

PIERRE LUC HÉBERT

**CARACTÉRISATION DU FONCTIONNEMENT
D'UNE RÉCOLTEUSE DE BIOMASSE ARBUSTIVE
ET ANALYSE DES COÛTS DE RÉCOLTE**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie agroalimentaire
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DES SOLS ET DE GÉNIE AGROALIMENTAIRE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2012

© Pierre Luc Hébert, 2012

Résumé

La récolte de la biomasse arbustive en plantation peut être effectuée sous diverses formes : en copeaux, en bâtonnets, en tiges complètes ou en tiges enroulées en balles rondes. Cette dernière méthode de récolte permet de manutentionner facilement la biomasse en plus de favoriser un séchage naturel durant l'entreposage. Une nouvelle machine qui produit des balles rondes de biomasse, le Biobaler[®] WB-55, a été évaluée en plantations arbustives ainsi qu'en milieux naturels en 2009 et 2010. Ce mémoire étudie principalement les performances du Biobaler[®] lors de 19 essais en plantations pour un total de 546 balles récoltées. Le rendement récolté moyen était de 19,41 t de matière sèche (MS) /ha et variait entre 9,68 et 31,84 t MS/ha. La masse moyenne des balles était de 427 kg de matière humide (MH) (218 kg MS). La densité moyenne des balles était de 138 kg MS/m³. La teneur en eau moyenne était de 48,6% et variait entre 40,8% et 56,0% sur une base humide (b.h.). La capacité moyenne de pressage était de 35 balles/h (7,69 t MS/h), la capacité maximum de 48 balles/h (10,53 t MS/h) et la capacité minimum de 23 balles/h (4,06 t MS/h). La consommation moyenne de diesel avec un tracteur de 138 kW était de 3,91 l/t MS et variait entre 2,12 l/t MS et 6,96 l/t MS. Les pertes moyennes relatives au champ étaient de 11,3% et variaient entre 5,7 et 20,1%. Le coût de pressage en plantation a été estimé en moyenne à 20,95 \$/ t MS (4,47 \$/balle) et a varié entre 14,65 et 36,54 \$/ t MS. Sept méthodes de récolte qui incluaient le pressage, le transport au champ et le broyage ont ensuite été évaluées à l'aide de la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Le coût de récolte a varié entre 32,72 et 44,07 \$/t MS (1,83 et 2,46 \$/GJ) en plantation et entre 57,84 et 76,74 \$/t MS (3,23 et 4,29 \$/GJ) en milieu naturel. Suite à l'étude AHP, il a été établi que la meilleure méthode pour récolter la biomasse avec le Biobaler[®] incorporait une autochargeuse avec un tracteur de 86 kW et un broyeur forestier avec un moteur diesel de 242 kW. Finalement, le coût de transport de la biomasse broyée pour une distance moyenne de 50 km sur route aller-retour a été évalué à 10,72 \$/t MS (0,60 \$/GJ). Le coût de transport en balles rondes non broyées a été évalué à 9,16 \$/t MS (0,51 \$/GJ)

Abstract

Biomass harvesting in plantations can be done in various forms: chips, billets, loose stems or stems rolled up in round bales. The latter method allows easy handling and moving of the biomass in addition to promoting natural drying during storage. A new machine that produces round bales of biomass, the Biobaler[®] WB-55, was tested in plantations and on fallow land in 2009 and 2010. This master's thesis reports mainly the performance of the Biobaler[®] during 19 trials in plantations for a total of 546 bales harvested. The average harvested yield was 19.41 t dry matter (DM) / ha and ranged from 9.68 to 31.84 t DM / ha. The average mass of a bale was 427 kg wet matter (WM) (218 kg DM). The average density of bales was 138 kg DM / m³. The moisture content averaged 48.6% and ranged between 40.8% and 56.0% wet basis (w.b.). The average capacity of baling was 35 bales / h (7.69 t DM / h), the maximum capacity was 48 bales / h (10.53 t DM / h) and the minimum capacity was 23 bales / h (4.06 t DM / h). The diesel consumption with a tractor of 138 kW averaged 3.91 l / t DM and ranged from 2.12 to 6.96 l / t DM. The relative loss in the field averaged 11.3% and ranged between 5.7 and 20.1%. The baling cost averaged \$ 20.95 / t DM (\$ 4.47 / bale) and varied between \$ 14.65 and \$ 36.54 / t DM. Seven harvest methods that included baling, displacement of bales in the field and grinding were evaluated using the AHP method (Analytic Hierarchy Process). The cost of harvesting ranged between \$ 32.72 and 44.07 / t DM (\$ 1.83 and 2.46 / GJ) in plantations and between \$ 57.84 and 76.74 / t DM (\$ 3.23 and 4.29 / GJ) in fallow land. Following the AHP study, it was determined that the best method for harvesting biomass with the Biobaler[®] incorporated a self loading bale carrier with a tractor of 86 kW and a forestry grinder with a diesel engine of 242 kW. Finally, the biomass transport cost for an average round-trip distance of 50 km was estimated at \$ 10.72 / t DM (\$ 0.60 / GJ). The transport cost of unprocessed round bales was estimated at \$ 9.16 / t DM (\$ 0.51 / GJ).

Table des matières

Résumé.....	II
Abstract.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures.....	VIII
Liste des équations.....	XI
Liste des abréviations des unités de mesure.....	XII
Remerciements.....	XIII
Avant-propos.....	XV
1. Introduction.....	1
2. Revue de littérature.....	3
2.1. Récolte de la biomasse arbustive.....	3
2.1.1. Récolte des résidus forestiers.....	3
2.1.1.1. Récolte sous forme de paquets de résidus forestiers.....	4
2.1.1.2. Récolte sous forme de copeaux des rejets forestiers.....	5
2.1.2. Récolte de plantations arbustives.....	6
2.1.2.1. Récolte sous forme de copeaux.....	7
2.1.2.2. Récolte sous forme de tiges.....	8
2.1.2.3. Récolte sous forme de bâtonnets.....	9
2.1.2.4. Récolte de peupliers en deux étapes.....	9
2.1.2.5. Récolte sous forme de balles rondes.....	11
2.1.3. Déchiquetage et broyage.....	14
2.1.3.1. Déchiqueteurs à disque.....	14
2.1.3.2. Déchiqueteurs à tambour.....	15
2.1.3.3. Broyeurs.....	16
2.1.3.4. Fragmenteurs.....	17
2.1.3.5. Coûts de la machinerie de déchiquetage et de broyage.....	17
2.1.4. Manutention et transport des balles.....	18
2.1.5. Contrôle de la qualité de la biomasse et calculs de coûts.....	24
2.1.6. Séchage et entreposage de la biomasse.....	25
2.1.7. Valeur calorifique de la biomasse.....	30
2.1.8. Transport de la biomasse sur route.....	32
2.2. Analyse de coûts.....	35
2.3. Méthodes d'analyse de coûts.....	41
3. Hypothèses et objectifs du mémoire.....	43
4. Méthodologie.....	44
4.1. Machine de récolte.....	44
4.2. Collecte de données au champ.....	46
4.3. Sites de récolte en plantation.....	50
4.4. Méthode d'aide à la décision.....	51
5. Résultats.....	52
5.1. Données de pressage en plantations.....	52
5.1.1. Observations pré-récolte.....	52
5.1.2. Caractéristiques des balles récoltées.....	53

5.1.3.	Temps de récolte, capacité et consommation de carburant	53
5.1.4.	Régressions linéaires.....	57
5.1.5.	Relations entre la consommation de carburant, le rendement, la capacité et la masse des balles	60
5.1.6.	Pertes de récolte	64
5.2.	Estimation des coûts et analyse de la récolte de la biomasse arbustive avec le Biobaler®	66
5.2.1.	Analyse des coûts de pressage de la biomasse	66
5.2.1.1.	Présentation des résultats.....	70
5.2.2.	Estimation des coûts des méthodes de récolte avec le Biobaler®	74
5.2.2.1.	Présentation des méthodes de récolte étudiées.....	76
5.2.2.2.	Résultats d'analyse des coûts de méthode de récolte.....	80
5.2.3.	Résultats d'analyse AHP	83
5.2.4.	Transport de la biomasse	89
6.	Discussion	91
7.	Conclusion	93
	Bibliographie.....	94
	Annexe A : Valeur des terres	102
	Annexe B : Prix de liste de différentes machineries.....	103
	Annexe C : Équations empiriques de la masse de tiges de saule et de diamètres mesurés à 0,10 et à 1,20 m au dessus du sol.....	106
	Annexe D : Coordonnées des collaborateurs (sites de récolte).....	109
	Annexe E : Fiches techniques pour le tracteur Fendt™ 818	110
	Annexe F : Résultats de régression linéaire selon la méthode d'analyse par élimination graduelle.....	113
	Annexe G : Données de pressage en milieu naturel	120
	Annexe H : Prix de la ficelle et des filets à balle	124
	Annexe I : Estimation des coûts de récolte pour chaque méthode de récolte	126
	Annexe J : Données détaillées de l'étude AHP (Analytic Hierarchy Process).....	169
	Annexe K : Détails des coûts de transport de la biomasse	172
	Annexe L : Évolution des taux d'intérêt au Canada	178

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de résultats d'expérimentation de récoltes d'une presse <i>New Holland</i> TM BR 740 modifiée pour récolter la biomasse (Lavoie et al., 2008; Savoie et al., 2008b).....	13
Tableau 2 : Sommaire des coûts de la machinerie de déchetage et de broyage	18
Tableau 3 : Capacité de divers équipements de manutention pour déplacer les balles rondes du champ jusqu'en bordure de route (adaptée de <i>Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute, 1977-1992</i>)	19
Tableau 4 : Coûts de déplacement de balles rondes selon la distance de déplacement.....	23
Tableau 5 : Coût de transport de copeaux de bois dans un cadre de référence autrichien (HBCC, 2008).....	35
Tableau 6 : Données relatives au coût de production du saule en plantation.....	36
Tableau 7 : Valeurs typiques de l'énergie au Royaume-Uni en août 2011 (Biomass Energy Centre, 2011), converties au taux de 1,62 \$ Cdn = 1,00 £	39
Tableau 8 : Caractéristiques des plantations récoltées en 2009 et 2010 avec le Biobaler® ..	54
Tableau 9 : Caractéristiques des balles récoltées en plantation en 2009 et 2010 (S=saule, P=peuplier)	55
Tableau 10 : Rendements récoltés lors des essais, capacité et consommation de diesel avec le Biobaler® en plantation en 2009 et 2010 (S=saule, P=peuplier)	56
Tableau 11: Variables indépendantes observées durant les récoltes avec le Biobaler®.	58
Tableau 12: Variables dépendantes mesurées durant les récoltes avec le Biobaler®.	59
Tableau 13: Régressions linéaires avec variables significatives ($p \leq 0,05$) en fonction des variables indépendantes du Tableau 11.....	60
Tableau 14 : Pertes mesurées au champ en plantations en 2009-2010 après le passage du Biobaler®	65
Tableau 15 : Paramètres d'estimation du coût de pressage moyen en plantation.....	67
Tableau 16 : Calculs d'estimation du coût de pressage moyen en plantation.....	68
Tableau 17 : Résultats d'estimation du coût de pressage moyen en plantation.....	69
Tableau 18 : Coût de pressage en plantation avec le Biobaler® selon les paramètres techniques des essais en 2009 et 2010 (en plantation de saule «S» ou peuplier «P»)..	70
Tableau 19 : Répartition des coûts de pressage de biomasse (%) avec le Biobaler® et le Fendt™ 818.....	72
Tableau 20 : Paramètres techniques pour l'estimation des coûts de récolte en plantations et en milieux naturels (formules de pondération au Tableau 41)	75
Tableau 21 : Équipements communs pour la récolte et le broyage des sept systèmes.....	78
Tableau 22 : Équipements distincts pour les sept systèmes	79
Tableau 23 : Résultats d'estimation des coûts de pressage, transport hors route et broyage	81
Tableau 24 : Critères décisionnels relatifs à l'étude AHP.....	85
Tableau 25 : Valeur des terres agricoles transigées dans certaines régions du Québec (modifié de Groupe Agéco, 2010).....	102
Tableau 26 : Prix de liste de tracteur selon le type et la puissance.....	103
Tableau 27 : Prix d'acquisition et caractéristiques de machinerie.....	104

Tableau 28: Variables indépendantes et plage de valeurs expérimentales	113
Tableau 29: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y1, la masse moyenne des balles (kg MH).....	113
Tableau 30: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y2, la densité moyenne des balles (kg MH/m ³)	114
Tableau 31: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y3, la masse moyenne des balles (kg MS)	114
Tableau 32: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y4, la densité moyenne des balles (kg MS/m ³).....	115
Tableau 33: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y5, la capacité moyenne (balle/h)	115
Tableau 34: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y6, la capacité moyenne (t MS/h)	115
Tableau 35: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y7, la capacité moyenne.....	116
Tableau 36: Étapes de calculs de régression linéaire pour la consommation de carburant (l/t MS)	116
Tableau 37: Résultats d'analyse de sensibilité de régression linéaire	117
Tableau 38 : Performances de pressage du Biobaler [®] en milieu naturel.....	120
Tableau 39 : Prix de la ficelle et des filets dans la région de la ville de Québec le 18 novembre 2010	124
Tableau 40 : Calculs du coût d'attachement des balles.....	125
Tableau 41 : Données moyennes de récolte pour l'estimation des coûts de récolte	126
Tableau 42 : Estimation des coûts de récolte : méthode 1	128
Tableau 43 : Estimation des coûts de récolte : méthode 2	134
Tableau 44 : Estimation des coûts de récolte : méthode 3	140
Tableau 45 : Estimation des coûts de récolte : méthode 4	145
Tableau 46 : Estimation des coûts de récolte : méthode 5	151
Tableau 47 : Estimation des coûts de récolte : méthode 6	157
Tableau 48 : Estimation des coûts de récolte : méthode 7	163
Tableau 49 : Résultats de l'étude AHP.....	169
Tableau 50 : Détails des coûts de transport de la biomasse	172
Tableau 51 : Calculs des coûts de transport de balles rondes avec camion et remorque plate-forme (53 pieds)	177

Liste des figures

<i>Figure 1</i> : Biobaler® WB-55 et tracteur Fendt™ 818 de 150kW (185 hp).....	XV
<i>Figure 2</i> : Le Fiberpac bundler (FP 370™) attaché sur le TJ-1210B™ (Johansson et al., 2006).....	5
<i>Figure 3</i> : FECON™ Bio-Harvester (Roise et al., 2009).....	6
<i>Figure 4</i> : Fourragère automotrice New Holland™ FR9060 avec une tête de récolte 130 FB.....	7
<i>Figure 5</i> : Le Segerslätt Empire 2000 (Lechasseur et Savoie, 2005).....	8
<i>Figure 6</i> : Case IH Austof (Caslin et al., 2010).....	9
<i>Figure 7</i> : Prototypé CRA-ING (Pari et al., 2010).....	10
<i>Figure 8</i> : Class Jaguar 890 (Pari et al., 2010).....	10
<i>Figure 9</i> : Récolteuse d'andains de peupliers de marque Spapperi RT (Pari et al., 2010).....	11
<i>Figure 10</i> : Presse New Holland™ BR 740 modifiée pour récolter la biomasse avec la tête à scies et la tête à marteaux (Savoie et al., 2008b).....	13
<i>Figure 11</i> : Déchiqueteur à disque (Hakkila, 1989 dans Ladan et al., 2006).....	15
<i>Figure 12</i> : (a) Déchiqueteur à tambour cylindrique (b) Déchiqueteur à tambour en V (Ladan et al., 2006).....	15
<i>Figure 13</i> : Broyeur à marteaux pivotants (Hakkila, 1989 dans Ladan et al., 2006).....	16
<i>Figure 14</i> : Déchiqueteur à fragments : le fragmenteur à vis sans-fin (a), le fragmenteur à disque (b) et le fragmenteur à double disque (c) (Ladan et al., 2006).....	17
<i>Figure 15</i> : Capacité de manipulateurs de balles rondes pour déplacer les balles du champ jusqu'en bordure de route (adapté de <i>Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute, 1977-1992</i>).....	20
<i>Figure 16</i> : New Holland Model 85 Bale Handler.....	20
<i>Figure 17</i> : McKee Bale-rustler.....	20
<i>Figure 18</i> : Hesston 5200 Round-Up Multiple Bale Mover.....	21
<i>Figure 19</i> : Laurier H-2125 Round Bale Mover.....	21
<i>Figure 20</i> : Farmhand Model F126-B Five-Bale Mover.....	21
<i>Figure 21</i> : B & K Bale Karrier 815.....	21
<i>Figure 22</i> : Morris M-881 Hay Hiker Round Bale Mover.....	21
<i>Figure 23</i> : Laurier H-4250 Round Bale Mover.....	22
<i>Figure 24</i> : Massey Ferguson 505 Round Bale Mover.....	22
<i>Figure 25</i> : Kingsman RBM-217 Round Bale Mover.....	22
<i>Figure 26</i> : Sperry New Holland Model 8500 Round Bale Wagon.....	22
<i>Figure 27</i> : Remorque autochargeuse de balles rondes TRB2000 (Groupe Anderson, 2011).....	24
<i>Figure 28</i> : Camion autochargeur de balles rondes (Bandit Bar, 2011).....	24
<i>Figure 29</i> : Pertes de matière sèche lors de l'entreposage à aire ouverte entre la récolte (en décembre et janvier) et la reprise en mai ou septembre en fonction de la grosseur des particules : tiges entières, bâtonnets de 20 cm (Silvatec), copeaux de 5 cm (Austoft) et copeaux de 2,8 cm (Class), selon Kofman et Spinelli (1997).....	27
<i>Figure 30</i> : Coût de séchage de copeaux de saule dans un entrepôt de séchage de pommes de terre en fonction du mois de séchage (1=janvier; 12=décembre) pour trois	

épaisseurs en tenant compte des charges fixes (ligne pleine) ou sans en tenir compte (ligne pointillée) (Gigler et al., 2000).....	29
<i>Figure 31</i> : Courbe de déshydratation de tiges de peuplier laissées au champ en fonction du temps (jours) (Pari et al., 2010).	30
<i>Figure 32</i> : Valeur calorifique nette en fonction du taux d'humidité pour une biomasse constituée de 50% de carbone, 6% d'hydrogène et 44% d'oxygène (HBCC, 2008). ...	31
<i>Figure 33</i> : Charge utile maximum (kg) de matière sèche en fonction du taux d'humidité pour des résidus forestiers en ballots (« bundles ») ou en copeaux (« chips ») (Johansson et al., 2006).	33
<i>Figure 34</i> : Remorque multiusage de Legras Industries (Hillman et Michaelsen, 2008). ...	34
<i>Figure 35</i> : Semi-remorque conventionnelle avec grillage de rétention pour copeaux.	34
<i>Figure 36</i> : Prix des copeaux de bois sur le marché résidentiel (EuBioNet3, 2010).	38
<i>Figure 37</i> : Prix des copeaux de bois sur le marché industriel (EuBioNet3, 2010).	38
<i>Figure 38</i> : Répartition des coûts de culture et de récolte pour le saule (Ericsson et al., 2009).	40
<i>Figure 39</i> : Coût d'approvisionnement sur une base énergétique en fonction du temps écoulé entre la récolte et la conversion d'énergie (ECU/kWh) (European Currency Unit = ECU ≈ 1€ en 1999) i= copeaux, u= bâtonnets, s = tiges (Gigler et al., 1999).	41
<i>Figure 40</i> : Schéma de fonctionnement du Biobaler® WB-55.	44
<i>Figure 41</i> : Consommation de carburant diesel (l/t MS) par le tracteur Fendt™ 818 lors du pressage de la biomasse avec le Biobaler® en fonction de la capacité de pressage en plantation (t MS/h).	61
<i>Figure 42</i> : Influence du rendement récolté (t MS/ha) sur la capacité (t MS/h) de pressage en plantation.	62
<i>Figure 43</i> : Masse moyenne des balles en fonction de la capacité de pressage en plantation (19 observations).	63
<i>Figure 44</i> : Masse moyenne des balles en fonction de la capacité de pressage en plantation (récolte sans feuilles, 13 observations).	63
<i>Figure 45</i> : Pertes relatives en fonction du rendement récolté.	64
<i>Figure 46</i> : Influence de la capacité sur le coût de pressage en plantation.	72
<i>Figure 47</i> : Influence de la maintenance et de la durée de vie du Biobaler® sur le coût de pressage en plantation.	73
<i>Figure 48</i> : Influence du coût du diesel sur le coût de pressage en plantation.	73
<i>Figure 49</i> : Système autochargeur pour le déplacement des balles rondes.	77
<i>Figure 50</i> : Importance relative des critères de décision de l'étude AHP.	83
<i>Figure 51</i> : Résultats détaillés de l'étude AHP.	88
<i>Figure 52</i> : Résultats finaux de l'étude AHP.	89
<i>Figure 53</i> : Influence du coût du diesel et de la distance parcourue sur route sur le coût de transport.....	90
<i>Figure 54</i> : Broyeur rotatif Morbark 1100	105
<i>Figure 55</i> : Camion à conteneur (USDA, 2005).	105
<i>Figure 56</i> : Camion à deux conteneurs (USDA, 2005).	105
<i>Figure 57</i> : Camion à copeaux 91,75 m ³ (53 pieds = 16,15 m) (USDA, 2005).	105
<i>Figure 58</i> : Camion à copeaux 113,15 m ³ (USDA, 2005).	105
<i>Figure 59</i> : Broyeur rotatif Haybuster H1130 (Savoie et Hébert, 2010).	105

Figure 60 : Les données de Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) basées sur 1150 tiges de saule et la relation entre la masse et le diamètre des tiges ou la section transversale mesurée au point de coupe. Les tiges ont été coupées à 0,10 m au-dessus du sol.	106
Figure 61 : Les données de Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) basées sur 1150 tiges de saule et la relation entre la masse et le diamètre des tiges ou la section transversale mesurée à 1,20 m du sol.	106
<i>Figure 62</i> : Courbe de régression de la capacité (t MS/h) en fonction de la capacité (balle/h) pour toutes les données provenant des milieux naturels (Tableau 38) et des plantations (Tableau 10). Cette relation a théoriquement une pente de 1, la variation est due à l'inhomogénéité des balles (masse et teneur en eau).	121
<i>Figure 63</i> : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction de la capacité (t MS/h) pour toutes les données de milieux naturels et de plantations.	121
<i>Figure 64</i> : Courbe de régression de la capacité (balle/h) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.	122
<i>Figure 65</i> : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction de la capacité (balle/h) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.	122
<i>Figure 66</i> : Courbe de régression de la capacité (t MS/h) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.	123
<i>Figure 67</i> : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.	123
<i>Figure 68</i> : Évolution des taux d'intérêt selon la Banque du Canada (Financière agricole, 2011).	178

Liste des équations

Équation 1 : % Humidité sur une base sèche (b.s.).....	30
Équation 2 : % Humidité sur une base humide (b.h.)	30
Équation 3 : Formule de calcul de la valeur calorifique nette.....	31
Équation 4 : Formule de calcul de la valeur calorifique nette simplifié pour le saule	32
Équation 5 : Masse (M, en kg humide) en fonction du diamètre à la base (Db, mm)	107
Équation 6 : Masse (kg humide) en fonction de la surface transversale à la base (Db, en mm).....	107
Équation 7 : Masse (M, en kg humide) en fonction du diamètre à 1,20 m du sol (D, mm)	107
Équation 8 : Masse (kg humide) en fonction de la surface transversale à 1,20 m du sol (D, en mm).....	107

Liste des abréviations des unités de mesure

Abréviation (français)	Signification	Abréviation (anglais)
an	année	yr
b.h.	base humide	w.b.
b.s.	base sèche	d.b.
BTU	<i>British Thermal Unit</i>	BTU
cm	centimètre	cm
€	Euro	€
g	gramme	g
GJ	giga joule	GJ
h	heure	h
ha	hectare	ha
hp	puissance	hp
kg	kilogramme	kg
km	kilomètre	km
kW	kilowatt	kW
kWh	kilowatt-heure	kWh
l	litre	l
lb	livre	lb
m	mètre	m
m ²	mètre carré	m ²
m ³	mètre cube	m ³
MH	matière humide	WM
Mha	méga hectare	Mha
min	minute	min
MJ	Méga Joule	MJ
mm	millimètre	mm
MS	matière sèche	DM
MW	Méga Watt	MW
pH	potentiel d'hydrogène	pH
po	pouce	in
RPM	rotation par minute	RPM
t	tonne	t
V	Volt	V
W	Watt	W
\$	dollar canadien	\$
\$ US	dollar américain	\$ US
%	pourcentage	%
°C	degré Celsius	°C

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide au long de mon cheminement à la maîtrise et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire d'une manière ou d'une autre.

