. Caractérisation des bois pour un usage en biocombustible	12
3.1. <i>Généralités</i>	12
3.2. <i>La densité du bois :</i>	12
3.2.1. Notions de base	12
3.2.2. Distribution des densités des bois de Guyane	13
3.2.3. Répartition de la densité du bois dans notre expérimentation	13
3.2.4. Conclusion	15
3.3. <i>Détermination de la densité apparente des plaquettes forestières</i>	15
3.4. <i>Taux d'humidité à l'état vert</i>	15
3.4.1. Notions de Base	15
3.4.2. Distributions des humidités des bois verts	16
3.4.3. Répartition des humidités du bois dans notre sélection	16
3.4.4. Conclusion	17
3.5. <i>Composition élémentaire, matières minérales, PCI du bois</i>	17
3.6. <i>Etude de la température de fusibilité des cendres</i>	20
3.6.1. Problématique	20
3.6.2. Mesures et résultats	20
3.6.4. Proposition de pistes de valorisation des cendres de bois en Guyane	Erreur ! Signet non défini.
3.6.5. Caractéristiques techniques des cendres de bois de Guyane	23
3.6.6. Réglementation	23
3.6.7. Voies de valorisation possibles	23
3.6.8. Conclusion	24
4. Etude du stockage de plaquettes forestières	25
4.1. <i>La durabilité naturelle vis-à-vis de champignons en essais sol</i>	25
4.1.1. Méthode utilisée	25
4.1.2. Résultats	26
4.1.3. Conclusion	27
4.2. <i>Evolution de l'humidité dans les plaquettes en décomposition</i>	28
4.2.1. Notion de base	28
4.2.2. Méthode utilisée	28
4.2.3. Résultats	28
4.2.4. Conclusion	29

5. Etude expérimentale du stockage de plaquettes forestières en silos	30
5.1. <i>Principe du dispositif mise en place</i>	30
5.2. <i>Récolte des bois et broyage</i>	30
5.3. <i>Fabrication des silos et mise en place des essais</i>	31
5.4. <i>Résultats</i>	32
5.4.1. <i>Suivi des températures</i>	33
5.4.2. <i>Suivi de l'humidité</i>	34
5.4.3. <i>Estimation de la perte de masse des silos</i>	36
5.4.4. <i>Détermination de la densité apparente des plaquettes séchées</i>	38
5.5. <i>Conclusion</i>	38
6. Etude technico-économique du stockage longue durée du bois énergie	40
6.1. <i>Description et caractéristiques principales des modes de stockage: grumes/plaquettes</i>	40
6.2. <i>Analyse comparative des modes de stockage.</i>	Erreur ! Signet non défini.
6.3. <i>Evaluation de l'impact du mode de stockage sur le bilan énergétique et les coûts du stockage</i>	43
7. Etude technico-économique de la mobilisation du bois énergie à partir des parcelles à vocation énergétique, ou à partir des défriches agricoles	46
7.1. <i>Description des itinéraires de mobilisation et stockage du bois énergie</i>	47
7.2. <i>Evaluation des coûts de mobilisation et stockage longue durée du combustible jusqu'à l'entrée chaudière.</i>	48
7.3. <i>Repères avec l'évolution des coûts filière bois œuvre</i>	49
7.4. <i>Evaluation des coûts pour les parcelles bois énergie</i>	49
7.5. <i>Evaluation des coûts pour la filière bois de défriche</i>	50
7.6. <i>Comparaison des coûts des itinéraires étudiés</i>	51
Références bibliographiques	52
<i>Annexe 1– TDR résumé du projet l'étude</i>	54
<i>Annexe 2 – Fiche récapitulative des études bois énergie 2010</i>	55
<i>Annexe 3.1– Compte rendu de la première réunion du comité de suivi de l'étude le 26 mai 2010</i>	57
<i>Annexe 3.2 – Compte rendu de la deuxième réunion du comité technique de suivi le 01 février 2011</i>	59
<i>Annexe 4 – Compte rendu de la réunion de restitution finale au comité technique de suivi le 19 octobre 2011</i>	61
<i>Annexe 5: Densités à 12 % d'humidité mesurée sur planchette</i>	63
<i>Annexe 6 : Densités Calculés à partir des Infradensités prélevées sur les arbres sur pied</i>	64
<i>Annexe 7 : Humidités sur brut prélevées sur les arbres sur pied</i>	65
<i>Annexe 8 : Tableau des Pertes de masse des essences retenues</i>	66
<i>Annexe 9 : Fiche « utilisation cendres de bois », Ch. Agri des Deux Sèvres - juin 2011 (6 pages))</i>	67
<i>Annexe 10 : Cendres : Résumé de l'étude Ademe intitulée « Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois » Novembre 2007.</i>	73
<i>Annexe 11: Problématique de l'usage des cendres en agriculture</i>	75

Introduction

Le Programme Régional pour la Maîtrise de l'Energie a confié au CIRAD la réalisation d'une étude intitulée « Qualification des bois de Guyane pour un usage combustible ». Ce rapport final présente les travaux réalisés et résultats obtenus, lesquels ont été présentés au comité technique de suivi à Cayenne le mercredi 19 octobre 2011.

Ce travail s'inscrit dans la stratégie du PRME d'appui au développement de la filière biomasse énergie en Guyane (cf. note de synthèse Ademe en Annexe 2 – Fiche récapitulative des études bois énergie 2010), ce qui nécessite de mieux connaître les caractéristiques de la ressource et les modalités de sa mobilisation.

Cette étude, réalisée sur la base d'un cahier des charges des producteurs d'énergie à partir de biomasse (Powéo, Endel et Voltalia) vise à apporter des informations pour permettre de mieux choisir les équipements et estimer contraintes et performances. Elle est complémentaire à deux études sur les modalités d'exploitation (collecte) de la ressource : l'une réalisée par l'ONF sur l'exploitation expérimentale du bois énergie de parcelles forestières, dont les résultats ont été présentés le 17 octobre 2011 et l'autre réalisée par Guyane Consult sur la valorisation de la défriche agricole.

1. Rappel des objectifs généraux et contenu de l'étude

L'étude vise à apporter des informations techniques et économiques sur le bois biocombustible pouvant être mobilisé pour alimenter des centrales électriques à bois en Guyane Française.

L'étude s'attachera à analyser une bonne représentativité des essences bois énergie les plus abondantes quantitativement en forêt guyanaise, suivant des modalités compatibles avec le principe d'exploitation durable suivi par le gestionnaire forestier, et dans des dimensions d'arbre suffisantes pour viser une économie réaliste de la filière énergétique.

Les 50 principales essences forestières à usage vocation bois énergie, représentant 80 % environ de la biomasse forestière extractible pour un usage énergie, ont été échantillonnées et caractérisées pour un usage comme combustible (PCI, taux de cendres, taux de silice, composition minérales,...).

La caractérisation de bois biocombustible porte sur :

- des mesures de taux d'humidité des bois sur pied en forêt pour un échantillon d'espèces suffisant pour être représentatif du bois énergie de la forêt,
- des essais de qualification des bois sur 150 échantillons de bois d'espèces forestières sélectionnées, aux laboratoires à Kourou et à Montpellier. La densité du bois, la durabilité naturelle vis-à-vis de champignons de pourriture molle, l'évolution de l'humidité dans les plaquettes en décomposition, taux de matières minérales, taux de silice, composition des cendres (principaux éléments), température de fusibilité des cendres sur dix échantillons de bois en mélanges (sur des groupes d'essences représentatifs), et l'analyse de composition élémentaire sur 150 échantillons, permettant de calculer le pouvoir énergétique.

Etude des différents itinéraires techniques pour les modalités « défrichage agricole » et « Bois énergie de parcelles forestières dédiées »

L'analyse des itinéraires techniques de mobilisation du bois combustible en défriche agricole et en exploitation de forêt s'appuie sur l'expertise CIRAD/ONF de l'étude PRME de 2007 et sur les résultats de l'expérimentation de l'ONF à Saut Léodade.

L'expérimentation spécifique sur le stockage de plaquettes forestières est réalisée en différentes conditions avec les étapes suivantes : identification des essences échantillonnées, mise en plaquettes chez l'industriel partenaire, réalisation des dispositifs au laboratoire de science du bois CIRAD de Kourou, suivi du comportement durant 6 mois, échantillonnages et pesées en fin d'expérimentation.

Les essais de stockage visent à répondre à une préoccupation importante des industriels porteurs de projets de centrales : Voltalia, Poweo, Endel (groupe GDF-Suez), Rewatt, etc. La sortie des bois de forêt ou de zones de conversion en terre agricole ne peut se faire dans de bonnes conditions qu'en absence de fortes pluies qui caractérisent près de 8 mois/an du climat guyanais. Il est donc important d'étudier les solutions possibles pour stocker le combustible durant 4 à 6 mois dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes.

L'étude comprend enfin une analyse technico-économique de la mobilisation du bois énergie en parcelle de défriche agricole ou en parcelle forestière à vocation énergétique, en se focalisant sur l'étape de stockage du combustible pour de futures centrales électriques. Cette partie vise à comparer la stockage de grumes avec le stockage de plaquette forestières, dans le cadre de deux itinéraires d'exploitation et de stockage de la biomasse sur longue période (jusqu'à 6 mois de janvier à juin) incluant la « grande saison des pluies ».

2. Sélection des essences à tester

2.1. Préambule

Pour mener à bien cette sélection, nous avons utilisés les résultats des **inventaires papetiers**, qui ont été récemment restaurés par l'ONF, nous nous sommes aussi appuyés sur les dispositifs expérimentaux permanents de GUYAFOR, le projet BRIDGE, ainsi que l'inventaire de COUNAMI.

Nous avons sélectionné les espèces les plus représentatives en volume sur les zones inventoriées qui couvrent de façon assez représentative la frange forestière côtière de la Guyane, qui est et sera utilisée pour la récolte du bois énergie.

Dans la présentation du projet nous avons proposé une sélection 150 espèces avec un seul essai par espèce pour décrire la structuration moyenne des différentes forêts dans cette étude. Il s'avère qu'au cours des comités de pilotage de l'étude, nous avons convenu qu'il serait préférable de travailler sur les **50 essences les plus représentatives en volume**, tout en adaptant le nombre d'essai à la représentativité de chaque essence. Les essences les plus fréquentes ont donc un échantillonnage plus grand.

Cette adaptation de l'échantillonnage prévu a pu se faire sur la plupart des propriétés mesurées. Toutefois, pour les mesures de dégradation (durabilité naturelle des espèces) en essai sol, mesures prévues sur les plaquettes de la xylothèque, nous avons fait une adaptation de l'échantillonnage à la diversité spécifique de la xylothèque.

2.2. Résultats de la sélection

Suite au travail de l'ONF Guyane sur les grands inventaires papetiers, nous avons sélectionné les cinquante essences les plus importantes en volume sur les inventaires (*Tableau 1*). Ensuite, à partir des bases de données des dispositifs permanents de GUYAFOR, de l'inventaire de COUNAMI et du projet BRIDGE (<http://www.ecofog.gf/Bridge/indexfr.html>) nous avons retenu un groupe d'espèces par essence en essayant d'extraire l'espèce la plus dominante du groupe. Opération souvent difficile puisqu'une peut-être relativement présente dans une forêt et absente d'une autre.

Toutefois, le résultat semble relativement homogène à l'intérieur de chaque essence, tout au moins du point des propriétés du bois, nous le verrons par la suite.

Tableau 1 : Sélection des 50 essences les plus fréquentes

	Nom papetier ou autre Nom commun	Sélection espèces en m ³ (la première est la plus fréquente)	Volumes inventoriés	Fréquence	Fréquence cumulée
1	Bioudou/ Wapa	<i>Eperua falcata</i> , <i>Eperua spp.</i>	61007	17,46%	17,5%
2	Baïkaaki/ Maho noir	<i>Eschweilera coriacea</i> , <i>E. sagotiana</i> , <i>E. spp.</i>	32806	9,39%	26,8%
3	Gaulette/ Koko	<i>Licania membranacea</i> , <i>L.alba</i> , <i>L.spp.</i>	29717	8,50%	35,4%
4	Iebi loabi/Maho rouge	<i>Lecythis idatimon</i> , <i>Lecythis spp.</i>	19882	5,69%	41,0%
5	Angélique	<i>Dicorynia guianensis</i>	12702	3,64%	44,7%
6	weti loabi	<i>Lecythis corrugata</i> , <i>Lecythis spp.</i>	7788	2,23%	46,9%
7	Bakouman	<i>Micropholis guyanensis</i> , <i>M. spp.</i>	5622	1,61%	48,5%
8	Balata franc	<i>Manilkara bidentata</i> , <i>M. spp.</i>	5527	1,58%	50,1%
9	Goupi	<i>Goupia glabra</i>	4992	1,43%	51,5%
10	Sabana mataaki/Manil	<i>Symphonia globulifer</i> , <i>S.sp1</i>	4755	1,36%	52,9%
11	Niamboka	<i>Pouteria guianensi</i> , <i>P. spp.</i>	4160	1,19%	54,1%
12	Ouéko	<i>Inga huberii</i> , <i>I. alba</i> , <i>I. spp.</i>	4131	1,18%	55,3%
13	Balata pomme	<i>Chrysophyllum sanguinolenta</i>	4052	1,16%	56,4%
14	Moni/ Encens	<i>Protium decandrum</i> , <i>P. opacum</i> , <i>P. spp.</i>	3884	1,11%	57,5%

15	Akoinsiba	<i>Pouteria melanopod, P. spp.</i>	3592	1,03%	58,6%
16	Bounaati/Wacapou	<i>Vouacapoua americana</i>	3310	0,95%	59,5%
17	Gonfolo kouali	<i>Qualea rosea, Q. spp.</i>	3286	0,94%	60,4%
18	Kobé	<i>Sterculia prurien, S. spp.</i>	3045	0,87%	61,3%
19	Grignon franc	<i>Sextonia rubra</i>	2723	0,78%	62,1%
20	Inguipipa	<i>Couratari multiflora, C. spp.</i>	2676	0,77%	62,9%
21	Bofo oudou	<i>Sacoglottis guianensis</i>	2589	0,74%	63,6%
22	Bougou bougou	<i>Swartzia polyphylla</i> (Volume surévalué arbre cannelé)	2563	0,73%	64,3%
23	Tossopassa	<i>Iryanthera sagotiana, I. hostmanii</i>	2558	0,73%	65,1%
24	Boco	<i>Bocoa prouacensi, B. spp.</i>	2298	0,66%	65,7%
25	Pepeboiti	<i>Chrysophyllum prieurii, C. spp.</i>	2102	0,60%	66,3%
26	Bois flèche	<i>Mouriri crassifolia, M. spp.</i>	1982	0,57%	66,9%
27	Bouchi moulomba / Yayamadou montagne	<i>Virola michelii, V. spp.</i>	1976	0,57%	67,5%
28	Tamalin	<i>Abarema jupunba</i>	1945	0,56%	68,0%
29	Neko oudou	<i>Alexa wachenheimii ou Ormosia coutinho, O. spp.</i>	1868	0,53%	68,6%
30	Dodomissinga	<i>Parkia nitida, P. spp.</i>	1862	0,53%	69,1%
31	Papaati/Amarante	<i>Peltogyne venos, P. paniculata</i>	1834	0,52%	69,6%
32	Bofom peto	<i>Tapura capitulifer, T. spp.</i>	1833	0,52%	70,1%
33	Carapa	<i>Carapa procera, C. guianensis</i>	1826	0,52%	70,7%
34	Sabana gouegoue/ Moutouchi	<i>Pterocarpus officinalis, P. spp.</i>	1815	0,52%	71,2%
35	Diaguidia	<i>Tachigalii melinonii, T. spp.</i>	1802	0,52%	71,7%
36	Anangossi	<i>Terminalia amazoni, T. spp.</i>	1758	0,50%	72,2%
37	Weti koko	<i>Drypetes variabilis</i>	1692	0,48%	72,7%
38	Balata blanc	<i>Micropholis cayennensis, M. spp.</i>	1684	0,48%	73,2%
39	Fongouti koko	<i>Parinari campestris, P. spp.</i>	1677	0,48%	73,6%
40	Alimiao	<i>Pseudopitadenia suaveolens, P. psyllostachia</i>	1675	0,48%	74,1%
41	Agougagui/Chawari	<i>Caryocar glabrum, C. spp.</i>	1648	0,47%	74,6%
42	Pikin panga	<i>Crudia aromatica</i>	1647	0,47%	75,1%
43	Gueli kiabici/ Saint- Martin Jaune	<i>Hymenolobium flavum, H. spp.</i>	1641	0,47%	75,5%
44	Palioudou/Gonfolo gris	<i>Ruizterania albiflora</i>	1627	0,47%	76,0%
45	Moulomba/ Yayamadou marécage	<i>Virola surinamensis</i>	1594	0,46%	76,5%
46	Bouchi mango	<i>Tovomita choisyana, T.spp.</i>	1540	0,44%	76,9%
47	Lebi kiabici/ Saint-Martin rouge	<i>Andira coriacea, A. spp., Ormosia coutinhoi</i>	1531	0,44%	77,3%
48	Lebi ouéko	<i>Inga sertulifera, Inga alba, I. spp.</i>	1509	0,43%	77,8%
49	Mongo gouegoue	<i>Swartzia benthamiana, S. spp.</i>	1497	0,43%	78,2%
50	Taapoutiki	<i>Dendrobangia boliviana</i>	1487	0,43%	78,6%

2.3. Conclusion

Cette sélection de 50 essences nous permet de décrire 78,6 % du volume de bois présent sur la frange côtière de Guyane. Evidemment, localement, au niveau d'une parcelle de 1 ha, par exemple, il y a une forte variabilité de la diversité spécifique, mais dans l'ensemble ce cortège d'essences décrit assez bien la diversité spécifique pour un usage en bois énergie.

3. Caractérisation des bois pour un usage en biocombustible

3.1. Généralités

Comme il a été précisé précédemment, les propriétés que nous avons mesurées intéressent essentiellement l'usage en bois énergie, elles doivent permettre de répondre aux questions qui concernent le stockage et la combustion du bois prévu pour cet usage.

Deux aspects sont à considérer dans l'utilisation du bois comme biocombustible : son potentiel thermique définit par son pouvoir calorifique et sa minéralisation qui induit des contraintes lors de sa combustion.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la chaleur que peut dégager la combustion complète d'une unité de combustible. On définit deux pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI ou Hi), mesuré en conservant l'eau à l'état vapeur,
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS ou Hs), mesuré après avoir récupéré la chaleur de condensation de l'eau.

Trois caractéristiques principales influencent le Pouvoir Calorifique Inférieur du bois : la densité du bois (abordée au paragraphe 3.2), la densité de son conditionnement (paragraphe 3.3) et son humidité (paragraphe 3.4).

Les minéraux contenus dans le bois sont à l'origine de la production de cendres lors de la combustion. Leur composition élémentaire est étudiée au paragraphe 3.5.

La température de fusion des cendres est intéressante à connaître pour les chaudiéristes afin d'éviter les phénomènes de formation de bloc de minéraux dans le foyer. Nous déterminons cette donnée pour dix échantillons de bois de Guyane en mélange comme ils peuvent se retrouver dans les centrales à biomasse au paragraphe 0.

3.2. La densité du bois :

3.2.1. Notions de base

La densité du bois influence directement le Pouvoir Calorifique Inférieur du bois.

La densité du bois est le rapport entre la masse volumique du bois et celle de l'eau. La densité est forcément un nombre sans dimension. La masse volumique de l'eau valant 1 g/cm³ (à 3,98 °C). A cette température, la densité du bois a la même valeur numérique que sa masse volumique en g/cm³. Par exemple, il est équivalent de dire que la densité du chêne est de 0,78 ou que sa masse volumique est de 0,78 g/cm³ (ou kg/m³). Ceci donne lieu à des confusions fréquentes entre les concepts de masse volumique et de densité. À noter également comme source d'erreur supplémentaire, la traduction anglo-saxonne de masse volumique qui est density alors que la traduction de densité est specific gravity.

Dans notre étude nous avons utilisé à la fois la densité du bois *D12* à 12 % d'humidité et l'infradensité *ID*. La densité à 12 % d'humidité est une référence normative (NF B51-005) du matériau couramment utilisée et l'Infradensité la densité de référence du bois vert ou sur pied.

$$\text{On a } D12 = \frac{\text{Masse à 12 \%}}{\text{Volume à 12 \%}} \quad \text{et} \quad ID = \frac{\text{Masse anhydre}}{\text{Volume saturé}}$$

On peut approximativement les relier par l'équation :

$$ID = 0.872 D12 \quad (1)$$

Sauf cas particulier, dans cette étude nous avons ramené les valeurs d'infradensité à une densité pour 12 % d'humidité afin de rester homogène et accessible.

3.2.2. Distribution des densités des bois de Guyane

La densité du bois peut varier fortement d'une espèce à l'autre, ainsi il existe en Guyane une espèce dont la densité (D12) peut-être de 0,08 (*Machaerium lunatum* (Linn.f.) Ducke) et une autre qui peut dépasser 1,33 (*Bocoa prouacensis* Aubl).

De même, dans certains cas, la densité peut varier fortement à l'intérieur de l'arbre sur le rayon ou sur la hauteur. Toutefois, ces plages de variabilité sont à considérer comme extrême et les gros projets auxquels nous avons participé, comme l'ANR BRIDGE (Figure 1), montre une répartition des densités du bois presque normal, avec une *D12 moyenne de 0,805* (médiane de 0,82) ainsi que *95 % des effectifs contenus dans la plage de densité à 12 % [0,6-1,1]*.

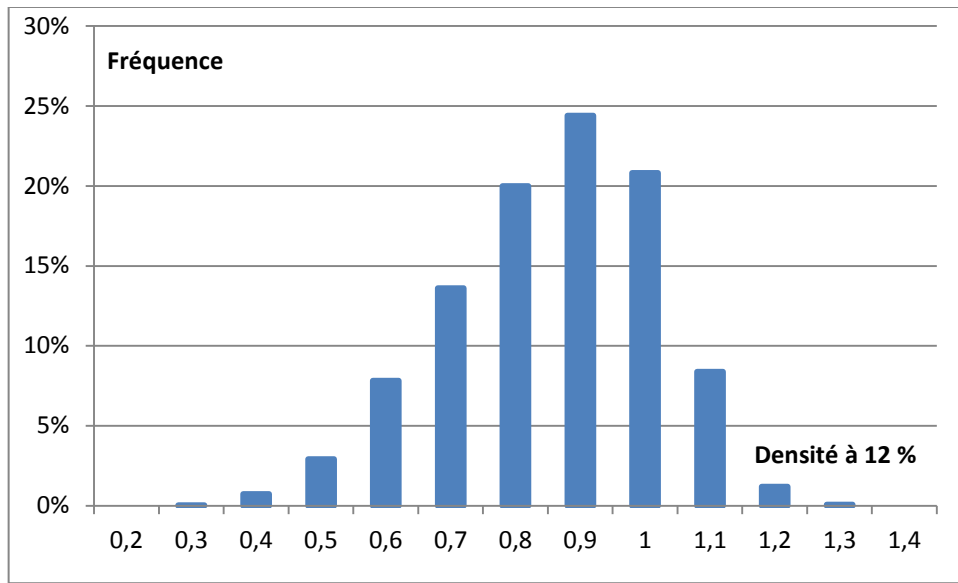


Figure 1 : Répartition des densités du bois du projet BRIDRE (2815 arbres, 659 espèces) Les données brutes (Infra densité de l'aubier) ont été transformées en Densité à 12 % (formule ci-dessus) puis multiplié par 1,10 pour approximer la densité du Duramen (Bridge ne s'est intéressé qu'aux 6 premiers mm d'aubier).

3.2.3. Répartition de la densité du bois dans notre expérimentation

Le but de ce paragraphe est dans un premier temps de renseigner la répartition des densités des essences choisies dans notre échantillonnage. Dans un second temps de comparer notre distribution de densité à celles du projet Bridge.

Méthodologie utilisée pour mesurer la densité :

Nous avons utilisé les échantillons destinés aux essais de pourriture molle pour mesurer la densité, les échantillons de dimension (5 x 10 x 100 mm³, 100 mm en longitudinal) ont été stabilisés 30 jours à une humidité de 12 % dans une enceinte climatique ; puis mesurés à l'aide de comparateur est pied à coulisse Mitutoyo de précision 0,01 mm ; ensuite pesés avec une balance Sartorius de précision 0,2 mg. Chacune des 150 densités représentent la moyenne des densités de 5 éprouvettes par individus (soit 750 mesures). Les résultats complets sont présentés en **Annexe 5** .

Nous avons complété ces mesures de densité par 100 mesures (sur les 30 essences les plus fréquentes) faites sur les arbres sur pied, à partir d'un prélèvement effectué à l'aide d'une perceuse thermique équipée d'une mèche de 20 mm et dont la profondeur moyenne était de 105 mm. Les copeaux récupérer et la géométrie du trou percé nous permettent de calculer une infradensité que l'on a transformé en densité à 12 % avec la formule (1). Les résultats complets sont présentés **Annexe 6** : Densités Calculés à partir des Infradensités prélevées sur les arbres sur pied.

Résultats et analyse

Les résultats (Figure 2) montrent une répartition presque normale des densités des 250 individus testés **la moyenne de notre population pondérée par les fréquences mesurées dans les données d'inventaire est de 0,806 de plus, 94,4 % de la population est comprise dans l'intervalle [0,6-1,1].**

La comparaison des deux échantillons par le test statistique de Kolmogorov-Smirnov (comparaison de deux distributions) montre que les deux échantillonnages ne sont pas similaires au seuil de 5 % (tableau suivant)

Statistiques descriptives :							
Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Bridge	2815	0	2815	0,299	1,236	0,805	0,158
Expérimentation	250	0	250	0,333	1,202	0,806	0,159
Test de Kolmogorov-Smirnov sur deux échantillons / Test bilatéral :							
D	0,118						
p-value	0,003						
alpha	0,05						

Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.

Ce résultat s'explique assez bien par le fait que l'échantillonnage de Bridge, était orienté « diversité » en échantillonnant au maximum 3 individus par site ; alors que nous avons mis l'accent dans l'échantillonnage de cette étude sur la représentativité effective des espèces.

Il est donc assez normal que les deux populations ne soient pas similaires, elles restent toutefois relativement proches.

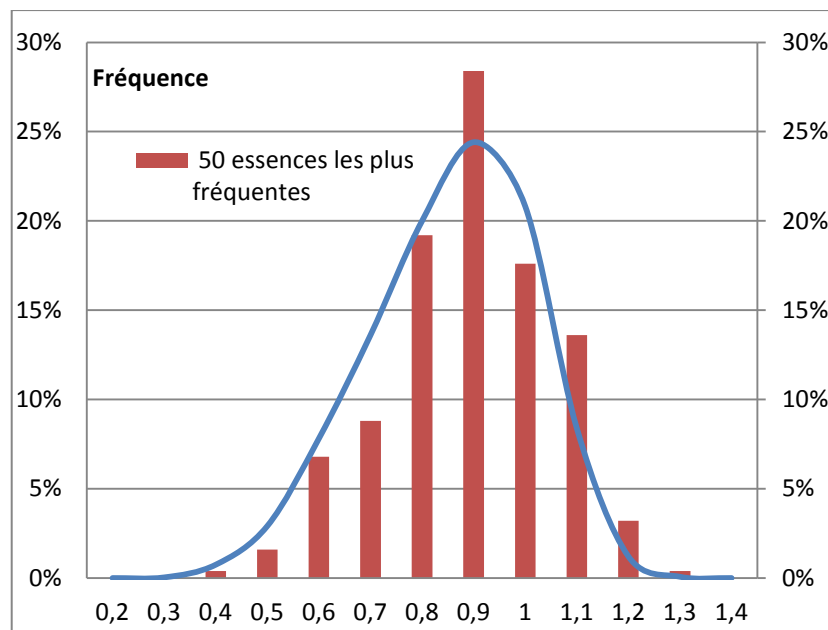


Figure 2 : Comparaison entre les distributions des densités du bois à 12 % d'humidité du projet BRIDRE (2815 arbres, 659 espèces) et de notre échantillonnage (250 arbres, 50 essences)

3.2.4. Conclusion

La densité moyenne à 12 % des 50 essences les plus fréquentes de Guyane est assez élevée puisque une densité de 0,806 pour comparaison constitue le haut de gamme de la densité du chêne et est bien plus dense que les bois de résineux alimentant habituellement les centrales à bois-énergie. C'est donc un résultat plutôt favorable dans l'utilisation des bois de Guyane comme biocombustible.

3.3. Détermination de la densité apparente des plaquettes forestières

Méthodologie :

Afin d'estimer la densité apparente des plaquettes forestières des bois de Guyane, nous avons pesé des échantillons prélevés aléatoirement dans les lots de plaquettes de bois blanc et de bois rouges que nous avons réalisés pour l'essai de stockage (cf. § 4.3 ci-après).

Des caisses rectangulaires d'un volume utile de 41 litres ont été remplies et pesées. Nous avons réalisés trois répétitions pour chaque protocole. Bois blancs/ bois rouges pour tenir compte de la variété de la ressource forestière, plaquettes tassées/non tassées.

Résultats :

Le tableau suivant présente les résultats de densité apparente obtenus :

Bois blancs		Bois rouges		Bois mélangés (par calcul)	
Non tassées	Tassées	Non tassées	Tassées	Non tassées	Tassées
0,30	0,37	0,39	0,49	0,34	0,43

Commentaires et conclusion :

Le tableau fait ressortir plusieurs points remarquables :

- les densités apparentes des plaquettes de bois rouges sont 30% plus élevées que celles de bois blancs.
- Le tassement manuel des plaquettes a permis d'augmenter le poids des chargements des caisses de près de 24% quel que soit le type de plaquette.

3.4. Taux d'humidité à l'état vert

3.4.1. Notions de Base

Le bois est un matériau poreux qui a souvent une bonne affinité avec l'eau, au moins dans sa phase fonctionnelle (aubier). La quantité d'eau qu'un volume de bois peut contenir est directement proportionnelle à sa porosité et par le fait à sa densité.

L'humidité du bois vert est assez proche de l'humidité maximum que peut contenir un volume de bois d'une densité donnée, toutefois on remarque, le plus souvent, que l'humidité réelle du bois vert est plus faible que cette humidité de saturation, une des raisons invoquées est le besoin de transferts gazeux pour alimenter en oxygène les cellules encore vivantes de l'aubier (3).

On distingue deux façons d'exprimer l'humidité du bois, l'humidité dite sur « sec » utilisée couramment en science des matériaux et l'humidité dite sur brut utilisée pour le bois énergie :

$$H \text{ sur sec en } \% = \frac{\text{Masse humide} - \text{masse anhydre}}{\text{Masse anhydre}}$$

$$H \text{ sur brut en } \% = \frac{\text{Masse humide} - \text{masse anhydre}}{\text{Masse humide}}$$

La masse anhydre est obtenue après stabilisation de la masse dans une étuve sèche ventilée à une température de 103 °C (minimum 48 heures).

Les humidités sur sec et sur brut sont liées par les équations suivantes :

$$H_{\text{sec}} = \frac{H_{\text{brut}}}{(1 - H_{\text{brut}})} \quad \text{et} \quad H_{\text{brut}} = \frac{H_{\text{sec}}}{(1 + H_{\text{sec}})}$$

L'humidité à laquelle un échantillon de bois est complètement saturé est liée à l'infradensité par la formule :

$$H_{\text{sat sur sec en \%}} = \frac{1}{ID} - \frac{1}{D_{ML}}$$

Où ID est l'infradensité et D_{ML} la densité de la matière ligneuse, soit environ 1,53.

3.4.2. Distributions des humidités des bois verts

Peu de références biographiques proposent les humidités des bois vert pour les essences présentes en Guyane. Nous avons confronté les données d'un ouvrage de référence Major Timber Trees of Guyana (2) aux données que nous avons recueillies dans le projet BRIDGE. Les données d'humidité du bois vert de BRIDGE ont été calculées à partir de prélèvements sur les arbres vivant réalisés à l'emporte-pièce sur les six premiers millimètres d'aubier.

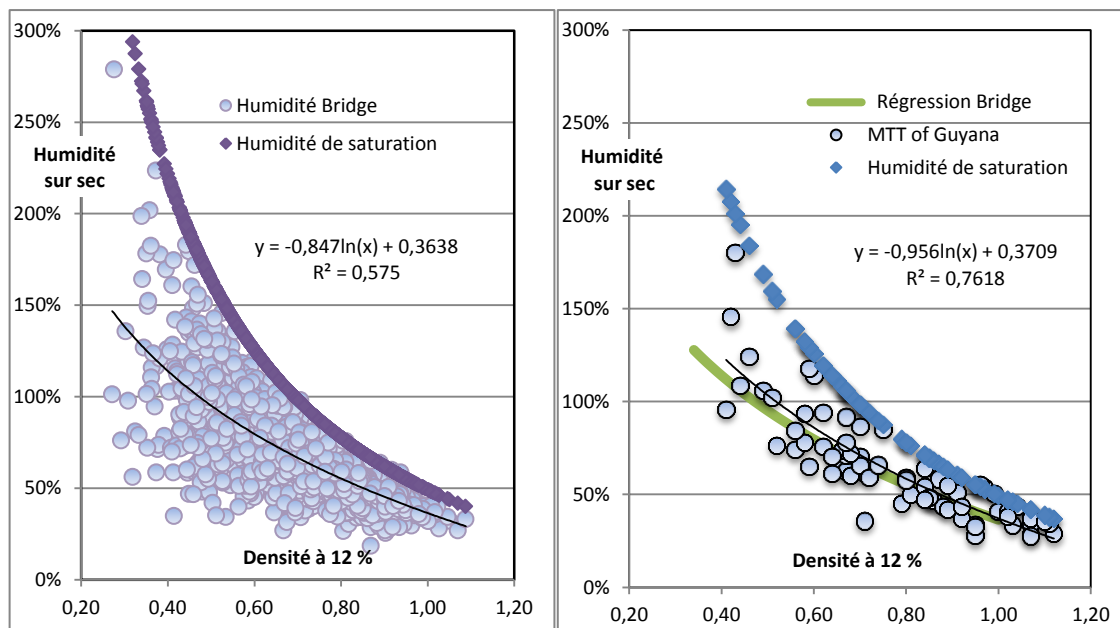


Figure 3 : Représentation de l'humidité du bois vert sur « sec » en fonction de la densité du bois à 12 % d'humidité pour 2201 arbres (581 espèces) du projet Bridge à droite et pour 70 espèces de l'ouvrage Major Timber Trees of Guyana (3) à gauche.

3.4.3. Répartition des humidités du bois dans notre sélection

Les mesures d'humidité du bois vert ont été faites sur 100 arbres et 30 essences les plus fréquentes de l'inventaire papetier sur les sites de PARACOU et de MATITI. La méthode utilisée consistait à prélever les copeaux de coupe réalisés en perçant les arbres à l'aide d'une perceuse thermique. Le diamètre du trou étant de 20 mm et la profondeur moyenne de 11 cm le volume de bois récolté était en moyenne de 34,6 cm³. Cette méthode nous permet de prélever au moins 50 % de duramen. Les résultats complets sont présentés en **annexe 7**.

Les résultats de mesure d'humidité sur cet échantillonnage donnent une moyenne **d'humidité sur brut pondérée par les fréquences mesurées dans les données d'inventaire de 36,8 %** et **une répartition assez groupée puisque 88 % de la population est comprise dans l'intervalle d'humidité sur brut de 30 à 45 %**.

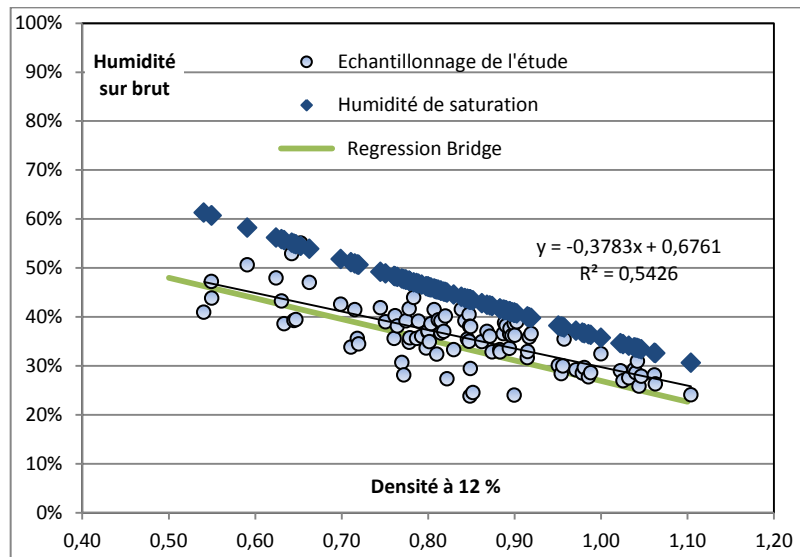


Figure 4 : Variation de l'humidité sur brut en fonction de la densité à 12 % pour notre échantillonnage de 100 arbres des 30 essences les plus fréquentes.

La Figure 4 montre une assez bonne corrélation entre l'humidité du bois et la densité puisque la densité explique 54 % de la variabilité de celle-ci.

A partir des résultats obtenus dans BRIDGE, il est possible d'estimer l'humidité du bois à l'état vert à partir de la densité à 12 % (D12) avec l'équation suivante :

$$H\% \text{ sur brut} = -0,4217 \times D12 + 0,6908 \quad (R^2 = 0,61).$$

3.4.4. Conclusion

L'humidité verte sur brut moyenne de 37 % sur les essences les plus fréquentes est assez faible. Pour comparaison l'humidité moyenne sur brut des aubiers des 581 espèces du projet BRIDGE est de 38,7 %. Par rapport aux essences tempérées épicéa et sapin sont à environ 45 % alors que le chêne est plutôt à 35 %. C'est donc un autre point technique positif pour l'utilisation de bois énergie à partir de la biomasse ligneuse de forêt de Guyane.

3.5. Composition élémentaire, matières minérales, PCI du bois

Cent cinquante échantillons des bois de Guyane ont été analysés et ont permis de déterminer une valeur moyenne en composés minéraux présentés dans le tableau 3.5.1 ci-après. Les résultats détaillés des 150 échantillons sont présentés dans le rapport « caractérisation du bois énergie de Guyane » réalisé concomitamment par l'unité de recherche UR-Biomasse énergie du Cirad à Montpellier.

Toutes les valeurs sont exprimées en proportion massique sur matière sèche.

La composition élémentaire (C, H, O, N) est exprimée en proportion massique sur sec, hors matières minérales.

	Caractéristiques analysées	Résultats (moyenne de tous les échantillons)
Taux de matières minérales	Taux de cendres %	1,0
Composition minérale des cendres	Taux de silice : SiO₂ %	0,30
	P %	0,005
	K %	0,093
	Ca %	0,154
	Mg %	0,032
	Na %	0,030
	S %	0,035
	Cu ppm	0,94
	Zn ppm	2,86
	Fe ppm	15,49
	Mn ppm	15,33
Composition élémentaire	N %	0,2
	C %	49,8
	H %	6,1
	O %	42,8
Pouvoir calorifique	PCI (MJ/Kg)	18,8

Tableau 2 : taux de cendres, composition minérale, composition élémentaire et pouvoir calorifique des 150 échantillons de bois de Guyane analysés.

Il s'agit là de moyennes pondérées par les fréquences estimées par les données des inventaires forestiers.

Les principaux enseignements de ces résultats peuvent être résumés comme suit :

Le taux de cendres des bois de Guyane, mesuré en moyenne à 1 % de la matière sèche, est élevé comparativement aux autres bois dans le monde, et on observe une forte variabilité avec des valeurs extrêmes mesurées de 0,1% et 4%.

Parmi les résultats de la détermination de la composition minérale des bois, on retiendra que la teneur moyenne en silice est de 0.35 % avec des valeurs extrêmes allant de 0 à 3.2% selon les échantillons. Les bois de la famille des Licania (certaines des gaulettes) ont le taux de silice le plus élevé, presque toujours compris entre 1 et 3%.

Les autres composés les plus présents sont le calcium (Ca) avec un taux moyen de 0.154% et le potassium (K) dont la teneur moyenne est 0.1%.

La teneur moyenne en Chlore mesurée sur 85 échantillons des espèces forestières les plus abondantes est de 0.048%, et la teneur moyenne en Soufre de ces échantillons est de 342ppm. Ces

informations pourront être utilisées pour évaluer les quantités de ces composés entrant dans la chaudière en fonction des débits d'alimentation en combustible.

Les autres macroéléments sont peu présents : Na et Mg ont un taux moyen de 0.030% et 0.032% de la matière sèche tandis que la teneur en phosphore est encore plus faible à 0.005%.

Le pouvoir calorifique moyen des échantillons de bois de Guyane est de 18,8 MJ/kg de bois anhydre légèrement plus élevée (d'environ 2%) que la valeur moyenne généralement admise pour le bois (18.4 MJ/kg). Les résultats détaillés sont présentés dans le rapport spécifique sur les caractéristiques des échantillons de bois analysées au laboratoire Cirad de Montpellier.

3.6. Etude de la température de fusibilité des cendres

3.6.1. Problématique

Ce paragraphe a été rédigé à partir d'un article publié par le laboratoire SOCOR (Yves Girard) dans BIOENERG le 20 09 2007.

Les cendres sont les résidus minéraux du bois après combustion. Selon la composition initiale de la matière minérale, les transformations physico-chimiques peuvent être plus ou moins importantes. Compte tenu des températures élevées qui règnent dans le foyer, les particules de cendres formées peuvent, en fonction de leurs caractéristiques, être à l'origine de problèmes d'exploitation sévères.

Les cendres s'agglomèrent en mâchefers imperméables à l'air et causent de nombreuses difficultés de fonctionnement du foyer (collage des cendres sur les barreaux de grille, sur les parois latérales du foyer, attaque chimique et corrosion du matériel, obstacle à la bonne répartition de l'air de combustion, difficultés d'évacuation etc). La fusibilité des cendres est donc importante à connaître car elle détermine le comportement des différents produits dans les foyers. Afin d'éviter ce problème, il faudra contrôler la température du foyer pour s'assurer que celle-ci n'atteigne pas la température de fusibilité des cendres.

La composition minérale des mélanges de bois qui alimenteront les centrales sera variable du fait de l'hétérogénéité naturelle des bois et de la variation des mélanges d'espèces forestières, ce qui peut se traduire par une variation de leur comportement à haute température, notamment en termes de température de fusibilité.

3.6.2. Mesures et résultats

Méthodologie :

La température de fusion des cendres, c'est-à-dire à laquelle les cendres passent de l'état solide à l'état liquide, dépend de leur composition. Il faut que la température à laquelle s'opère la combustion - en tout point du foyer - reste inférieure à cette température de fusion des cendres.

En effet, il faut éviter que celles-ci ne coulent et viennent se solidifier sur des équipements du foyer (phénomène de vitrification). Bien que les foyers de combustion modernes soient conçus pour répondre à cette contrainte, il est important de caractériser cette température de fusion des cendres pour des échantillons de biomasse proche de ce qui sera utilisé dans les futures centrales.

Il existe un test normalisé permettant de mesurer le comportement des cendres lorsqu'elles sont portées entre 800 et 1500 °C. Il s'agit du test de fusibilité. Il consiste à réaliser une éprouvette de cendre et de la placer dans un four tubulaire balayé par un gaz (oxydant ou réducteur selon le type de chaudière) et d'observer la déformation éventuelle de cette éprouvette en fonction de la température. La première étape est généralement un arrondissement de la pointe ou des arrêtes (temp. initiale de déformation).

Puis si la cendre est relativement fusible, l'éprouvette s'affaissera pour prendre une forme d'hémisphère dû au ramollissement de la cendre. Si la cendre est très fusible, elle se liquéfiera et s'étalera sur son support. Les points caractéristiques sont définis par les températures pour lesquelles les éprouvettes présentent des formes géométriques prédéfinies.

Les déterminations des températures de fusibilité des cendres sous atmosphère oxydante ont été réalisées par la société SOCOR selon la norme en vigueur pour les 10 échantillons de mélanges de plaquettes de bois de Guyane prélevés par le Cirad.

Résultats et commentaires :

Compositions des échantillons :

Les principales essences forestières constituant les échantillons en mélanges sont répertoriés dans le tableau suivant :

N° Echantillon	Type échantillon pour mesures de la Température de fusibilité des cendres	Espèces présentes en mélange
1	Bois rouges	Eperua sp., Parinari sp, Monorobea coccinea, Lecythis sp, Eschweilera sp., Inga sp., Virola sp.
2	Bois rouges	Idem
3	Bois rouges	Idem
4	Mélange rouges et blancs	Mélange aléatoire des échantillons des espèces de bois rouges (lot 1 à 3) et de bois blancs (lot 8 à 10).
5	Mélange rouges et blancs	Idem
6	Mélange rouges et blancs	Idem
7	Mélange rouges et blancs	Idem
8	Bois blancs	Virola michelii, Antonia ovato, Couma sp., Sterculia sp., Tachigalii sp., Apieba sp., Simaba sp., Parkia sp., Couratari sp.
9	Bois blancs	Idem
10	Bois blancs	Idem

Tableau 352 : Principales espèces forestières constitutives des 10 échantillons de mélanges de bois préparés pour la détermination de la température de fusibilité des cendres.

Les résultats obtenus sur les dix échantillons de bois de Guyane tout venant, bois blancs et bois rouges sont présentés dans le tableau suivant :

Type échantillon plaquettes forestières	N° Ech.	T de contraction	T de déformation	T d'hémisphère	Température d'écoulement
Bois rouges	1	1234	1412	1490	1495
Bois rouges	2	1178	1280	1323	1393
Bois rouges	3	1184	1283	1296	1330
Mélange rouges et blancs	4	945	1037	1052	1141
Mélange rouges et blancs	5	1201	>1500	>1500	>1500
Mélange rouges et blancs	6	1227	1415	1482	>1482
Mélange rouges et blancs	7	1211	1326	1384	1446
Bois blancs	8	1070	1164	1178	1210
Bois blancs	9	1111	1446	>1482	>1482
Bois blancs	10	1302	>1500	>1500	>1500

Tableau 3.6 : Températures de fusibilité des cendres des 10 échantillons de bois énergie de Guyane

Conclusion :

N° Echantillon	Type échantillon de bois énergie	Espèces présentes en mélange	Température d'écoulement
Lot 1 à 3	Bois rouges	Eperua sp., Parinari sp, Monorobea coccinea, Lecythis sp, Eschweilera sp., Inga sp., Virola sp.	1330 1393 1495
Lot 4 à 7	Mélange rouges et blancs	Mélange aléatoire des échantillons des espèces de bois rouges et de bois blancs .	1140 >1500 >1492 1446
Lot 8 à 10	Bois blancs	Virola michelii, Antonia ovato, Couma sp., Sterculia sp., Tachigalii sp., Apieba sp., Simaba sp., Parkia sp., Couratari sp.	1210 >1482 >1500

- ⇒ résultats obtenus sur les 10 échantillons montrent que la température d'écoulement des cendres est comprise entre 1140 et 1500°C, résultat conforme à ce qui est observé pour des cendres de combustion de bois.
- ⇒ Les deux échantillons dont la température d'écoulement est la plus basse (1141 et 1210°C) contiennent des bois blancs seuls ou mélangés avec des bois rouges.
- ⇒ La température d'écoulement des bois rouges est toujours supérieure à 1330°C.