Tout d'abord, je désire exprimer mes remerciements à mon directeur de maîtrise, M. Philippe Savoie, professeur associé au Département des sols et de génie agroalimentaire de l'Université Laval et chercheur au Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour son œil critique ainsi que pour tous ses conseils avisés qui m'ont été très précieux afin de peaufiner mon travail. Un remerciement spécial à Ressources Naturelles Canada et au Réseau canadien d'innovation dans la biomasse pour leur support financier à la recherche.

Ensuite, je tiens à remercier tout particulièrement M. François-Simon Robert, étudiant à l'Université Laval, candidat à la maîtrise, pour sa précieuse collaboration lors des essais de récolte, pour nos nombreuses discussions ainsi que pour son support moral.

Aussi, un merci à M. Joey Villeneuve, M. René Morissette, M. Marc-Antoine Robert, Mme Emmanuelle Caron, M. Pierre-Luc Lizotte et Mme Héloïse Bastien, des collaborateurs indispensables d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Puis, je veux remercier M. Frédéric Lavoie et M. Luc D'Amours du Groupe Anderson, sans qui je n'aurais pu accomplir un tel projet.

Aussi, j'exprime ma gratitude aux partenaires financiers qui m'ont permis de bénéficier d'une bourse d'études en milieu pratique, soit le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies ainsi que le Groupe Anderson.

Également, l'aboutissement de cette thèse a aussi été rendu possible par la collaboration de partenaires : M. Francis Allard (Ferme Agro Énergie), M. Philippe Quinn (Willow Shade Farm), M. Rolland Guillon (Domaine de la Templierie) et M. Derek Sidders (plantations Ontario)

Finalement, je ne saurais passer sous silence l'appui inconditionnel de ma conjointe Cynthia, des membres de ma famille et de mes amis qui ont toujours été présents pour me supporter et m'encourager.

À vous tous, je souhaite exprimer ma reconnaissance pour votre support et je vous adresse un merci des plus sincère.

Avant-propos

D'abord, une revue de littérature des méthodes de récolte des plantes arbustives est présentée. Ensuite, le mémoire présente les méthodes utilisées pour caractériser le fonctionnement du Biobaler[®] (*Figure 1*) dans des plantations au Québec et en Ontario. Par la suite, les méthodes de calcul du coût de récolte de la biomasse sont décrites. Les résultats fournissent des données détaillées de performance du Biobaler au champ. Le coût de récolte est segmenté en trois parties : le pressage de la biomasse sous forme de balles rondes, le déplacement des balles rondes au bord du champ et le broyage de la biomasse au bord du champ. Ensuite, les différentes chaînes de récolte sont analysées en fonction des coûts et d'autres critères décision qui incluent l'investissement total, le risque technologique, la polyvalence des équipements, la convivialité de la chaîne de récolte et la capacité annuelle du chantier. Finalement le mémoire présente des recommandations et une conclusion.



Figure 1 : Biobaler[®] WB-55 et tracteur Fendt[™] 818 de 150kW (185 hp).

1. Introduction

L'augmentation du prix du pétrole et le réchauffement climatique favorisent la recherche de nouvelles sources d'énergie. La biomasse arbustive est une source d'énergie prometteuse. Par ses qualités, elle peut être une alternative à l'utilisation du pétrole afin de produire de l'énergie. Elle peut aussi réduire les gaz à effet de serre en séquestrant du carbone. Selon la Coalition Bois Québec (2011), 1,1 m³ cube de bois séquestre une tonne de carbone. Une utilisation possible de la biomasse arbustive est la fabrication de panneaux de particules et de panneaux de fibres à densité moyenne (MDF). Selon Sean et Labrecque (2006), une utilisation d'un pourcentage pouvant aller jusqu'à 30% en copeaux de saule (*Salix Viminalis*) ne nuit pas aux caractéristiques physiques et mécaniques nécessaires pour répondre aux normes de l'American National Standards Institute (ANSI). Une autre utilisation possible de la biomasse, plus commune, est la combustion pour réduire les coûts de chauffage conventionnel.

Les plantes arbustives sont abondantes en milieux naturels et peuvent aussi devenir une culture intéressante sur des terres non essentielles à la culture du fourrage et de la nourriture. Dans plusieurs pays, les plantes arbustives naturelles sont parfois considérées comme une nuisance, car elles envahissent les terres agricoles, les sous-bois et les plaines. On doit les couper régulièrement pour minimiser les risques de feux spontanés incontrôlés, mais leur faible densité fait en sorte qu'on les brûle souvent sur place sans aucune valorisation énergétique. Par ailleurs, certaines terres abandonnées peuvent servir à l'implantation du saule et à d'autres espèces arbustives à croissance rapide pour une collecte cyclique de biomasse, soit à tous les deux, trois ou quatre ans. Autant que possible, la culture du saule et du peuplier doit être faite sur des terres marginales afin de ne pas faire compétition à la demande alimentaire. Le rendement potentiel du saule est estimé entre 10 et 20 tonnes de matière sèche par année par hectare (Lechasseur et Savoie, 2005). Selon Labrecque et Teodorescu (2005), le rendement des peupliers hybrides NM5 et NM6 variait de 16,62 à 18,05 tonnes de matière sèche par année par hectare. Le Canada compte

31 Mha de terres agricoles qui ne sont pas cultivées (Statistique Canada (2005) rapporté par Lechasseur et Savoie (2005)). Dans les vingt prochaines années, Lechasseur et Savoie (2005) ont émis l'hypothèse qu'un million d'hectares de culture intensive à courte rotation pourraient voir le jour au Canada. À titre de comparaison, en 2005, Statistique Canada estimait les superficies de culture des pois, du maïs et du soya respectivement à 1,3 Mha, 1,2 Mha et 1,1 Mha (Statistique Canada (2005) rapporté par Lechasseur et Savoie, 2005).

Devant ces constatations, le Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) a développé un prototype pouvant récolter la biomasse arbustive autant en milieux naturels qu'en plantations. Cette nouvelle machine porte aujourd'hui le nom de Biobaler® et est maintenant fabriquée sous la licence d'AAC par le Groupe Anderson, situé à Chesterville au Québec.

2. Revue de littérature

La revue de la littérature est divisée en deux parties. La première partie décrit les méthodes de récolte de la biomasse arbustive. La deuxième partie décrit les méthodes d'analyse de coûts.

2.1. Récolte de la biomasse arbustive

La méthode de conversion et le besoin logistique des projets d'utilisation de biomasse influencent les paramètres de design des chaînes d'approvisionnement. Donc, il est possible qu'une méthode de récolte soit optimale pour un type d'utilisation et qu'elle ne le soit pas pour un autre type d'utilisation. Il est important de définir les besoins spécifiques de chaque projet. Cela commence par le choix de la méthode de récolte. La prochaine section décrit brièvement la récolte des résidus forestiers et de façon plus détaillée la récolte des arbustes en plantations ou en friches.

2.1.1. Récolte des résidus forestiers

L'expérience de la Suède en matière de récolte de biomasse sous forme de résidus forestiers s'est enrichie au fil des années. De ce fait, les suédois ont réussi à réduire leur coût de production. L'expérience et les connaissances acquises par les opérateurs d'abatteuse-ébrancheuse les amènent, pour faciliter le ramassage, à empiler les résidus dès la récolte des billots de bois. Aussi, les opérateurs de machines forestières ne roulent pas sur les résidus de façon à ne pas contaminer cette biomasse. Si elle est contaminée, les déchiqueteurs sont plus souvent sujets à subir des bris mécaniques qui entraînent des délais de production et des coûts d'entretien élevés. De plus, les opérateurs ne cherchent pas à ramasser l'intégralité des piles de résidus, ils ne font qu'enlever le « crémage sur le

dessus » car le ramassage de l'intégralité des résidus mène à une augmentation des coûts (Junginger, 2005). Hillring (2002) mentionne que des ententes sont parfois créées entre les compagnies chargées de la récolte de billes de bois et celles chargées de la récolte des résidus afin de faciliter le travail de chacun.

2.1.1.1. Récolte sous forme de paquets de résidus forestiers

Une méthode de récolte des résidus forestiers est sous forme de paquets de 0,68 m de diamètre par 3,2 m de longueur en moyenne. Ces paquets ont une masse d'environ 550 kg et une densité d'environ 475 kg/m^3 . Une machine munie d'une pince ramasse les résidus au sol et les dépose dans un empaqueteur qui les densifie et les attache en continu (Figure 2) (Johansson et al. , 2006).

Lorsque le paquet a atteint une longueur désirée, il est scié et poussé au sol. Cette méthode a pour avantage de réduire les coûts de récolte et de transport par rapport aux copeaux. La récolte de résidus forestiers sous forme de paquets a une plus grande densité que sous forme de copeaux de bois (Johansson et al. , 2006).

Le paquet peut être attaché avec de la corde de polypropylène ou de la corde de sisal. Bien que la corde de sisal ait l'avantage d'être biodégradable, cette caractéristique peut également être un désavantage. En effet, la corde de sisal se décompose entre les paquets et entre les paquets et le sol. Lors de tests après cinq mois, la corde de sisal avait perdu jusqu'à 40% de sa force en tension aux endroits où elle commençait à se décomposer. En comparaison, la corde de polypropylène n'avait perdu que 20% de sa force de tension après un an (Johansson et al., 2006).



Figure 2 : Le Fiberpac bundler (FP 370 TM) attaché sur le TJ-1210B TM (Johansson et al., 2006).

2.1.1.2. Récolte sous forme de copeaux des rejets forestiers

Un prototype a été développé par Roise et al. (2009) pour la récolte d'arbustes en forêt sans valeur commerciale pour les scieries. Cette machine du nom de Bio-Harvester TM (Figure 3) coupe des arbustes jusqu'à 15 cm de diamètre, les déchiquète et achemine les copeaux avec une vis-sans-fin jusqu'à un souffleur qui les projette dans une remorque traînée. Durant les premiers essais, le prototype a rencontré plusieurs problèmes de blocage dans la vis-sans-fin, le souffleur et la chute. Un problème de la machine est son faible taux de recouvrement de la biomasse disponible estimé à 33% en moyenne. Le taux d'utilisation était de 23%, c'est-à-dire que la machine était arrêtée durant 77% du temps de récolte. Malgré ces problèmes, la performance moyenne de production était de 2,6 t/h et la meilleure performance était de 7,2 t/h.



Figure 3 : FECON™ Bio-Harvester (Roise et al., 2009).

La récolte des résidus et rejets forestiers sous forme de paquets ou de copeaux requiert des équipements spécialisés et très robustes à cause de la diversité des branches et arbustes traités. Dans la section suivante, la revue de littérature se concentrera sur la récolte des arbustes en plantation où des conditions sont plus homogènes qu'en milieu forestier.

2.1.2. Récolte de plantations arbustives

Les récoltes en plantation doivent avoir lieu en période de dormance, tard à l'automne lorsque les feuilles sont tombées ou tôt au printemps lorsque les bourgeons n'ont pas encore bourgeonné. De plus, la coupe devrait être effectuée à 10 cm ou moins du sol afin de favoriser la production de biomasse. Les souches plus courtes favorisent une bonne régénération et produisent davantage de biomasse que les souches plus hautes (Hytönen, 1994). Toutefois lors de la récolte, il ne faut pas ramasser de la terre ou des cailloux afin de ne pas contaminer la biomasse.

2.1.2.1. Récolte sous forme de copeaux

Cette méthode utilise une fourragère automotrice avec une tête de récolte spéciale pour couper et acheminer les tiges de saule (Figure 4).



Figure 4 : Fourragère automotrice New Holland™ FR9060 avec une tête de récolte 130 FB.

Le chantier requiert deux à quatre autres tracteurs avec remorques afin de transporter les copeaux et ne pas ralentir le rythme de récolte de la fourragère. Le coût d'utilisation de ce type de machinerie est élevé sur une base horaire. Il devient alors primordial d'optimiser la capacité de récolte. Spinelli et al. (2009) rapportent des capacités de production de six différentes machines de récolte sous forme de copeaux pour des fourragères *Class Jaguar* ayant une puissance de 254 kW à 445 kW. Les capacités variaient de 9 à 70 t MH par heure planifiée pour le peuplier à croissance rapide. Les coûts des fourragères variaient de 200 000 à 300 000 €¹ selon leur puissance. Les capacités des machines présentées dépendent aussi des capacités de deux têtes de récolte qui ont été testées, soit la *GBE 1* et

¹ 1€= 1,41 \$ Can (Banque du Canada, 2011)

la *Class HS-2*. Le coût d'une tête de récolte est de 140 000 € en plus de la fourragère. Les coûts de récolte se situent entre 11 et 35 €/t MH (1,5 à 4,7 €/GJ). Ces coûts de récolte ont été calculés à partir de la méthode Miyata (1980) en supposant un temps d'utilisation des fourragères de 1 000 h/an, 500 h/an pour les têtes de récolte, une durée de vie de 8 ans, un coût de réparation et de maintenance annuelle à 70% de l'amortissement annuel, un coût de main-d'œuvre de 16 €/h, un coût de carburant de 0,90 €/l et 20% de profit. Le même type d'hypothèse a été posé pour les unités de transport de copeaux (tracteur et remorque).

2.1.2.2. Récolte sous forme de tiges

Un autre système de récolte coupe et accumule la biomasse sous forme de longues tiges en vrac (Figure 5). Cette méthode a l'avantage de permettre le séchage naturel de la biomasse jusqu'à un pourcentage de 19% d'humidité base humide (b.h.). Bien qu'avec cette méthode les tiges puissent être attachées en paquets, on obtient une densité de biomasse trop faible pour que leur transport soit rentable. Par conséquent, les tiges récoltées et séchées devront être déchiquetées avant d'être transportées afin d'augmenter la densité de la biomasse et de rendre le transport plus économique (Lechasseur et Savoie, 2005).



Figure 5 : Le Segerslätt Empire 2000 (Lechasseur et Savoie, 2005).

2.1.2.3. Récolte sous forme de bâtonnets

Un autre système de récolte utilise des récolteuses à canne à sucre pour collecter la biomasse sous forme de bâtonnets de 5 à 10 cm de longueur (Figure 6). Par la suite, la biomasse est transportée par camion. Lorsque l'on fait des piles de bâtonnets, la grosseur des morceaux permet à l'air de circuler facilement à l'intérieur et de sécher naturellement la biomasse. Après la récolte et le séchage, un broyage de la biomasse est nécessaire afin d'optimiser l'efficacité de combustion (Caslin et al., 2010).



Figure 6 : Case IH Austof (Caslin et al., 2010).

2.1.2.4. Récolte de peupliers en deux étapes

Pari et al. (2010) présentent la récolte de peupliers en deux étapes. La première étape est de couper les peupliers et de les laisser au champ en andain entre les rangées à l'aide d'une machinerie spécialisée (Figure 7). Ensuite, le peuplier est laissé au champ pour sécher naturellement. Finalement, le peuplier est déchiqueté à l'aide d'une fourragère automotrice *Class Jaguar 890* (Figure 8) ou d'un *Spapperi RT* (Figure 9). Cette méthode a pour avantage de permettre de couper les tiges de peuplier lorsque les conditions de sol sont humides sans affecter le travail et ainsi, étendre la période de récolte. De plus, selon les

mêmes auteurs, cette méthode permet d'obtenir des copeaux de bois plus homogènes, avec moins d'impureté et à une humidité qui permet de la convertir immédiatement en énergie.



Figure 7 : Prototype CRA-ING (Pari et al., 2010).



Figure 8 : Class Jaguar 890 (Pari et al., 2010).



Figure 9 : Récolteuse d'andains de peupliers de marque Spapperi RT (Pari et al., 2010).

2.1.2.5. Récolte sous forme de balles rondes

Une autre méthode de récolte est sous forme de balles rondes. Cette méthode a pour avantage d'avoir un coût d'acquisition faible par rapport aux récolteuses automotrices à copeaux. Pour cette raison, cette méthode semble prometteuse et sera abordée plus profondément dans cette revue de littérature.

Cette méthode utilise le principe d'une presse à balle ronde pour le fourrage pour produire des balles rondes de biomasse. En fait, un prototype proposé par Savoie et al. (2008a) était fabriqué à partir d'une presse à balles rondes *New Holland*™ BR 740. Le coût d'acquisition des pièces pour le développement du premier prototype était de 52 000 \$ et pour le deuxième prototype, 10 000\$ supplémentaires ont été nécessaires. De plus, la récolte sous forme de balles rondes permet d'effectuer un séchage naturel. La méthode de récolte sous forme de balles rondes permet aussi de manutentionner facilement les balles avec de l'équipement déjà existant pour la production de balles rondes de fourrage.

Modifications apportées à la presse *New Holland*™ BR-740

Les modifications de la presse *New Holland*™ BR 740 (Figure 10) ont été les suivantes (Lavoie et al., 2008); (Savoie et al., 2006); (Savoie et al., 2008a);

- Le timon a été allongé pour permettre de récolter la biomasse de façon déportée par rapport au déplacement du tracteur;
- Une tête de récolte a été développée pour couper des arbustes en plantations. Elle était fabriquée à partir d'un châssis de faucheuse munie de quatre scies circulaires. Celle-ci produisait une coupe nette qui limitait les infiltrations d'eau dans les souches et le développement de maladies. Dans les terres naturelles, les têtes à scie ne sont pas conseillées, car les roches et le sol accidenté peuvent émousser les scies. Une tête à marteau y est préférable;
- Une deuxième tête de récolte a été développée pour couper des plantes arbustives en milieu naturel. La tête de récolte comportait un rotor de déchiquetage muni de 20 marteaux ou de 60 couteaux dépendamment des essais. La tête déchiqueteuse offrait une grande résistance aux roches et au sol.
- Un déchiqueteur à marteau modifié a été placé entre la tête de récolte et la chambre de compression afin d'assouplir les tiges récoltées et de facilement former les balles dans la chambre de compression;
- La presse était équipée d'une chambre à volume variable munie de plusieurs courroies. Ces courroies ont été remplacées par une seule large courroie;
- L'axe des roues original a été avancé de 350 mm afin d'améliorer la distribution du poids, car les têtes de récolte et le déchiqueteur avaient déséquilibré la presse vers l'avant;
- Le châssis a été renforcé pour supporter le poids des pièces ajoutées.

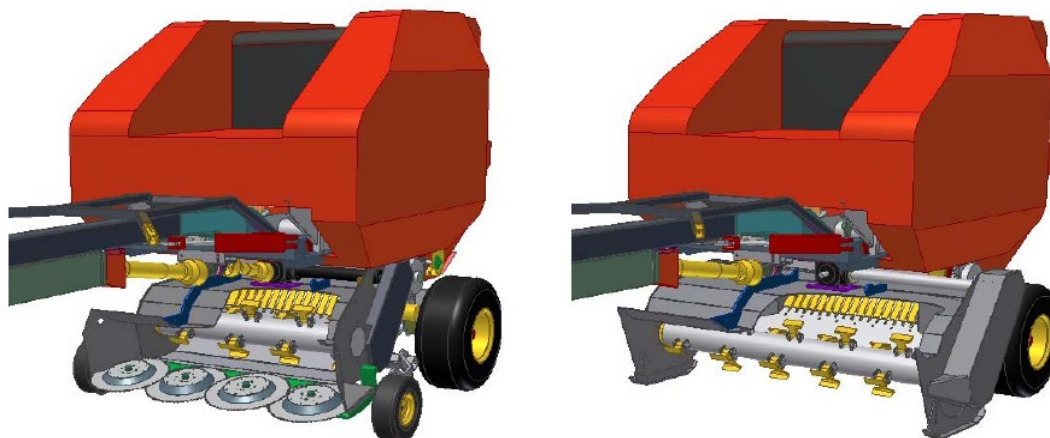


Figure 10 : Presse New Holland TM BR 740 modifiée pour récolter la biomasse avec la tête à scies et la tête à marteaux (Savoie et al., 2008b).

Performances de la presse *New Holland* TM BR 740

Les balles produites par le premier prototype avaient un diamètre variant entre 1 m et 1,5 m. La largeur des balles était de 1,2 m. La densité des balles produites était de 220 à 300 kg MH/m³. L'ajustement de la tension au maximum de la courroie dans la chambre de compression permettait d'augmenter la densité de 10% (Savoie et al., 2008a). Le Tableau 1 illustre les performances de la presse *New Holland* TM BR 740 modifiée pour récolter la biomasse sous différentes conditions : types de sites de récolte, rendement du site et tête de récolte utilisée.

Tableau 1 : Exemples de résultats d'expérimentation de récoltes d'une presse *New Holland* TM BR 740 modifiée pour récolter la biomasse (Lavoie et al., 2008; Savoie et al., 2008b)

Sites	Indian Head, Saskatchewan	Cazaville, Québec	Syracuse, New York
Date	24 octobre 2007	27-29 novembre 2006	8-9 novembre 2006
Type de sites	Saule naturel sur terre inondable	Saule (récolte une rangée à la fois)	Saule (récolte deux rangées à la fois)
Rendement (t MS/ha)	42,6	-	76,5
Tête de récolte	Tête déchiqueteuse	Tête à scie	Tête à scie
Recouvrement (%)	63,2	72,0	NA
Capacité moyenne de la machine (t MH/h)	6,61	7,52	9,72

Un modèle commercial est maintenant disponible. Les caractéristiques de ce modèle seront présentées dans la section méthodologie du mémoire.

2.1.3. Déchiquetage et broyage

Le déchiquetage et le broyage sont souvent nécessaires pour préparer la biomasse avant sa conversion en énergie ou en biomatériaux. Le déchiquetage et le broyage peuvent avoir lieu directement sur le terrain ou à l'usine. Sur le terrain, les déchiqueteurs ou les broyeurs doivent être équipés d'un conteneur à copeaux. Ils peuvent être automoteurs ou remorqués et couplés à la prise de force d'un tracteur (Ladan et al., 2006).

2.1.3.1. Déchiqueteurs à disque

L'énergie nécessaire pour déchiqueter le bois correspond à 1 à 3% de l'énergie contenue dans le bois. Selon Spinelli et Hartsough (2001), les déchiqueteurs à disque (Figure 11) ont des couteaux fixes qui produisent des copeaux uniformes, idéaux pour les papetières. Les paramètres des déchiqueteurs à disque sont les suivants (Ladan et al., 2006) :

- L'ajustement des couteaux et des contre-outils;
- La vitesse de rotation des disques varie habituellement entre 400 et 1000 révolutions/minute;
- Le nombre de couteaux;
- La vitesse d'avancement du matériel;
- L'avancement de la biomasse peut se faire à l'horizontale ou par gravité.

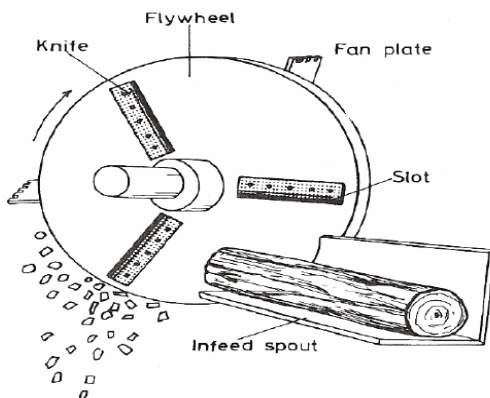


Figure 11 : Déchiqueteur à disque (Hakkila, 1989 dans Ladan et al., 2006).

2.1.3.2. Déchiqueteurs à tambour

Selon Spinelli et Hartsough (2001), les déchiqueteurs à tambour produisent des copeaux plus petits, idéaux pour la conversion en énergie. Les déchiqueteurs à tambour ont des couteaux fixés sur le sens de la longueur ou de façon hélicoïdale. Les déchiqueteurs à tambour sont plus lourds et dispendieux que les déchiqueteurs à disque. Cependant, ils sont plus faciles à alimenter en biomasse et peuvent transformer des particules de grosseur variées. La Figure 12 montre le déchiqueteur à tambour cylindrique et le déchiqueteur à tambour en V. Ce dernier est moins commun dans l'industrie, car ses coûts d'entretien sont élevés (Ladan et al., 2006).

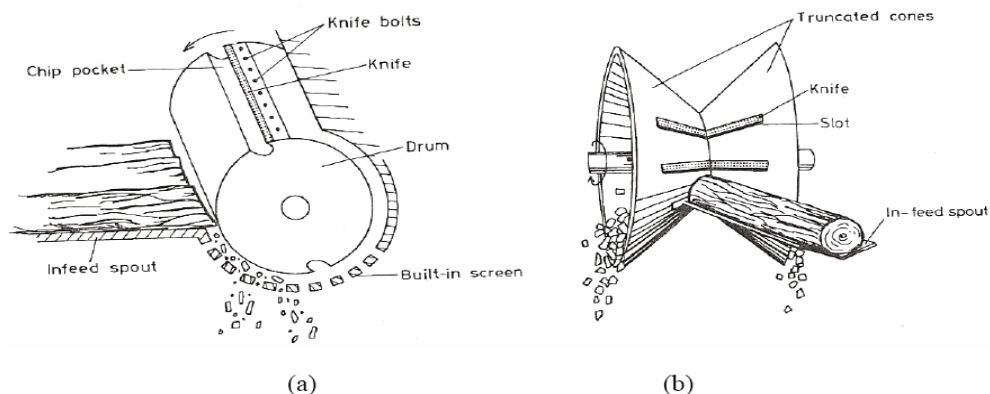


Figure 12 : (a) Déchiqueteur à tambour cylindrique (b) Déchiqueteur à tambour en V (Ladan et al., 2006).

2.1.3.3. Broyeurs

Les résidus forestiers sont souvent contaminés par des roches, de l'acier ou de la terre. Les broyeurs sont plus résistants à ces impuretés de la biomasse que les déchiqueteurs. Les broyeurs utilisent la force de compression des marteaux pour réduire la taille des particules de biomasse. Le matériel broyé n'est pas uniforme en forme et en grosseur. Cependant, l'utilisation de tamis à même le broyeur peut permettre de contrôler la grosseur du produit fini. Les marteaux des broyeurs peuvent être fixes ou pivotants (Figure 13). Les broyeurs à marteaux pivotants peuvent accepter plus d'impuretés et sont plus faciles à réparer que les broyeurs à marteaux fixes. Par contre, ces derniers peuvent transmettre plus d'énergie pour le broyage que les broyeurs à marteaux pivotants (Ladan et al., 2006).

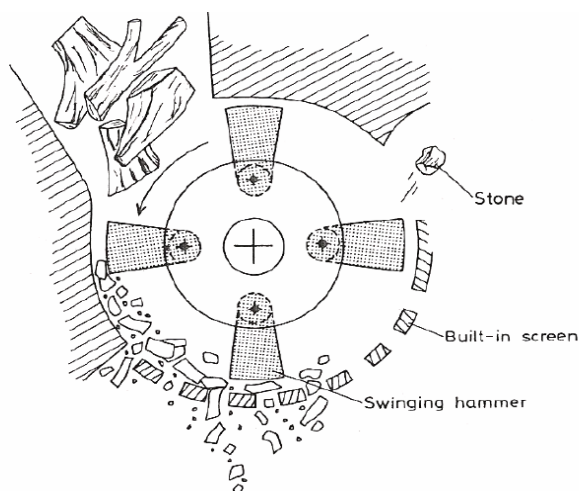


Figure 13 : Broyeur à marteaux pivotants (Hakkila, 1989 dans Ladan et al., 2006).

Les broyeurs à cuve ont des marteaux qui broient la biomasse alimentée par gravité (exemple : les broyeurs en Annexe B aux Figure 54 et 59). Le rotor des marteaux tourne au fond d'une cuve et les marteaux sont intercalés entre des disques (Ladan et al., 2006).

2.1.3.4. Fragmenteurs

Les fragmenteurs produisent des morceaux de bois entre 50 et 250 mm de longueur. Les fragments sont produits selon le sens du grain et sont de longueur relativement uniforme. La Figure 14 montre trois types de fragmenteurs (Ladan et al., 2006).

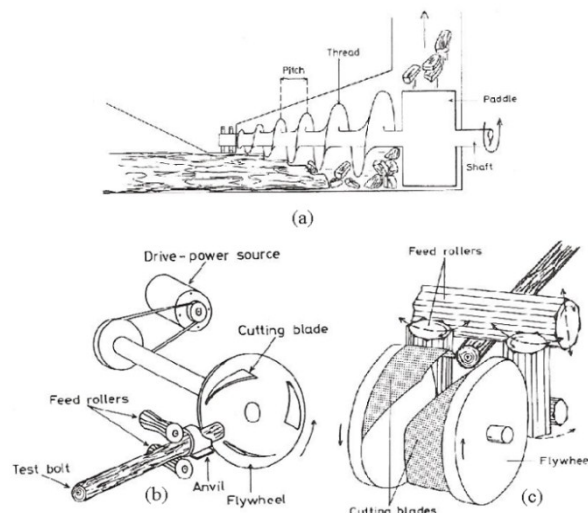


Figure 14 : Déchiqueteur à fragments : le fragmenteur à vis sans-fin (a), le fragmenteur à disque (b) et le fragmenteur à double disque (c) (Ladan et al., 2006).

2.1.3.5. Coûts de la machinerie de déchiquetage et de broyage

Le Tableau 2 expose le coût d'acquisition et le coût horaire de différents types de déchiqueteurs et de broyeurs de l'industrie selon la méthode de Turhollow (2002).

Tableau 2 : Sommaire des coûts de la machinerie de déshiquetage et de broyage
(Ladan et al., 2006)

Type de déshiqueteur	Puissance (kW)	Coût d'acquisition (\$ US)	Durée de vie (années)	Heure d'opération (heure/année)	Coût horaire (\$ US/h)
Déshiqueteur à tambour	200	625 542	8	2 000	157
Petit déshiqueteur	186	187 692	8	2 000	91
Moyen déshiqueteur	336	247 436	8	2 000	129
Gros déshiqueteur	448	313 589	8	2 000	161
Broyeur mobile (non-autonome)	522	381 500	5	1 700	229
Broyeur mobile (autonome)	522	471 500	5	1 700	252

2.1.4. Manutention et transport des balles

De 1977 à 1992, le *Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute* ont réalisé une série de rapports sur divers équipements de manutention de balles rondes de foin ou de paille. Les données de temps de chargement, de temps de déchargement et de puissance recommandée sont présentées dans le Tableau 3. On a utilisé ces données pour estimer la capacité de déplacement des balles du champ en supposant une masse moyenne de matière sèche de 218 kg par balle de saule. On a aussi supposé que l'opérateur remplissait la moitié du chargement à l'aller et l'autre moitié du chargement au retour et déposait les balles au bord du chemin d'accès au champ. Ainsi, aucun temps de transport n'est tenu en compte. La Figure 15 présente les capacités de déplacement des dix premiers équipements de manutention de balles du Tableau 3. Elle n'inclut pas la capacité du dernier équipement, le *Sperry New Holland Model 8500 Round*

Bale Wagon qui est un équipement de manutention automoteur. Les Figures 16 à 26 illustrent les 11 systèmes de manutention des balles.

Tableau 3 : Capacité de divers équipements de manutention pour déplacer les balles rondes du champ jusqu'en bordure de route (adaptée de *Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute, 1977-1992*)

Modèle	Type	Capacité (nb balle)	Temps de chargement (min)	Temps de déchargement (min)	Puissance recommandée du tracteur (kW)	Capacité de déplacement des balles (t MS/h)
New Holland Model 85 Bale Handler	Attaché à un tracteur	4	5,2	2,2	48	7,12
Laurier H-2125 Round Bale Mover	Attaché à un tracteur	6	7	4	45	7,18
McKee Bale-rustler	Attaché à un tracteur	5	6,4	2,3	30	7,57
Farmhand Model F126-B Five-Bale Mover	Attaché à un tracteur	5	4,9	3,2	46	8,13
Hesston 5200 Round-Up Multiple Bale Mover	Attaché à un tracteur	4	4	1,9	38	8,93
B & K Bale Karrier 815	Attaché à un tracteur	8	9,2	2,5	46	9,00
Laurier H-4250 Round Bale Mover	Attaché à un tracteur	12	14	2,5	75	9,58
Massey Ferguson 505 Round Bale Mover	Attaché à un tracteur	12	13	3	56	9,88
Kingsman RBM-217 Round Bale Mover	Attaché à un tracteur	12	11	5	82	9,88
Morris M-881 Hay Hiker Round Bale Mover	Attaché à un tracteur	8	7,5	2,4	49	10,64
Sperry New Holland Model 8500 Round Bale Wagon	Automo-trice	8	3,5	2	-	19,15

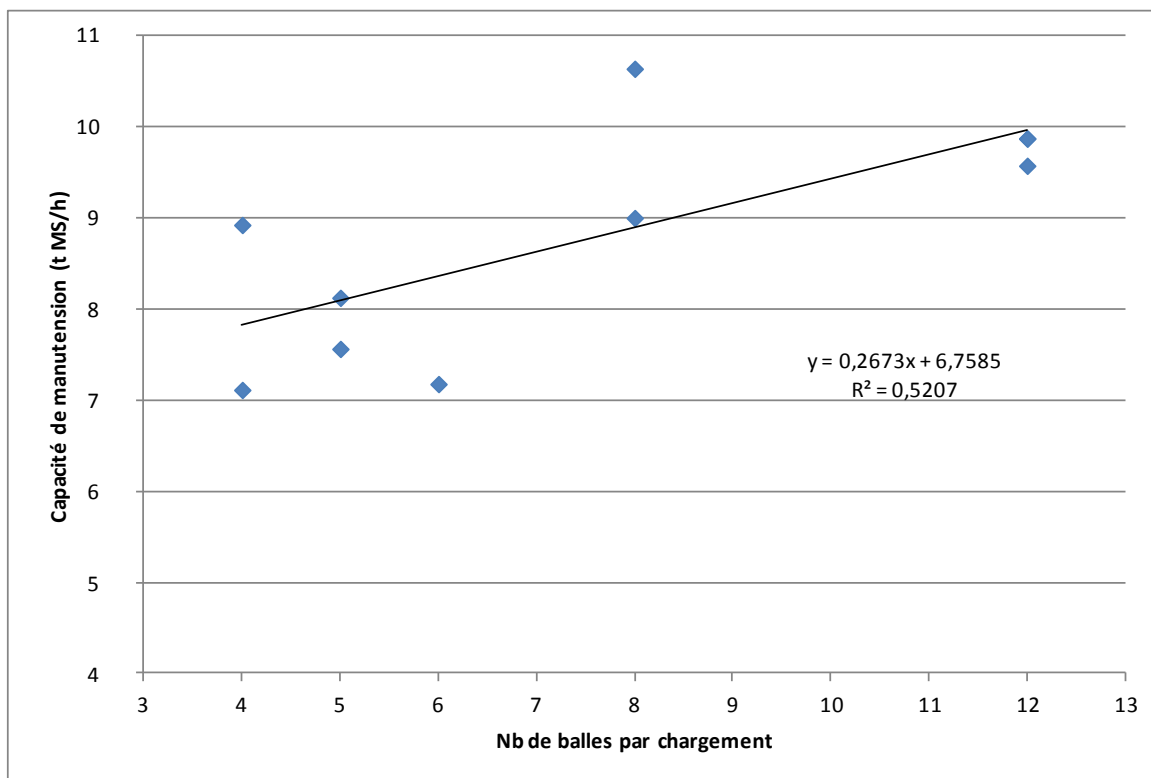


Figure 15 : Capacité de manipulateurs de balles rondes pour déplacer les balles du champ jusqu'en bordure de route (adapté de *Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute, 1977-1992*).



Figure 16 : New Holland Model 85 Bale Handler.



Figure 17 : McKee Bale-rustler.



Figure 18 : Hesston 5200 Round-Up Multiple Bale Mover.

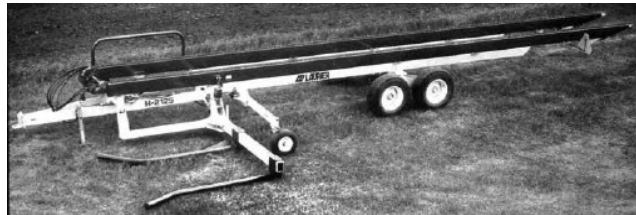


Figure 19 : Laurier H-2125 Round Bale Mover.



Figure 20 : Farmhand Model F126-B Five-Bale Mover.



Figure 21 : B & K Bale Karrier 815.



Figure 22 : Morris M-881 Hay Hiker Round Bale Mover.

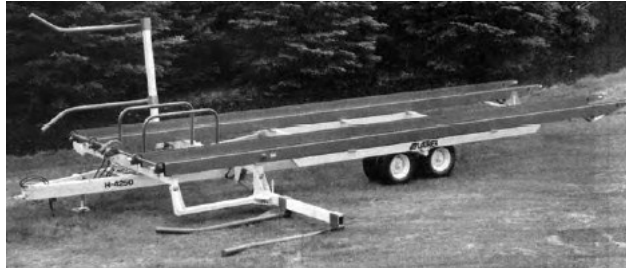


Figure 23 : Laurier H-4250 Round Bale Mover.



Figure 24 : Massey Ferguson 505 Round Bale Mover.



Figure 25 : Kingsman RBM-217 Round Bale Mover.



Figure 26 : Sperry New Holland Model 8500 Round Bale Wagon.

Cundiff et al. (2009) ont analysé le coût de manutention des balles rondes pour un système d'entreposage à emplacements satellites. Les auteurs ont supposé l'utilisation d'un tracteur de manutention *New Holland Sperry 8500* (Figure 26), un chargement de 10 balles (900 lb/balle), un temps de chargement par balle de 30 s, une vitesse au champ de 6,7 km/h et une vitesse sur route de 50 km/h. En utilisant Matlab, ces auteurs ont réalisé une simulation et obtenu les résultats qui sont présentés au Tableau 4. Le coût de transport par balle a été déduit des informations présentes dans l'analyse des auteurs.

Tableau 4 : Coûts de déplacement de balles rondes selon la distance de déplacement
(adapté de Cundiff et al., 2009)

Distance de déplacement du champ au site d'entreposage (km)	Coût de déplacement du champ au site d'entreposage (\$/t MH)	Coût de déplacement du champ au site d'entreposage (\$/balle)
0,4	3,59	1,47
0,8	3,82	1,56
1,6	4,29	1,75
3,2	5,23	2,14
6,4	7,10	2,90
12,8	10,85	4,43

D'autres types d'équipements de manutention de balles rondes sont disponibles et distribués par le *Groupe Anderson (2011)* et par *Bandit Bar (2011)*. Aucun rapport de capacité n'a été trouvé pour ces équipements. Cependant, leur concept de fonctionnement devrait permettre des réductions de coût de manutention par rapport aux équipements traditionnels. La Figure 27 montre la remorque autochargeuse du Groupe Anderson avec une capacité de 20 balles rondes. La Figure 28 montre une autochargeuse *Bandit Bar* avec une capacité de 17 balles et un temps de chargement de 10 minutes selon le manufacturier. Il est à noter que ces équipements devront être modifiés pour manutentionner des balles rondes de saules à l'intérieur de plantations.



Figure 27 : Remorque autochargeuse de balles rondes TRB2000 (Groupe Anderson, 2011).



Figure 28 : Camion autochargeur de balles rondes (Bandit Bar, 2011).

2.1.5. Contrôle de la qualité de la biomasse et calculs de coûts

De grandes quantités de différentes sources de biomasse sont disponibles, mais à des qualités et à des coûts variables. Selon *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing* (HBCC) (2008), le coût payé doit tenir compte de la qualité de la biomasse et de sa teneur en énergie.

Le HBCC (2008) propose une méthode simplifiée pour contrôler la qualité de la biomasse. D'abord, une inspection visuelle devrait être effectuée au point de livraison afin de constater la composition de la biomasse et les contaminations grossières telles que la terre, les roches et le sable ou des particules d'une grosseur excessive. Toute biomasse qui échoue l'inspection

visuelle requerra un tri supplémentaire ou devra être rejeté. Si la biomasse est jugée adéquate, la prochaine étape consiste à évaluer sa teneur en énergie. Pour ce faire, il suffit de peser la charge à l'aide d'une balance à camion et de mesurer le taux d'humidité de quelques échantillons en utilisant un humidimètre donnant des résultats rapides (en quelques minutes). Ces paramètres serviront au calcul de la valeur calorifique nette de la biomasse, discuté à la section 2.1.7.

2.1.6. Séchage et entreposage de la biomasse

L'entreposage de la biomasse décentralisé sur plusieurs sites diminue les risques de grandes pertes lors de la destruction par le feu (Mukenda et al., 2006). Les règles suivantes devraient être suivies pour l'entreposage de biomasse selon HBCC (2008; pp 85-86) :

- « Lorsque des copeaux fraîchement coupés ou des écorces sont entreposés, la température au centre de la pile monte jusqu'à 60°C lors des premiers jours. La température n'augmente pas lorsque la longueur des particules est plus grande que 20 cm;
- L'auto-inflammation principalement dans les piles d'écorces peut être évitée lorsque les écorces sont entreposées dans des piles de moins de huit mètres de hauteur durant une période inférieure à cinq mois;
- La biomasse ne devrait jamais être compactée pour ne pas favoriser la création de zones humides qui pourraient par la suite créer des zones de chaleur intense;
- Le contenu des piles de biomasse devrait être homogène, spécialement lorsque les taux d'humidité sont différents. En effet, une partie d'une pile plus humide pourrait commencer à dégager une chaleur très intense et, par la suite, le reste de la pile plus sèche pourrait s'enflammer instantanément;
- Des mesures préventives telles que la prise de température dans différentes zones des piles de biomasse et la détection de CO et de CO₂ dans l'entrepôt pourraient prédire l'inflammation imminente de la biomasse;
- Lorsque des copeaux fraîchement récoltés ou des écorces sont entreposés en pile, les pertes de matière sèche peuvent être de 5% par mois. Les pertes de matière sèche sont plus

importantes au début de la période d'entreposage et dépendent principalement des facteurs suivants :

- Le taux d'humidité de la biomasse. Une biomasse plus humide occasionne plus de pertes de matière sèche;
- Le type et l'âge de la biomasse. Une biomasse plus jeune telle que les cultivars à croissance rapide occasionnent plus de pertes de matière sèche que les biomasses forestières;
- La grosseur des particules. Plus petites sont les particules, plus grandes sont les surfaces et plus grandes sont les pertes de matière sèche;
- La ventilation des piles de biomasse peut réduire les pertes de matière sèche. Par contre, les coûts d'énergie reliés sont importants. Pour réduire les pertes de matière sèche, l'entreposage de biomasse non déchiquetée ou l'entreposage scellé est recommandé;
- La convection naturelle peut réduire le taux d'humidité de la biomasse. Pour cette raison, il est important de permettre l'entrée d'air dans les lieux d'entreposage intérieurs afin de permettre la circulation d'air à travers les piles. De plus, la circulation d'air dans les piles est importante afin d'éviter leur auto-inflammation et ce, particulièrement pour les écorces et le brin de scie;
- L'entreposage de biomasse à l'extérieur sans couverture est déconseillé lorsque le taux d'humidité de la biomasse est plus bas que 20-30%, car la biomasse risque de se réhumidifier. L'entreposage intérieur ou une mesure de protection contre la pluie est conseillé;
- L'entreposage extérieur de fines particules ou de brins de scie n'est pas possible en zone habitée. L'entreposage de fines particules ou de brins de scie dans ces zones devrait toujours être fait à l'intérieur ou dans des silos;
- Les piles non couvertes de biomasse causent le relâchement d'eaux usées à cause des averses. L'entreposage extérieur de biomasse devrait toujours être couvert, spécialement lorsqu'il s'agit d'écorces. L'eau des piles non couvertes qui ruisselle est généralement acide avec un pH de 2,5 à 5,0;
- Les surfaces d'entreposage de biomasse devraient toujours être couvertes de pavé afin d'éviter la contamination de la biomasse par des impuretés. »

La Figure 29 montre l'effet de l'entreposage à aire ouverte sur les pertes de matière sèche (Vejde, Danemark). Le montage des expériences s'est étalé de décembre 1995 à janvier 1996. Les résultats ont été obtenus en mai et septembre de l'année 1996. La grosseur des particules variait en fonction des machines et des réglages. L'expérience comparait le séchage de tiges complètes (*whole shoots*), de bâtonnets de 20 cm (*Silvatec 20*), de copeaux de 5 cm (*Austoft 5*) et de copeaux de 2,8 cm (*Class*). Les pertes sont plus importantes pour les essais avec de petites particules (Kofman et Spinelli, 1997).