3.7. Caractéristiques techniques et valorisation des cendres de bois de Guyane

Evaluation des quantités potentielles à valoriser :

La quantité de cendres produite par chaque centrale dépendra de la puissance de la chaudière (tonnage bois entrant), du combustible utilisé (taux de cendre intrinsèque aux bois) et du degré de propreté en termes de présence plus ou moins importante de terre adhérente au bois combustible entrant dans le foyer.

Compte tenu du taux de cendre faible (en moyenne 2 à 5 % du tonnage entrant), on peut évaluer qu'une installation consommant 100 000 tonnes de bois à l'état vert (42% d'humidité) produira environ 1100 et 2800 tonnes de cendres par an.

Composition :

Les cendres brutes sortant des centrales sont constituées des matières minérales :

- intrinsèques au bois (cf. analyses de composition ci-avant), et
- exogènes qui correspondent à la terre collée aux bois utilisés. L'attention portée à la propreté du bois permet de diminuer cette fraction surtout constitués de silice.

3.7.1. Réglementation

La réglementation française et européenne a fait l'objet d'étude piloté par l'ADEME métropole dont on trouvera les références bibliographiques en fin du document :

Une étude portant sur la définition d'un référentiel pour les plaquettes forestières comme combustible bois énergie a été réalisée en avril 2008- par le FCBA pour le compte de l'ADEME (cf. ref. biblio. 11).

Une étude de 2007 est spécifique à la réglementation s'appliquant aux cendres de bois et visait à comparer la réglementation de 10 pays européens avec celle de la France, en matière de classification et valorisation des déchets de bois, en particulier faiblement adjuvants, ainsi que sur la valorisation des cendres de bois.(cf. ref. biblio.12 « Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois » - Ademe, Novembre 2007)).

Concernant les valeurs seuils en Eléments Traces Métalliques, cette étude fait apparaître des valeurs réglementaires ou recommandées sur lesquelles pourrait s'appuyer la France, notamment en Autriche, Allemagne, ou Suède. On retiendra que les valeurs proposées dans l'arrêté du 02/02/98, sur lesquelles il a été proposé de s'appuyer pour les chaufferies d'une puissance entre 0 et 20 MW sont globalement en concordance avec les valeurs indiquées en Allemagne ou en Autriche, hormis pour l'Arsenic.

L'étude faisabilité de valorisation des cendres de l'usine de la société Voltalia à Kourou montre que ces cendres présentent des teneurs en composés largement inférieurs aux seuils réglementaires de l'arrêté de 98.

3.7.2. Voies de valorisation possibles

Même si l'on peut envisager trois possibilités de valoriser les cendres de bois en Guyane, la valorisation comme amendement agricole semble de loin la voie à privilégier compte tenu de la faible fertilité des sols et de leur acidité. L'incorporation à du compost dans l'unité de compostage de Cayenne, et l'usage en cimenterie à la société des ciments guyanais sont deux autres voies envisageables mais avec soit des contraintes réglementaires fortes, soit un mode d'usage moins noble dans le cas de l'incorporation dans la fabrication du ciment. Nous nous focaliserons ici sur la valorisation comme amendement.

La valorisation comme amendement agricole apparaît la plus logique pour organiser la valorisation de volumes conséquents avec la mise en place d'un plan d'épandage par le producteur des cendres qui devrait trouver un écho favorable auprès des agriculteurs cherchant à améliorer la fertilité de leur sol.

Selon le type d'évacuation des cendres par les centrales énergétiques, on est amené à parler de cendres sèches, ou de cendres humides (cas d'arrosage des cendres dans les containers de récupération).

Les cendres sèches s'épandent avec un épandeur à chaux vive, permettant des apports d'environ 1,5 T/ha (environ 500 kg/ha de chaux), avec des cendres exemptes de morceaux de métal, pierre ou mâchefers. C'est un épandeur à caisse monocoque, muni d'une toile de protection évitant l'envol des cendres. Le coût d'épandage en Métropole est d'environ 20 € HT/T. Il peut être effectué par une entreprise ou avec du matériel en CUMA.

Les cendres humides s'épandent avec un épandeur à hérissons verticaux équipé d'une porte guillotine ou d'une table d'épandage. Les doses d'apport sont d'environ 5 à 10 T/ha (apport d'1,5 T à 3 T/ha de chaux). L'épandage des cendres humide peut être réalisé avec un épandeur à fumier à table d'épandage. L'enfouissement superficiel des cendres est possible au déchaumeur ce qui permettra un effet amendant des cendres plus important par contact avec le sol.

3.7.3. Conclusion

On retiendra de l'étude sur la valorisation de cendres de combustion de bois d'origine forestière, donc exempt de tout adjuvant, que la réglementation les classe dans la rubrique 2910 A. Leur utilisation relève de l'obtention d'une autorisation locale car elles ne présentent pas de risque avéré dans des conditions normales d'épandage ou mise en décharge.

La réglementation les classe par contre différemment si les cendres sont considérées comme « produit » qui entrerait dans la composition d'un produit commercial. On pense ici à l'incorporation à du compost par exemple. C'est la réglementation sur les produits qui s'appliquerait alors, avec des contraintes beaucoup plus importantes et des analyses spécifiques à réaliser.

L'usage comme amendement agricole est recommandé en Guyane compte tenu de la composition minérale, du pouvoir chaulant qui équivaut à $\frac{1}{4}$ de la chaux agricole, très utile en sols acides, et des apports en K, P et Mg comme fertilisant.

L'usage en cimenterie, a priori possible selon l'avis des industriels du secteur pourra être organisé pour des volumes de cendres plus importants qui ne trouveraient pas d'utilisation en agriculture, mais cette voie ne semble pas à privilégier.

4. Etude du stockage de plaquettes forestières

4.1. *La durabilité naturelle vis-à-vis de champignons en essais sol*

Dans cette partie, nous proposons de tester la perte de masse sur une durée de 5 mois d'échantillons de petites dimensions (5x10x100 mm³) en essais sol, les dimensions et plus particulièrement la masse surfacique est proche des plaquettes issus du broyage avant la combustion.

4.1.1. **Méthode utilisée**

La méthodologie d'essai utilisé est une adaptation de la norme expérimentale publiée en 2006 XP CEN/TS 15083-2 : Détermination de la durabilité naturelle du bois massif vis-à-vis des champignons lignivores - Méthodes d'essai – Partie 2 : micro-organismes de pourriture molle. De plus, nous avons essayé d'appliquer les recommandations préconisées par Acker (1) qui ont servi à élaborer cette norme.

Principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à tester la durabilité d'éprouvettes élancées de petite dimension, plantées verticalement dans un sol forestier contenu dans des bacs dont l'humidité est maintenue élevée. Le sol forestier est prélevé directement en sous-bois à Pointe Combi, il contient naturellement des spores des champignons des espèces constituant le groupe des pourritures molles. Le sol est à usage unique, il doit être renouvelé après chaque essai. Les essais ont une durée de cinq mois, tous les mois une quantité donnée d'éprouvettes est prélevée dans les bacs et la perte de masse est mesurée. On obtient un suivi mensuel de la perte de masse.

Préparation du sol

Le sol de culture est prélevé en forêt sur une profondeur de 5 à 20 cm après avoir raclé la couche de litière, il est ensuite grossièrement tamisé, maille 12,5 mm. Une fois le sol brassé et homogénéisé, on mesure son humidité, sa capacité de rétention en eau. Le sol préparé est alors séparé en bac d'environ 20 litres la hauteur de terre dans le bac est d'environ 20 cm. Les bacs d'essais sont alimentés régulièrement en eau de manière à ce que le sol soit toujours proche de sa capacité aux champs. La température moyenne du laboratoire est d'environ 27°C. Toutes les conditions sont alors réunies pour le développement optimal des pourritures molles dans les sols d'essais.

Préparation des éprouvettes d'essai

L'éprouvette d'essai est une éprouvette de 100 mm de long et de 10 mm x 5 mm de section, ses petites dimensions sont une optimisation du rapport masse/surface, il permet une dégradation rapide de l'éprouvette tout en conservant une rigidité suffisante en fin d'essai. La norme préconise un débit sur quart des éprouvettes, ceci afin d'harmoniser au mieux les proportions de bois initial, bois final des bois tempérés, dans le cas des essences de Guyane, le contraste intra-cerne est beaucoup moins marqué, nous n'avons donc pas respecté cette préconisation.

Les éprouvettes une fois débitées sont conditionnées dans une pièce climatisée où la température est l'humidité varient peu, leur humidité de stabilisation est d'environ 12 %.

Environ 10 % des éprouvettes sont sacrifiées pour mesurer l'humidité moyenne de départ des éprouvettes du lot. Chaque éprouvette mise en culture est pesée, on calcul grâce à sa masse à 12 % d'humidité et à l'humidité moyenne du lot, sa masse anhydre théorique. Cette masse anhydre théorique est utilisée après exposition, pour le calcul de perte de masse.

Prélèvement des éprouvettes dans l'arbre

Pour les essences que nous avons directement récoltées en forêt, les zones de prélèvement des éprouvettes sont repérées à l'aide d'un calque, afin de tester l'effet de la position radiale de l'éprouvette vis-à-vis de sa durabilité (Figure 1).

Mise en culture des éprouvettes

Les éprouvettes sont plantées au 4/5ème dans le sol, les deux centimètres restant permettent de conserver visible l'identification de l'éprouvette et surtout de créer un gradient d'humidité le long de l'éprouvette, gradient nécessaire à une dégradation optimale.



Photo 1 : Un des bacs du dispositif d'essai sol

Après quelques jours de mise en culture, les éprouvettes sensibles sont recouvertes d'un fin mycélium indiquant la réactivité des microorganismes du sol. Les bacs d'essais sont placés dans un laboratoire clos non climatisé ce qui permet de limiter les variations de températures et de maintenir une humidité de l'air élevée (Figure 4).

Récolte des éprouvettes et mesure de la perte de masse

Tous les mois pendant 5 mois, une éprouvette par espèce est récoltée. Soit 150 éprouvettes par mois.

Une fois récoltées les éprouvettes sont brossées délicatement à l'aide d'une brosse rotative, elles sont ensuite pesées une première fois afin d'obtenir leur masse humide. Les échantillons sont ensuite lavés au lave-vaisselle à 45 °C, trois cycles sont nécessaires afin d'éliminer les particules de sol adhérentes (matière organique, grain de sable). Enfin, les échantillons sont placés dans une étuve ventilée à 103 °C pendant 48 heures afin d'obtenir leur masse sèche.

La perte de masse se calcule alors avec la formule suivante :

$$\text{Perte de masse en \%} = \frac{(\text{masse anhydre initiale} - \text{masse anhydre après exposition})}{\text{masse anhydre initiale}}$$

4.1.2. Résultats

Nous avons exprimé les résultats à l'aide d'un indice « D6 » qui correspond à la valeur théorique de perte de masse à 6 mois calculée à partir de la droite d'ajustement de la perte de masse en fonction du temps (Figure 5). On remarque sur cette figure que les droites ne passent pas par zéro, en effet, dans cette expérimentation les échantillons sont mis en terre à 12 % d'humidité, il faut donc que l'humidité du bois remonte avant qu'il ait un début de dégradation. Les résultats complets sont présentés en « **Annexe 8** : Tableau des Pertes de masse des essences retenues »

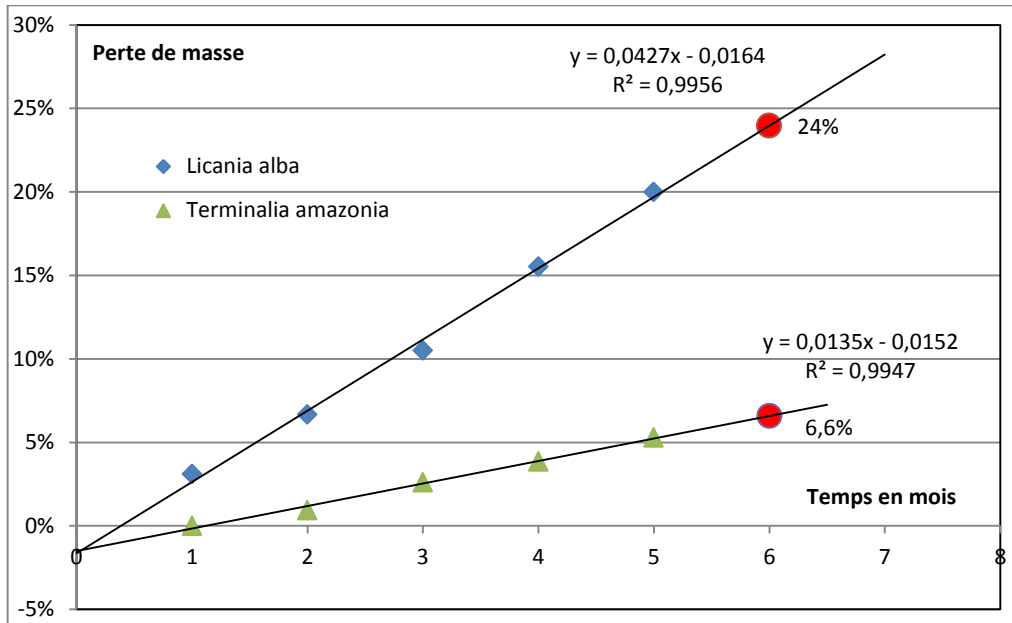


Figure 5 : Pertes de masse en fonction du temps pour deux espèces testées, les points rouges indiquent la valeur de l'indice D6.

La Figure 6 présente les pertes de masse des 150 arbres testés calculées à 6 mois pour l'ensemble des 50 essences de l'échantillonnage. On remarque une répartition légèrement bimodale de l'histogramme, **la moyenne de la perte de masse de l'échantillonnage pondérée par les fréquences mesurées dans les données d'inventaire est de 13,1 % 80 % de la population est comprise dans l'intervalle [5 %, 20 %].**

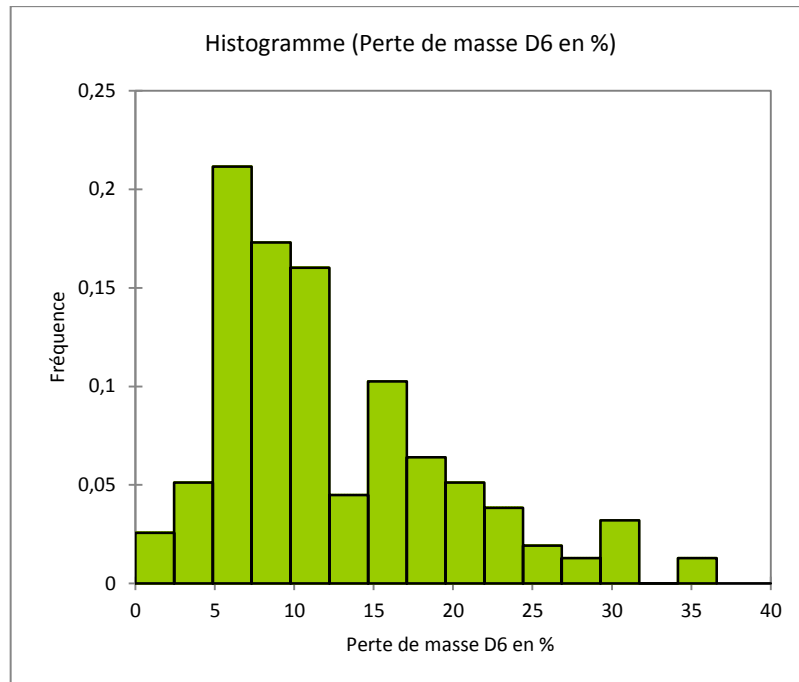


Figure 6 : Histogramme des pertes de masse à 6 mois des 150 arbres de notre échantillonnage

4.1.3. Conclusion

Les essais réalisés sur l'échantillonnage représentatif de la sélection donnent des résultats cohérents et de même ordre de grandeur que les autres essais que nous avons déjà réalisés par le passé, dans les mêmes conditions. La dégradation moyenne de 13 % au bout de six mois ne

s'applique que dans les conditions de l'essai c'est-à-dire pour une humidité de bois élevée supérieure à 33 % sur brut.

Les éprouvettes d'essai ont une surface volumique de $6,2 \text{ cm}^{-1}$ équivalente à de petites plaquettes de bois énergie.

4.2. Evolution de l'humidité dans les plaquettes en décomposition

4.2.1. Notion de base

Pour qu'un champignon colonise le bois il faut que l'humidité soit suffisante, il n'y aura pas d'attaque fongique si le bois se maintient au-dessous de 25 % sur sec (20 % sur brut). En ce qui concerne les pourritures brunes et blanches, l'humidité minimum sur sec est d'environ 30 % alors que pour les pourritures dites molles l'humidité du bois doit être au minimum de 40 - 50 % sur sec.

De plus, lorsqu'un champignon hydrolyse les macromolécules du bois, cellulose, hémicellulose, lignine, il fabrique de l'eau sous l'action des enzymes responsables de l'hydrolyse (cellulase, hemicellulase et laccase) ; l'humidité intrinsèque du bois augmente donc lorsqu'il y a dégradation.

4.2.2. Méthode utilisée

La mesure d'humidité après exposition se fait en parallèle avec les essais sol, tous les mois pendant 5 mois, une éprouvette par espèce est récoltée, soit 150 éprouvettes par mois. Les éprouvettes sont ensuite brossées délicatement à l'aide d'une brosse rotative, elles sont ensuite pesées une première fois afin d'obtenir leur masse humide ensuite placées 48 heures dans une étuve ventilée à $103 \text{ }^\circ\text{C}$ pour obtenir la masse anhydre. L'humidité du bois est alors calculée comme décrit au paragraphe 3.4.1.

4.2.3. Résultats

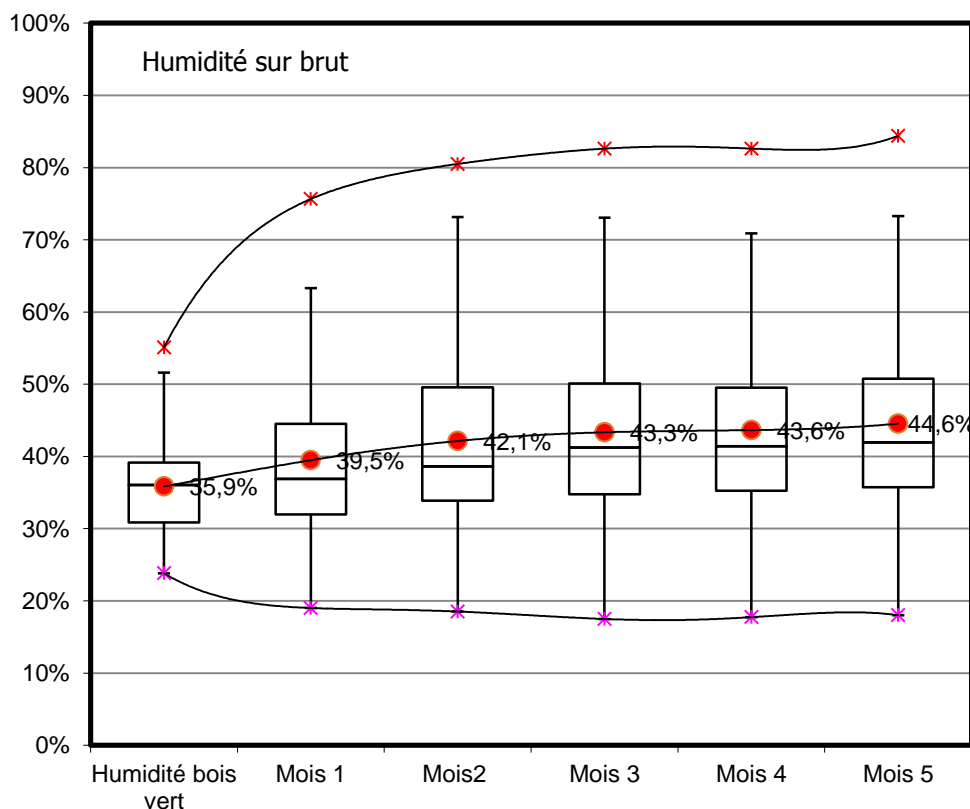


Figure 7 : Distribution de l'humidité sur brut des éprouvettes après n mois d'exposition. Signification des boîtes à moustaches : la boîte formée par le premier et le deuxième quartile séparés par la médiane représente 75% des observations, entre les 2 écarts il y a 95 % de la population, les croix représentent les maxima et minima, les points rouges les moyennes.

Les résultats présentés en Figure 7 montrent que les échantillons placés dans un sol proche de sa capacité de rétention en eau ont une rapide reprise d'humidité dès le premier mois, cette augmentation est accompagnée d'une forte dispersion, qui s'explique assez bien par la différence de densité et de durabilité entre les espèces sélectionnées. La reprise d'humidité semble se stabiliser dans le temps, toutefois, l'humidité liée à l'activité fongique augmente graduellement. Nous avons représenté sur le graphique la dispersion des mesures d'humidité faites sur les arbres sur pied, l'échantillonnage légèrement différent explique la baisse d'humidité minimum (100 arbres pour l'un et 150 pour l'autre).

4.2.4. Conclusion

Une source d'humidité permanente comme le contact avec un sol forestier influence grandement la reprise d'humidité de petits échantillons de bois telles les plaquettes forestières. Cette reprise d'humidité stimule assez rapidement l'activité fongique notamment et dans un premier temps, sur les bois non durables et les aubiers. Cette dégradation fait à son tour croître l'humidité du bois.

Cette augmentation d'humidité est néfaste pour le Pouvoir Calorifique Inférieur du biocombustible ainsi stocké. Il est donc essentiel à veiller à ce qu'elle ne puisse pas avoir lieu, en évitant un stockage exposé à des sources d'humidité permanentes.

5. Etude expérimentale du stockage de plaquettes forestières en silos

Une expérimentation permettant de comparer les performances du stockage du bois combustible a été conduite au laboratoire de Sciences du Bois du CIRAD à Kourou, avec la participation de la société VOLTAVIA pour produire les plaquettes forestières.

5.1. Principe du dispositif mise en place

Le dispositif mise en place devait répondre à plusieurs questions de base, la teneur en eau, la vitesse de séchage et la dégradation éventuelle de tas de stockage de plaquettes biocombustibles provenant directement de l'exploitation forestière.

Pour ce faire nous avons mise en place des silos cylindriques isolés de l'extérieurs d'environ $\frac{3}{4}$ de m³ qui sont censés simuler l'intérieur d'un gros tas (cône de 4 ou 5 m de hauteur) de plaquettes forestières.