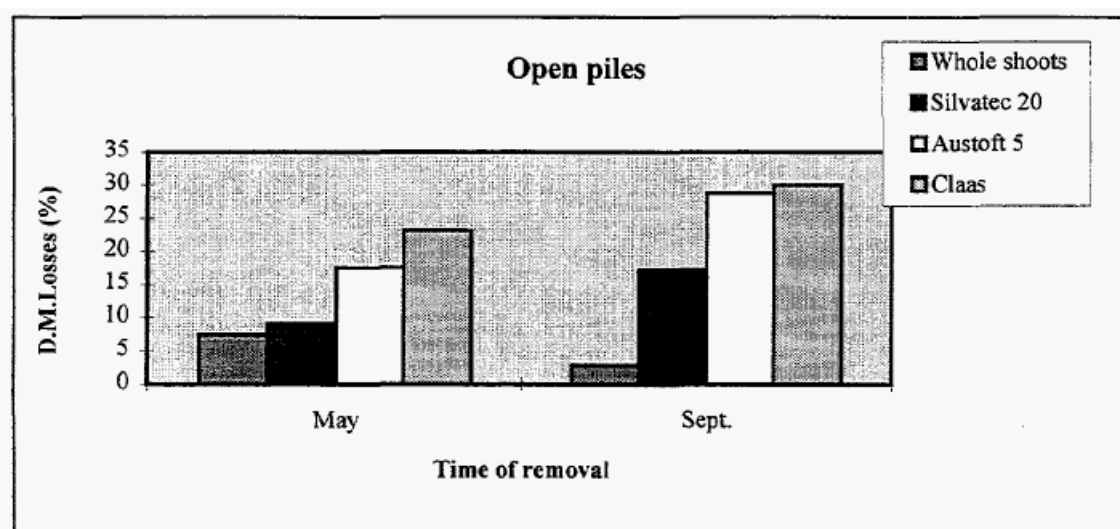


Figure 29 : Pertes de matière sèche lors de l'entreposage à aire ouverte entre la récolte (en décembre et janvier) et la reprise en mai ou septembre en fonction de la grosseur des particules : tiges entières, bâtonnets de 20 cm (Silvatec), copeaux de 5 cm (Austoft) et copeaux de 2,8 cm (Class), selon Kofman et Spinelli (1997).

Selon une revue de littérature de Gingras (1995), recouvrir les piles de biomasse avec du papier cartonné renforcé préviendrait l'absorption d'eau. D'ailleurs, Jiris (1995) a recouvert des andains de copeaux de résidus forestiers en Suède immédiatement après l'abattage par un papier absorbant. Il a noté un taux d'humidité de 10% inférieur par rapport aux andains non couverts. Dans une autre expérience en Suède, Lehtikangas et Jirjis (1993) ont observé que le taux d'humidité de 43% au départ s'abaissait à 30% pour des andains de paquets de résidus forestiers non couverts et 26% pour des andains couverts.

En plus d'augmenter la valeur calorifique nette, le séchage des copeaux en facilite la combustion. En effet, des copeaux secs et homogènes génèrent moins d'émissions et brûlent plus efficacement dans les chaudières plus petites que des copeaux humides exigeant des équipements plus coûteux pour la même puissance nette (HBCC, 2008).

Une étude de Gigler et al. (2000) a montré qu'il en coûterait de 12 à 25 €/t MS en énergie pour sécher des copeaux de saules de 50% d'humidité (b.h.) à 15% d'humidité (b.h.), dans des entrepôts de séchage de pommes de terre, en utilisant des ventilateurs et de l'air ambiant. Le temps de séchage a varié entre 21 et 100 jours et il augmentait avec la hauteur des copeaux. Cette méthode de séchage permettrait d'amortir plus facilement les coûts d'acquisition de telles infrastructures, car elles pourraient dorénavant servir à conditionner la biomasse d'avril à août et les pommes de terre de septembre à mars. En assignant les coûts d'acquisition pour le séchage des copeaux de saule, le coût total serait de 28 à 59 €/t MS. Le coût de manutention n'est pas tenu en compte dans l'analyse de coût. Selon Gigler et al. (2000), les coûts totaux de séchage sont quand même élevés, environ trois fois plus importants, que les coûts de récolte qui étaient de 12 à 14 €/t MS. La Figure 30 illustre le coût de séchage des copeaux de saule dans un entrepôt de séchage de pommes de terre en fonction des mois de l'année. Le séchage est moins cher entre avril et août (mois 4 à 8) à cause de l'air ambiant plus chaud et plus asséchant.

Selon Caslin et al. (2010), il en coûte 8 à 12 livres sterling par tonne pour sécher artificiellement (avec de l'air préchauffé) une biomasse de 50% humidité sous la barre des 20%.

Caslin et al. (2010) et le magazine *Tresearch* (2008) suggèrent de sécher la biomasse à l'aide d'un système de conduit perforé et d'un ventilateur. Une période de séchage de 3 mois est nécessaire pour amener une biomasse préalablement au-dessus de 50% d'humidité à une humidité sous les 20% d'humidité. Durant l'expérience, les copeaux de bois étaient ventilés 12 heures par jour. Le coût final était principalement dû à la consommation d'électricité qui représentait moins de 5 €/t MH (Caslin et al., 2010).

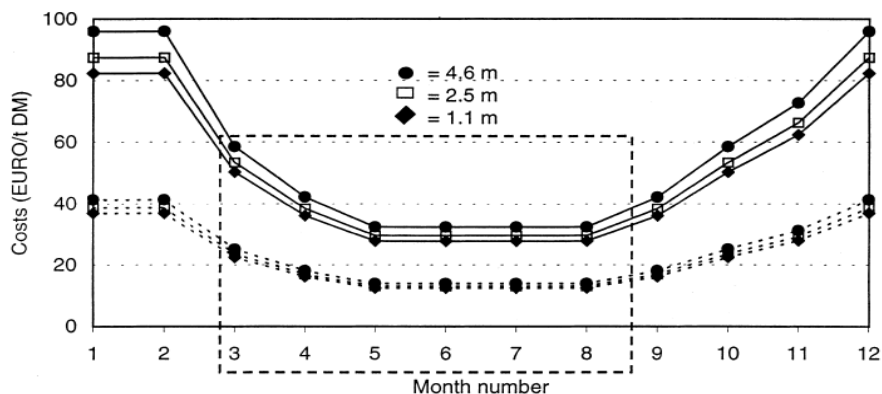


Figure 30 : Coût de séchage de copeaux de saule dans un entrepôt de séchage de pommes de terre en fonction du mois de séchage (1=janvier; 12=décembre) pour trois épaisseurs en tenant compte des charges fixes (ligne pleine) ou sans en tenir compte (ligne pointillée) (Gigler et al., 2000).

Une autre méthode de séchage utilise des bâtiments ressemblant à des serres (Thermo-System, 2010). Cette technologie utilise des films de polyéthylène à coussins d'air ainsi qu'une structure en aluminium afin de profiter de l'énergie solaire comme source de chaleur.

Une étude de Pari et al. (2010) démontre, entre autres, l'évolution du séchage en Italie de tiges de peuplier laissées au champ durant une période allant jusqu'à 120 jours. Les tiges ont été coupées en février (Figure 31).

Selon les travaux de Savoie et al. (2009), le séchage naturel de balles rondes de saule de novembre 2006 à mai 2007 a permis de faire passer le taux d'humidité des balles de 50 à 34% pour un entreposage à l'extérieur et de 50 à 21% pour un entreposage à l'intérieur. Les balles entreposées à l'intérieur avaient un diamètre moyen de 1,46 mètre et celles à l'extérieur un diamètre moyen de 1,19 mètre. En octobre 2008, 74 balles de saule, qui avaient été entreposées à l'extérieur depuis plus d'un an, avaient un taux d'humidité moyen de 31,2%.

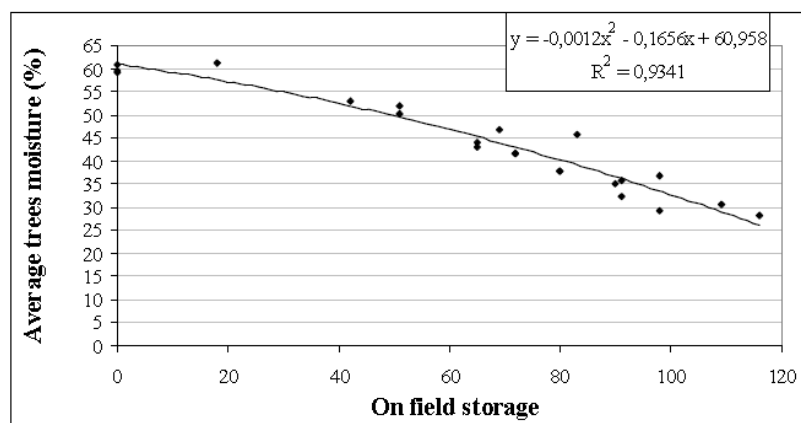


Figure 31 : Courbe de déshydratation de tiges de peuplier laissées au champ en fonction du temps (jours) (Pari et al., 2010).

2.1.7. Valeur calorifique de la biomasse

L'analyse économique tient compte de la valeur calorifique nette de la biomasse pour établir sa valeur. La valeur calorifique nette dépend de la nature du matériel, mais aussi de sa teneur en eau (HBCC, 2008). La teneur en eau se définit de deux façons :

Équation 1 : % Humidité sur une base sèche (b.s.)

$$\% \text{ Humidité sur une base sèche} = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse de matière sèche}} \times 100$$

Équation 2 : % Humidité sur une base humide (b.h.)

$$\% \text{ Humidité sur une base humide} = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse de matière humide}} \times 100$$

La Figure 32 montre l'évolution de la valeur calorifique nette en fonction du taux d'humidité sur une base humide.

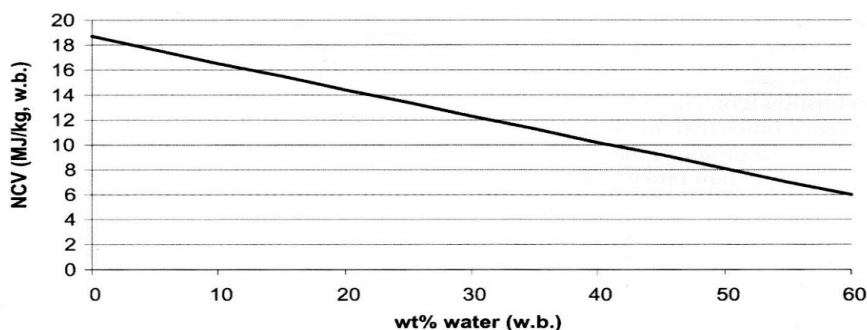


Figure 32 : Valeur calorifique nette en fonction du taux d'humidité pour une biomasse constituée de 50% de carbone, 6% d'hydrogène et 44% d'oxygène (HBCC, 2008).

Le pourcentage d'humidité dépend du temps de récolte, du type de matériel, de la méthode de prétraitement, des conditions climatiques et de la méthode d'entreposage (HBCC, 2008). L'Équation 3 représente la valeur calorifique nette en fonction du pouvoir calorifique, du taux d'humidité sur une base humide et du taux d'hydrogène dans la biomasse.

Équation 3 : Formule de calcul de la valeur calorifique nette

$$NVC = GVC \left(1 - \frac{w}{100} \right) - 2,444 \frac{w}{100} - 2,444 \frac{h}{100} 8,936 \left(1 - \frac{w}{100} \right) \quad [Mj / kg, w.b.]$$

Où :

2,444 = La différence d'enthalpie entre l'eau à l'état gazeux et l'état liquide à 25°C;

8,936 = La ratio entre la masse molaire de l'eau et de l'hydrogène (M_{H_2O} / M_{H_2});

NCV : Valeur calorifique nette de la biomasse en MJ/kg sur une base humide (*net calorific value*);

GCV : Pouvoir calorifique supérieur de la biomasse en MJ/kg sur une base sèche (*gross calorific value*);

w : Pourcentage d'humidité (%) sur une base humide de la biomasse b.h. (w.b.)

h : Pourcentage d'hydrogène (%) de la biomasse sur une base sèche.

En supposant un taux d'hydrogène de 6,2% et un pouvoir calorifique supérieur de 20,3 Mj/kg (CEN/TS 14961), l'équation simplifiée est :

Équation 4 : Formule de calcul de la valeur calorifique nette simplifiée pour le saule

$$20,3 \left(1 - \frac{w}{100} \right) - 2,444 \frac{w}{100} - 1,354 \left(1 - \frac{w}{100} \right) \quad [Mj / kg, w.b.]$$

$$18,95 - 0,214w$$

2.1.8. Transport de la biomasse sur route

Plusieurs moyens de transport peuvent être utilisés. Les tracteurs et les remorques sont généralement utilisés pour de courtes distances. Les camions sont utilisés de préférence pour les moyennes à longues distances. Les trains peuvent servir pour de grandes quantités de biomasse sur de longues distances continentales. Les bateaux sont utilisés pour des quantités importantes exportées vers d'autres continents (HBCC, 2008).

Selon Spinelli et Hartsough (2001), la façon de transporter les copeaux de bois en Italie dépend de la distance à parcourir. Pour les distances de 3-4 km, l'utilisation des tracteurs conventionnels, équipés d'une remorque, est de mise pour les déplacements hors route. Ces tracteurs transportent des chargements de 5-10 tonnes. Pour les distances de 10-30 km, les tracteurs conventionnels sont trop lents. Des tracteurs de type JCB FastracTM 155 avec une remorque de 8 tonnes à deux essieux ou un JCB FastracTM 175 avec une remorque de 10 tonnes à trois essieux permettent d'avoir de la rapidité sur la route et une bonne agilité hors route. Un aller-retour incluant le déchargement prend entre 45-80 minutes. Pour les distances de plus de 50 km, la façon de faire la plus courante est l'utilisation de camions équipés de remorques forestières standards. Ces remorques transportent entre 24-28 tonnes de copeaux.

Johansson et al. (2006) ont comparé le transport par camion de biomasse en ballots de bois de 0,6 m de diamètre par 3,2 m de longueur (« bundles ») avec des copeaux en fonction de la teneur en eau (Figure 33). La charge utile des copeaux en termes de matière sèche était toujours inférieure à celle des paquets. Dans les deux cas, le facteur limitatif était le volume jusqu'à un degré d'humidité de 40,9% pour les copeaux et de 44,7% pour les ballots. Au-delà de ces seuils d'humidité, le facteur poids devenait le facteur limitant.

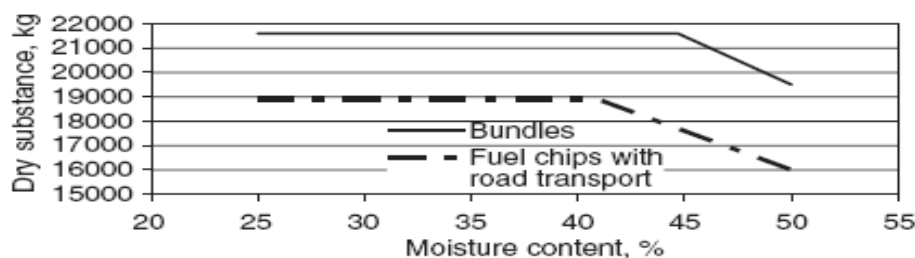


Figure 33 : Charge utile maximum (kg) de matière sèche en fonction du taux d'humidité pour des résidus forestiers en ballots (« bundles ») ou en copeaux (« chips ») (Johansson et al., 2006).

Hillman et Michaelsen (2008) ont réalisé une étude de productivité au Québec avec une remorque multiusage de *Legras Industries*, un équipementier français (Figure 34). Cette remorque permet de charger de la marchandise autant par la porte arrière que par les côtés ou par le dessus. Cette particularité permet d'accommoder une variété de marchandises comme des résidus forestiers et des panneaux de contre-plaqué. Elle permet d'effectuer des cycles de transport en étant presque toujours en charge. En comparaison, les semi-remorques classiques sont remplies en pleine charge seulement un peu plus de la moitié du temps. Lorsqu'un transport est effectué, une intensité énergétique faible est recherchée (litre de carburant/t/100 km). L'étude de Hillman et Michaelsen (2008) a démontré que la remorque multiusage avait une intensité énergétique plus faible que les semi-remorques conventionnelles ou les remorques dédiées aux résidus forestiers avec plancher abaissé.



Figure 34 : Remorque multiusage de Legras Industries (Hillman et Michaelsen, 2008).

Une façon d'adapter les camions semi-remorque conventionnels au transport de copeaux est d'ajouter un grillage tel qu'illustré à la Figure 35. Le chargement peut se réaliser à l'aide d'un souffleur ou d'un convoyeur.



Figure 35 : Semi-remorque conventionnelle avec grillage de rétention pour copeaux.

Cardinael et al. (2011) ont réalisé une expérience de chargement de semi-remorque de 14,6 m de longueur (48 pieds fermée) avec des balles rondes de saule. Un total de 42 balles de saule a été chargé en 120 minutes avec un tracteur *John Deere 7430*. Si l'hypothèse

suivante est formulée, soit une masse sèche de 218 kg par balle, il s'agit d'un chargement d'environ 9,16 t MS et d'une capacité de chargement de 4,58 t MS/h.

Le Tableau 5 montre une comparaison des coûts de transport de biomasse dans un cadre de référence autrichien (HBCC, 2008).

Tableau 5 : Coût de transport de copeaux de bois dans un cadre de référence autrichien (HBCC, 2008)

Combustible	Taux d'humidité	Densité en vrac	Moyen de transport	Capacité de transport	Teneur en énergie	Coûts totaux	Coûts spécifiques
	b.h. %	kg /m ³ (b.h.)		(m ³)	(GJ)	(€/GJ) (VCN)	(€/km t) (b.s.)
Copeaux de déchet industriel (humide)	50	340	Camion	65	180	0,4	0,13
Copeaux de déchet industriel (humide)	30	240	Camion	95	281	0,26	0,09
Copeaux de bois forestiers	30	250	Camion porte-conteneur	35	108	0,28	0,48
Copeaux de bois forestiers	30	250	Tracteur et remorque	12	36	1,33	2,33

2.2. Analyse de coûts

Les différents coûts de production du saule ont été estimés par Caslin et al. (2010) pour l'Irlande et par Abrahamson et al. (2002) pour l'État de New York. Les coûts sont présentés au Tableau 6.

Tableau 6 : Données relatives au coût de production du saule en plantation

Description	Unités	Années applicables	<i>Short rotation coppice willow best practice guidelines</i> Caslin et al., 2010	Université de l'état de New York, étude de cas SUNY-ESF, 2010
Durée de vie de la plantation	an		20	22
Nombre d'années par cycle de récolte	an		2	4
Nombre de récoltes	-		9	5
Patron de plantation	rangée/bloc	-	2	2
Patron de plantation	distance entre les rangées (m)	-	0,75	0,75
Patron de plantation	distance entre les blocs (m)	-	1,50	1,50
Concentration des boutures	boutures/ha	-	14 800	13 200
Mise en terre des boutures	\$/ha	1	3 150,00	1 884,00
Rendement estimé pour la première récolte	t MS/ha/an	4	7,0	8,8
Rendement estimé pour les récoltes ultérieures à la première récolte (Caslin et al., 2010)	t MS/ha/an	6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	10,0	-
Rendement estimé pour les récoltes ultérieures à la première récolte (SUNY-ESF, 2010)	t MS/ha/an	5, 9, 13, 17, 21	-	11,0
Administration	\$/ha	Toutes les années	-	12,00
Coût de la terre et assurances	\$/ha	Toutes les années	-	85,00
Enlèvement de la végétation	\$/ha	0	-	50,00
Préemergent herbicide (1 ^{ère} appl.)	\$/ha	0	84,00	70,00
Charrue	\$/ha	0	105,00	60,00
Disque	\$/ha	0	-	50,00
Herse	\$/ha	0	112,00	-
Planter culture de couverture	\$/ha	0	-	120,00
Préemergent herbicide (2 ^e appl.)	\$/ha	1	144,20	-
Préemergent herbicide (3 ^e appl.)	\$/ha	1	84,00	110,00
Tuer culture de couverture	\$/ha	1	-	70,00
Nivellement avec rouleaux	\$/ha	1	14,00	-

Description	Unités	Années applicables	<i>Short rotation coppice willow best practice guidelines</i> Caslin et al., 2010	Université de l'état de New York, étude de cas SUNY-ESF, 2010
Désherbage mécanique ou chimique	\$/ha	1	-	35,00
Recepage	\$/ha	2	42,00	50,00
Fertilisation	\$/ha	2, 5, 9, 13, 17	-	175,00
Récolte avec récolteuse automotrice aux 4 ans	\$/ha ou \$/t MS	5, 9, 13, 17, 21	-	620,00 ou 14,00
Récolte sous forme de copeaux	\$/t MS	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	35,00	-
Récolte sous forme de tiges	\$/t MS	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	40,60	-
Séchage de copeaux de 55% d'humidité à sous la barre des 20%	\$/t MS	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	42,00	-
Déchiquetage de tiges	\$/t MS	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	14,00	-
Contrôle de mauvaises herbes, insecticide et contrôle des coccinelles	\$/ha	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	224,00	-
Transport de copeaux (41,5 km)	\$/ha ou \$/t MS	5, 9, 13, 17, 21	-	225,00 ou 5,10
Défrichage des souches de saules	\$/ha	Dernière année	-	740,00

Plusieurs auteurs ont présenté des analyses globales des coûts de production de biomasse arbustive pour la bioénergie. Selon Ericsson et al. (2009), il faut être prudent quand on compare certaines études à d'autres en raison d'une multitude de facteurs qui diffèrent comme les hypothèses, les délimitations et les méthodes utilisées. Selon eux, la biomasse non traitée, tels les copeaux de bois, a un coût d'environ 4 à 5 €/GJ en Europe. À titre d'exemple, le charbon à 60 \$/tonne (Ressources Naturelles Canada, 2010) à 27,6 GJ/tonne vaut 2,17 \$/GJ (Francescato et al., 2008). Le mazout léger à 0,98 \$ par litre (Régie de l'énergie, 2011) contient une énergie thermique de 38,69 MJ/litre (Forest Products Laboratory, 2004), ce qui revient à 25,33 \$/GJ.

Le prix des copeaux de bois varie d'un pays à l'autre en fonction des saisons et selon qu'il s'agit du marché résidentiel ou du marché industriel (Figure 36 et Figure 37)

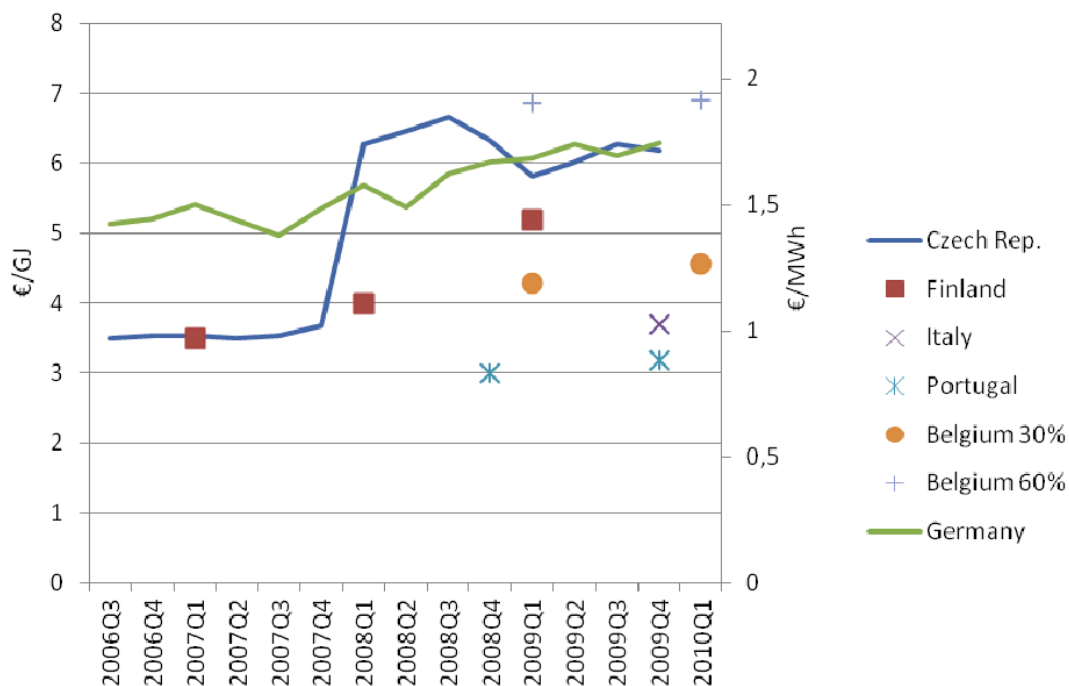


Figure 36 : Prix des copeaux de bois sur le marché résidentiel² (EuBioNet3, 2010).

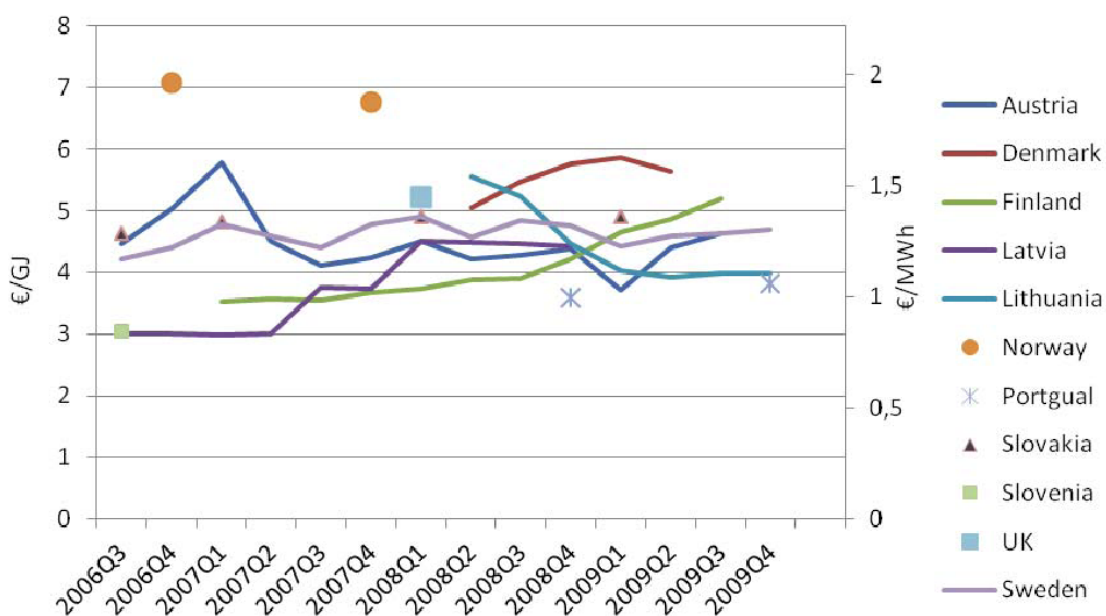


Figure 37 : Prix des copeaux de bois sur le marché industriel (EuBioNet3, 2010).

² 1€/GJ = 1,41 \$ Can/GJ \approx 0,005 \$/ kWh (Banque du Canada, 2011)

Le Tableau 7 présente des valeurs typiques de l'énergie au Royaume-Unis selon le Biomass Energy Centre (2011). Ces prix sont présentés à titre indicatif. Ils ne comprennent pas la taxe sur la valeur ajoutée (TVA).

Tableau 7 : Valeurs typiques de l'énergie au Royaume-Uni en août 2011 (Biomass Energy Centre, 2011), converties au taux de 1,62 \$ Cdn = 1,00 £

Source d'énergie	Prix au R-U (£)	Facteur de conversion	Prix unitaire (£/kWh)	Prix unitaire (\$ Cdn / kWh)
Copeaux de bois (30% d'humidité)	100 / tonne	3 500 kWh/tonne	0,029	0,047
Granule de bois	190 / tonne	4 800 kWh/tonne	0,040	0,065
Gaz naturel	0,048 / kWh	1	0,048	0,078
Mazout	0,58 / litre	10 kWh/litre	0,058	0,094
Gaz de pétrole liquifié	0,49 / litre	6,6 kWh/litre	0,074	0,120
Électricité	0,15/ kWh	1	0,150	0,243

La Figure 38 illustre la répartition des coûts de production du saule (Ericsson et al., 2009). Les coûts du premier cas tiennent compte des coûts de production établis en 2005. Le deuxième cas tient compte d'une réduction de coût liée au développement de ces cultures. Le troisième cas tient compte du développement et d'une augmentation de 40% des rendements dans le futur.

Gascol et al. (2009) ont étudié le coût de production de deux systèmes de récolte du peuplier : sous forme de tiges et sous forme de copeaux. Sous forme de tiges, la biomasse, après une période de séchage naturel au champ, a une humidité de 20%. Sous forme de copeaux, la biomasse est livrée à une humidité de 50%. Le coût final de la biomasse récoltée sous forme de tiges transformées subséquemment en copeaux varie entre 19,79 et 21,09 €/t MS. Ce coût final comprend la récolte, le déchiquetage et le transport. Le coût final pour la récolte sous forme de copeaux directement au champ varie entre 18,65 et 23,96 €/t MS. Ce coût final comprend la récolte sous forme de copeaux et le transport. Les auteurs n'indiquent pas le coût de séchage des copeaux de 50 à 20% de teneur en eau. Donc, la comparaison ne peut pas être faite directement avec les tiges séchées naturellement.

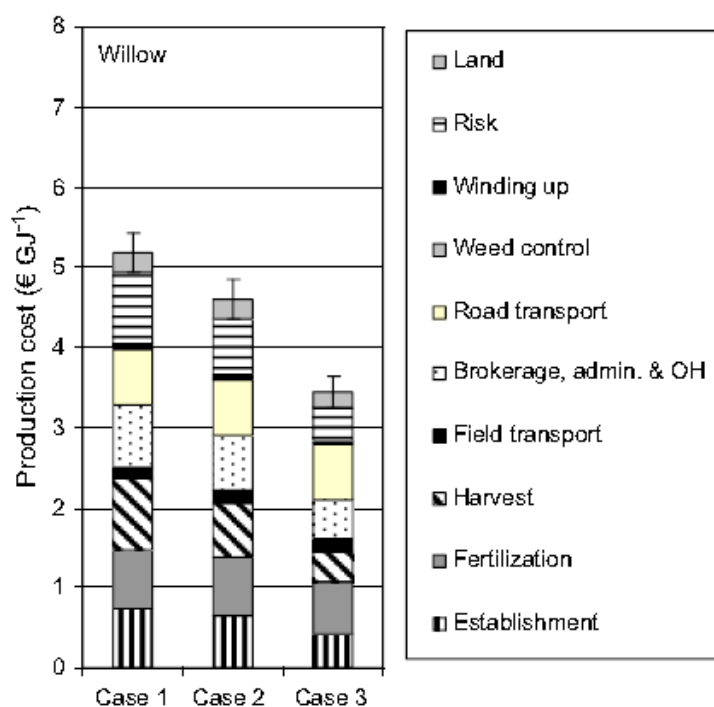


Figure 38 : Répartition des coûts de culture et de récolte pour le saule (Ericsson et al., 2009).

Gigler et al. (1999) ont analysé le coût d’approvisionnement de la biomasse sous trois différentes formes de récolte : des copeaux, des bâtonnets (« billets ») et des tiges. L’analyse suppose une récolte de la biomasse à une humidité de 50% b.h. et une livraison à 20% b.h. à l’usine. L’analyse tient compte du délai entre la récolte et la conversion en énergie et du type de technologie. La Figure 39 illustre le coût sur une base énergétique de l’approvisionnement de biomasse à partir du saule en fonction du délai entre la récolte et la conversion en énergie. La Figure 39 démontre que pour quatre types d’usines de conversion, la récolte sous forme de copeaux est la plus avantageuse pour les premiers mois après la récolte. Par la suite, la récolte sous forme de bâtonnets est généralement plus avantageuse. Il n’y a que dans le cas de la grosse unité de gasification qu’après 12 mois, la récolte sous forme de tige est plus avantageuse. La Figure 39 montre aussi que la grosse unité de gasification est moins dispendieuse à opérer.

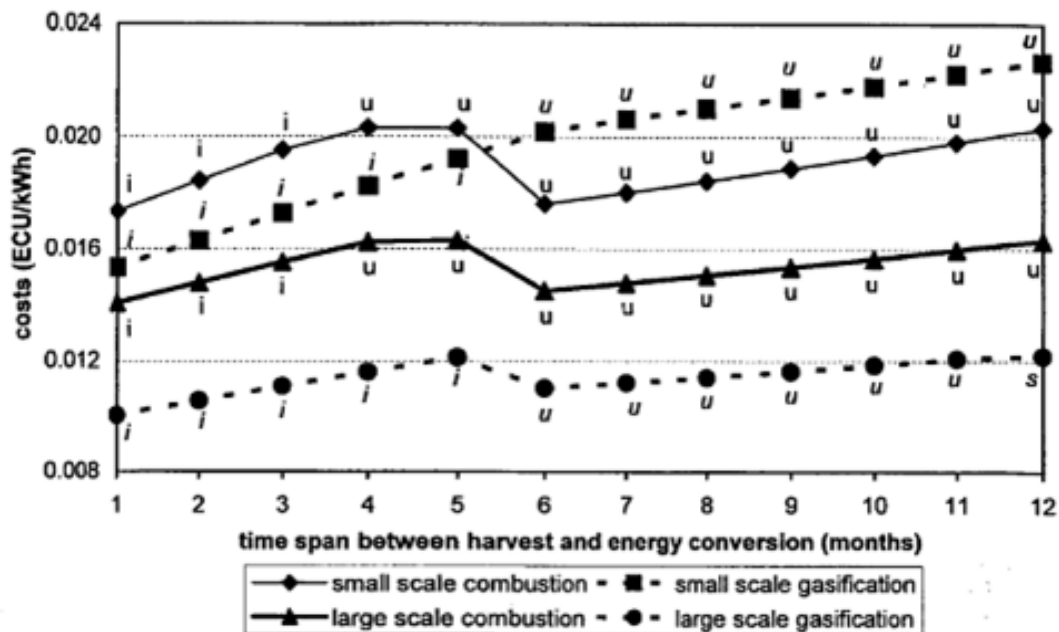


Figure 39 : Coût d’approvisionnement sur une base énergétique en fonction du temps écoulé entre la récolte et la conversion d’énergie (ECU/kWh) (European Currency Unit = ECU \approx 1€ en 1999) i= copeaux, u= bâtonnets, s = tiges (Gigler et al., 1999).

2.3. Méthodes d’analyse de coûts

Il existe plusieurs façons de calculer le coût d’utilisation de la machinerie agricole ou forestière. La norme D497.6 de l’ASABE (2009) permet de calculer les coûts d’intérêts, de propriété, de réparation, d’entretien, de consommation de carburant et de lubrifiant pour la machinerie agricole.

L’Université d’Auburn (Alabama, États-Unis) a élaboré une méthode d’estimation des coûts surtout utilisée dans le milieu forestier (Brinker et al., 2002, basé sur Miyata, 1980). Cette méthode tient compte des coûts de carburant, de lubrification, d’entretien, de réparation, de salaire de l’opérateur, d’intérêts, de taxes, d’assurance et d’amortissement. Cette dernière méthode est utilisée dans ce mémoire et de plus amples détails sont présentés lors de l’analyse des coûts.

Le *United States Department of Agriculture* (USDA) (2005) a produit un autre type d'outil de calcul pour l'industrie forestière. Cet outil sous forme de classeur Excel calcule le coût d'acheminement de la biomasse forestière en tenant compte de l'équipement nécessaire à la manutention au premier transport, au déchiquetage et au deuxième transport. Aussi, cet outil tient compte des types de routes empruntées et du matériel transporté.

3. Hypothèses et objectifs du mémoire

La première hypothèse est que la capacité, la consommation de carburant et les pertes au champ d'un biobaler dépendent des conditions de récolte, notamment le rendement au champ. La deuxième hypothèse est que le coût d'opération du biobaler sera variable en fonction de la capacité. La troisième hypothèse est qu'il existe une chaîne de récolte optimale en tenant compte de divers critères de décision.

L'objectif principal du mémoire est de caractériser le fonctionnement du Biobaler[®] dans des conditions de récolte variées. En effet, cette nouvelle technologie destinée à la récolte des plantes arbustives est peu connue et on dispose de peu d'information technique pour évaluer la performance. Les objectifs spécifiques incluent des mesures au champ pour évaluer la capacité de récolte, la consommation de carburant et les pertes au champ dans des plantations à courte rotation de saule et de peuplier. Un autre objectif spécifique est l'estimation détaillée du coût d'opération d'un biobaler en fonction de la capacité au champ. Un troisième objectif spécifique consiste à déterminer la chaîne optimale de récolte avec un biobaler en considérant le transport des balles au champ et leur broyage en copeaux.

4. Méthodologie

Ce chapitre présente la machine de récolte utilisée lors de la cueillette de données, les méthodes utilisées pour la cueillette des données aux champs de même que la méthode utilisée pour l'analyse de la chaîne de récolte.

4.1. Machine de récolte

La récolte des plantes arbustives a été réalisée à l'aide du Biobaler[®], modèle WB-55 du Groupe Anderson (2011). Le fonctionnement de la machine est illustré à la Figure 40. Le broyeur forestier à l'avant coupe, déchiquette partiellement et envoie les plantes dans la chambre de compression par l'intermédiaire d'un rouleau d'entraînement. Les plantes partiellement déchiquetées devenues souples s'enroulent le long du pourtour de la chambre de compression afin de créer une balle ronde. Lorsque la chambre est pleine, la balle est attachée avec de la ficelle. Ensuite, la porte d'évacuation à l'arrière s'ouvre et laisse tomber la balle au sol. La biomasse récoltée sous forme de balles rondes peut être transportée à l'abord du champ ou sur un site d'entreposage. Suite à l'entreposage, cette biomasse est transportée et manutentionnée selon son utilisation finale.

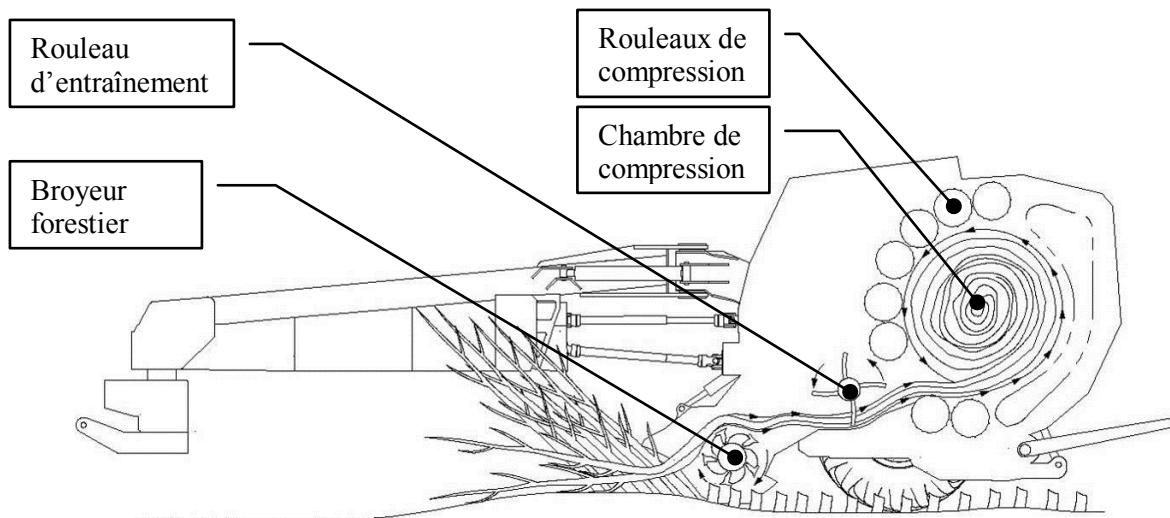


Figure 40 : Schéma de fonctionnement du Biobaler[®] WB-55.

Au Canada, le coût d'acquisition du Biobaler[®] WB-55 est d'environ 150 000 \$. Le Biobaler[®] WB-55 est équipé d'un broyeur à marteaux fixes qui coupent des arbustes jusqu'à 10 cm de diamètre au tronc. Les marteaux peuvent couper les troncs jusqu'à 15 cm de diamètre mais la capacité de la machine est grandement réduite.

Les autres caractéristiques du Biobaler[®] sont les suivantes :

- Masse de 6 820 kg;
- Deux pneus forestiers;
- Un timon pivotant de 6 ou 12 pieds;
- Une caméra d'observation à l'arrière de la machine;
- Une tête de broyage à marteaux fixes et interchangeable de 88,5 po (225 cm) de longueur;
- Un système d'attache à ficelle;
- Une chambre fixe de 4' X 4' (122 cm x 122 cm).

Le Biobaler[®] WB-55 nécessite un tracteur de 200 à 250 hp (PTO 1000 RPM) et quatre sorties hydrauliques à double action. Le tracteur doit idéalement être muni d'un ensemble de gardes qui protègent l'opérateur du tracteur et les éléments mécaniques vulnérables tels que le réservoir d'essence, le radiateur et les conduites hydrauliques contre les perforations et le fracas des branches durant l'opération.

4.2. Collecte de données au champ

Cette section aborde la démarche scientifique pour la cueillette de données lors de l'estimation du rendement pré-récolte et lors du pressage de la biomasse. Elle décrit les instruments de mesure utilisés ainsi que les méthodes de calculs.

L'estimation du rendement pré-récolte a été effectuée en réalisant le recensement de trois surfaces d'échantillonnage au hasard. Ces surfaces comportaient une rangée d'une longueur de 1 à 2 mètres. À l'intérieur des surfaces d'échantillonnage, le diamètre de toutes les tiges était observé à hauteur de poitrine (DBH ou « Diameter at breast height » selon les forestiers, soit à 1,35 m au-dessus du sol). Les tiges de diamètre de moins de 10 mm étaient simplement comptées; les tiges de diamètre de plus 10 mm étaient mesurées avec un pied-à-coulisse ($\pm 0,1$ mm). Le rendement pré-récolte était ainsi estimé en extrapolant le nombre de tiges par hectare, en deux classes (< 10 mm et ≥ 10 mm). On a utilisé des équations proposées par Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) pour estimer la masse par hectare avant la récolte en fonction du diamètre des tiges (Annexe C).

La masse des balles a été mesurée après la récolte à l'aide d'une de deux balances de type plate-forme : *Cardinal™ Model205 weight indicator* à $\pm 0,5$ kg (0 à 2250 kg) ou E1010 W1160DS4848 avec un indicateur *Avery Weigh-Tronic* à $\pm 0,1$ kg (0 à 2000 lbs) . Cette mesure sert à déterminer le rendement récolté au champ et la capacité de la machine.