De plus, afin de vérifier l'influence de la diversité ligneuse sur ces dispositifs nous avons testés 3 types de ressources :

- Les essences dont les bois sont denses et durables dénommées « bois rouges »,
- Les essences dont le bois sont tendres et non durables dénommées « bois blanc »,
- Et enfin un mélange des bois rouges et bois blancs nommé par la suite « bois mélangés ».

5.2. Récolte des bois et broyage

La récolte des billons ([Photos 2](#)) s'est faite sur le parc à grume de la forêt de Risque-tout, parc à grume réalisé par l'ONF pour son étude bois énergie. Les grumes avaient 1 à 2 mois de stockage sur le parc. La sélection des essences a été réalisée à partir de deux critères de choix, un groupe de bois denses et durables et un groupe de bois tendres et non durables. Étant donnée la faible représentativité des bois tendre dans le parc, mais aussi dans les forêts guyanaises en générale, ceux-ci ont été volontairement sur-échantillonnés, en effet dans notre sélection de 50 essences les bois blancs (paragraphe 2.2) ne représentent que 8,5 % du volume.

Les essences prélevées ont été identifiées sur grume et à partir de l'anatomie de leur bois, la liste de ces essences est fournie en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Environ 5 m³ de bois, soit 61 billons ont alors été transportés en 4x4 jusqu'à l'usine de biomasse de VOLTAVIA à KOUROU.

Le broyage des billons ([Photos 2](#)) a été réalisé le vendredi après-midi et le samedi matin suivant afin de perturber le moins possible la production de l'usine. L'extraction des plaquettes des silos de stockage de l'usine ne s'est pas fait sans mal, mais nous avons pu broyer séparément les bois blanc à la suite des bois rouges. Et obtenir ainsi environ 5 m³ de plaquettes, les billons surnuméraires ont servi à alimenter l'usine.

Les plaquettes ont été stockées dans des sacs hermétiques en attendant leur mise en silos le lundi suivant, afin de conserver leur humidité initiale.



Photos 2 Récolte, transport et broyage des billons

5.3. Fabrication des silos et mise en place des essais

Nous avons réalisé, dans le laboratoire du CIRAD de KOUROU, 6 silos en grillage armé, deux silos contenant des plaquettes de « bois rouges », deux silos contenant des plaquettes en « bois blancs » et deux silos contenant un mélange homogène des deux types blanc et rouge. Les silos de 80 cm de diamètre et de 1,50 m de hauteur (soit 750 L) ont été isolés par deux couches de laine de verre de 4 cm d'épaisseur, fermés par un opercule en contreplaqué et posés sur une estrade de 10 cm isolées du sol

(*Photos 3*). Ceci afin de recréer au mieux l'atmosphère confinée qu'il existe au sein d'un gros tas de plaquette de plusieurs dizaines de m³.

Une structure en bois a été construite au-dessus des silos pour permettre l'application d'une pression permanente sur l'opercule supérieur (renforcée pour l'occasion) de chaque silo. La pression appliquée à l'aide d'un cric forestier est de l'ordre de 200 g/cm² (*Photos 4*), elle est maintenue grâce à des cales en bois placées entre la structure et l'opercule des silos.

L'ensemble du dispositif était placé sous un hangar à l'abri de la pluie, mais pas des vents très présents dans cette zone dégagée.



Photos 3 Mise en place du dispositif



Photos 4 Mise en charge et positionnement des sondes

La masse totale des plaquettes contenues dans chaque silo a été mesurée au moment du remplissage. L'humidité de départ a aussi été mesurée à l'aide de prélèvements à l'intérieur de chaque silo. Des sondes thermocouples permettant de suivre la température à l'intérieur des silos ont été installées à raison de trois par silo une dans la partie haute, une dans la partie basse et une au milieu. Trois plaquettes de bois en Simarouba ont été installées à l'intérieur des silos, l'une étant câblée et permettait une mesure régulière de la variation de la conductivité électrique de la plaquette depuis l'extérieur ; les deux autres ont été prélevées au cours du séchage et ont servi de référence d'humidité. Après chaque prélèvement de plaquette d'humidité, nous réappliquions la pression initiale sur le haut des silos.

5.4. Résultats



Photo 5 Le dispositif et son démontage après 6 mois d'essai

Après 6 mois de suivi, les silos ont été démontés, et le contenu de chacun a été repesé. Pour chaque silo, nous avons réalisé 20 prélèvements (4 niveaux, 5 échantillons par niveau) d'environ 100 g pour faire une mesure d'humidité, et une mesure de densité de plaquette.

5.4.1. Suivi des températures

Les suivis des températures pendant les six mois d'essais sont présentés en [Figure 8](#).

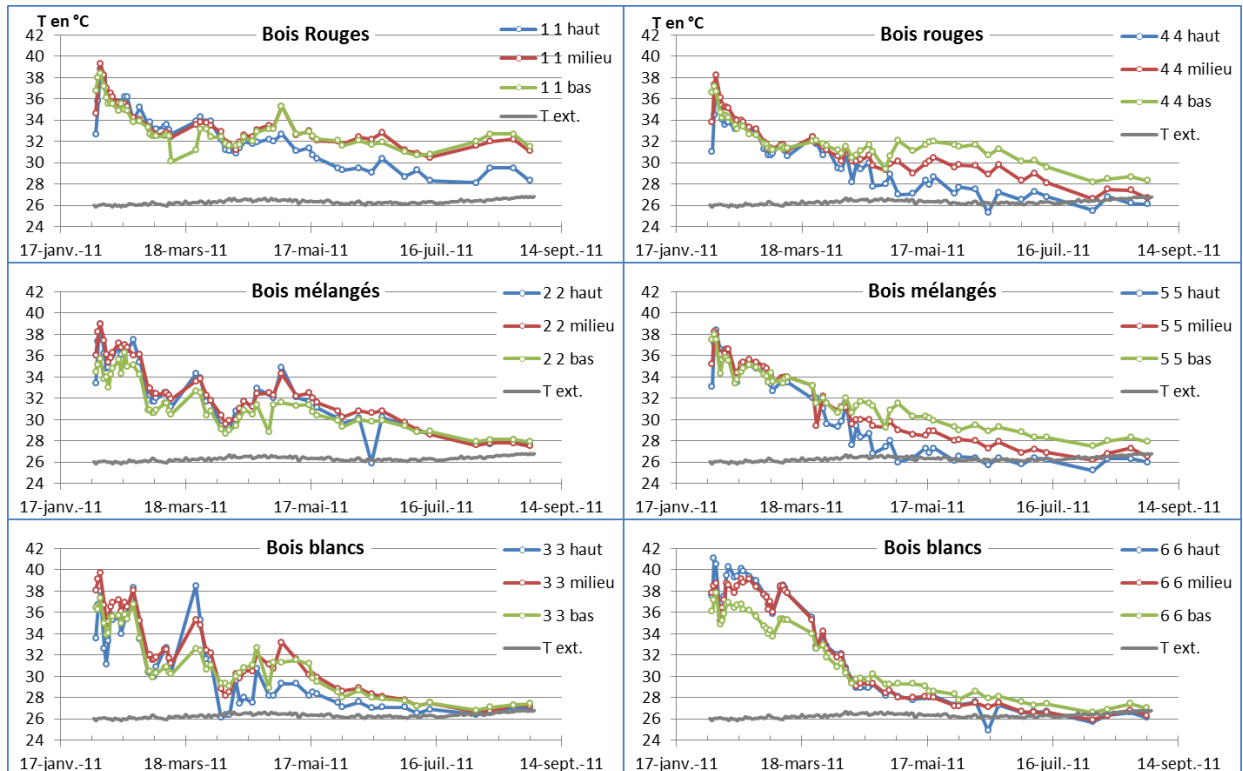


Figure 8 Evolution de la température à l'intérieur des silos d'essais, sur 3 hauteurs différentes : haut (1.20m), milieu (0.75 m) et bas (0.30 m) ; la courbe grise représente la température extérieure moyenne sous abri sur 30 ans ; les essais 1, 2 et 3 sont plus abrités des vents dominants que les essais 4,5 et 6.

De nombreuses variables sont présentées dans cette figure et nous allons essayer d'en dégager les résultats les plus pertinents pour le sujet qui nous intéresse :

a- L'élévation de la température :

Est un bon indicateur de l'activité microbiologique, les microorganismes (bactéries) en dégradant les sucres simples produisent de la chaleur à partir de réactions exothermiques. Ces bactéries peuvent dégrader des glucides plus complexes comme l'amidon, très présent dans l'aubier des bois fraîchement abattus, ou dépendre de l'activité enzymatique de champignon.

Dans nos essais on observe une montée de la température en début d'essai de 41 à 38°C suivant les silos, avec un maximum en haut du silo 6. Puis une baisse et une stabilisation progressive vers la température ambiante pour la majorité des silos mis à part le silo numéro 1 « bois rouge abrité » qui semble maintenir une certaine activité exothermique.

Les silos contenant des bois blanc semblent perdre plus rapidement cette activité microbiologique exothermique que les silos contenant du bois rouge, les silos mélangés étant intermédiaires.

Une hypothèse assez probable est que les glucides assimilables comme l'amidon ont été complètement dégradés. Hypothèse renforcée par le fait que les grumes avaient déjà 1 ou 2 mois de parc. De plus, lors du prélèvement sur le parc nous avons observé que certaines grumes de bois blanc étaient déjà fermentées et étaient chaudes au touché dans le cœur.

b- L'exposition

Malgré les deux couches d'isolant, l'exposition au vent dominants semble avoir eu un rôle dans la vitesse de refroidissement des silos et notamment ceux situés aux vents (silos 4, 5 et 6). Dès le mois d'avril, les silos aux vents sont au-dessous de 30 °C alors qu'il faut attendre de mi-mai à fin aout pour que les silos sous le vent descendent à cette valeur.

De plus, le gradient de température entre le haut et le bas du silo est plus important pour les silos 4 et 5 au vent, ce qui implique une déperdition de chaleur vers le haut.

5.4.2. Suivi de l'humidité

L'évolution de l'humidité dans les silos a été mesurée de 3 façons :

- Par des prélèvements directs au début et à la fin de l'essai
- Par un suivi de la conductivité électrique de plaquettes de Simarouba au cours de l'essai
- Par des mesures de plaquettes témoin en Simarouba, trois prélèvements au cours de l'essai.

La [Figure 9](#) présente de façon synthétique les résultats des différentes mesures.

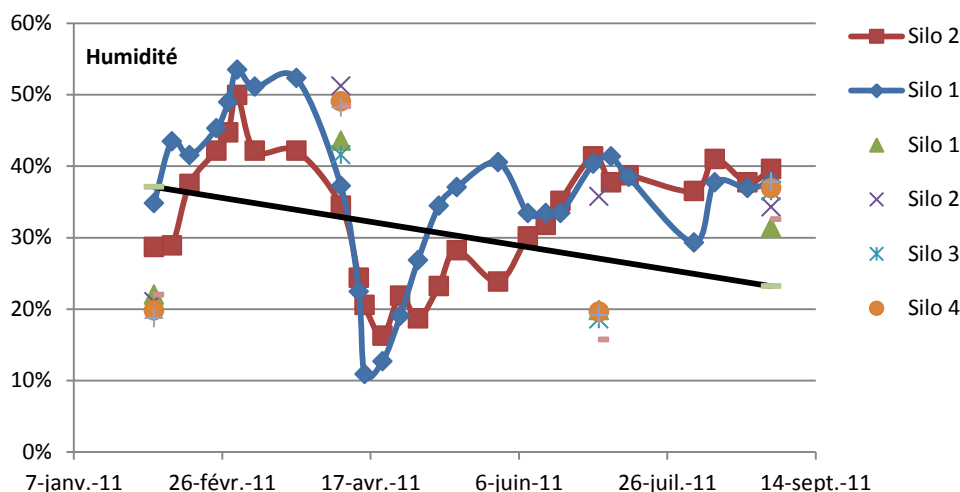


Figure 9 Evolution de l'humidité sur masse brute des plaquettes de Simarouba témoin, les courbes représentent l'humidité estimée à partir des mesures de résistance et les points isolés représentent les humidités calculées sur les plaquettes de Simarouba prélevées ; la droite noire représente les humidités moyennes mesurées en début et en fin d'essai

Les mesures de conductivité électriques sur les plaquettes de Simarouba implantées au cœur des silos n'ont pas données les résultats espérés, en effet, la mesure n'était pas stable dans le temps et il fallait attendre 20 mn pour que la valeur se stabilise. La [Figure 9](#) représente le suivi de deux silos, l'étalonnage entre l'humidité et la conductivité électrique s'est fait à partir des plaquettes témoins, les valeurs d'humidité sont malgré cela assez loin des valeurs réelles mesurées à partir des plaquettes témoins en Simarouba, de ce fait elles ne sont pas exploitables.

Les mesures d'humidité réalisées sur les plaquettes témoins prélevées dans les silos montrent trois phases : une prise d'humidité des plaquettes pendant la première phase jusqu'au 7 avril (l'humidité moyenne initiale sur brut des plaquettes était de 20 %) ; une baisse d'humidité pendant la seconde phase, l'humidité moyenne sur brut étant de 21 % le 3 juillet et enfin une reprise de l'humidité pendant la dernière phase, l'humidité moyenne sur brut étant de 35 % le 1 septembre 2011. S'il est assez compréhensible que

les planchettes de Simarouba mises dans les silos gagnent en humidité en contact avec l'atmosphère humide des silos (phase 1) et qu'ensuite elles sèchent progressivement en équilibre avec l'humidité des silos (phase 2), la troisième phase de reprise d'humidité, alors que l'humidité moyenne des silos en fin d'essai est plus faible que celle des planchettes, est plus complexe à interpréter.

En effet, l'hypothèse que nous faisons pour expliquer ce phénomène est que les planchettes de Simarouba sont attaquées par des champignons durant cette phase 3, ce qui explique la reprise d'humidité. Cette hypothèse est étayée par des observations antérieures (essais sol ENV 807) sur le comportement de cette espèce lorsque son bois est dans des conditions très humides. Effectivement, les composés qui protègent le bois de Simarouba (métabolismes secondaires) sont pérennes lorsqu'il est sec mais sont rapidement dégradés (après 2 ou 3 mois) quand le bois est dans des conditions très humides. Il perd alors au bout d'un temps sa protection naturelle, c'est pourquoi il n'est attaqué qu'en phase 3.

L'utilisation de planchettes témoins en Simarouba pour suivre l'humidité semble ne pas être non plus suffisamment fiable et serait à réaliser avec une essence plus durable.

Par contre, les mesures d'humidité par prélèvements directes d'un certain volume de plaquettes avant et en fin d'essai se sont révélées à la fois répétables et fiables, les résultats sont présentés en [Figure 10](#) et dans le [Tableau 3](#).

*Tableau 3 Moyennes des humidités sur brut au cœur des silos
en fonction des différents types de bois en début et en fin d'essai*

Silos	H% Initiale	H% finale
Bois rouges	35,1%	26,1%
Bois mélangés	37,8%	21,7%
Bois blancs	39,6%	21,8%

Ces résultats font ressortir plusieurs points :

- 1- Les plaquettes des silos, malgré leur confinement, ont séché pendant la période de 6 mois d'essai, elles ont perdu entre 25 % pour les bois rouges et de 45 % pour les bois blancs et mélangés.
- 2- Les bois rouges ont proportionnellement moins bien séchés que les 2 autres types de bois, qui ont des humidités équivalentes. La diffusion de l'eau et de la vapeur d'eau étant plus faible à l'intérieur ces types de bois à la fois parce qu'ils sont moins hydrophiles et que leurs vaisseaux sont souvent obstrués.
- 3- On retrouve dans tous les silos un gradient d'humidité du cœur vers l'extérieur avec une déperdition plus importante d'humidité vers le dessus du silo ([Figure 10](#)).
- 4- Comme pour la température on retrouve un petit effet exposition, avec une humidité moyenne plus faible du côté sous le vent (silos 4,5 et 6). Cependant il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les deux expositions : les échantillons exposés et abrités étant normaux, les variances égales, le test de Student donne une p-value bilatérale de 0,118, rejetant alors l'hypothèse de moyennes différentes.
- 5- L'hétérogénéité de la distribution de l'humidité est aussi plus forte dans les bois rouges que dans les autres silos, en effet, la variabilité (écart-type/moyenne) est de 18.0 % pour silos en bois rouges alors qu'elle est respectivement de 14.1 % et 12.4 % pour les bois mélangés et les bois blancs.



Figure 10 Distribution de l'humidité sur masse brute à l'intérieur des 6 Silos en fin d'essai

5.4.3. Estimation de la perte de masse des silos

Nous avons estimé la perte de masse, liée à la perte de matière suite aux attaques fongiques durant l'essai à partir des masses totales avant et après l'essai en les confrontant aux humidités des plaquettes mesurées avant et après l'essai.

Le principe du calcul consiste à calculer une masse anhydre théorique (a) à partir de la masse initiale (début de l'essai) en plaquette de chaque silo et à partir des humidités initiales faites par prélèvements sur les différents silos avant l'essai. A partir de la masse finale en plaquette de chaque silo et de la masse anhydre théorique, on calcule des humidités théoriques (b) pour

chaque silo, humidité que l'on confronte avec les humidités réelles mesurées en fin d'essai pour calculer la perte de masse (c).

Principe des calculs :

$$(a) \text{ Masse anhydre théorique} = \text{Masse initiale} \times (1 - \text{Humidité initiale})$$

$$(b) \text{ Humidité calculée en \%} = \frac{(\text{Masse finale} - \text{Masse anhydre théorique})}{\text{Masse finale}}$$

Calcul de la perte de masse

Soit

Hf : l'humidité finale ; Hc : l'humidité calculée ; mh, mc, mf des masses.

Pour une même masse mh on a :

$$Hc = \frac{mh - mc}{mh} \text{ et } Hf = \frac{mh - mf}{mh}$$

On en déduit que

$$mh = \frac{mc}{(1 - Hc)} \text{ et } mh = \frac{mf}{(1 - Hf)}$$

Ainsit que $mc = mf \frac{(1 - Hc)}{(1 - Hf)}$

La perte de masse s'exprime par :

$$PM = \frac{mc - mf}{mc} \text{ soit } PM = \frac{mf \frac{(1 - Hc)}{(1 - Hf)} - mf}{mf \frac{(1 - Hc)}{(1 - Hf)}} \text{ D'où } PM = 1 - \frac{1}{\frac{(1 - Hc)}{(1 - Hf)}}$$

On obtient alors :

$$(c) \text{ Perte de masse en \%} = 1 - \frac{(1 - \text{Humidité finale})}{(1 - \text{Humidité calculée})}$$

Tableau 4 présentation des masses, des humidités avant et après l'essai et des pertes de masse calculées pour les 6 différents silos

Silos	Masse initial e en kg	Mass e Finale en kg	Pert e brut e	Humidit é initiale mesurée	Masse anhydre théoriqu e en kg	Humidit é calculée	Humidit é finale mesurée	Perte de mass e	PM Moyenn e par type de bois
1 - Bois rouges	331,0	258,7	22%	35,1%	214,8	17,0%	17,7%	0,9%	0,6%
4 - Bois rouges	324,5	256,0	21%	35,0%	210,9	17,6%	17,8%	0,2%	
2 - Bois mélangés	299,0	224,1	25%	38,0%	185,4	17,3%	18,6%	1,6%	2,1%
5 - Bois mélangés	308,0	234,1	24%	37,5%	192,5	17,8%	20,0%	2,7%	
3 - Bois blancs	254,9	188,1	26%	39,7%	153,7	18,3%	21,0%	3,3%	3,1%

6 - Bois blancs **246,2** **179,1** 27% **39,5%** 149,0 16,8% **19,2%** **2,8%**

Les résultats sont très cohérents et montrent une assez faible perte de masse de l'ensemble des silos sur les six mois d'essai. Les silos les plus dégradés sont ceux en bois blancs qui ont eu une perte de 3,1% les silos en bois mélangés ont perdu 2,1 % de matière sèche et les silos en bois rouge 0,6 %. En moyenne, la perte de masse anhydre est calculée à 1.9%.

5.4.4. Détermination de la densité apparente des plaquettes séchées

Méthodologie :

La densité apparente des plaquettes forestières après l'essai silo a été estimée directement à partir du volume final des silos pour la densité tassée. La densité non tassée a été estimée en comptant le nombre de remplissages (à ras bord) d'un seau de 21 L nécessaire au vidage de chaque silo.

Résultats :

Le tableau suivant présente les résultats des densités apparentes obtenues :

Bois blancs		Bois rouges		Bois mélangés	
Non tassées	Tassées	Non tassées	Tassées	Non tassées	Tassées
0,23	0,26	0,32	0,36	0,27	0,31

Commentaires:

Le tableau fait ressortir plusieurs points remarquables :

- Les densités apparentes ont perdues entre 20 et 30 % par rapport aux densités fraîches
- les densités apparentes des plaquettes de bois rouges sont 28 % plus élevées que celles de bois blancs.
- Le tassement des silos après essai a d'augmenté la densité apparente que de 12 % quel que soit le type de plaquette.

5.5. Conclusion

Cette étude expérimentale du stockage de plaquettes forestières en silo a donné de nombreux résultats dont voici les principales conclusions :

Nous avons pu observer une montée en température des dispositifs dès la mise en silo avec un maximum de 41 °C, toutefois cette augmentation de la température n'a pas été aussi importante que ce qui est mentionnée dans la bibliographie (7, 8) en région tempérée où la température monte jusqu'à 70°C. L'hypothèse pour justifier ce résultat est que la fermentation se fait beaucoup plus rapidement qu'en zone tempérée, dès l'abatage de l'arbre lorsqu'il n'y a pas de protection biochimique, il y a fermentation et les sucres complexes comme l'amidon disparaissent assez rapidement en quelques mois. La montée en température est donc dépendante de la durée de stockage des grumes, plus elle sera courte, plus la montée en température du tas sera importante et plus elle sera longue (+ 2 mois) moins la montée en température sera importante.

Si l'on veut donc profiter de cette phase de monter en température pour sécher naturellement les plaquettes forestières en tas, il faut absolument réduire le temps entre l'abatage et le broyage.

Les dispositifs permettant de suivre l'évolution de l'humidité dans les silos n'ont pas donné les résultats escomptés, pas plus les plaquettes témoins que les mesures de conductivité électriques ne peuvent vraiment être exploitées pour estimer la cinétique des variations d'humidité dans le tas de plaquettes.

Par contre, les prélèvements de plaquettes ont donné des résultats probants, ce sont certainement les plus fiables et les plus simples à mettre en œuvre même s'ils nécessitent une intubation du tas.

Les mesures d'humidité en début et en fin d'essai nous montrent que les plaquettes ont bien séché malgré leur confinement, les bois denses et durables ont séché un peu moins vite que les bois légers et non durables, partant de 40 % l'humidité moyenne sur brut au cœur des silos varie de 22 à 26 % après 6 mois de stockage.

Les pertes de matière sèche au cours de l'essai ont varié de 0,5% pour les bois rouges à 3,1% pour les bois blancs. On peut donc considérer dans une première approximation que cette perte n'excédera 3 % de la matière sèche après 6 mois d'essai pour un tas de plaquettes forestières abrité de bois mixtes.

Pour ce qui est de l'exposition au vent dominant, il existe un effet antagoniste entre le séchage qui est accéléré par les vents forts et réguliers et le refroidissement du tas exposé à ces vents. Il est certainement possible d'optimiser le stockage pour soit profiter de la montée en température si les plaquettes forestières sont très fraîches, soit, si les plaquettes sont plus âgées, stocker les plaquettes dans une zone bien ventilée afin de profiter du séchage naturel.

6. Etude technico-économique du stockage longue durée du bois énergie

Nous traiterons dans cette partie de la comparaison des modes de stockage possibles en grumes ou en plaquettes forestières, puis la chapitre suivant portera sur l'étude technico-économique des 2 itinéraires de mobilisation de bois combustible : soit par exploitation et stockage en grume, soit par exploitation et stockage en plaquettes forestières.

6.1. Description et caractéristiques principales des modes de stockage: grumes/plaquettes

Stockage en grume

Le stockage en grume est réalisé traditionnellement sur plateforme en terrain stabilisé non couverte (Photo 6) comme pour les scieries, mais avec un empilement possible sur une plus grande hauteur si l'on est équipé d'un chargeur adapté. On considère généralement qu'il faut compter en moyenne 1 m² de surface au sol pour stocker 1 à 1,2 m³ de bois en grume, soit en Guyane, une surface de 900 m² par tranche de 1000m³.

Le coût d'aménagement et stabilisation du terrain choisi dans une zone propice (bon drainage naturel et bonne portance du sol) peut être évalué entre 20 et 30 k.€/1000 m². Par simplification, nous ne compterons pas de coût d'entretien annuel, bien que les travaux de nettoyage du sol pour enlever les écorces qui se décrochent des grumes (Photo 7) sera réalisé une à deux fois par an.



Photo 6 : parc à grume aménagé. Outre les voies de circulation des engins, on prévoit des supports pour éviter que les piles de grumes ne posent directement sur le sol (et soient ré humidifiées par le sol).



Photo 7 : des écorces peuvent se décrocher complètement de la grume lors du stockage sur parc.

Stockage de plaquettes forestières

Le stockage de plaquettes forestières est prévu sur plateforme avec dalle en ciment et couverture par hangar sur une partie de la plateforme. La figure suivante montre un exemple de schéma d'implantation d'une plateforme.

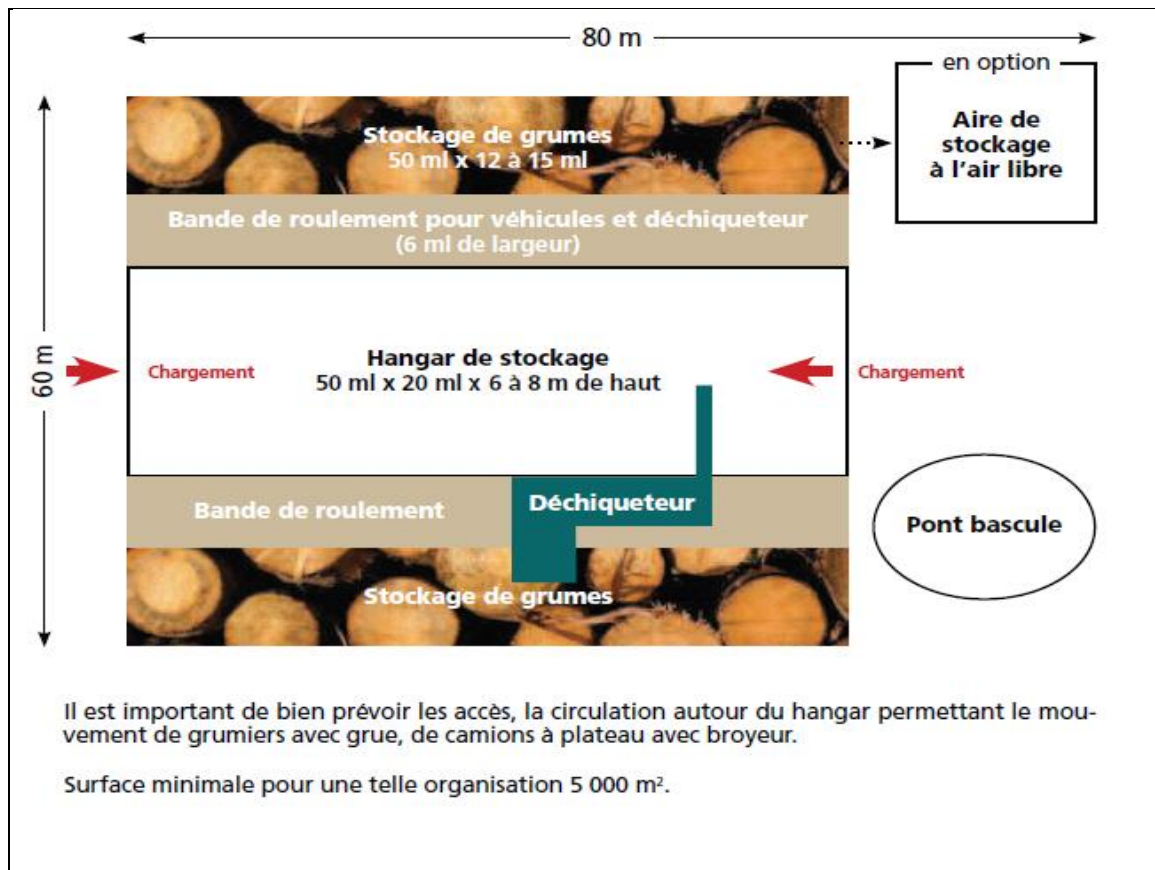


Figure 11 : exemple de schéma d'implantation d'une plateforme de mise en plaquette et stockage de plaquettes forestières de capacité : 3500 MAP (mètre cube apparent de plaquettes). Source : Guide technique de mise en œuvre des plateformes et hangars de stockage de bois énergie pour le milieu rural à destination des collectivités - Juillet 2009.

Pour les bois de métropole, le ratio retenu est de 1 tonne de plaquette/m² de hangar. Compte tenu de leur densité plus élevée, cela correspond à environ 1,5 tonne de bois de Guyane/m² couvert.

Pour conclure ce paragraphe sur la description du mode de stockage en plaquettes forestières, plusieurs recommandations peuvent guider la réalisation de ce mode de stockage :

Faire des plaquettes les plus grosses et régulières possibles en accord avec le « cahier des charges » de la centrale. Plusieurs recommandations peuvent guider la réalisation de stockage en plaquettes forestières, :

- Faire des plaquettes les plus grosses et régulières possibles en accord avec le « cahier des charges » de la centrale énergétique, et limiter au maximum la proportion de fines.
- Ne pas tasser artificiellement pour permettre la dissipation de la chaleur par convection et la réduction d'humidité liée.
- Il est probable que le stockage en silo en extérieur bâché (utiliser une bâche « respirante ») ou non bâché, chercher à augmenter la proportion de « cœur » du silo en travaillant sur la (la forme et les proportions) du tas de plaquettes. Réaliser un silo jusqu'à 10m de haut en fonction des limites des équipements permet de limiter la proportion des zones de bordure.
- Ne pas tasser artificiellement, et limiter au maximum la proportion de fines.
- Ne pas tasser artificiellement pour permettre la dissipation de la chaleur par convection et la réduction d'humidité liée.
- Dans le cas de silo en extérieur bâché (utiliser une bâche « respirante ») mais non couvert, chercher à augmenter la proportion de « cœur » du silo en travaillant sur la (la forme et les

proportions) du tas de plaquettes. Réaliser un silo jusqu'à 10m de haut en fonction des limites des équipements permet de limiter la proportion des zones de bordure.

6.2. Evaluation de l'impact du mode de stockage sur le bilan énergétique

La comparaison du bilan énergétique est réalisée à partir de l'évaluation des pertes d'humidité par le bois et des pertes de matière.

En se basant sur les résultats obtenus lors de l'expérimentation menée de février à septembre 2011 au Cirad à Kourou et de la bibliographie, des scénarios d'évolution du taux d'humidité du bois ont été définis (cf. §4) pour les grumes en extérieur ou les plaquettes forestières sous hangar.

Bilan énergétique comparé des modes de stockage	Grumes	Plaquettes forestières*
type stockage	sur plateforme stabilisée en extérieur	en tas, sur dalle sous hangar
Humidité initiale	40%	40%
PCI initial des bois (kWh/kg)	2.7	2.7
Humidité final après stockage	38%	26%
PCI après stockage (kWh/kg)	2.8	3.7
Perte de matière (en% de la matière sèche)		
1- par dégradation de la matière	3%	2%
2 - par élimination des écorces ou des bordures de tas de plaquettes	2%	0%
Bilan énergétique	98,5%	104,1%

Tableau 5 Bilans matière et énergétique comparé performances techniques du stockage en grumes ou en plaquettes forestières.

Les évaluations présentées dans ce tableau montrent que le stockage des plaquettes forestières permet d'améliorer de 4% le contenu énergétique potentiel d'une ressource en bois combustible comparativement au stockage en grumes.

6.3. Evaluation de l'impact du mode de stockage sur les coûts

Pour le stockage en plaquettes forestières, il a été retenu de limiter la durée de stockage à 3 mois car cela devrait permettre d'obtenir le séchage stabilisé autour de 25% d'humidité sur brut. La perte d'humidité est beaucoup moins rapide ensuite et ne justifie pas de prolonger ce mode de stockage coûteux. Le volume correspondant aux 3 premiers mois (pour viser les 6

mois au total) sera stocké en grumes en extérieur. Le tableau suivant résume l'approche économique comparée des coûts de stockage.

Le coût moyen d'investissement pour une plateforme de stockage de plaquettes forestières telle que décrite ci-avant est évalué entre 1000 et 1700 €/m², (hors coût du broyeur).

Le stockage en plaquette pour une capacité de 10 000 tonnes nécessiterait un investissement évalué à environ 8,5 millions d'euros.

Etude économique pour une capacité stockage 10000 tonnes	Grumes	Plaquettes forestières*
type aménagement	Sol stabilisé , réseau de drainage.	Dalle en béton armée + hangar haut (capacité 5000t) + sol stabilisé pour 5000t en grumes
Montant des investissements	200 000	4 400 000
durée amortissement	20	20
Amortissement annuel (€)	10000	220 000
Coût ramené à la tonne en €/T	1	22
Coût manutention (dépôt et reprise) en €/T	3	6
Total coût stockage en €/T	4	28

Tableau 6 : Récapitulatif des coûts pour un stockage de 10 000 tonnes de capacité (i) en grumes ou (ii) combinant stockage en grumes (3 mois) et en plaquettes forestières (3 mois).

Les résultats montre un coût du stockage en plaquettes forestières sous hangar de 28€/tonne, à comparer avec le coût du stockage des grumes, qui est évalué à 4 €/t. L'écart de coût provient principalement du niveau d'investissement nécessaire dans les infrastructures.

6.4. Conclusion sur le stockage du bois énergie

Le tableau suivant résume l'analyse avantage/inconvénient mener pour comparer les deux modes de stockage pressentis : Stockage en grumes/en plaquettes.

<i>Scénario n°1 : stockage en grumes</i>	<i>Scénario 2 : stockage en plaquettes forestières</i>
Avantages	
Simplicité de mise en œuvre, Maîtrise des pratiques de ce mode de stockage traditionnel, Coût peu élevé, Nécessite moins d'immobilisations financière car pas d'opération de broyage préalable.	Manutention facilité Maintien de la propreté du bois Séchage du bois peut être fortement accéléré en utilisant de l'énergie thermique fatale (sans autre usage possible dans la centrale dendroélectrique).

<i>Inconvénients</i>	
<p>Séchage du bois très lent.</p> <p>Nécessite une surface au sol en plateforme aménagée plus important.</p>	<p>Coût très élevé</p> <p>Pratique innovante – peu de données disponibles dans la littérature, et en conditions (essences de bois, climat,...) tropicales. Peu de recul sur les moyens de contrôle simples et fiables de l'humidité et de la dégradation des propriétés énergétiques du bois).</p> <p>Technique pouvant être délicate à conduire (risque d'échauffement incontrôlé)</p> <p>immobilisation financière du stockage supérieure car l'opération de broyage est déjà réalisée.</p> <p>Nécessite une plateforme et un bâtiment de stockage.</p>

Tableau 7 : Synthèse des avantages et inconvénients des modes de stockage comparés

Le stockage en plaquettes forestières sous abri nécessite de très lourds investissements qui le rendent peu intéressant même si l'on a un gain de PCI grâce au séchage naturel du bois qui peut être obtenu en silo abrité en 3 mois.

Par conséquent, il est recommandé de stocker le bois sur longue période sous forme de grumes, et d'utiliser la faculté des plaquettes forestières à sécher (relativement rapidement) en réalisant une ventilation d'air chaud dans les silos de stock tampon habituels pour garantir l'alimentation en plaquettes de la centrale.

7. Etude technico-économique de la mobilisation du bois à partir des parcelles à vocation énergétique, ou à partir des défriches agricoles

Les itinéraires de mobilisation de deux gisements sont étudiés : l'exploitation forestière de bois énergie en forêt exploitée durablement, et la mobilisation de bois résiduels dans les parcelles en conversion agricole. L'étude s'appuie sur une actualisation des résultats de l'étude Cirad/ONF de 2007 tant au niveau des coûts que du mode d'exploitation du bois énergie en forêt, et en prenant en compte des travaux récents de l'ONF et de Guyane Consult :

- L'exploitation de parcelles de bois énergie a fait l'objet d'une première expérimentation en 2 petites parcelles (quelques hectares) par l'ONF en 2011 et qui a confirmé le besoin de développer un mode d'exploitation adapté (proposition de travailler par cloisonnement et d'utiliser des engins mieux adaptés au bois énergie).
- L'analyse de l'exploitation des bois de défriche a aussi considéré l'étude « Identification des conditions pour une valorisation énergétique de la biomasse issue de l'installation des agriculteurs en Guyane » réalisée par Guyane Consult .

Les scénarios techniques de mobilisation du bois de la parcelle jusqu'à la chaudière seront analysés sous l'angle de l'efficacité énergétique et économique en considérant le cadre de la certification de l'exploitation forestière : adoption de mesures d'amélioration des conditions de travail, réduction des risques pour le personnel, limitation des impacts sur l'environnement, etc.

En accord avec la demande du représentant du GENERG lors de la 1ère réunion technique de suivi, cette partie porte plus particulièrement sur le choix des options de stockage des bois en grumes versus plaquettes forestières. L'étape de mise en plaquette forestière sera étudiée afin de comparer les options de broyage : « mobile en parcelle » ou « broyeur statique sur plateforme » qui seront associé aux options d'itinéraires de stockage : en cas de broyage en forêt, le stockage est réalisé en plaquettes forestières.

Dans tous les cas, les itinéraires sont considérés depuis la mobilisation en parcelle jusqu'à la grille de la chaudière en incluant le transport et le stockage sur plateforme durant 6 mois.

7.1. Description des itinéraires de mobilisation et stockage du bois énergie

Les deux itinéraires étudiés portent sur l'exploitation de bois combustible en parcelles forestières à vocation principale la production de bois énergie, et l'exploitation du bois résiduaire des parcelles en défriches agricoles.

Les deux itinéraires peuvent être résumés comme suit :

- **1^{er} itinéraire « exploitation et stockage en grumes »** - cas de l'exploitation forestière dédiée.

Arbres en parcelle forestière --> tronc --> débusquage --> débardage par treuil (cloisonnement) puis par traîne --> parc de transfert --> tronçonnage et chargement transport /grumier ---> plateforme de stockage longue durée --> // --> chargement vers broyeur --> alimentation centrale.

- **2^{eme} itinéraire « plaquettes forestières »** - cas de la valorisation du bois des parcelles défriches agricoles

Arbres sur pied ---> tronc ---> débusquage ---> débardage par treuil (cloisonnement), tronçonnage et chargement sur PORTEUR ---> Broyeur mobile bord piste principale ---> transport /benne grand volume ---> plateforme de stockage plaquettes ---> // ---> alimentation centrale.

Le 1^{er} itinéraire est considéré en parcelle forestière, tandis que l'exploitation en parcelles agricoles est étudié selon le 2^{ème} itinéraire avec broyage en parcelles pour permettre un retour partiel de bois au sol selon une approche similaire à celle de l'étude réalisée par Guyane Consult.

L'étude ONF a permis d'explorer différents scénarii d'exploitation (sylviculture et technique d'exploitation). Elle a consisté en un test de deux schémas d'exploitation forestière réalisés en deux parcelles expérimentales de 5 hectares qui avaient fait l'objet d'un inventaire et du marquage des arbres à exploiter : la première parcelle a été exploitée selon un schéma défini par l'ONF qui comprenait un « cloisonnement d'exploitation » tandis que la deuxième parcelle a été exploitée par l'entreprise prestataire sans recommandation particulière.

Les travaux expérimentaux ont mis en évidence les difficultés actuelles pour l'entreprise prestataire à s'adapter au nouveau type d'exploitation « bois énergie ». Parmi les facteurs perturbant, on citera le fait d'avoir fait travailler les agents à la journée et non pas à la tâche ; d'une part, et la sortie d'un volume de bois beaucoup plus important (Prés de 100 m³/ha), soit 5 à 6 fois plus que d'habitude en exploitation bois œuvre, d'autre part.

Les opérateurs ont visiblement manqué de repères pour cette activité nouvelle, ce qui les a conduit à :

- n'exploiter qu'une fraction de la surface de la parcelle (30% de la surface n'a pas été exploité) et à oublier des grumes en forêt y compris dans la zone exploitée, et à
- réaliser des cloisonnements très peu réguliers et à une distance ne correspondant pas au schéma prévu par l'ONF, rendant délicat l'exploitation des résultats techniques et économiques obtenus lors de cette opération test.

Pour ces raisons, nous nous baserons sur un scénario prospectif considérant l'adoption de pratiques nouvelles en Guyane et permettant de s'inscrire dans les principes de la certification forestière.

Concernant l'itinéraire de mobilisation de la biomasse en défriche agricole, la démarche d'ensemble a été décrite dans l'étude ONF/Cirad de 2007. Il est prévu en plus de suivre les recommandations de l'étude Guyane Consult de broyer le bois, en partie au moins, en parcelle afin d'en restituer au sol la fraction correspondant aux houppiers qui étaient brûlés sur place dans le scénario précédent.



Photo 8: Exemples de broyeurs mobiles de grandes capacités (moteur diesel de 420 à 480 CV). Déchiqueteuse à tambour "spécial plaquettes forestières et chargement à la brassée et à la grue" - Pour grosses productions. " Production horaire théorique en bois type européen : de 100 à 150 m3

7.2. Evaluation des coûts de mobilisation et stockage longue durée du combustible.

Nous traiterons ici des deux gisements pressentis comme prépondérant : le bois exploité en parcelles à vocation principale la production de bois énergie, et la récupération du bois énergie dans les défriches agricoles.

Que ce soit pour le bois d'origine forestière ou de parcelles en défriche agricole, le scénario retenu prévoit un stockage durant 4 à 6 mois afin de ne pas sortir du bois durant les périodes fortement pluvieuses généralement de janvier à juin, excepté la période du « petit été de mars » que l'on observe habituellement durant 6 à 8 semaines entre février et avril.

7.3. Repères avec l'évolution des coûts filière bois œuvre

Nous présentons ici l'évolution des coûts de mobilisation du bois œuvre qui peut nous servir de repère tant qu'il n'existe pas d'exploitation bois énergie. Aujourd'hui, on constate une augmentation forte des coûts d'approvisionnement en grumes des industries du bois par rapport à 2007 comme le montre le tableau ci-après :

Opérations	Coût 2007 (€/m ³)	Coût 2010 (€/m ³)
Abattage	5	3-7
Débardage	21	30-45
Transport 150-200km	34	40- 65
TOTAL	60	85-110

Tableau 8 : Comparaison des coûts de mobilisation du bois œuvre entre 2007 et 2010.

7.4. Evaluation des coûts pour les parcelles bois énergie

Sur la base de l'étude ONF/Cirad de 2007, nous avons actualiser l'itinéraire technique en ajoutant un stockage longue durée, et en actualisant les coûts pour tenir compte de l'inflation des prix (carburant, pièces et fournitures, main œuvre), et de l'évolution des pratiques en forêts qui visent l'objectif global d'une plus grande limitation des impacts sur le sol et la forêt. Il s'agit en particulier de l'arrêt de certains travaux forestiers en périodes pluvieuses, ce qui impacte plusieurs mois par an et nécessite plus de matériels et plus de main d'œuvre pour traiter l'ensemble du volume annuel en 6 à 8 mois seulement.

Le tableau suivant présente les données économiques retenues comme hypothèse pour le coût du Bois énergie (en €/tonne) :

Opérations	Coût (plage -€/m ³)	Coût moyen (€/m ³)
Abattage	2-4	3
Débardage	18-28	23
Transport (20-45km) y compris la création des pistes secondaires	10- 16	14
Broyage en plateforme	12-14	13
Stockage longue durée en plateforme y compris la manutention spécifique*	3 à 5	4
Achat bois ONF (prévisionnel)	5 à 7	7
Frais de suivi	1	1
TOTAL	55-81	70

* en parc à grumes

** les pistes principales sont considérées prises en charge par le Feder au même titre que les pistes pour l'exploitation du bois d'œuvre.

Tableau 9 : Evaluation des coûts pour la mobilisation du bois énergie en parcelles forestières (chiffres 2010)

Le coût global ressort entre 55 et 81 €/T , avec une valeur moyenne «évaluée à 70€/T rendu entrée centrale. Une diminution sensible du coût semble possible en limitant les distances à parcourir au débardage et au transport de bois (total de 12€/T d'écart possible). Cela nécessite d'optimiser les méthodes et équipements d'exploitation forestière, de prévoir le transport du bois sur piste fermée au public (utilisation d'engins de plus forte charge) et de rapprocher les centrales de la ressource forestière. A titre d'illustration de voies d'amélioration des coûts à approfondir, signalons que les distances courtes et le parcours exclusivement sur des pistes forestières permet d'envisager des attelages à plus forte charge utile.

7.5. Evaluation des coûts pour la filière bois de défriche

Sur la base de l'étude ONF/Cirad de 2007, nous avons actualisé l'itinéraire technique en ajoutant un stockage longue durée, et en actualisant les coûts pour tenir compte de l'inflation des prix (carburant, pièces et fournitures, main œuvre), et de l'évolution des pratiques à la défriche qui visent l'objectif global d'une plus grande limitation des impacts sur le sol de la future parcelle agricole. Il s'agit en particulier de :

- l'utilisation d'un broyeur mobile permettant de laisser au sol une petite partie du bois broyé. l'arrêt des travaux en périodes pluvieuses, ce qui impacte plusieurs mois par an et
- la nécessité de plus de matériels et plus de main d'œuvre pour traiter l'ensemble du volume annuel en 6 à 8 mois de travail seulement.

Le tableau suivant présente les données économiques retenues comme hypothèse pour le coût du Bois énergie issu de parcelles destinées à une conversion agricole.(en €/tonne) :

Opérations	Coût 2010 (plage en €/m³)
Abattage	2-4
Débardage	10
Transport (20-45km) y compris la création des pistes secondaires	10- 14
Broyage en parcelle ou bord de parcelle	14-18
Stockage longue durée en plateforme avec hangar pour plaquettes forestières	4
Achat bois	0 à 3
Frais de suivi	1
TOTAL	41-54

Tableau 10 : Evaluation des coûts pour la mobilisation du bois énergie en parcelles de défriche agricole: .