Le taux de matière humide des balles à la récolte a été déterminé à l'aide d'échantillons d'environ 1000 à 1500 g de matière humide. Ces échantillons ont été mis dans des sacs de papier et ont été pesés le même jour ou le jour subséquent à l'aide d'une balance *Denver™ Instrument APX-1502* à $\pm 0,5$ g (0 à 1500 g) ou une balance *OHAUS Adventurer Pro* $\pm 0,1$ g (0 à 8 100 g). De retour au laboratoire, les échantillons dans leurs sacs ont été mis dans une étuve *Thermo Scientific™ OV128060* (4100 W) à 103°C durant 72 heures. Les échantillons dans leurs sacs ont été pesés à nouveau à la sortie de l'étuve. De plus, afin d'avoir une mesure du taux d'humidité la plus exacte possible, dix sacs vides ont été pesés

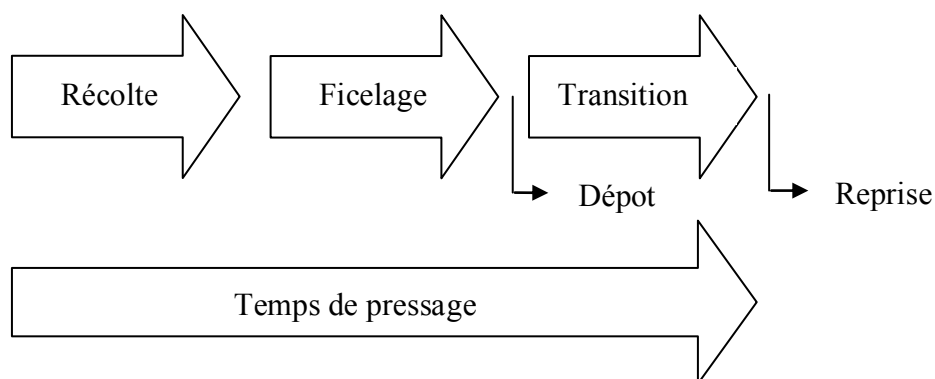
avant et après le passage dans l'étuve. Ainsi, la masse d'eau initiale dans les sacs a pu être soustraite des calculs de l'évaporation d'eau de la biomasse. En général, on collectait un échantillon à toutes les quatre balles et un minimum de trois échantillons par traitement (espèce végétale, champ différent, changement de mode d'opération, etc.).

Les pertes au champ ont été déterminées en extrapolant la biomasse non récoltée sur de petites surfaces d'échantillonnage choisies au hasard après la récolte. Les pertes ont été classées en deux catégories : les tiges complètes laissées au champ et les pertes au sol (petits morceaux). En premier lieu, la surface d'échantillonnages des tiges a été établie entre deux rangs de plantation sur 45 m de longueur. Toutes les tiges étaient collectées pour y mesurer le diamètre à la base (point de coupe à 10 cm au-dessus du sol) avec un vernier $\pm 0,1$ mm. Une masse moyenne de 36,5 g était attribuée aux tiges inférieures à 14 mm de diamètre. Cette masse moyenne provient d'une récolte de données lors d'une expérience au Domaine de la Templierie où la masse moyenne de 234 tiges avec un diamètre inférieur à 10 mm a été mesurée. Les masses des tiges complètes laissées au champ avec un diamètre supérieur à 14 mm ont été déterminées à l'aide d'une formule empirique basée sur le diamètre de base des tiges (Gagnon-Bouchard et Savoie, 2009; Annexe C).

Pour déterminer la seconde catégorie de perte, toutes les petites particules ont été ramassées sur une surface entre deux rangs de plantation et 1 m de longueur. Ensuite, les sacs contenant les pertes ont été mis dans une étuve *Thermo Scientific*[®] OV128060 (4100 W) à 103°C durant 72 heures afin de connaître la masse de matière sèche à l'aide d'une balance *Denver*[®] *Instrument APX-1502* à $\pm 0,5$ g (0 à 1500 g) ou une balance *OHAUS Adventurer Pro* $\pm 0,1$ g (0 à 8100 g). Afin d'obtenir une plus grande précision, la masse connue des sacs secs a été soustraite de la masse des sacs d'échantillonnage des pertes. En général, on répétait trois fois la mesure des pertes (tiges et courtes particules) par traitement ou journée de récolte en plantation.

Les temps de récolte, ficelage, transition et pressage des balles ont permis de calculer la productivité de la machine. Les actions de la machine ont été chronométrées à ± 1 s. Le

temps de récolte correspond au temps que prend la machine pour récolter la matière nécessaire au pressage d'une balle. Le temps de ficelage correspond au temps entre le début du ficelage et le dépôt de la balle au sol. Le temps de transition des balles correspond au temps entre le dépôt d'une balle et le début de la récolte d'une autre balle. Le temps de pressage d'une balle correspond à la somme des moyennes des temps de récolte, de ficelage et de transition des balles. Les temps chronométrés ne tiennent pas compte des temps d'arrêt de la machine. En effet, lorsqu'il y avait un arrêt, plusieurs personnes faisaient des observations ou travaillaient à remettre la machine en marche. Plusieurs arrêts ont servi aux concepteurs et mécaniciens à analyser le comportement de la machine sur divers sites. Lorsque la machine entrait dans un nouveau type de site, les arrêts étaient plus longs afin de bien analyser le comportement de la machine. Les temps d'arrêts n'étaient donc pas représentatifs d'une opération normale. La durée de chaque essai était généralement courte (une dizaine de balles ou environ une demi-heure à la fois). D'autres essais de plus longue durée seront nécessaires à l'avenir pour estimer la fréquence d'entretien et des arrêts sur une base régulière.



La distance récoltée par balle a été mesurée afin de calculer le rendement récolté par unité de surface et la capacité de la machine. Cette distance a été mesurée à l'aide d'une roulette de mesurage à ± 1 pied le long du parcours de chaque balle. La surface correspondant à une balle était la distance multipliée par la largeur récoltée (environ 2,25 m).

La consommation de carburant a été mesurée à la fin de chaque période de travail de la machine. Pour ce faire, le réservoir de carburant du tracteur a été préalablement rempli avant d'entreprendre la période de travail. Après une période d'essai, le réservoir a été rempli à nouveau avec du carburant pesé dans des contenants de 20 litres. La masse des contenants a été mesurée à l'aide d'une balance *OHAUS™ ChampII* à $\pm 0,010$ kg (0 à 100 kg) ou d'une balance de type plate-forme E1010 WI160DS4848 avec indicateur *Avery Weigh-Tronic* ($\pm 0,1$ kg). La masse volumique du diesel est de 0,8269 kg/l selon la fiche technique du *Nebraska Tractor Test Laboratory* (2010) pour le Fendt™ 818 (Annexe E). Le tracteur utilisé durant les essais était un tracteur Fendt™ 818 de 185 hp. Cependant, les réglages du tracteur ont été changés de façon à obtenir une puissance de 200 hp. Il est à noter que la consommation de diesel pour les récoltes du 29 juin 2010 à la ferme Agro Énergie a été mesurée directement en volume à la pompe d'une station-service.

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel Excel. Des équations de régression linéaire ont été produites pour 8 variables dépendantes en fonction de 8 variables indépendantes décrites en Annexe F à l'aide de la méthode d'analyse de régression par élimination graduelle (Step-wise deletion). Le seuil du niveau de confiance pour retenir des variables indépendantes significatives était de 95%. À chaque étape, la variables la moins significative a été éliminée ($p < 0,05$). Des courbes de régression ont été établies à l'aide des fonctions graphiques du logiciel, notamment pour la consommation du carburant, la capacité de récolte et les pertes au champ en fonction du rendement récolté. Une régression de la masse moyenne des balles a été établie en fonction de la capacité de récolte. L'unité expérimentale d'un essai de récolte correspondait à une mesure de carburant effectuée en moyenne un fois par 29 balles récoltées (en moyenne 12,6 t MH). Compte tenu du nombre limité d'unités expérimentales (19 au total), les régressions étaient un bon moyen de représenter l'ensemble des données et d'en estimer un coefficient de détermination (R^2) en fonction de la principale variable indépendante mesurée, c'est-à-dire le rendement récolté. D'autres variables indépendantes pouvaient influencer les résultats, comme l'opérateur, l'état de la récolteuse, les conditions au champ, le diamètre des tiges, les cultivars et la présence de mauvaises herbes mais la plupart de ces variables n'étaient pas mesurées ou étaient trop hétérogènes pour expliquer les variations.

4.3. Sites de récolte en plantation

La récolte au champ a eu lieu entre août 2009 et novembre 2010 sur divers sites au Québec et en Ontario. L'espèce arbustive cultivée et le mode de plantation sur chacun des sites sont décrits ci-après.

Agro Énergie est une ferme spécialisée dans la culture du saule. Cette ferme est située à St-Roch de l'Achigan (Québec, Canada). Des récoltes ont eu lieu à quatre reprises à St-Roch de l'Achigan. La première récolte avec le Biobaler® a eu lieu du 31 août au 1er septembre 2009, dans un champ planté en 2006, recépé en 2006, récolté en 2007 pour des boutures et en 2009, après deux années de croissance. La deuxième récolte a eu lieu le 12 avril 2010, dans un champ planté en 2007, recépé en 2007 et récolté, après également deux années de croissance. La troisième récolte a eu lieu le 29 juin 2010, dans le même champ que celui de la deuxième récolte, mais avec un peu plus que deux années de croissance. La quatrième récolte a été effectuée les 24 et 25 novembre 2010, dans une plantation expérimentale avec quatre niveaux d'irrigation et deux traitements de fertilisation (fertilisé ou non fertilisé). Le patron de plantation de la ferme Agro Énergie était simple, chacune des rangées étaient séparée d'une distance de 1,8 m.

Guelph est une plantation située en Ontario. Les récoltes sur ce site ont eu lieu les 2 et 3 décembre 2009. Le patron de plantation regroupait trois rangées à 0,6 m de distance entre elles. Chaque groupe était séparé par une distance de 2 m (trois rangées à tous les 3,2 m).

Kemptville est une plantation située en Ontario. Les récoltes sur ce site ont eu lieu le 30 novembre 2009. Il y avait deux patrons de plantation sur ce site. Le premier patron à Kemptville était le même qu'à Guelph : trois rangées regroupées à 0,6 m entre elles, avec une distance de 2 m entre les groupes. Le deuxième patron à Kemptville regroupait six rangées, séparées de 0,75 m de distance entre elles. Chaque groupe de six rangées était séparé par une distance de 1,5 m (six rangées à tous les 5,25 m).

Pickering est une plantation située en Ontario. Les récoltes sur ce site ont eu lieu le 1 décembre 2009. Il y avait seulement un patron de plantation sur ce site. Le patron regroupait deux rangées séparées à 0,75 m de distance entre elles. Chaque groupe était séparé par une distance de 1,5 m (deux rangées à tous les 2,25 m).

Willow Shade Farm est une ferme située à Godmanchester au Québec sur laquelle est plantée une plantation expérimentale de saules et de peupliers. Cette plantation a été récoltée les 25 et 26 août 2009 avec le Biobaler®. Le patron utilisé à Willow Shade Farm regroupait six rangées, séparées de façon équidistante à 1,5 m entre elles. Les groupes étaient séparés entre eux par une distance de 3 m (six rangées à tous les 10,5m).

4.4. Méthode d'aide à la décision

La méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) permet de déterminer la meilleure option d'acheminement de la biomasse selon les décideurs. Elle prend en considération plusieurs critères selon un poids décisionnel déterminé par les décideurs. Cette méthode permet de résoudre des problèmes avec des facteurs qualitatifs et quantitatifs. Elle considère aussi les incohérences des décideurs (Gharbi et Carrier, 2010). Les critères de décision retenus dans l'analyse sont le coût de la récolte, l'investissement nécessaire, le risque technologique, la polyvalence des équipements utilisés, la convivialité des méthodes de récolte et leur capacité. Ainsi, la méthode idéale aura un faible coût de récolte, un faible coût d'investissement et peu de risques technologiques. Elle utilisera des équipements qui peuvent servir à d'autres travaux à la ferme. Elle sera agréable à utiliser et offrira une grande capacité de récolte annuelle. Pour réaliser la méthode AHP, le logiciel *Expert Choice* est utilisé (Expert Choice, 2010). Il permet de réaliser des études AHP complexes et des études de sensibilité à partir des résultats obtenus.

5. Résultats

Ce chapitre présente dans un premier temps des résultats de pressage de biomasse en plantation effectué en 2009 et en 2010. En deuxième lieu, les résultats de l'analyse économique sont présentés.

5.1. Données de pressage en plantations

En 2009 et 2010, plusieurs essais de pressage de biomasse arbustive ont été effectués dans des plantations et en milieux naturels. Ce chapitre présente des résultats de pressage effectué en plantation. Le Tableau 8 indique les dates et les sites où ont eu lieu ces récoltes en plantations. Les autres résultats de pressage de biomasse en milieux naturels sont disponibles en Annexe G. Ils ne font pas l'objet d'analyse dans ce mémoire qui porte sur les plantations. Des graphiques en annexe G présentent néanmoins quelques corrélations plus générales incluant toutes les données.

5.1.1. Observations pré-récolte

Le Tableau 8 indique que le Biobaler® a récolté en 2009 et 2010 onze fois dans des plantations de saules et deux fois dans des plantations de peupliers. Les plantations de saules contiennent plus de tiges en moyenne (130 000/ha) que les plantations de peuplier (56 000/ha), mais leurs tiges sont généralement plus petites (18 mm vs 31 mm de diamètre à hauteur de poitrine pour les tiges ≥ 10 mm). Les plantations de saule comportaient en moyenne 72 200 grosses tiges/ha (diamètre de moins de 10 mm) et 51 900 petites tiges/ha (diamètre de plus de 10 mm) pour un total de 130 100 tiges/ha. Les plantations de peuplier avaient 38 100 petites tiges par hectare et 18 300 grosses tiges par hectare (total de 56400/ha). On a constaté que le modèle de Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) en annexe C donnait des prédictions trop peu précises pour estimer adéquatement le rendement pré-

récolte. À l'avenir, il serait utile d'établir des corrélations plus précises entre les diamètres au point de coupe et à hauteur de poitrine. De plus, on suggère de mesurer toutes les tiges y compris celles plus petites que 10 mm. Il faut aussi développer des modèles de prédiction adaptés aux espèces (saule, peuplier) et possiblement aux divers hybrides qui présentent des différences physiologiques entre le diamètre, la hauteur et la masse. Des estimations de rendement pré-récolte plus précises permettraient d'établir le meilleur moment de récolte pour diminuer les coûts au minimum.

5.1.2. Caractéristiques des balles récoltées

Le Tableau 9 montre les caractéristiques des balles des 19 essais complétés pour un total de 546 balles. La masse moyenne des balles récoltées était 427 kg à une teneur en eau moyenne de 48,6% (b.h.). La masse sèche par balle était de 218 kg MS en moyenne et variait entre 174 et 269 kg MS. La densité moyenne était de 138 kg MS/m³ et variait entre 117 et 174 kg MS/m³. La teneur en eau variait entre 40,8% et 56,0%. Les valeurs extrêmes de la masse des balles, entre 339 et 551 kg sur une balle humide représentent une variation de 20 à 30 % par rapport à la moyenne (427 kg). Cet aspect est à considérer lorsque vient le temps de planifier la logistique du transport des balles.

5.1.3. Temps de récolte, capacité et consommation de carburant

Le Tableau 10 présente les performances du Biobaler® lors des 19 essais. Le rendement récolté lors des essais variait entre 9,68 et 31,84 t MS/ha, avec une moyenne de 19,41 t MS/ha. La capacité moyenne de la récolteuse était de 35 balles/h ou 7,69 t MS/h. La capacité maximum a été de 48 balles/h (10,53 t MS/h), et le minimum de 23 balles/h (4,06 tMS/h). Les temps moyens de récolte, d'attachement et de transition étaient respectivement de 59, 35 et 13 s. Ainsi, le temps de pressage moyen était de 1 min 47 s.

Tableau 8 : Caractéristiques des plantations récoltées en 2009 et 2010 avec le Biobaler®

Site	Date	Localisation centrale (GPS)	Culture	Nb d'année de croissance	Diamètre des tiges ≥10mm à 1,3m du sol		Nb de tiges par hectare avec un diamètre :		Nb de tiges par hectare
					Moy.	Max.	< 10 mm à 1,3m du sol	≥10 mm à 1,3m du sol	
Willow Shade Farm	2009-08-25	45° 8'34.39"N 74° 8'52.32"O	Saule	3	21,0	55,0	51000	52000	103000
Agro Énergie	2009-09-01	45°50'45.09"N 73°38'23.37"O	Saule	2	16,0	28,0	84000	51000	135000
Kemptville	2009-11-30	-	Saule	-	15,0	21,2	77600	43200	120800
Kemptville	2009-11-30	-	Peuplier	-	28,4	35,4	73700	17300	91000
Pickering	2009-12-01	-	Saule	-	19,1	33,8	26600	45800	72400
Pickering	2009-12-01	-	Peuplier	-	33,9	43,8	2500	19300	21800
Guelph	2009-12-02	-	Saule	-	13,3	16,1	192400	44100	236500
Agro Énergie	2010-04-12	-	Saule	2	18,6	36,1	59000	98000	157000
Agro Énergie	2010-06-29	-	Saule	2	16,0	23,7	64000	79000	143000
Agro Énergie	2010-11-24	45°51'16.87"N 73°34'35.20"O	Saule	2	21,0	39,4	57100	55400	112500
Agro Énergie	2010-11-24	45°51'16.87"N 73°34'35.20"O	Saule	2	21,4	42,1	53800	54200	108000
Agro Énergie	2010-11-25	45°51'16.87"N 73°34'35.20"O	Saule	2	21,1	55,5	59900	58600	118500
Agro Énergie	2010-11-25	45°51'16.87"N 73°34'35.20"O	Saule	2	16,3	28,5	69000	56100	125100
Moyenne	-	-	Saule	-	18,1	34,5	72218	57945	130164
Moyenne	-	-	Peuplier	-	31,2	39,6	38100	18300	56400
Écart-type	-	-	-	-	5,7	12,0	43400	21200	49100
Min plantation	2009-08-25	-	-	-	13,3	16,1	2500	17300	21800
Max plantation	2010-11-25	-	-	-	33,9	55,5	192400	98000	236500

Tableau 9 : Caractéristiques des balles récoltées en plantation en 2009 et 2010 (S=saule, P= peuplier)

Site	Date	Feuilles présentes (Oui/Non)	Nb de balles produites	Masse moyenne des balles (kg MH)	Densité (kg MH/m ³)	Teneur en eau (%)	Masse moyenne des balles (kg MS)	Densité (kg MS/m ³)
Québec, Willow Shade Farm #1 (S)	2009-08-25	Oui	23	439	272	42,6	252	156
Québec, Willow Shade Farm #2 (S)	2009-08-26	Oui	13	488	297	53,4	227	139
Québec, Agro Énergie #1 (S)	2009-09-01	Oui	16	426	252	48,5	220	130
Québec, Agro Énergie #2 (S)	2009-09-01	Oui	18	385	239	48,3	199	124
Québec, Agro Énergie #3 (S)	2009-09-01	Oui	18	451	293	51,7	218	142
Ontario, Kemptville #1 (S)	2009-11-30	Non	23	463	280	50,8	228	138
Ontario, Kemptville #2 (S)	2009-11-30	Non	32	437	280	50,6	216	138
Ontario, Kemptville #3 (P)	2009-11-30	Non	35	512	314	56,0	225	138
Ontario, Pickering #1 (S, P)	2009-12-01	Non	43	470	-	50,6	232	-
Ontario, Pickering #2 (S, P)	2009-12-01	Non	52	454	-	50,6	224	-
Ontario, Guelph (S)	2009-12-02	Non	38	380	233	46,7	203	124
Québec, Agro Énergie #4 (S)	2010-04-12	Non	17	372	242	40,8	220	143
Québec, Agro Énergie #5 (S)	2010-04-12	Non	16	397	241	40,8	235	143
Québec, Agro Énergie #6 (S)	2010-04-12	Non	28	401	245	40,8	237	145
Québec, Agro Énergie #7 (S)	2010-06-29	Oui	20	551	355	51,1	269	174
Québec, Agro Énergie #8 (S)	2010-11-24	Non	45	398	269	50,0	199	135
Québec, Agro Énergie #9 (S)	2010-11-24	Non	46	385	264	51,4	187	128
Québec, Agro Énergie #10 (S)	2010-11-25	Non	36	371	259	50,5	183	128
Québec, Agro Énergie #11 (S)	2010-11-25	Non	27	339	228	48,7	174	117
Moyenne Plantation	2009-2010		29	427	269	48,6	218	138
Moyenne avec feuilles	2009-2010	Oui	18	457	285	49,3	231	144
Moyenne sans feuilles	2009-2010	Non	34	414	260	48,3	213	134
Écart-type	2009-2011		12	53	32	4,3	23	13
Min plantation	2009-2011		13	339	228	40,8	174	117
Max plantation	2009-2012		52	551	355	56,0	269	174

Tableau 10 : Rendements récoltés lors des essais, capacité et consommation de diesel avec le Biobaler[®] en plantation en 2009 et 2010
(S=saule, P= peuplier)

Site	Date	Feuilles présentes (Oui/Non)	Rendement récolté (tMS/ha)	Temps de pressage	Temps de récolte	Temps d'attachement	Balle/h	Capacité (tMS/h)	Consommation de carburant diesel (l/t MS)
				hh : mm : ss balle	hh : mm : ss balle	hh : mm : ss balle			
Qc, Willow Shade Farm #1 (S)	2009-08-25	Oui	31,8	00:01:47	00:00:54	00:00:36	33,75	8,51	2,74
Qc, Willow Shade Farm #2 (S)	2009-08-26	Oui	19,5	00:02:33	00:01:43	00:00:30	23,48	5,34	4,36
Qc, Agro Énergie #1 (S)	2009-09-01	Oui	16,3	00:01:30	00:00:46	00:00:30	39,94	8,77	4,17
Qc, Agro Énergie #2 (S)	2009-09-01	Oui	24,1	00:01:23	00:00:43	00:00:31	43,14	8,58	3,23
Qc, Agro Énergie #3 (S)	2009-09-01	Oui	28,7	00:01:15	00:00:36	00:00:29	48,32	10,53	2,67
Ont, Kemptville #1 (S)	2009-11-30	Non	9,7	00:01:52	-	-	32,15	6,78	2,93
Ont, Kemptville #2 (S)	2009-11-30	Non	13,0	00:01:58	-	-	30,60	6,64	3,53
Ont, Kemptville #3 (P)	2009-11-30	Non	16,6	00:01:36	-	-	37,50	8,42	2,64
Ont, Pickering #1 (S, P)	2009-12-01	Non	14,7	00:01:31	-	-	39,51	9,24	2,12
Ont, Pickering #2 (S, P)	2009-12-01	Non	16,3	00:01:28	-	-	41,11	9,33	5,26
Ont, Guelph (S)	2009-12-02	Non	10,2	00:02:10	-	-	27,78	5,62	4,84
Qc, Agro Énergie #4 (S)	2010-04-12	Non	22,8	00:01:48	00:01:12	-	33,37	7,35	6,96
Qc, Agro Énergie #5 (S)	2010-04-12	Non	26,1	00:01:24	00:00:45	-	42,99	10,10	3,28
Qc, Agro Énergie #6 (S)	2010-04-12	Non	21,5	00:01:36	00:00:53	-	37,33	8,86	2,76
Qc, Agro Énergie #7 (S)	2010-06-29	Oui	17,1	00:01:44	00:01:03	00:00:29	34,76	9,36	3,00
Qc, Agro Énergie #8 (S)	2010-11-24	Non	23,8	00:01:36	00:00:52	00:00:29	37,52	7,46	3,03
Qc, Agro Énergie #9 (S)	2010-11-24	Non	23,0	00:01:47	00:00:56	00:00:35	33,68	6,31	4,49
Qc, Agro Énergie #10 (S)	2010-11-25	Non	19,3	00:02:18	00:01:08	00:00:47	26,02	4,77	5,49
Qc, Agro Énergie #11 (S)	2010-11-25	Non	15,4	00:02:34	00:01:18	00:00:57	23,36	4,06	6,81
Moyenne Plantation	2009-2010		19,5	00:01:47	00:00:59	00:00:35	35,07	7,69	3,91
Moyenne avec feuilles	2009-2010	Oui	22,9	00:01:42	00:00:58	00:00:31	37,23	8,51	3,36
Moyenne sans feuilles	2009-2010	Non	17,9	00:01:49	00:01:01	00:00:42	34,07	7,30	4,16
Écart-type	2009-2011		5,8	00:00:22	00:00:17	00:00:09	6,66	1,80	1,38
Min plantation	2009-2011		9,7	00:01:15	00:00:36	00:00:29	23,36	4,06	2,12
Max plantation	2009-2012		31,8	00:02:34	00:01:43	00:00:57	48,32	10,53	6,96

Les essais se sont bien déroulés à l'exception des deux derniers qui ont eu lieu à la ferme Agro Énergie le 25 novembre 2010. Ce jour-là, un nouvel opérateur était à ses débuts de conduite et de maintenance de la machine. La conduite du Biobaler® demande une certaine habileté qui s'acquiert bien, mais qui doit être développée. De plus, la maintenance de cette machine s'apparente beaucoup plus à celle d'une machine forestière qu'agricole. De surcroît, l'intensité et l'environnement de travail sont plus durs que pour la moyenne des machines agricoles.