Le coût global ressort entre 41 et 54 €/T, soit une valeur moyenne d'environ 47€/T rendu entrée centrale dendroénergétique. Une incertitude demeure sur le coût du broyage mobile qui dépendra beaucoup de l'organisation de l'alimentation en grume du broyeur lui-même, ainsi que l'efficacité des services d'entretien et maintenance à réaliser en parcelle. En effet, la productivité réelle par jour est un facteur important de la compétitivité de ce type d'équipement.

7.6. Comparaison des coûts des itinéraires étudiés

Le tableau suivant récapitule les données de coût pour les 2 itinéraires étudiés :

Gisement d'origine bois énergie	Exploitation parcelles bois énergie	Déforestation agricole
Coût des opérations (euros/tonne)		
Achat de la biomasse	7	3
Abattage	3	3
Coût de la récolte et mise en dépôt bord de piste	20	10
Transport de la piste jusqu'à la plateforme de stockage bois rond ou de mise en plaquette	15	12
Stockage en bois rond sur parc à grumes (y compris manutentions)	2	0
Mise en plaquettes (broyage)	13	16
Mise en dépôt et stockage dans le silo longue durée (y compris manutentions)	0	6
Frais de suivi	1	1
Total (en €/T)	61	51

Tableau 11 : Récapitulatif des coûts de mise à disposition du bois énergie en plaquettes au silo de stockage (entrée centrale).

Le coût moyen en parcelles de défriche agricole est inférieur de 10€/T par rapport au bois de parcelles forestières. Cet élément positif est obtenu grâce à des coûts de débardage, de transport et d'achat du bois plus bas, et malgré un coût du broyage nettement plus élevé (+ 30%) qu'en broyeur statique fonctionnant à l'électricité.

Comme le montre l'étude de Guyane Consult, cela nécessitera d'optimiser l'organisation de la filière de récupération des bois en parcelles, d'une part, et l'organisation des chantiers de défriches agricoles et les méthodes et équipements d'exploitation forestière. Quel que soit l'origine du bois, l'objectif de rapprocher les centrales de la ressource forestière (les distances courtes et l'absence de parcours sur la route, permet l'utilisation de pistes forestières uniquement et d'utiliser des ensembles tracteurs agricoles attelés à plusieurs remorques pour réduire le coût de transport.

Le stockage du bois en plaquette augmente le coût du bois de 5€/tonne à cause des infrastructures à construire, mais le stockage en plaquettes accélère le séchage naturel avant l'utilisation comme combustible. Le surcoût peut en effet être couvert par l'amélioration du rendement énergétique de la centrale grâce au bois plus sec utilisé.

Les postes les plus élevés sont l'exploitation forestière, le transport et la mise en plaquette. C'est sur ces coûts qu'il est souhaitable de trouver des solutions pour la maîtrise des coûts du bois combustible. Une des clef est vraisemblablement d'optimiser la localisation des futures centrales au plus près de la ressource, ce qui devrait justifier l'allongement nécessaire des lignes électriques de raccordement.

Références bibliographiques

1. Acker Jv, Stevens M, Carey J, Sierra-Alvarez R, Militz H, Bayon II, Kleist G, Peek RD (2003) Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1. Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*.61(1):35-45.
2. Chave J, Muller-Landau HC, Baker TR, Easdale TA, Steege Ht, Webb CO (2006) Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications*.16(6):2356-67
3. Gerard J, Miller RB, ter Welle BJH (1996) Major timber trees of Guyana : Timber characteristics and utilization. Tropenbos serie 15 The Tropenbos foundation, Wageningen, the Netherlands.
4. Sorz J, Hietz P (2006) Gas diffusion through wood: implications for oxygen supply. *Trees: Structure and Function*.20(1):34-41.
5. XP CEN/TS 15083-2. 2006. Determination of the natural durability of the solid wood against wood-destroying fungi – Test methods. Part2: Soft rotting micro-fungi - European Committee for Standardisation (CEN).
6. Yves Schenkel (1), Michael Temmerman (1), Didier Marchal (1), Céline Schaar (2) (2005). Une analyse comparative de l'impact sur l'emploi d'une installation de chauffage au bois. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2005 9 (1), 53–64
7. Ademe, 2008 ; REFERENTIEL COMBUSTIBLE BOIS ENERGIE : LES PLAQUETTES FORESTIERES - DEFINITION ET EXIGENCES ; avril 2008- Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par FCBA. 45p.
8. Ademe, 2007, Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois - Synthèse. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Sophie MOUSSEAU, Bureau d'Etudes INDDIGO. Coordination technique : Caroline RANTIEN - Département Bio-ressources de l'Ademe. 32p.
9. CRITT bois, FIBOIS, CTBA (2001), « Mesure des caractéristiques des combustibles bois : évaluation et proposition de méthodes d'analyse de combustible », étude pour l'ADEME, juin, http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Combustible/CRITT-ADEME_Mesurecombustible.pdf.
10. ITEBE, Tableur de conversion des unités bois énergie pour l'usage des plaquettes forestières,
11. <http://www.itebe.org/portail/affiche.asp?arbo=1&num=455> UCFE (2005), « Amélioration des performances technico-économiques de la production de plaquette forestière à partir d'opérations sylvicoles. Recherche d'extension des protocoles expérimentaux de caractérisation de ce combustible vers une charte de qualité », étude pour l'ADEME.
12. Développement de la biomasse énergie en Guyane : Synthèse des études conduisant à un schéma directeur de la filière. Pierre Courtiade, fiche Ademe Guyane –septembre 2010, 2p.

Références bibliographiques sur la mise en plaquettes et le comportement au stockage.

13. AST*—Yann ROGAUME*—Eric MOUGEL*—André ZOULALIAN**Modifications physico-chimiques des plaquettes forestières lors du séchage naturel en tas. UNIVERSITE Nancy I. 6 p.
14. Johann AST , 2009. Étude de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des plaquettes forestières en fonction des modalités de stockage et de séchage. Thèse de doctorat de l'U Nancy I. 209 p.
15. Garstang J. (2002) and al. IDENTIFICATION AND CHARACTERISATION OF FACTORS AFFECTING LOSSES IN THE LARGE-SCALE, NON-VENTILATED BULK STORAGE OF WOOD CHIPS AND DEVELOPMENT OF BEST STORAGE PRACTICES. FES B/W2/00716/REP. DTI/Pub URN 02/1535. First Renewables Ltd, pp 119.

16. Anonyme. Guide technique de mise en œuvre des plateformes et hangars de stockage de bois énergie à destination des collectivités. Union régionale des associations des communes forestières de Rhône-Alpes. Maison des Parcs et de la Montagne ; 256, Rue de la République / 73000 Chambéry - Tél : 04 79 60 49 05 / Fax : 04 79 33 38 95 - jf.veille@cofor.eu - www.fncofor.fr- *Juillet 2009*. 32 p.
17. Atkinson, M.D., Jervis J.P., and Sangha, R.S. (1997). Discrimination between *Betula pendula*, *Betula pubescens* and their hybrids using near-infrared reflectance spectroscopy. *Can. J. For. Res.* 27. Pp 1896 - 1900.
18. Buggeln, R. (1999). Outside storage of wood chips. *Biocycle*, June 1999, pp 32-34. Control of Substances Hazardous to Health, 1999.
19. Fuller, W.S. (1985). Chip pile storage - a review of practices to avoid deterioration and economic losses. *Tappi Journal* 68, pp 8, 48 -51.
20. General Recommendations of the Swedish National Board of Occupational Safety and Health on Organic Dust in Agriculture, 1996.
21. Jirjis, R. (1995). Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*. 9,1-5, pp 181-190.
22. R JIRJIS 2002. STORAGE AND DRYING OF WOOD FUEL. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Box 7008, S-750 07 Uppsala, Sweden ; 10 p.
23. Nellist, M.E., Bartlett, D.I. and Moreea, S.B. (1994). Storage trials with arable coppice. In: Proc IEA/BA Task VI Activity 5. Garpenberg, Sweden.13 -16 June 1994.Swedish University of Agricultural Sciences.
24. Nicholls, D. and Feng, Y.G. (1992). Properties of open stored wood fuel during winter months in northern Michigan. *Forest Products Journal*, 42. Pp 37 -40.
25. Nurmi, J. (1991). Long term storage of chips in large piles. In: Polttohakkeen Pitaaikainen Varastointi Aumoissa. Tyotehoseuran Metsatiedote. 11, 4. Tyotehoseura Ry, Helsinki.

Annexe 1– TDR résumé du projet d'étude

QUALIFICATION DES ESSENCES FORESTIERES DE GUYANE POUR UN USAGE BIOCOMBUSTIBLE

Résumé :

Afin de répondre au besoin de qualification de la ressource forestière pour une utilisation comme combustible, le CIRAD propose de mobiliser une collection de bois provenant de différentes espèces parfaitement identifiées dans le dessein de déterminer l'ensemble des propriétés et des caractéristiques fondamentales de ceux-ci. Seront mesurés la densité, la durabilité naturelle, le taux de matières minérales, le taux de silice et la composition des cendres. Le CIRAD propose aussi d'utiliser les bases de données uniques existantes pour estimer la diversité et la qualité de la ressource bois énergie sur différents massifs forestiers de l'Est du Centre et de l'Ouest Guyanais.

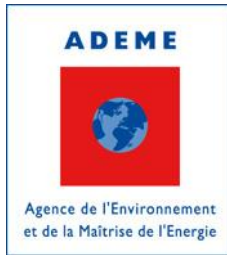
Des itinéraires cohérents de mobilisation du bois énergie seront définis en concertation avec l'ONF et les opérateurs économiques. Les itinéraires et les scénarios de stockage (en grume, ou en plaquettes) possibles seront comparés en termes de performances techniques et économiques et de bilan énergétique. Les itinéraires pressentis sont :

- 1 - exploitation forestière, transport et stockage en grumes
 - 1.1 – en mélange essences de bois « tout venant »,
 - 1.2 – avec séparation par tri des essences selon la durabilité naturelle (réalisation de groupes d'essences de bois),
- 2 - exploitation forestière, transport en grume, puis broyage, et stockage en copeaux, stockage des plaquettes à l'état vert.
- 3 - séchage des plaquettes forestières puis stockage en silo couvert, détermination du taux d'humidité en fonction des conditions climatiques locales (humidité). Il est prévu de pouvoir réaliser des tests techniques sur certaines séquences des scénarios 1 et 2 grâce au concours d'industriels locaux intéressés par les résultats des travaux. Une demi-journée est prévue pour la réalisation du broyage sur installation industrielle de différents petits lots de grumes qui seront préparés par le Cirad.

En s'appuyant sur les données techniques définies par l'expertise, l'analyse économique permettra de faire ressortir l'option économique la plus pertinente. Un bilan énergétique global sera également établi afin de renforcer la comparaison des options possibles. Une étude de sensibilité permettra d'analyser l'évolution des résultats pour les variations des principaux facteurs de production de biomasse énergie entrée chaudière avec ou sans stockage longue durée (jusqu'à 6 mois).

Outre les étapes détaillées des travaux réalisés, le rapport d'étude présentera un résumé exécutif des résultats obtenus. L'ensemble de l'étude sera suivi par le comité de pilotage qui regroupera les parties prenantes de la filière bois énergie en Guyane et se réunira au lancement, à mi-parcours et à la fin des travaux.

Annexe 2 – Fiche récapitulative des études bois énergie 2010



Développement de la biomasse énergie en Guyane : Synthèse des études conduisant à un schéma directeur de la filière

Délégation Régionale Guyane

28, Avenue Léopold Héder

97300 Cayenne

Téléphone : 05 94 29 73 60

Télécopie : 05 94 30 76 69

Contact : Pierre Courtiade, Ingénieur Energies Renouvelables

Tel : 05 94 29 73 64, mel : pierre.courtiade@ademe.fr

Le 27 septembre 2010

Conclusion des études déjà réalisées :

En 2007, l'ONF et le CIRAD ont réalisé pour le PRME et l'ADEME une étude du potentiel de la biomasse pour la production d'électricité en Guyane. Elle montre que la Guyane dispose largement de la ressource de bois permettant de produire 20 MW électriques :

- 5 MW sur St Laurent du Maroni
- 10 MW sur Montsinéry
- 5 MW sur Régina, difficilement exploitable à court terme car non desservi par le réseau de transport d'électricité.

4 ressources sont exploitables :

- la valorisation des déchets issus du déboisement agricole (installation de jeunes agriculteurs sur St Laurent et Montsinéry)
- la valorisation des déchets d'exploitation forestière (création de pistes, rémanents) (principalement sur Régina)
- d'une exploitation conjointe bois d'œuvre et bois énergie (principalement sur Régina)
- d'une exploitation uniquement énergétique de la forêt sur des parcelles dédiées (sur St Laurent et Montsinéry)

La culture de plantes à vocation énergétique, bien plus coûteuse, a été écartée.

Sur cette base, 3 industriels se positionnent actuellement sur la Guyane, avec des variantes sur les approvisionnements et des approches parfois complémentaires :

- 8 MW à St Laurent, (exploitation énergétique de la forêt) (Endel)
- 5 MW à Montsinéry (exploitation énergétique de la forêt) (Powéo)
- 4 MW à Cacao, (déchets de scierie) (Voltalia)
- 4 MW à Régina (déchets d'exploitation forestière)
- 0,5 à 3 MW pour alimenter St Georges (déchets d'exploitation forestière, culture énergétique, bois-d'œuvre-bois énergie) (Enertime, ReWatt, Abiodis)

On constate que les industriels, sur les gros projets, préfèrent se tourner vers l'exploitation énergétique de la forêt, dont l'approvisionnement est plus garanti que les déboisements agricoles. Or le choix de l'implantation de l'usine dépend des aires d'approvisionnement.

Pourtant l'étude CIRAD-ONF, utilisant une équation du PNUD, affirme que le bilan « gaz à effet de serre » est bien meilleur si l'on valorise les déchets du déboisement agricole, qui brûlés en parcelle, dégagent aussi du méthane.

L'étude de synthèse réalisée par le PRME début 2008 montre que la biomasse pourrait produire 15 % de l'électricité de la Guyane et générer 400 emplois en 2020. L'étude CIRAD-ONF a permis d'identifier

des potentiels qui doivent être affinés. Aussi le PRME a commandé plusieurs études, conduisant à un schéma directeur de la filière.

Etudes en cours :

Valorisation de la défriche agricole : Le PRME a confié à Guyane Consult l'étude de la faisabilité d'un aménagement concerté pour l'installation de nouveaux agriculteurs, qui répondrait à leurs besoins tout en apportant une garantie d'approvisionnement pour les exploitants des centrales électrique. Budget : 50 k€. Rendu : novembre 2010.

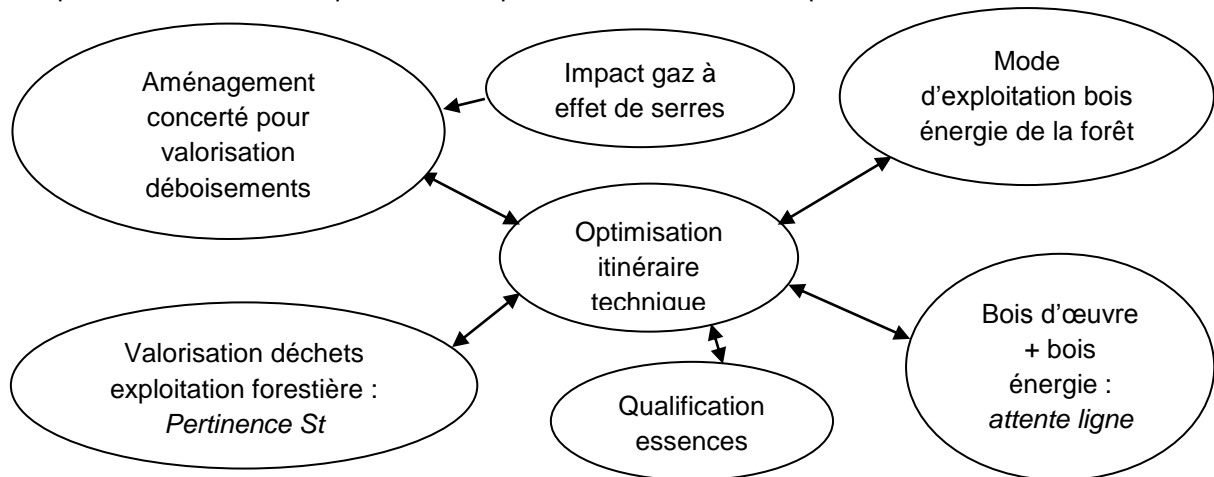
Ressource exploitation bois énergie de la forêt : L'ONF a proposé une étude visant à définir les modes d'exploitation les plus stimulants pour la forêt et les itinéraires techniques les plus efficaces. Budget 60 k€, financé à 50 % par l'ADEME. Rendu avril 2011. L'ONF a déjà fourni des études et des prix aux industriels, conduisant à un prix de plaquette combustible de 74 €/t, qui entraîne un prix de revient du kWh de 23 à 25 c€/kWh, qui semble trop élevé.

Caractérisation des essences : Le PRME, sur la base d'un cahier des charges proposé par les entreprises, a commandé au CIRAD Kourou et Montpellier une étude de caractérisation des essences « non bois d'œuvre » : PCI, comportement au broyage, au stockage, itinéraire technique. Budget : 100 k€. Rendu

Bilan gaz à effet de serre : Afin de disposer d'une base de calcul fiable et partagée, le PRME a commandé à l'ONF International une étude bibliographique permettant de choisir la méthode de calcul la plus adaptée à notre territoire, tenant compte des différents gaz émis (CO2, méthane) par le carbone des arbres et du sol. Elle pourra concerner d'autres secteurs comme le solaire. Budget 12 k€. Déjà Rendu.

Bien que complémentaires, les études concernant la ressource ont pour point d'interface la définition d'itinéraires techniques (organisation de la collecte), et il sera nécessaire à posteriori de mettre en cohérence ces itinéraires.

Reste à étudier, la valorisation des déchets d'exploitation forestière et l'exploitation bois d'œuvre bois-énergie : La ressource étant principalement à l'Est cette étude dépend des possibilités d'interconnexion au réseau du littoral ou de la pertinence d'un projet de centrale autonome à St Georges. Toutefois, cette ressource pourrait assurer un complément sur St Laurent. Le mode d'exploitation devrait rester proche de l'exploitation forestière classique.



L'ensemble de ces études pourrait concerner à terme un autre secteur de l'énergie : la production de biocarburants de deuxième génération, directement à partir du bois.

Annexe 3.1– Compte rendu de la première réunion du comité de suivi de l'étude le 26 mai 2010

Ce paragraphe présente la synthèse des présentations et discussions entre les membres du Comité Technique de Suivi et les chercheurs du Cirad responsables de la réalisation de l'étude. Il regroupe les échanges lors de la réunion du 26 mai le matin, et au cours de réunions bilatérales avec les personnes qui n'étaient pas disponibles cette matinée.

Participants présents le 25 mai : Nicolas Lecoer, ONF-Guyane, Frederic Farrugia, Voltalia et représentant Generg, François Pinta, UR Biomasse énergie du Cirad, Jacques Beauchene, UMR Ecofog Kourou. Autres membres rencontrés durant la mission de démarrage du 19 au 26 mai : Suzanne Pons, Ademe Guyane, Emmanuelle Seyes, Endel-gdf suez, Isabelle Bonjour, Maison du bois et de la forêt.

Les points marquants des discussions au cours de la réunion sont résumés ci-après :

L'intérêt de mieux caractériser les bois utilisables comme biocombustibles est partagé par tous afin de préparer l'approvisionnement des futures centrales électriques à bois qui seront approvisionnées à partir d'exploitation durable de la forêt, et des zones forestières converties pour les besoins d'aménagement du territoire : bois issus de déforestation de zones agricoles et urbaines.

L'ONF réalise en 2010 une étude sur parcelle à Saut Léodade d'exploitation bois NRJ qui vise à faire une analyse technique, écologique et environnementale (bilan carbone) de ce type d'exploitation des arbres de diamètre compris entre 40 et 65 cm, ce qui permet de conserver des semenciers, ainsi que les tiges d'avenir.

L'UMR Ecofog indique qu'une demande de financement a été déposée auprès des fonds du MOM pour étudier la répartition du carbone dans l'arbre : entre bois de cœur et bois des branches.

La société Voltalia (et le Generg) rappelle que la question centrale porte sur le choix des options de stockage des bois en grumes versus plaquettes, et plaquettes humides versus séchées. Le type de centrale électrique pour la production d'électricité peut permettre de sécher le biocombustible, mais il se pose la question de connaître à quel taux d'humidité faut-il sécher pour optimiser la conservation de son contenu énergétique au cours du stockage.

Après une discussion ouverte sur les thèmes d'intérêts des participants, les échanges se sont poursuivis sur le contenu prévu de l'étude :

1.2.1 - Sélection et caractérisation d'espèces forestières « énergie »

La sélection des espèces (150 analyses prévues) à caractériser sera réalisée à partir des données disponibles sur la forêt de Guyane. Les essences les plus abondantes et dont le diamètre des arbres atteint 30 cm (en déforestation) ou 40 cm (en exploitation forestière dédiée) seront caractérisées.

Il a été discuté de la possibilité de caractériser 150 espèces différentes en commençant par les plus abondantes, ce qui permet de ne pas prendre en compte la variabilité intra-spécifique car on ne peut faire qu'une seule mesure par espèce.

Une autre orientation possible consiste à mieux caractériser les espèces représentant une grande proportion du volume de bois NRJ par ha en faisant au moins 3 mesures pour ces espèces importantes. Par exemple, si les 20 espèces les plus importantes requièrent 60 analyses, le nombre total d'espèce serait ramené à 90.

On cherchera à regrouper les espèces en groupes selon leur importance en volume biocombustible par hectare et selon leurs caractéristiques.

Les caractéristiques des bois qui seront déterminées sont : la densité, la détermination de la durabilité naturelle vis-à-vis de la pourriture molle, le taux de matière minérale, le taux de silice, et la composition élémentaire permettant de calculer le pouvoir calorifique.

La détermination de l'humidité des bois sur pied sera également réalisée sur une série d'espèces représentatives puis les résultats seront analysés avec ceux des travaux du projet Bridge.

Il sera réalisé également des mesures de température de fusibilité des cendres d'une dizaine d'échantillons issus de mélanges d'espèces forestière pour apporter des informations aux chaudiéristes.

1.2.2 - Réalisation d'essais de stockage de plaquettes forestières et analyses technique et économique comparées d'itinéraires :

L'objectif de cette partie est d'apporter des informations techniques et économiques pour aider au choix d'itinéraires d'exploitation du bois NRJ ; et surtout au choix du mode de stockage de bois NRJ nécessaire pour assurer l'approvisionnement des centrales électriques durant les périodes de saison des pluies ne permettant pas de sortir du bois des parcelles.

A partir d'un échantillonnage de grumes de bois NRJ dont les espèces seront identifiées, on produira 3 lots de plaquettes forestières grâce au concours de la société Voltalia : un lot en bois blanc dont la durabilité naturelle est faible, un lot de bois rouge, dont la durabilité naturelle est meilleure, et un tout-venant.

Ces lots seront ensuite placés dans des situations de stockage visant à représenter les conditions d'un silo de grand volume : simulation de l'intérieur du tas de plaquette en stockage.

L'ONF propose que le bois NRJ qui sera placé bord de piste dans la parcelle expérimentale de 5 hectares de Saut Léodade puisse servir pour l'expérimentation. Il est prévu de se recontacter pour envisager une reconnaissance et un marquage des espèces à retenir par le Cirad avant l'abattage-débardage (plus facile à identifier), et préparer l'échantillonnage de grumes à transporter jusqu'à Kourou (regroupement en bord de piste).

Annexe 3.2 – Compte rendu de la deuxième réunion du comité technique de suivi le 01 février 2011

Ce paragraphe présente la synthèse des présentations et discussions entre les membres du Comité Technique de Suivi et les chercheurs du Cirad responsables de la réalisation de l'étude. Il regroupe les échanges lors de la réunion du 01 février 2011 à la Région Guyane.

Participants présents le 01 février : Nicolas Lecoer, ONF-Guyane, Frederic Farrugia, Voltalia et représentant Geneng, K. Neron, Région Guyane, M. du Conseil Régional, I. Bonjour, Maison de la forêt et du bois, Jacques Beauchene, UMR Ecofog Kourou, et François Pinta, UR Biomasse énergie du Cirad.

Les faits marquants et discussions au cours de la réunion sont résumés ci-après : Jacques Beauchène et F. Pinta ont présenté un diaporama (cf. annexe 2) indiquant l'avancement de l'étude et les premiers résultats obtenus :

- Sélection des essences et des échantillons à caractériser
- Détermination du taux d'humidité du bois sur pied
- Essais de durabilité naturelle
- Caractéristiques obtenues sur les 50 premiers échantillons
- Mise en place du dispositif d'essai de stockage.
- Programmation des travaux de la suite de l'étude.

La discussion a ensuite permis d'apporter des éclaircissements sur plusieurs points présentés :

1.3.1 - Echantillonnage des bois et caractérisation bois combustible :

La sélection des essences de bois à caractériser est réalisée à partir des données d'inventaires disponibles en Guyane et vise en priorité à caractériser le plus grand volume de bois énergie exploitable en forêt : Nos travaux permettront de caractériser en moyenne près de 80% du volume bois énergie des forêts de Guyane.

Voltalia et l'ONF Guyane confirme l'intérêt de réaliser un échantillonnage visant à caractériser le plus de volume de bois énergie possible compte tenu du budget alloué aux analyses (15 k€). Les essences de bois les moins importantes (en volume disponible selon les inventaires) ne sont pas prioritaires et ne seront pas caractérisés

Une réunion avec Poweo et ONF énergie à Paris fin janvier avait permis de confirmer l'intérêt du porteur de projet pour une priorité à caractériser la plus grande part possible du volume de bois énergie qui sera destinée à la centrale électrique.

Les mesures de taux d'humidité du bois sur pied ont donné une valeur moyenne inférieure à 40% (sur masse brute).

Les tests de durabilité naturelle ont été terminés récemment et les résultats obtenus seront interprétés en février ou mars 2011.

Les mesures de température de fusibilité des cendres pour une dizaine d'échantillons de mélanges d'espèces forestières seront réalisées au retour de mission de F. Pinta.

1.3.2 - Réalisation des essais de stockage de plaquettes forestières et analyses technique et économique comparées d'itinéraires :

L'objectif de cette partie est d'apporter des informations techniques et économiques pour aider au choix d'itinéraires d'exploitation du bois NRJ ; et surtout au choix du mode de stockage de bois NRJ nécessaire pour assurer l'approvisionnement des centrales électriques durant les périodes de saison des pluies ne permettant pas de sortir du bois des parcelles.

La mise en place des essais est en cours selon la méthodologie prévue et présentée au 1^{er} comité de suivi. Les dispositifs visent à reproduire l'ambiance au milieu d'un tas de grand volume de plaquettes de bois stocké en extérieur : on simule donc des conditions de tassement (par le poids propre des plaquettes), et d'échanges réduits avec l'air extérieur. Le suivi de l'humidité du bois et de la température à l'intérieur du tas est prévu par mesures à pas de temps adéquat (plus rapproché au début d'expérimentation qu'à la fin) durant 6 mois.

Liste des personnes présentes lors du 2eme CTS :

Noms	Organisme/ Société	Tel	Mail
Beauchêne Jacques	Cirad - UMR Ecofog	05 94 32 09 60	Jacques.beauchene@cirad.fr
Lecoeur Nicolas	ONF – Guyane	05 94 25 53 70	Nicolas.lecoeur@onf.fr
Frederic Farugia	Voltalia Guyane	05 94 32 91 37	f.farugia@voltalia.com
Philippe Forot	Voltalia Guyane	05 94 32 91 37	p.forot@voltalia.com
Courtiade Pierre	Ademe Guyane	05 94 29 73 64	pierre.courtiade@ademe.fr
Karine Néron	Région Guyane - Responsable service environnement	05 94 27 12 04	karine.neron@cr-guyane.fr
M. le représentant	Conseil Général de la Guyane		
François Pinta	Cirad - UR Biomasse énergie	04 67 61 56 23	francois.pinta@cirad.fr

Annexe 4 – Compte rendu de la réunion de restitution finale au comité technique de suivi le 19 octobre 2011

Ce paragraphe présente la synthèse des discussions entre les membres du Comité Technique de Suivi et les chercheurs du Cirad responsables de la réalisation de l'étude. Il regroupe les échanges lors de la réunion de restitution finale le 19 octobre 2011 à la Région Guyane.

Participants présents le 19 octobre : Pierre Courtiade, Ademe Guyane, David Binet, ONF-Guyane, Frederic Farrugia, Voltalia et représentant Geneng, Louise Lecurieux, Région Guyane, M. Conseil Général, Isabelle Bonjour, Maison de la forêt et du bois, Jacques Beauchene, UMR Ecofog Kourou, et François Pinta, UR Biomasse énergie du Cirad.

Les faits marquants et discussions au cours de la réunion sont résumés ci-après : Jacques Beauchêne et F. Pinta ont présenté les principaux résultats de l'étude en s'appuyant sur leur diaporama.

La discussion a porté sur les principaux points suivants :

- La pondération des 150 résultats d'analyses des caractéristiques des bois échantillonnés vise à donner une bonne représentativité de la forêt moyenne sur la bande littorale. La pondération de chaque essence sera précisée avec le volume évalué lors des inventaires forestiers pour déterminer les valeurs moyennes des caractéristiques déterminées.
- Le broyage (la mise en plaquettes forestière) est un poste de la chaîne technique particulier en Guyane du fait des caractéristiques de forte densité du bois et d'un taux de silice élevé dans certains bois. L'usure des lames de broyeur, et les frais de maintenance associés (arrêts pour changement des couteaux) s'en trouvent augmenter. Il est recommandé de viser une granulométrie la plus grande possible en accord avec le cahier des charges du fabricant de chaudière.
- Le constat d'une forte hausse dans l'évaluation du coût de la biomasse énergie entre 2006 et 2010 et sa répercussion directe sur le coût de l'électricité sont inquiétants et risquent de contrarier l'essor de la filière naissante.
- Dans l'objectif de maîtrise de chaque poste de coût de la biomasse, plusieurs pistes ont été évoquées :
 - o optimiser le besoin en stockage (étudier la possibilité de réduire la capacité de stockage à 4 mois plutôt que 6, si on compte qu'il est possible de travailler dans de bonnes conditions météorologiques durant le « petit été de mars »),
 - o réduire le transport du bois en plaçant les centrales plus près de la ressource forestière,
 - o réduire les coûts d'exploitation du bois énergie en évaluant l'intérêt de machines spécifiques d'abattage et débardage (en accord avec l'ONF et la certification forestière).
 - o Etc.
- Les principales sources bibliographiques sur l'utilisation des cendres de bois seront également diffusées.

Liste des personnes présentes lors de la restitution de l'étude le 19 octobre à Cayenne :

Noms	Organisme/ Société	Tel	Mail
Christian Claudon	Commissaire au développement endogène – Préfecture de la Guyane		christian.claudon@guyane.gouv.pref.fr
David Binet	ONF – Guyane	05 94 25 53 70	david.binet@onf.fr
Olivier Brunaux	ONF – Guyane	05 94	olivier.brunaux@onf.fr
Frederic Farugia	Voltalia Guyane	05 94 32 91 37	f.farugia@votalia.com
Eric Mindor	Endel GDF-Suez	05 94 32	eric.mindor@endel-gdfsuez.com
Pierre Courtiade	Ademe – Guyane	05 94 29 73 64	pierre.courtiade@ademe.fr
Louise Lecurieux-Lafferonnay	Région Guyane - service environnement	05 94 27 12 07	louise.lecurieux@cr-guyane.fr
Jean-Pierre Parsemain	Conseil Général de la Guyane	05 94 29 56 51	jean-pierre.parsemain@cg973.fr
Jacques Beauchêne	Cirad - UMR Ecofog	05 94 32 09 60	jacques.beauchene@cirad.fr
François Pinta	Cirad - UR Biomasse énergie	(+ 33) 04 67 61 56 23	francois.pinta@cirad.fr

Annexe 5: Densités à 12 % d'humidité mesurée sur planchette

Espèces	Fréquence en forêt	Effectif retenu	Moyenne	Densité à 12 % mesurées sur les échantillons (5 répétitions par mesure)																	
<i>Eperua falcata</i> , <i>Eperua grandiflora</i>	17,46%	18 ¹	0,86	0,87	0,84	0,87	0,86	0,86	0,82	0,87	0,85	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,82	0,85	0,86	0,89
<i>Eschweilera coriacea</i> , <i>E. sagotiana</i>	9,39%	18	0,94	0,85	0,90	0,96	1,10	1,03	0,94	0,85	1,04	0,84	0,90	0,85	1,07	0,95	0,93	0,86	1,04	1,00	0,85
<i>Licania membranacea</i> , <i>L. heteromorpha</i> , <i>L. alba</i>	8,50%	16	0,97	1,02	0,99	1,01	0,98	0,96	1,04	1,12	0,91	0,77	0,95	0,96	1,11	1,05	1,02	0,89	0,71		
<i>Lecythis persistens</i>	5,69%	11	1,01	1,08	0,83	1,04	1,13	1,05	0,93	0,98	1,10	1,14	0,97	0,90							
<i>Dicorynia guianensis</i>	3,64%	7	0,79	0,78	0,81	0,79	0,76	0,80	0,76	0,79											
<i>Lecythis corrugata</i>	2,23%	6	0,76	0,73	0,70	0,79	0,78	0,85	0,73												
<i>Micropholis guianensis</i>	1,61%	4	0,71	0,76	0,69	0,69	0,71														
<i>Manilkara bidentata</i>	1,58%	4	1,09	1,07	1,12	1,08	1,07														
<i>Goupia glabra</i>	1,43%	3	0,82	0,77	0,85	0,84															
<i>Symphonia globulifera</i>	1,36%	3	0,69	0,67	0,70	0,69															
<i>Pouteria guianensis</i>	1,19%	3	1,11	1,15	1,08	1,09															
<i>Inga huberii</i> ou <i>Inga alba</i>	1,18%	3	0,51	0,52	0,41	0,61															
<i>Chrysophyllum sanguinolenta</i>	1,16%	3	0,85	0,80	0,79	0,95															
<i>Protium decandrum</i> ou <i>P. opacum</i>	1,11%	3	0,56	0,52	0,59	0,57															
<i>Pouteria melanopoda</i>	1,03%	3	0,96	0,95	0,97	0,95															
<i>Vouacoupa americana</i>	0,95%	3	0,91	0,90	0,93	0,89															
<i>Qualea rosea</i>	0,94%	3	0,71	0,74	0,69	0,70															
<i>Sterculia pruriens</i>	0,87%	3	0,52	0,53	0,50	0,54															
<i>Sextonia rubra</i>	0,78%	3	0,58	0,56	0,58	0,61															
<i>Couratari multiflora</i>	0,77%	3	0,54	0,49	0,57	0,55															
<i>Sacoglottis guianensis</i>	0,74%	3	0,98	0,98	1,01	0,96															
<i>Swartzia polyphylla</i>	0,73%	3	0,81	0,82	0,82	0,81															
<i>Iryanthera sagotiana</i>	0,73%	3	0,68	0,68	0,69	0,68															
<i>Bocoa prouacensis</i>	0,66%	1	1,20	1,20																	
<i>Chrysophyllum prieurii</i> ou <i>C. lucentifolium</i>	0,60%	1	0,95	0,95																	
<i>Mouriri crassifolia</i>	0,57%	1	1,06	1,06																	
<i>Virola michelii</i>	0,57%	1	0,51	0,51																	
<i>Abarema jupunba</i>	0,56%	1	0,68	0,68																	
<i>Alexa wachenheimii</i> ou <i>Ormosia coutinhoi</i>	0,53%	1	0,59	0,59																	
<i>Parkia nitida</i>	0,53%	1	0,33	0,33																	
<i>Peltogyne venosa</i>	0,52%	1	0,88	0,88																	
<i>Tapura capitulifera</i>	0,52%	1	0,91	0,91																	
<i>Carapa procera</i>	0,52%	1	0,78	0,78																	
<i>Pterocarpus officinalis</i>	0,52%	1	0,65	0,65																	
<i>Tachigalii melinonii</i>	0,52%	1	0,52	0,52																	
<i>Terminalia amazonia</i>	0,50%	1	0,90	0,90																	
<i>Drypetes variabilis</i>	0,48%	1	1,08	1,08																	
<i>Micropholis cayennensis</i>	0,48%	1	1,10	1,10																	
<i>Parinari campestris</i>	0,48%	1	0,83	0,83																	
<i>Pseudopitadenia suaveolens</i>	0,48%	1	0,76	0,76																	
<i>Caryocar glabrum</i>	0,47%	1	0,75	0,75																	
<i>Crudia aromatica</i>	0,47%	1	0,98	0,98																	
<i>Hymenolobium flavum</i>	0,47%	1	0,71	0,71																	
<i>Ruizterania albiflora</i>	0,47%	1	0,75	0,75																	
<i>Virola surinamensis</i>	0,46%	1	0,40	0,40																	
<i>Tovomita</i> sp 5 ou <i>T. choisyana</i>	0,44%	1	1,04	1,04																	
<i>Andira coriacea</i>	0,44%	1	0,92	0,92																	
<i>Inga sertulifera</i>	0,43%	1	0,83	0,83																	
<i>Swartzia polyphylla</i>	0,43%	1	0,82	0,82																	
<i>Dendrobania boliviana</i>	0,43%	1	0,77	0,77																	

¹ L'effectif retenu pour les *Eperua* a volontairement été réduit du fait de la faible variabilité des propriétés mesurées

Annexe 8 : Tableau des Pertes de masse des essences retenues

Espèces	Fréquence en forêt	Effectif retenu	Moyenne	Pertes de masse estimées au sixième mois en %																	
				6,8	5,9	6,4	6,0	5,6	5,1	5,9	5,3	6,2	8,1	9,0	8,1	4,9	6,1	5,8	5,6	4,5	5,0
<i>Eperua falcata, Eperua grandiflora</i>	17,46%	18 ²	6,1	6,8	5,9	6,4	6,0	5,6	5,1	5,9	5,3	6,2	8,1	9,0	8,1	4,9	6,1	5,8	5,6	4,5	5,0
<i>Eschweilera coriacea, E. sagotiana</i>	9,39%	18	15,0	10,3	11,6	10,9	7,8	11,0	9,9	21,5	17,0	12,8	14,9	19,5	15,2	14,3	17,1	16,2	19,0	21,6	19,9
<i>Licania membranacea, L. heteromorpha, L. alba</i>	8,50%	16	13,3	24,0	6,2	9,0	11,2	7,6	8,3	12,2	10,2	24,8	11,7	13,9	11,0	15,8	12,3	15,0	19,8		
<i>Lecythis persistens</i>	5,69%	11	9,2	6,5	11,5	7,6	6,7	7,2	5,5	10,1	9,3	9,6	15,6	11,8							
<i>Dicorynia guianensis</i>	3,64%	7	5,4	6,4	5,5	5,2	5,7	5,9	4,9	4,2											
<i>Lecythis corrugata</i>	2,23%	6	18,0	15,7	22,0	15,9	19,4	23,2	12,0												
<i>Micropholis guianensis</i>	1,61%	4	16,5	19,4	21,8	7,4	17,4														
<i>Manilkara bidentata</i>	1,58%	4	7,8	9,7	6,9	6,5	8,1														
<i>Goupia glabra</i>	1,43%	3	10,3	10,1	10,3	10,4															
<i>Symphonia globulifera</i>	1,36%	3	16,3	20,9	17,2	10,9															
<i>Pouteria guianensis</i>	1,19%	3	1,6	0,1	0,4	4,4															
<i>Inga huberii ou Inga alba</i>	1,18%	3	11,0	10,8	9,2	13,1															
<i>Chrysophyllum sanguinolenta</i>	1,16%	3	13,6	10,3	20,2	10,2															
<i>Protium decandrum ou P. opacum</i>	1,11%	3	20,7	21,6	18,6	22,0															
<i>Pouteria melanopoda</i>	1,03%	3	9,3	6,1	8,8	13,0															
<i>Vouacapoua americana</i>	0,95%	3	3,1	3,3	3,1	2,9															
<i>Qualea rosea</i>	0,94%	3	7,5	8,5	7,6	6,5															
<i>Sterculia pruriens</i>	0,87%	3	30,9	35,6	29,5	27,7															
<i>Sextonia rubra</i>	0,78%	3	7,9	7,9	7,9	7,8															
<i>Couratari multiflora</i>	0,77%	3	17,8	16,8	12,2	24,4															
<i>Sacoglottis guianensis</i>	0,74%	3	7,1	9,4	4,4	7,4															
<i>Swartzia polyphylla</i>	0,73%	3	15,8	16,0	16,2	15,0															
<i>Iryanthera sagotiana</i>	0,73%	3	29,9	30,0	30,0	29,7															
<i>Bocoa prouacensis</i>	0,66%	1	1,8	1,8																	
<i>Chrysophyllum prieurii ou C. lucentifolium</i>	0,60%	1	10,2	10,2																	
<i>Mouriri crassifolia</i>	0,57%	1	8,5	8,5																	
<i>Virola michelii</i>	0,57%	1	35,6	35,6																	
<i>Abarema jupunba</i>	0,56%	1	18,7	18,7																	
<i>Alexa wachenheimii ou Ormosia coutinhoi</i>	0,53%	1	30,7	30,7																	
<i>Parkia nitida</i>	0,53%	1	22,7	22,7																	
<i>Peltogyne venosa</i>	0,52%	1	9,3	9,3																	
<i>Tapura capitulifera</i>	0,52%	1	3,2	3,2																	
<i>Carapa procera</i>	0,52%	1	26,1	26,1																	
<i>Pterocarpus officinalis</i>	0,52%	1	25,8	25,8																	
<i>Tachigali melinonii</i>	0,52%	1	17,1	17,1																	
<i>Terminalia amazonia</i>	0,50%	1	6,6	6,6																	
<i>Drypetes variabilis</i>	0,48%	1	15,3	15,3																	
<i>Micropholis cayennensis</i>	0,48%	1	0,7	0,7																	
<i>Parinari campestris</i>	0,48%	1	6,4	6,4																	
<i>Pseudopitadenia suaveolens</i>	0,48%	1	11,2	11,2																	
<i>Caryocar glabrum</i>	0,47%	1	12,0	12,0																	
<i>Crudia aromatica</i>	0,47%	1	6,0	6,0																	
<i>Hymenolobium flavum</i>	0,47%	1	11,6	11,6																	
<i>Ruizterania albiflora</i>	0,47%	1	8,6	8,6																	
<i>Virola surinamensis</i>	0,46%	1	28,0	28,0																	
<i>Tovomita sp 5 ou T. choisyana</i>	0,44%	1	7,1	7,1																	
<i>Andira coriacea</i>	0,44%	1	8,7	8,7																	
<i>Inga sertulifera</i>	0,43%	1	9,7	9,7																	
<i>Swartzia polyphylla</i>	0,43%	1	16,2	16,2																	
<i>Dendrobangia boliviana</i>	0,43%	1	16,7	16,7																	

² L'effectif retenu pour les *Eperua* a volontairement été réduit du fait de la faible variabilité des propriétés mesurées

Annexe 9 : Fiche « utilisation cendres de bois », Ch. Agri des Deux Sèvres - juin 2011 (6 pages)





05

Une gestion de proximité :
le recyclage agricole par
épandage des cendres issues des
chaufferies à biomasse

QU'ENTEND-ON PAR CENDRES ?

Les cendres de chaufferies correspondent aux résidus issus de la combustion des granulés de bois, de la paille, du bois déchiqueté, des écorces ... dans des chaudières à biomasse. Ces cendres contiennent essentiellement des éléments minéraux (fer, alumine, silice), des éléments fertilisants (chaux, potasse, phosphore...) et des oligoéléments.

La multiplication des chaufferies alimentées à la biomasse augmente les volumes de cendres produites, donc à valoriser. La production de cendres varie en fonction du type de bois et de la nature de l'alimentation de la chaufferie. Elles peuvent représenter de 0,2% à 5% des tonnages brûlés. Suivant les conditions de combustion et les matériaux brûlés, il peut y avoir formation de mâchefers dans les cendres (concrétions).



Photo n°1 : cendres issues d'une chaufferie bois

LES LOGIQUES DE VALORISATION DES CENDRES

Logique déchet	Epandage agricole	Suivre les prescriptions de l'arrêté du 2 février 1998 ou classer les cendres comme sous-produits issus de la combustion et non comme déchets
	Co-compostage	Rubrique 2780 : valorisation agricole sans plan d'épandage, si les cendres sont reconnues comme matières organiques végétales Co-compostage de produits non agricoles : autorisé si plan épandage
Logique produit	Homologation	Possible mais démarche lourde
	Normes	NFU 44051 compost (si co-compostage avec d'autres matières) Amendements minéraux basiques (rajouter les cendres à la liste des produits normalisables)

Vu le manque de clarté qu'il y a sur le classement des cendres et les réglementations, la logique déchets avec le respect des prescriptions de l'arrêté du 2 février 1998 paraît la meilleure solution pour valoriser les cendres.

Version Juin 2011

« Energie – Bio masse »

LES FILIERES ACTUELLES D'ELIMINATION

Les cendres sont considérées aujourd'hui comme des déchets, leur élimination dans le respect de l'environnement incombe au producteur (exploitant de la chaufferie, particulier, industriel ou collectivité). Les cendres peuvent suivre les destinations suivantes :

- ☛ épandage direct en milieu agricole ou forestier,
- ☛ utilisation comme matières fertilisantes ou comme amendements,
- ☛ utilisation comme matériau de construction,
- ☛ évacuation en décharge de classe 2.

LA VALEUR FERTILISANTE DES CENDRES

Avant toute étude de filière de valorisation, il convient de connaître la qualité des cendres et leur valeur fertilisante : ce qui permettra d'orienter leur valorisation. Les paramètres suivants sont à analyser :

Paramètres	Nature
Caractéristiques physiques	Matière sèche, humidité, pH, matières organiques et minérales (% MS), granulométrie
Valeur fertilisante	C total, N total, phosphore, potasse, chaux, magnésie, valeur neutralisante
Eléments traces métalliques	Arsenic, cadmium, plomb, nickel, cuivre, zinc, mercure, sélénium, chrome

Les teneurs en éléments traces métalliques pourront être complétées par d'autres éléments suivant la diversité et l'origine des bois alimentant les chaudières. Certaines origines peuvent conduire à des enrichissements en certains métaux (bois tropicaux par exemple), limitant l'utilisation agricole.