La consommation de carburant diesel par le tracteur Fendt™ 818 utilisé avec le Biobaler® variait entre 2,12 l/t MS et 6,96 l/t MS. La moyenne de consommation était de 3,91 l/ tMS (Tableau 10).

5.1.4. Régressions linéaires

Cette section analyse la relation entre les variables indépendantes et les variables dépendantes mesurées lors des essais de pressage. Le Tableau 11 montre les 8 variables indépendantes observées durant les récoltes en plantations avec le Biobaler®. Le Tableau 12 illustre les 8 variables dépendantes utilisées pour les calculs de régression linéaire. Le Tableau 13 montre les équations obtenues à partir de cette méthode ainsi que les coefficients de détermination (R^2). Les détails des étapes de calcul pour ces équations sont fournis dans l'Annexe F aux tableaux 29 à 36. L'annexe F inclut une analyse de sensibilité. La masse des balles est influencée par l'espèce (les balles de saule sont plus légères que les balles de peuplier) et par la présence de feuilles (les balles sont plus légères quand il n'y a pas de feuilles). La densité sur une base humide des balles est influencée par la teneur en eau. La capacité de récolte est influencée principalement par le diamètre moyen des tiges (effet positif), le diamètre maximum des tiges (effet négatif) et le rendement récolté (effet positif). Deux variables dépendantes (densité sur une base sèche et la consommation de carburant) n'étaient aucunement corrélées avec les huit variables indépendantes mesurées (Tableau 13).

Tableau 11: Variables indépendantes observées durant les récoltes avec le Biobaler®.

Site	Date	Culture X1 (Saule=1; Saule + Peuplier=1,5; Peuplier=2)	Diamètre des tiges ≥ 10 mm à 1,3m du sol (mm)		Nb de tiges par hectare avec un diamètre:		Teneur en eau (%) X6	Feuilles (Oui=1/ Non=0) X7	Rendement récolté (t MS/ha) X8
			Moy. X2	Max. X3	< 10 mm à 1,3 m du sol X4	≥10 mm à 1,3 m du sol X5			
Québec, Willow Shade Farm #1 (S)	2009-08-25	1,0	21,0	55,0	51000	52000	42,6	1	31,8
Québec, Willow Shade Farm #2 (S)	2009-08-26	1,0	21,0	55,0	51000	52000	53,4	1	19,5
Québec, Agro Énergie #1 (S)	2009-09-01	1,0	16,0	28,0	84000	51000	48,5	1	16,3
Québec, Agro Énergie #2 (S)	2009-09-01	1,0	16,0	28,0	84000	51000	48,3	1	24,1
Québec, Agro Énergie #3 (S)	2009-09-01	1,0	16,0	28,0	84000	51000	51,7	1	28,7
Ontario, Kemptville #1 (S)	2009-11-30	1,0	15,0	21,2	77600	43200	50,8	0	9,7
Ontario, Kemptville #2 (S)	2009-11-30	1,0	15,0	21,2	77600	43200	50,6	0	13,0
Ontario, Kemptville #3 (P)	2009-11-30	2,0	28,4	35,4	73700	17300	56,0	0	16,6
Ontario, Pickering #1 (S, P)	2009-12-01	1,5	26,5	38,8	14550	32550	50,6	0	14,7
Ontario, Pickering #2 (S, P)	2009-12-01	1,5	26,5	38,8	14550	32550	50,6	0	16,3
Ontario, Guelph (S)	2009-12-02	1,0	13,3	16,1	192400	44100	46,7	0	10,2
Québec, Agro Énergie #4 (S)	2010-04-12	1,0	18,6	36,1	59000	98000	40,8	0	22,8
Québec, Agro Énergie #5 (S)	2010-04-12	1,0	18,6	36,1	59000	98000	40,8	0	26,1
Québec, Agro Énergie #6 (S)	2010-04-12	1,0	18,6	36,1	59000	98000	40,8	0	21,5
Québec, Agro Énergie #7 (S)	2010-06-29	1,0	16,0	23,7	64000	79000	51,1	1	17,1
Québec, Agro Énergie #8 (S)	2010-11-24	1,0	21,0	39,4	57100	55400	50,0	0	23,8
Québec, Agro Énergie #9 (S)	2010-11-24	1,0	21,4	42,1	53800	54200	51,4	0	23,0
Québec, Agro Énergie #10 (S)	2010-11-25	1,0	21,1	55,5	59900	58600	50,5	0	19,3
Québec, Agro Énergie #11 (S)	2010-11-25	1,0	16,3	28,5	69000	56100	48,7	0	15,4

Tableau 12: Variables dépendantes mesurées durant les récoltes avec le Biobaler®.

Site	Date	Masse moyenne des balles (kg MH) Y1	Densité (kg MH/m ³) Y2	Masse moyenne des balles (kg MS) Y3	Densité (kg MS/m ³) Y4	Capacité (Balle/h) Y5	Capacité (t MS/h) Y6	Capacité (t MH/h) Y7	Consommation de carburant (l/t MS) Y8
Québec, Willow Shade Farm #1 (S)	2009-08-25	439	272	252	156	33,75	8,51	14,83	2,74
Québec, Willow Shade Farm #2 (S)	2009-08-26	488	297	227	139	23,48	5,34	11,45	4,36
Québec, Agro Énergie #1 (S)	2009-09-01	426	252	220	130	39,94	8,77	17,01	4,17
Québec, Agro Énergie #2 (S)	2009-09-01	385	239	199	124	43,14	8,58	16,60	3,23
Québec, Agro Énergie #3 (S)	2009-09-01	451	293	218	142	48,32	10,53	21,80	2,67
Ontario, Kemptville #1 (S)	2009-11-30	463	280	228	138	32,15	6,78	13,78	2,93
Ontario, Kemptville #2 (S)	2009-11-30	437	280	216	138	30,60	6,64	13,44	3,53
Ontario, Kemptville #3 (P)	2009-11-30	512	314	225	138	37,50	8,42	19,13	2,64
Ontario, Pickering #1 (S, P)	2009-12-01	470	291	232	144	39,51	9,24	18,70	2,12
Ontario, Pickering #2 (S, P)	2009-12-01	454	281	224	139	41,11	9,33	18,89	5,26
Ontario, Guelph (S)	2009-12-02	380	233	203	124	27,78	5,62	10,54	4,84
Québec, Agro Énergie #4 (S)	2010-04-12	372	242	220	143	33,37	7,35	12,41	6,96
Québec, Agro Énergie #5 (S)	2010-04-12	397	241	235	143	42,99	10,10	17,06	3,28
Québec, Agro Énergie #6 (S)	2010-04-12	401	245	237	145	37,33	8,86	14,96	2,76
Québec, Agro Énergie #7 (S)	2010-06-29	551	355	269	174	34,76	9,36	19,15	3,00
Québec, Agro Énergie #8 (S)	2010-11-24	398	269	199	135	37,52	7,46	14,92	3,03
Québec, Agro Énergie #9 (S)	2010-11-24	385	264	187	128	33,68	6,31	12,98	4,49
Québec, Agro Énergie #10 (S)	2010-11-25	371	259	183	128	26,02	4,77	9,65	5,49
Québec, Agro Énergie #11 (S)	2010-11-25	339	228	174	117	23,36	4,06	7,92	6,81

Tableau 13: Régressions linéaires avec variables significatives ($p \leq 0,05$) en fonction des variables indépendantes du Tableau 11.

Variable dépendante	Modèle	R ²
Y1 Masse moyenne des balles (kg MH)	$271,80 + 122,97 * X1 + 61,83 * X7$	0,48
Y2 Densité moyenne des balles (kg MH/m ³)	$58,25 + 436,16 * X6$	0,37
Y3 Masse moyenne des balles (kg MS)	$113,21 + 56,10 * X1 + 0,000616 * X5 + 27,001 * X7$	0,42
Y4 Densité moyenne des balles (kg MS/m ³)	Aucune variable significative	-
Y5 Capacité (balle/h)	$15,50 + 1,14 * X2 - 0,654 * X3 + 1,04 * X8$	0,69
Y6 Capacité (t MS/h)	$9,90 + 0,45001 * X2 - 0,172 * X3 - 17,15 * X6 + 2,05 * X7 + 0,143 * X8$	0,75
Y7 Capacité (t MH/h)	$2,75 + 0,899 * X2 - 0,354 * X3 + 3,88 * X7 + 0,3106 * X8$	0,78
Y8 Consommation de carburant (l/t MS)	Aucune variable significative	-

5.1.5. Relations entre la consommation de carburant, le rendement, la capacité et la masse des balles

La Figure 41 montre l'influence de la capacité de récolte sur la consommation de carburant. Lorsque la capacité est accrue, la consommation de carburant (l/t MS) diminue. Selon le modèle, la consommation passe de 6 à 3 l / t MS lorsque la capacité augmente de 4 à 10 t MS/h. D'autres facteurs influencent la consommation de carburant. Par exemple, les peupliers récoltés à Pickering le 1er décembre dans l'essai 2 étaient les arbustes à plus grand diamètre (34 mm en moyenne à 1,3 m du sol); la consommation de carburant était relativement élevée à 5,26 l/ t MS. Un autre exemple est la consommation de 6,96 l/ t MS mesurée le 12 avril à Agro Énergie (essai #4) qui était dû en partie à un long temps d'arrêt. Pour mesurer un taux de consommation plus précisément, les conditions expérimentales devraient être mieux contrôlées ce qui n'était pas possible sur les petites parcelles variées disponibles pour nos essais.

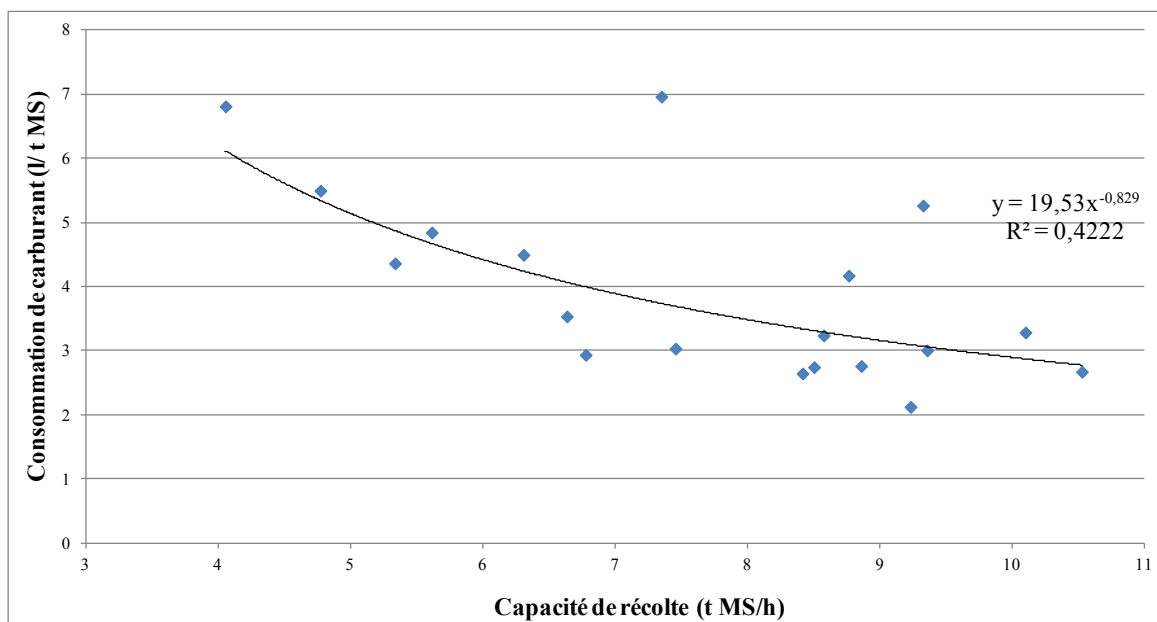


Figure 41 : Consommation de carburant diesel (l/t MS) par le tracteur Fendt™ 818 lors du pressage de la biomasse avec le Biobaler® en fonction de la capacité de pressage en plantation (t MS/h).

La Figure 42 montre que la capacité de pressage du Biobaler® est légèrement influencée par le rendement récolté ($R^2=0,17$). Selon le modèle, la capacité passe de 6,5 à 9 t MS/h lorsque le rendement passe de 10 à 30 t MS/ha. Cependant, d'autres facteurs moins facilement quantifiables tels que l'état du champ, l'opérateur, le cultivar et le diamètre maximum des tiges peuvent influencer la capacité de la machine puisque la capacité réelle a varié entre 4 et 10,5 t MS/h. Le diamètre élevé de certaines tiges a quelques fois forcé l'opérateur du tracteur à ralentir. En règle générale, lorsque le diamètre des tiges ou des troncs atteint 10 cm, l'opérateur doit ralentir la vitesse de la machine. Le Biobaler® a récolté des tiges ou des troncs allant jusqu'à 15 cm de diamètre.

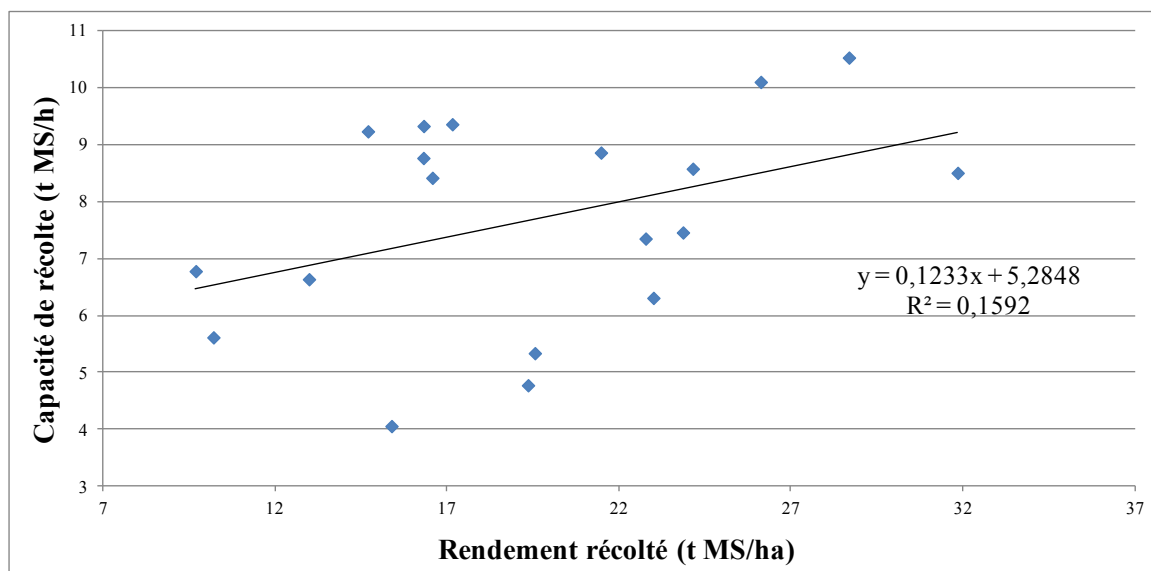


Figure 42 : Influence du rendement récolté (t MS/ha) sur la capacité (t MS/h) de pressage en plantation.

Les Figures 43 et 44 montrent l'influence de la capacité de pressage (t MS/h) sur la masse de matière sèche moyenne des balles produites. Plus la capacité de récolte est grande plus la masse moyenne des balles est importante. Cette tendance est contraire à celle observée avec les récoltes de plantes en friches où la masse volumique diminuait lorsque la capacité augmentait (Robert et al. 2011). Dans le cas des plantations, les branches sont relativement uniformes et semblent se placer de façon plus compacte lorsqu'elles sont alimentées plus rapidement. De plus, lorsque le diamètre des tiges en plantation est plus faible, la capacité peut augmenter et par le même fait, le volume des intertices diminue et la densité des balles augmente. Dans le cas des friches, c'est surtout le temps de séjour dans la chambre de compression qui a un effet sur la densité finale. Le Biobaler® a récolté de la biomasse arbustive lorsque les feuilles étaient présentes sur les tiges, mais aussi lorsque les feuilles étaient tombées. Lorsque les feuilles sont présentes lors des essais de récolte (Figure 43), le R^2 est moins important que lorsque les feuilles sont absentes (Figure 44).

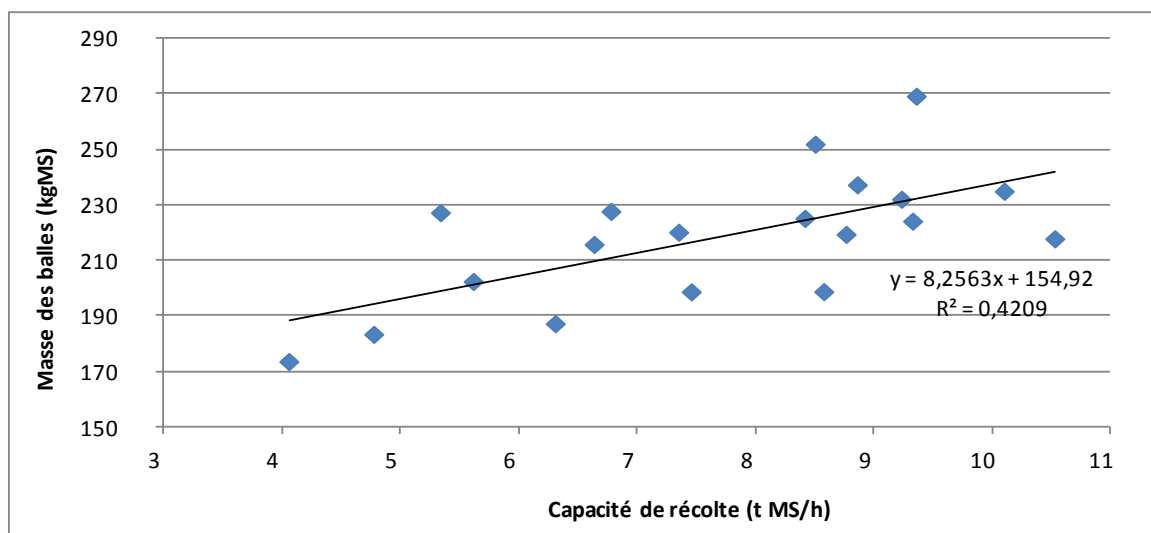


Figure 43 : Masse moyenne des balles en fonction de la capacité de pressage en plantation (19 observations).

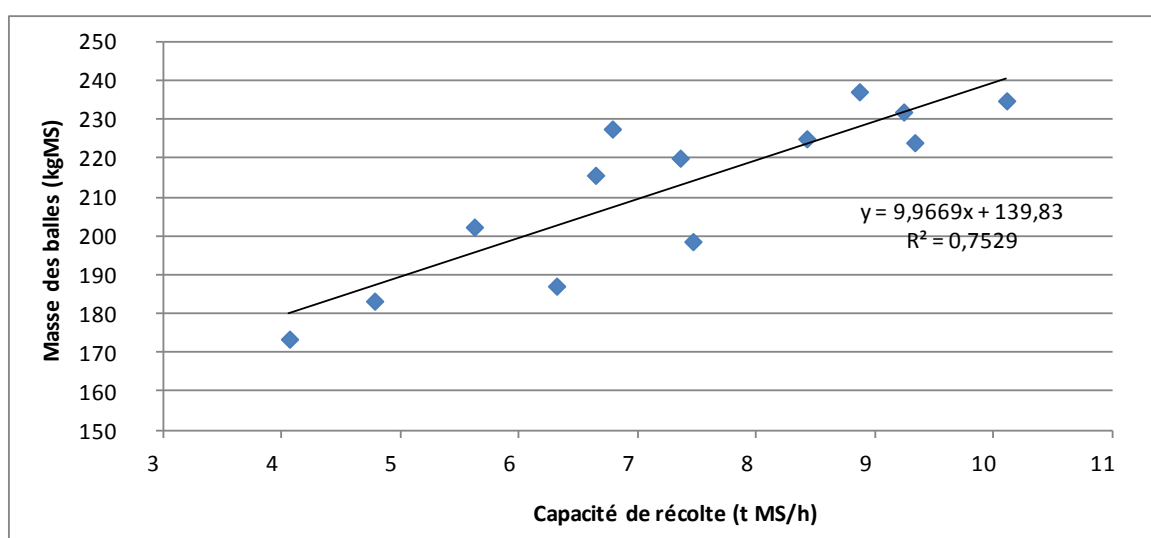


Figure 44 : Masse moyenne des balles en fonction de la capacité de pressage en plantation (récolte sans feuilles, 13 observations).

5.1.6. Pertes de récolte

Le Tableau 14 montre les pertes au champ du Biobaler[®]. La moyenne des pertes relatives était de 11,3% et variaient entre 5,7 et 20,1 %. Dans le cas des pertes de 20,1%, une portion importante était due à la présence d'un cultivar fragile et cassant (SX 61). Dès que le Biobaler[®] commençait à faire courber les tiges de ce cultivar pour les couper et les agripper dans le conditionneur à fléaux, les tiges ne s'assouplissaient pas, tombaient au sol et devenaient difficiles à ramasser. Une augmentation du rendement récolté diminue les pertes relatives (Figure 45), de 17 à 7% pour un rendement qui passe de 10 à 26 t MS/ha. Cependant, quand les pertes sont exprimées en valeur absolue, il n'y a aucune corrélation avec le rendement récolté ($R^2=0,0045$). La valeur absolue moyenne des pertes était de 2,33 t MS/ha. Ainsi, il est préférable de récolter la biomasse lorsque le rendement est grand. De cette façon, les pertes relatives seraient réduites au minimum.