L'utilisation biomasse d'origine végétale, à l'exclusion de déchets industriels pollués (bois imprégnés par des résines, peintures...), permet de garantir des cendres ne contenant pas de composés traces organiques.

Un exemple d'analyse de cendres :

- ☛ Paramètres agronomiques

Elément (matière brute)	Composition (kg/t)
Matière sèche	99,8 %
Humidité	0,2 %
pH	12,7
Matière organique	0,86 kg/T
Azote total	0,2 kg/T
Phosphore (P2O5)	7,6
Potasse (K2O)	14,15
Chaux (CaO)	278
Magnésie (MgO)	9,86
Valeur neutralisante	312,45

☛ Eléments traces métalliques :

Elément	Teneur (mg/kg sur matière sèche)	Arrêté du 2 février 1998	Flux cumulé sur 10 ans (kg/ha)
Fer	4 141		
Manganèse	3 272		
Chrome	9,99	1 000	15
Cuivre	23,57	1 000	15
Nickel	7,72	200	3
Zinc	12,88	3 000	45
Cadmium	0,49	10	0,15
Plomb	16,82	800	15
Mercuré	0,19	10	0,15
Sélénium	0,32		
Arsenic	1,5		
Molybdène	0,5		
Chrome + cuivre + Nickel + Zinc	63,26	4000	60

Dans une chaudière à biomasse, plus la combustion est optimisée, plus les cendres seront riches en matières minérales. Les imbrûlés, charbons n'existent pas avec un bon tirage et des combustibles de qualité (taux de matière sèche élevé).

La combustion de la biomasse herbacée est plus délicate que celle du bois, de part des teneurs en sels minéraux plus élevées (calcium et potassium). Ces teneurs plus élevées entraînent des quantités plus importantes de cendres, un abaissement du point de fusion des cendres et donc une augmentation de la possibilité de création de mâchefer (pouvant gêner les épandages).

L'intérêt agronomique des cendres est lié à leurs teneurs élevées en chaux et magnésie (environ 30%/MS), qui permettent une utilisation comme amendement calcique (amélioration du fonctionnement biologique des sols, redressement de pH). La potasse est également intéressante (1,4%/MS), car rapidement disponible pour les plantes.

LES PRESCRIPTIONS EN MATIERE D'EPANDAGE DE CENDRES

Les prescriptions suivantes s'appliquent (arrêté du 2 février 1998) :

Nature des activités à protéger	Distance d'isolement minimale	Domaine d'application
Puits, sources, forages	35 m	Pente du terrain inférieur à 7%
Cours d'eau et plans d'eau	5 m des berges	Déchets stabilisés et enfouis après épandage
Tiers	Sans objet pour les cendres si elles sont agglomérées ou épandues en mélange (attention aux poussières)	
Zones conchylicoles	500 m	
Herbages	3 semaines avant la remise à l'herbe	
Terrains affectés aux cultures maraîchères et fruitières	Pas d'épandage pendant la période de végétation	

Les périodes d'épandages des cendres :

Au sens de l'arrêté du 30 juin 2009, les cendres sont considérées comme des engrais de type 1 (rapport C/N > 8), les périodes d'épandage à prendre en compte sont les suivantes :

Occupation des sols	Type de fertilisants		
	Type I (fumier)	Type II (lisier)	Type III (fertilisants de synthèse)
Grandes cultures d'automne		du 1 ^{er} novembre au 15 janvier	du 1 ^{er} septembre au 15 janvier
Grandes cultures de printemps	du 1 ^{er} juillet au 31 août	du 1 ^{er} juillet au 15 janvier	du 1 ^{er} juillet au 15 février
Prairies de plus de 6 mois		du 15 novembre au 15 janvier	du 1 ^{er} octobre au 31 janvier
Sols non cultivés	Toute l'année	Toute l'année	Toute l'année

L'exploitant qui fait son affaire des cendres devra en tenir compte pour la gestion de ses apports d'azote (raisonnement de la fertilisation), reporter les apports dans son cahier d'épandage (ce qui est théorique car les cendres sont en général très faiblement pourvues en azote).

Une convention d'épandage sera co-signée entre la collectivité (producteur des cendres) et l'agriculteur (utilisateur). Cette convention précisera le rôle des deux parties (prise en charge et livraison des cendres, suivi des cendres, analyses...). Des bordereaux de cessions de cendres seront co-signés avec l'identité des deux parties, les doses reprises, les dates de reprise, les parcelles épandues.

L'intérêt agronomique des cendres de chaufferies est essentiellement lié à sa valeur amendante (apport de chaux et de magnésie). L'essentiel des apports s'effectuera en été pour des semis de céréales d'hiver, de prairies ou de colza. Des apports de printemps sont possibles pour des semis de tournesol ou de maïs.

Le stockage des cendres :

Les cendres sèches sont produites par des petites et moyennes chaufferies. Leur stockage doit permettre d'éviter leur humidification et leur prise en masse.

- ☛ Le stockage des cendres en big-bag est le plus fréquent : leur manipulation est aisée pour le stockage, le transport et l'épandage. Le stockage s'effectue sur le site de la chaufferie ou chez l'utilisateur.
- ☛ Le stockage en bennes est plus coûteux et leur manipulation est plus délicate : le dépotage et le chargement des épandeurs sont des sources de poussières.



Photo n°2 : stockage des cendres sous abri

Les cendres humides sont produites dans des chaufferies de grande capacité (industrie). Les cendres chaudes sont éteintes pour éviter les braises. Elles sont stockées en bennes couvertes, hors gel, elles peuvent coller au fond des bennes.

Il convient donc :

- ☛ de protéger les cendres pour éviter leur prise en masse et maintenir leur caractéristiques physiques,
- ☛ de faciliter la reprise pour charger les épandeurs,
- ☛ de maintenir leurs qualités agronomiques.

L'épandage des cendres :

Les cendres sèches s'épandent avec un épandeur à chaux vive, permettant des apports d'environ 1,5 T/ha (environ 500 kg/ha de chaux), avec des cendres exemptes de clous, de mâchefers. C'est un épandeur à caisse monocoque, muni d'une toile de protection évitant l'envol des cendres. La vitesse du tracteur, la vitesse d'avancement du tapis, le réglage de l'ouverture de la porte permettent des doses d'apport variées.



Photo n°3 : épandage des cendres possible avec un épandeur à chaux, permettant de faibles apports à l'hectare

Les cendres doivent être dépourvues d'inertes (clous, pierres...) pouvant endommager le matériel. Le coût d'épandage est d'environ 20 € HT/T. Il peut être effectué par une entreprise ou avec du matériel en CUMA.

Les cendres humides s'épandent avec un épandeur à hérissons verticaux équipé d'une porte guillotine ou d'une table d'épandage. Les doses d'apport sont d'environ 5 à 10 T/ha (apport d'1,5 T à 3 T/ha de chaux).

Photo n°4 : épandage possible des cendres et du fumier avec un épandeur à table d'épandage



L'enfouissement superficiel des cendres est possible au déchaumeur en cours d'été après l'épandage des cendres. Cet enfouissement superficiel permettra un effet amendant des cendres plus important par contact avec le sol.



Photo n°5 : enfouissement superficiel des cendres possible avec un déchaumeur, en fin d'été sur chaume de céréales (pour l'implantation d'une céréale ou d'un colza).

Les cendres de chaufferies peuvent être utilisées en co-compostage avec des fumiers au champ, permettant d'améliorer la valeur agronomique des fumiers. Un mélange de 10 à 20% de cendres avec du fumier permet d'avoir un amendement équilibré, ce compostage peut se faire au champ. Le co-compostage cendres + fumier devra respecter les prescriptions de la circulaire du 17 janvier 2002 (co-compostage en établissement d'élevage).

Photo n°6 : co-compostage possible de cendres avec du fumier au champ



L'épandage des cendres en forêt :

L'utilisation des cendres en forêt permet de couvrir les besoins des peuplements forestiers en chaux et potasse (principaux éléments intéressants dans les cendres). Les besoins sont variables suivant les peuplements et les stations (types de sols), avec des besoins plus élevés sur des sols acides.

La fertilisation peut s'effectuer avant la plantation, les apports de calcium et de potassium présentent un intérêt comme fertilisation de fond, permettent de neutraliser le pH du sol et activent le cycle biologique de la matière organique (calcium). Le phosphore apporté permet le développement racinaire des arbres, l'absence d'azote permet de contrôler le développement des espèces concurrentes les premières années. Cette fertilisation peut être efficace pendant une dizaine d'années.

La fertilisation des peuplements adultes est plus délicate. Elle s'effectuera en utilisant les couloirs de cloisonnement (premières éclaircies). Le calcium apporté par les cendres agira en favorisant l'activité biologique (décomposition des litières).

Cet épandage en forêt doit tenir compte : des distances de transport entre les lieux de production et les zones forestières (parcelles de grandes dimensions, accessibles), la durée de stockage des cendres (éviter des stockages trop longs à l'extérieur), avoir des cendres pulvérulentes (attention à la prise en masse), disposer d'un matériel d'épandage satisfaisant, garantir une efficacité et une innocuité des cendres (amélioration des propriétés des sols, pas d'impact négatif à court ou moyen terme), bonne acceptabilité sociale (image plutôt positive du retour des cendres en forêt).

La réalisation d'un plan d'épandage :

Compte tenu du caractère peu nocif des cendres de chaufferies bois (confirmé par l'analyse des cendres), le dépôt d'un plan d'épandage auprès des administrations compétentes ne paraît pas nécessaire. Un rapprochement avec l'administration permettrait de clarifier ce point, mais vu l'utilisation essentiellement comme amendement, cela n'est pas nécessaire (petits tonnages).

Un tel plan d'épandage pourrait être réalisé pour une grosse chaufferie industrielle, générant beaucoup de cendres et utilisant des combustibles d'origines variées (surveillance nécessaire des éléments traces métalliques dans les cendres).

Annexe 10 : Cendres : Résumé de l'étude Ademe intitulée « Etat de l'art de la réglementation européenne sur la valorisation des déchets de bois et des cendres de bois » Novembre 2007.

« Cette étude a pour objectif de comparer la réglementation de 10 pays européens avec celle de la France, en matière de classification et valorisation des déchets de bois, en particulier faiblement adjuvantés, ainsi que sur la valorisation des cendres de bois.

La première partie relative aux déchets de bois présente une analyse détaillée par pays ainsi qu'une synthèse d'une part des différentes filières de valorisation des déchets de bois, et d'autre part, des valeurs limites d'émissions pour leur valorisation énergétique. Généralement, on constate une distinction entre les déchets concernées par la directive incinération, et les autres, sans catégorie particulière pour les bois dits faiblement adjuvantés. Il en ressort néanmoins des recommandations basées essentiellement sur la réglementation ou guides observés en Allemagne, Autriche et Royaume Uni.

La deuxième partie relative aux cendres de bois présente également une analyse détaillée par pays ainsi qu'une synthèse des filières de valorisation et valeurs limites pour l'épandage. Les cendres sont généralement considérées comme des déchets, et font l'objet de valorisation au cas par cas. Seuls l'Allemagne et l'Autriche ont clairement intégré les cendres de bois dans leur dispositif réglementaire.

Globalement, cette étude montre le besoin d'une réglementation homogène au niveau européen fixant des exigences environnementales, que ce soit pour la valorisation des déchets de bois, ou pour les cendres de bois, afin de favoriser le développement de l'utilisation de la biomasse »

L'étude présente un point sur la réglementation pour l'usage des cendres de bois : Les cendres peuvent être valorisées soit en épandage direct au sol, en agriculture (l'épandage forestier est surtout répandu dans les pays nordiques), ou en co-compostage, en technique routière, ou bien encore de façon plus marginale comme matière première secondaire, dans la fabrication de céramiques par exemple.

Les principales filières de valorisation que sont l'épandage direct en agriculture et le co-compostage ne sont pas régies par un texte réglementaire spécifique. Différentes logiques peuvent être suivies, mais des lacunes normatives et réglementaires subsistent :

□ Logique produits

Les cendres sont considérées comme des sous-produits de la combustion et peuvent être considérées comme matière fertilisante pour un retour au sol, direct ou indirect ; différentes options réglementaires ou normatives sont possibles :

_ L'homologation

_ La normalisation :

Norme NFU 42-001 (« cendres végétales ») : selon cette norme, les cendres végétales entrent dans la catégorie des engrais composés P, K, selon certaines conditions (teneurs minimales en composants). D'après les retours d'expérience, la plupart des cendres produites par les chaufferies en France ne peuvent rentrer dans ce cadre. Cette norme est cependant en cours de révision.

Norme NFU 44-001 relative aux amendements basiques : les cendres contiennent les teneurs minimales en CaO et MgO requises, mais ne sont pas normalisables car n'entrent pas dans le champ de la norme ;

∞ Norme NF U 44-051, rendue d'application obligatoire : les cendres peuvent rentrer dans la constitution d'amendements organiques sous réserve du respect de la réglementation, ou à défaut des valeurs limites de concentration en Eléments Traces Métalliques (ETM).

Logique déchets :

- Épandage : cette voie de valorisation n'est pas autorisée pour les chaudières bois soumises à l'arrêté du 25 juillet 97 (2910 A, puissance comprise entre 2 et 20 MW), et les conditions d'épandage ne sont pas explicitement prévues pour les chaudières soumises aux arrêtés du 20 juin 2002 et du 3 juillet 2003 (2910 A, puissance supérieure à 20 MW). Enfin, rien n'est prévu pour les chaudières de puissance inférieures à 2MW.

- Co-compostage : l'arrêté du 7 janvier 2002 relatif à la rubrique 2170 fixe des exigences pour le compost dont la quantité est comprise entre 1 et 10T par jour, et pour l'activité de compostage réalisée hors exploitation agricole et/ou de produits non agricoles, notamment pour le compost contenant des cendres (dans ce cas, une étude d'innocuité est nécessaire). Un plan d'épandage est alors nécessaire.

Tout d'abord, on constate que la totalité des pays étudiés ne dispose pas de texte spécifique relatif aux cendres de bois, et seuls l'Allemagne et l'Autriche ont intégré les cendres de bois dans leur dispositif réglementaire soit dans le cas d'épandage ou pour la fabrication d'engrais (Allemagne) soit pour la fabrication de compost (Autriche). D'autres pays comme la Finlande ou la Suède ont établi des recommandations, mais qui n'ont pas de valeur réglementaire.

En France, la réglementation et le contexte normatifs présentent également des lacunes quant à la gestion des cendres aussi il apparaît nécessaire de prévoir une réglementation couvrant l'ensemble des gammes de puissance, et spécifiant précisément les filières pour chaque catégorie de cendres, les caractéristiques, en particulier en termes de valeurs limites en Eléments Traces Métalliques.

Une vision globale intégrant suivi du combustible en amont et suivi des émissions de l'installation, en terme de cendres et d'émissions atmosphériques, en aval, est nécessaire pour une gestion optimisée de la chaufferie (réduction des coûts) et pour assurer un développement fiable et pérenne des filières de valorisation des cendres : assurer la qualité des entrants conditionnera l'ensemble des processus (rendu chaleur, émissions atmosphériques, valorisation des cendres).

Concernant les valeurs seuils en Eléments Traces Métalliques, l'étude fait apparaître des valeurs réglementaires ou recommandées sur lesquelles pourrait s'appuyer la France, notamment en Autriche, Allemagne, ou Suède. Les valeurs proposées dans l'arrêté du 02/02/98, sur lesquelles il a été proposé de s'appuyer pour les chaufferies d'une puissance entre 0 et 20 MW sont globalement en concordance avec les valeurs indiquées en Allemagne ou en Autriche, hormis pour l'Arsenic.

Enfin, il apparaît que les cendres globalement sont considérées comme des déchets et sont donc soumis, en termes de gestion, à la réglementation déchets propre à chaque pays. Cela implique notamment dans la plupart des cas, l'obtention de permis ou d'autorisation préalable à leur utilisation, à obtenir auprès des autorités compétentes. Aussi, leur valorisation relève plutôt d'une gestion au cas par cas que de pratiques couramment établies, même si certaines filières sont plus développées dans quelques pays (en particulier l'épandage forestier dans les pays nordiques).

Les partenaires du projet Recash poussent à une logique produits pour la valorisation des cendres, et au vu des résultats de l'étude, il apparaît pertinent de mener une réflexion globale à l'échelle européenne plutôt que nationale, à la fois pour l'épandage direct, la fabrication d'engrais et de compost.

A noter les valeurs limites des cendres qui ont été répertoriées dans la réglementation européenne sont présentées en annexe 2.2 du document.

Annexe 11: Problématique de l'usage des cendres en agriculture

Extrait de la fiche technique « L'importance des éléments mineurs : des carences à la toxicité. Une préoccupation en agriculture biologique ? » par B. Estevez, agr. Cas au Québec.

Introduction

- _ Les éléments mineurs sont importants pour les végétaux
 - _ Les sols carencés peuvent nuire au développement végétal et réduire ainsi la qualité du produit
 - _ Certains éléments mineurs sont des métaux lourds et lorsque les sols sont saturés, la disponibilité pour la plante peut potentiellement créer de la phytotoxicité augmentant le risque de la contamination de l'environnement et de la chaîne alimentaire des humains et des animaux
- (...)

Des éléments mineurs aux métaux lourds

Dans le registre de la pollution agricole (sol et eau), les métaux lourds sont une préoccupation de plus en plus inquiétante car certains de ces éléments peuvent se retrouver dans la chaîne alimentaire. Ce que l'on appelle communément les métaux lourds est aussi nommé les ÉTM pour « Éléments traces métalliques ».

Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) peuvent être une source potentielle d'ÉTM (Deschênes et al., 2006) (boues d'épuration de stations d'épuration des eaux, les poussières de cimenteries, les composts urbains, les cendres de bois, les bois raméaux, les résidus de pâtes et papiers...). Leur valorisation agricole est encadrée par une législation du ministère de l'environnement (MDDEP, 2004).

Les fumiers et les lisiers ne sont pas non plus sans potentiel de contamination. En effet, l'utilisation d'engrais de ferme peut contribuer à enrichir les sols et occasionner des pertes d'ÉTM dans les eaux de ruissellement, notamment pour Cu, Zn et Mn et ce davantage dans le maïs que dans les prairies (Deschênes et al., 2006). Toujours au Québec, Giroux et al. (2005) ont mis en évidence que l'apport de lisiers pendant 25 ans a affecté les teneurs totales et disponibles du sol en zinc et en cuivre, de même que celles des fractions échangeable, organique et des oxydes libres. L'apport de Cu et de Zn par le lisier de porc pendant 25 ans a augmenté la saturation des sites de fixation, ce qui accroît la mobilité des ÉTM. À plus long terme, les matières organiques fertilisantes contenant des ÉTM devront être réduites pour ce sol afin de ne pas atteindre des niveaux phytotoxiques pour les plantes ou toxiques pour la chaîne alimentaire.

Dans le tableau 3, nous présentons les principaux métaux lourds selon leur degré de risque pour les humains. Vous constaterez que parmi les sept métaux lourds les plus à risque, trois d'entre eux sont aussi des éléments mineurs. Il est important de savoir que souvent, la marge entre la carence et la toxicité est parfois mince. Giroux et al. (1992) mentionnent le cas du cuivre (Cu) (tableau 4).

Tableau 3. Les métaux lourds selon leur risque pour l'environnement et la chaîne alimentaire (Giroux et al., 1992)

Risque faible	Risque important
Mn (manganèse)	Zn (zinc)
Fe (fer)	Cu (cuivre)
Al (aluminium)	Mo (molybdène)
Cr (chrome)	Ni (nickel)
Sb (antimoine)	Cd (cadmium)
Pb (plomb)	Co (cobalt)
As (arsenic)	Se (sélénium)
Hg (mercure)	

Tableau 4. Carence et toxicité du cuivre dans les végétaux (Harter, 1983 cité par Giroux et al., 1992).

Carence	Niveau de suffisance	Risque important
1 à 5 ppm	5 à 15 ppm	Entre 16 et 20 ppm

Ainsi, la toxicité des éléments mineurs est possible et provient toujours d'une grande disponibilité dans le sol. Celle-ci n'a pas toujours un lien direct avec la teneur totale du sol en éléments mineurs. Puisque la disponibilité est en cause, le pH est souvent le facteur principal.

Les teneurs les plus élevées des métaux lourds sont trouvées dans des sols argileux. Ainsi, leur teneur totale est en relation avec les groupes texturaux : argiles>loams argileux>loams>sables (Giroux et al., 1992).

Comme avec le cas des éléments mineurs, la teneur totale des métaux lourds du sol n'indique pas la disponibilité à la culture, donc le potentiel de toxicité, non plus le risque de contamination de la chaîne alimentaire que ce soit pour les humains ou le bétail.

Les matières fertilisantes sur lesquelles l'agriculteur à un contrôle sont d'autant plus préoccupantes que les ÉTM s'y trouvent surtout dans des fractions labiles donc potentiellement disponibles (Deschênes et al., 2006; Giroux et al., 2005). Il est donc très important pour l'évaluation du risque de connaître les liens entre la teneur du sol et la concentration dans les tissus végétaux. Pour déterminer le niveau de contamination des sols, il est alors nécessaire de compléter le suivi avec d'autres analyses.

(...)

Bibliographie citée (extraits)

Alberta's agriculture and industry. 1999. Copper deficiency : diagnosis and correction. Agdex 532.3. 7pp.

Baize, D. 2000. Teneurs totales en "métaux lourds" dans les sols français. Le courrier de l'environnement de l'INRA. No 39 : 39-54.

Comeau, A., Pageau, D., Voldeng, H. Brunelle, A. 2006. Les oligoéléments : Essentiels à l'établissement du couvert végétal dans les céréales. Grandes cultures, Vol. 16 (4) :34-36.

Deschênes, L., R. Chassé, M. Giroux, C. Bastien, L. Jean, V. Bécaert, D. Martineau et G. Côté, G. 2006. Développement d'une méthode d'évaluation de la mobilité et de la biodisponibilité des éléments traces métalliques d'un sol. PARDE, 147p + annexes

FAO. 1998. Evaluation des Terres pour l'Agriculture Pluviale - Bulletin Pédologique de la FAO - 52

Giroux, M., R. Chassé, L. Deschênes et D. Côté. 2005. Étude sur les teneurs, la distribution et la mobilité du cuivre et du zinc dans un sol fertilisé à long terme avec des lisiers de porcs. Agrosol. Vol. 16 (1) : 23-32.

Giroux, M. M. Rompré, D. Carrier, P. Audesse et M. Lemieux. 1992. Caractérisation de la teneur en métaux lourds totaux et disponibles des sols du Québec. Agrosol, Vol. 5 (2) :46-55.

MAAARO. 2002. Autres problèmes liés à la culture du maïs. Publication 811F.

MDDEP. 2004. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes : critères de référence et normes réglementaires. http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/index.htm

Autres Contacts :

VOLTALIA Guyane

67 Impasse Chèvrefeuille

97351 MATOURY

Tel. : 05 94 30 47 12

Fax : 05 94 29 05 85

Email : voltaliaguyane@votalia.com

Web : www.votalia.com

CEFOG

Yvan FERNANDEZ

42 r Maripas

97320 SAINT LAURENT DU MARONI

Tel : 05 94 34 83 00

KLR

chem La Désirée

97351 MATOURY

TEL / 05 94 25 11 80

FORESTIERE AMAZONIA

05 94 31 05 55