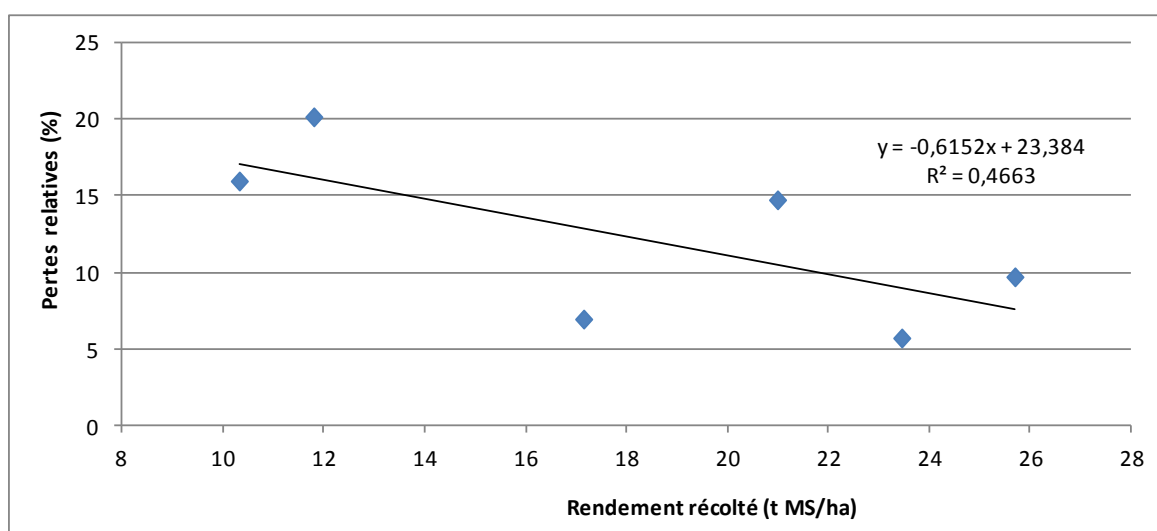


Figure 45 : Pertes relatives en fonction du rendement récolté.

Tableau 14 : Pertes mesurées au champ en plantations en 2009-2010 après le passage du Biobaler®

Date	Site	Particules au sol (t MS / ha)	Longues tiges laissées au champ (t MS / ha)	Pertes totales (t MS / ha)	Particules au sol (t MS / ha)	Longues tiges laissées au champ (t MS / ha)	Pertes totales (t MS/ha)	Rendement récolté par le Biobaler® (t MS / ha)	Pertes (%)
2009-08-25	Willow Shade Farm	2,00	0,14	2,15	2,51	0,25	2,75	25,69	9,7
		2,19	0,13	2,31					
		1,56	0,60	2,16					
		1,78	0,20	1,98					
		4,99	0,17	5,17					
2009-08-31	Agro Énergie	2,73	0,05	2,77	3,57	0,05	3,61	20,99	14,7
		4,08	0,05	4,13					
		3,90	0,04	3,94					
2009-11-30	Kemptville	1,56	0,77	2,33	1,70	1,26	2,97	11,79	20,1
		2,45	2,93	5,38					
		1,10	0,09	1,19					
2009-12-02	Guelph	1,04	0,49	1,53	1,62	0,34	1,95	10,32	15,9
		2,17	0,26	2,43					
		1,64	0,26	1,90					
2010-04-12	Agro Énergie	2,07	0,02	2,10	1,40	0,02	1,42	23,45	5,7
		0,72	0,02	0,74					
2009-06-29	Agro Énergie	1,09	0,00	1,09	1,28	0,00	1,28	17,14	6,9
		1,63	0,00	1,63					
		1,11	0,00	1,11					
Moyenne Plantation					2,01	0,32	2,33	18,23	11,3
Écart-type					0,88	0,48	0,93	6,26	5,6
Min plantation					1,28	0,00	1,28	10,32	5,7
Max plantation					3,57	1,26	3,61	25,69	20,1

5.2. Estimation des coûts et analyse de la récolte de la biomasse arbustive avec le Biobaler®

Ce chapitre porte sur l'analyse économique de la récolte de la biomasse arbustive. Les coûts de récolte sont d'abord estimés pour différentes méthodes de récolte et ensuite analysés avec la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

5.2.1. Analyse des coûts de pressage de la biomasse

Cette analyse des coûts prend en compte les données recueillies lors de récoltes de biomasse arbustive en plantations en 2009 et 2010. Ces données sont présentées de façon détaillée dans la section 5.1. L'analyse de départ est basée sur des valeurs de performance moyennes, à l'instar de l'analyse économique de Spinelli et al. (2009) pour la récolte de plantations avec une fourragère automotrice.

Le Tableau 15 présente les paramètres d'estimation de coûts en plantations. Certains de ces paramètres sont basés sur les données moyennes au champ comme la consommation de carburant tandis que les autres sont basés sur des valeurs-types moyennes (durée de vie, taux d'intérêts, coût de réparation). Le Tableau 16 montre les coûts sur une base annuelle ou horaire pour estimer le coût de pressage de balles de biomasse arbustive. À partir de ces valeurs moyennes, le coût d'opération du tracteur est de 77,17 \$/h et celui du Biobaler 76,01 \$/h pour un total de 153,18 \$/h (Tableau 16 et 17). Le coût par heure cédulée est moins élevé que le coût d'opération car le premier répartit les charges sur les heures travaillées (production) et les heures sans production estimées à 30% du total. Ces dernières représentent le temps d'entretien, de déplacement, de pause, etc. Le coût total de récolte moyen pour la biomasse est de 10,25 \$/t MH, 19,94 \$/t MS ou 4,38 \$/balle. Les paramètres supposent une utilisation de 1 200 heures cédulées par année afin de refléter l'utilisation du temps de récolte possible pour le Biobaler® en Europe. La méthode est partiellement adaptée pour les particularités du Biobaler®. Un coût de ficelle de 0,25 \$ par

balle est ajouté à la méthode de calcul; ce coût est expliqué au Tableau 40 de l'annexe H. Le tracteur considéré dans cette analyse est un tracteur Fendt™ 818 décrit précédemment.

Tableau 15 : Paramètres d'estimation du coût de pressage moyen en plantation

I. Paramètres	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW	Biobaler® WB55
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	150 000	150 000
Puissance	Puissance		kW	138	-
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	19	7
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20	10
Taux d'utilisation	%Util		%	70	70
Taux de réparation et de maintenance	%R&M		%	100	150
Taux d'intérêt	%Int		%	5,0	5,0
Coût d'assurance et de taxes	%AssTaxe		%	3,5	2,0
Taux de consommation de carburant	ConsCarb		l/h	30,04	-
Coût du carburant	\$Diesel		\$/litre	0,75	-
Taux de coût de lubrification	%Lub		%	37	18
Coût de main-d'œuvre	\$Hor		\$/h	15,6	-
Nb d'heures cédulées	TempsCédulé		h/an	1200	1200
Heures de production	HeureProd	TempsCédulé X %Util	h/an	840	840

Tableau 16 : Calculs d'estimation du coût de pressage moyen en plantation

2. Calculs	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW	Biobaler® WB55
Valeur de revente	\$Revente	\$Acquisition X %Revente	\$	30 000,00	15 000,00
Amortissement annuel	\$AmortisAnnuel	(\$Acquisition - \$Revente) / Durée Vie	\$	6 300,00	18 900,00
Valeur moyenne de la machine	ValeurMoyMachine	(\$Acquisition + \$Revente) / 2	\$	90 000,00	82 500,00
3. Coûts de propriétés					
Coût d'intérêts	\$Int	ValeurMoyMachine X %Int	\$/an	4 500,00	4 125,00
Coûts d'assurance et de taxes	\$AssTaxe	ValeurMoyMachine X %AssTaxe	\$/an	3 150,00	1 650,00
Coût de propriété annuel	\$Prop	\$AmortisAnnuel + \$Int + \$AssTaxe	\$/an	13 950,00	24 675,00
Coût de propriété par heure cédulée	\$PropTempsCédulé	\$Prop / TempsCédulé	\$/h	11,63	20,56
Coût de propriété par heure de production	\$PropTempsProd	\$Prop / TempsProd	\$/h	16,61	29,38
4. Coûts d'opérations					
Coût de carburant	\$CarbHor	ConsCarb X \$Diesel	\$/h	22,50	-
Coût de lubrification	\$LubHor	\$CarbHor X %Lub	\$/h	8,27	4,14
Coût de maintenance et de réparation	\$R&M	\$AmortisAnnuel X %R&M / HeureProd	\$/h	7,50	33,75
Coût de main-d'œuvre	\$HorRéalProd	\$HorRéal / %Util	\$/h	22,29	-
Coût de ficelle	\$FicelleBalle		\$/balle		0,25
Coût de ficelle	\$Ficelle	CapBalleHeure X \$FicelleBalle	\$/h		8,75
Coût d'opération par heure de production	\$OpHeureProd	\$CarbHor + \$LubHor + \$R&M + (\$HorRéal / %Util) + \$Ficelle	\$/h	60,56	46,64
Coût d'opération par heure cédulée	\$OpHeureCédulé	\$OpHeureProd X %Util	\$/h	42,39	32,65
5. Coûts totaux					
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	77,17	76,01
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	54,02	53,21

Tableau 17 : Résultats d'estimation du coût de pressage moyen en plantation

6. Résultats finaux	Variable	Formule	Unité	Total
Coût total de pressage par heure de production	\$TotalPressageProd	\$TotalTempsProdTracteur + \$TotalTempsProdBiobaler	\$/h	153,18
Coût total de pressage par heure cédulée	\$TotalPressageCédulé	\$TotalTempsCéduléTracteur + \$TotalTempsCéduléBiobaler	\$/h	107,22
Coût total par t MH	\$tMH	\$TotalPressageProd / CapTmhHeure	\$/t MH	10,25
Coût total par t MS	\$tMS	\$TotalPressageProd / CapTmsHeure	\$/t MS	19,94
Coût total par balle	\$Balle	\$TotalPressageProd / CapBalleHeure	\$/balle	4,38

5.2.1.1. Présentation des résultats

Le coût de pressage a ensuite été calculé pour chacun des 19 essais rapportés à la section 5.1.3 Les paramètres techniques individuels ont servi aux calculs. Le Tableau 18 présente les coûts de pressage pour chacun des 19 scénarios. La moyenne pour les 19 essais est de 20,95 \$/t MS ou 4,47 \$/balle. Ces valeurs sont légèrement différentes de celles basées sur la moyenne des paramètres techniques (19,94 \$/t MS ou 4,38 \$/balle) parce que la pondération n'est pas la même. On observe une grande variation de coût de récolte, entre 14,65 et 36,34 \$/t MS (3,19 et 6,31 \$/balle). Cette variation est due en partie aux différences dans la capacité de récolte, entre 4,1 et 10,5 t MS/h, et dans les rendements récoltés, entre 9,7 et 31,8 t MS/ha.

Tableau 18 : Coût de pressage en plantation avec le Biobaler[®] selon les paramètres techniques des essais en 2009 et 2010 (en plantation de saule «S» ou peuplier «P»)

Site	Date	Coût de pressage (\$/ t MS)	Coût de pressage (\$/ balle)
Québec, Agro Énergie #3 (S)	2009-09-01	14,65	3,19
Ontario, Pickering #1 (S, P)	2009-12-01	15,39	3,60
Québec, Agro Énergie #5 (S)	2010-04-12	15,71	3,69
Québec, Agro Énergie #7 (S)	2010-06-29	16,12	4,34
Québec, Agro Énergie #6 (S)	2010-04-12	16,61	3,94
Québec, Willow Shade Farm #1 (S)	2009-08-25	17,05	4,30
Ontario, Kemptville #3 (P)	2009-11-30	17,19	3,86
Québec, Agro Énergie #2 (S)	2009-09-01	17,78	3,54
Québec, Agro Énergie #1 (S)	2009-09-01	18,47	4,05
Ontario, Pickering #2 (S, P)	2009-12-01	18,95	4,30
Québec, Agro Énergie #8 (S)	2010-11-24	19,46	3,87
Ontario, Kemptville #1 (S)	2009-11-30	20,74	4,37
Ontario, Kemptville #2 (S)	2009-11-30	21,75	4,72
Québec, Agro Énergie #4 (S)	2010-04-12	24,12	5,31
Québec, Agro Énergie #9 (S)	2010-11-24	23,91	4,48
Ontario, Guelph (S)	2009-12-02	26,36	5,33
Québec, Willow Shade Farm #2 (S)	2009-08-26	26,68	6,07
Québec, Agro Énergie #10 (S)	2010-11-25	30,68	5,63
Québec, Agro Énergie #11 (S)	2010-11-25	36,34	6,31
Moyenne	2009-2010	20,95	4,47
Écart-type	2009-2010	5,80	0,88
Min plantation	2009-08-25	14,65	3,19
Max plantation	2010-11-25	36,34	6,31

La Figure 46 montre l'influence de la capacité de pressage sur le coût de pressage en plantations. Chacun des points correspond au coût de récolte d'un essai en plantation. Une faible capacité engendre des coûts de récolte plus élevés et vice-et-versa. Il est donc primordial de favoriser de grande capacité de pressage.

Au Tableau 10, on observe que le temps de pressage est réparti à 55% pour la récolte, 33% pour l'attachement et 12% pour la transition. Une simple modification de l'attacheur en doublant le nombre d'aiguilles permettrait une diminution de moitié du temps d'attachement. Ainsi, la capacité de pressage moyen augmenterait d'environ 15% (8,9 t MS/h) par rapport à la capacité moyenne actuelle (7,69 t MS/h). Ainsi, le coût moyen de pressage passerait de 19,94 \$/t MS à 17,83 \$/t MS, soit une diminution de 11% par rapport au coût actuel.

Une autre opportunité d'amélioration technique serait d'éliminer l'obligation de reculer avec le Biobaler[®] en diagonale, lors de la transition entre deux balles. Présentement, lorsque le Biobaler[®] ne recule pas en diagonale pour éjecter les balles, les passages de récolte ultérieurs sont gênés par les balles dans le chemin du tracteur. Un mécanisme de redirection des balles lors de l'éjection de la chambre de compression permettrait de réduire le temps de transition entre la production de deux balles. La nécessité de reculer représente un déplacement, une perte de temps et une perte de productivité.

Le Tableau 19 montre la répartition des coûts de pressage en plantation. Selon les paramètres de l'analyse des coûts, les coûts de carburants, d'amortissement, d'entretien et de réparation représentent environ 60% des coûts de pressage. L'importance de l'impact de ces facteurs nécessite d'obtenir des données précises. Les frais d'entretien et de réparation sont particulièrement importants (27%) et basés seulement sur des estimés d'autres sources. Les expériences n'ont pas duré assez longtemps pour obtenir un historique de ces frais. Après quelques années d'essais, des données fiables devraient être disponibles. Par la suite, il sera possible de déterminer les points à étudier en priorité afin d'obtenir un coût de récolte moindre.

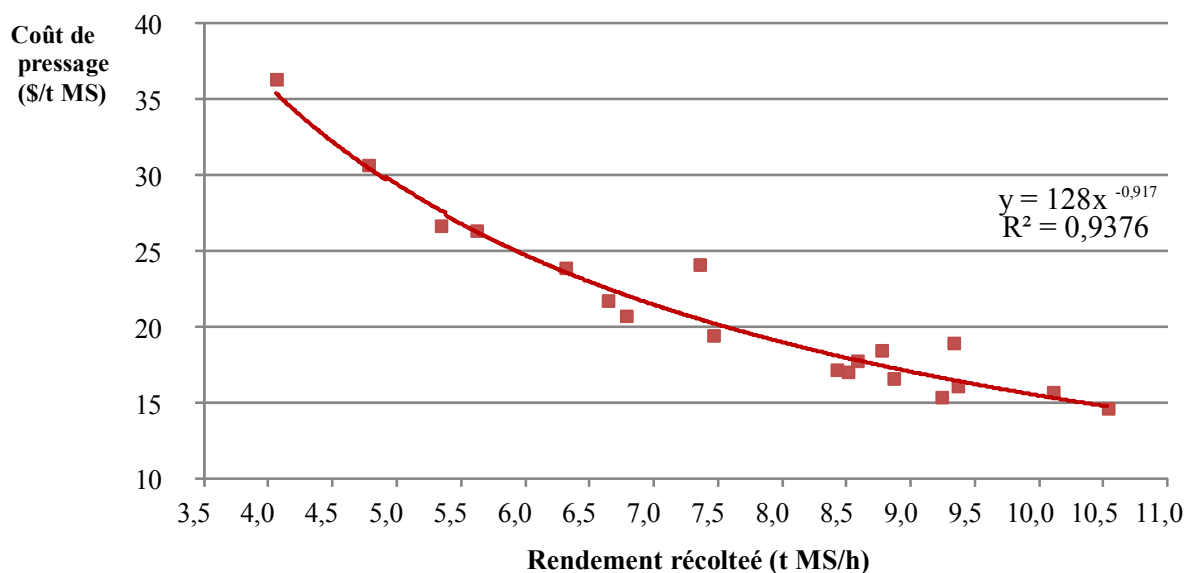


Figure 46 : Influence de la capacité sur le coût de pressage en plantation.

Tableau 19 : Répartition des coûts de pressage de biomasse (%) avec le Biobaler[®] et le Fendt[™] 818

Description des coûts	Biobaler [®]	Fendt [™] 818	Total
Entretien et réparation	22,03	4,89	26,92
Amortissement	14,68	4,89	19,58
Carburant	-	14,70	14,70
Main d'œuvre	-	14,54	14,54
Intérêt	3,20	3,50	6,70
Lubrification	2,70	5,41	8,11
Ficelle	5,71	-	5,71
Assurance et taxes	1,28	2,45	3,73
Total	49,61	50,39	100,00

Des analyses de sensibilité du coût de pressage en plantation sont présentées aux Figure 47 et Figure 48. Le coût total de pressage varie de 17,25 à 20,75 \$/ t MS lorsque l'hypothèse du coût d'entretien passe de 100 à 170% de l'amortissement annuel et que la vie utile du Biobaler[®] passe de 9 à 7 ans. Le coût total varie entre 19 et 25 \$/ t MS lorsque le prix du

diesel passe de 0,55 à 1,55 \$/ litre. Cette analyse permet de comprendre la sensibilité de certains intrants ou de certaines hypothèses sur le coût final.

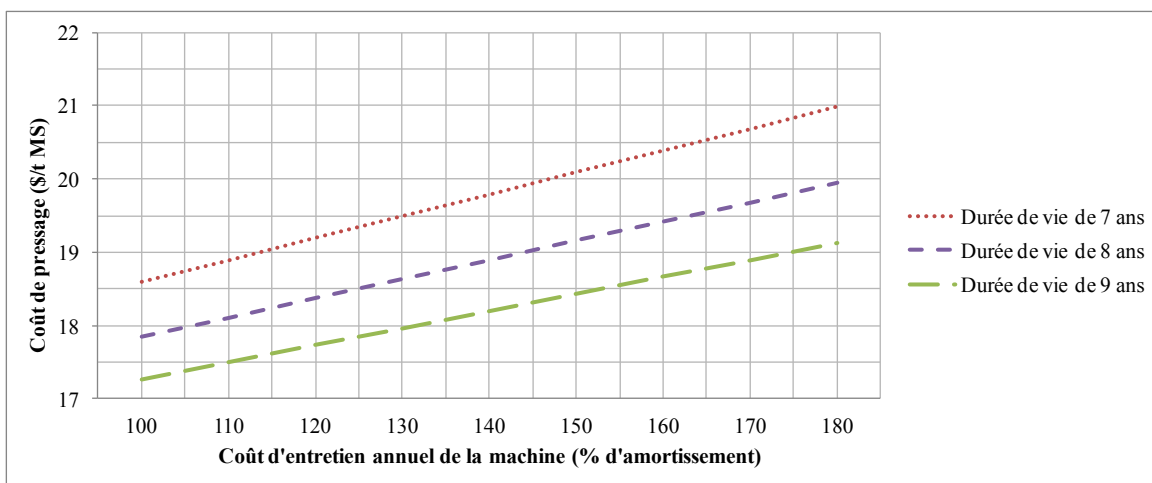


Figure 47 : Influence de la maintenance et de la durée de vie du Biobaler® sur le coût de pressage en plantation.

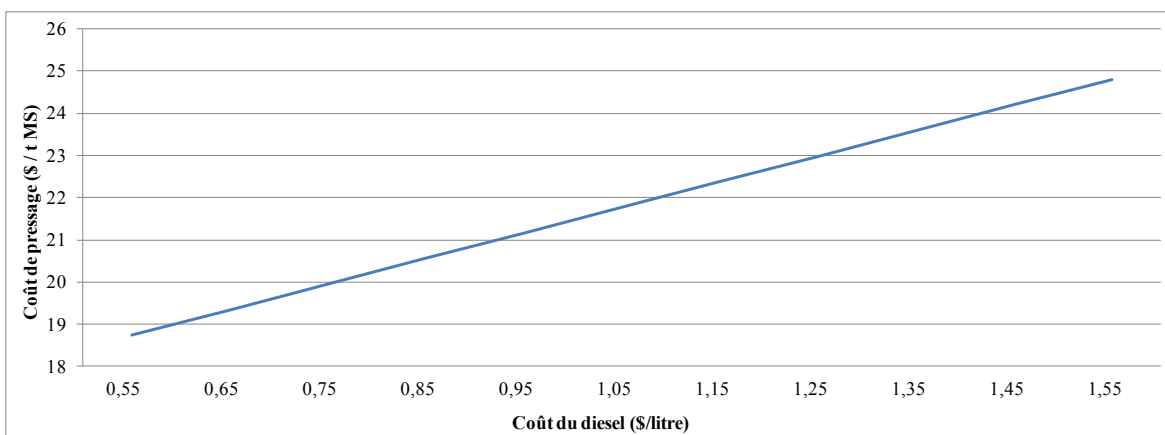


Figure 48 : Influence du coût du diesel sur le coût de pressage en plantation.

5.2.2. Estimation des coûts des méthodes de récolte avec le Biobaler®

Cette prochaine section porte sur l'évaluation du coût de récolte total. Ce coût suppose que la biomasse est pressée, déplacée sur le bord des champs et broyée avec un «Tub Grinder». Ces coûts ne comprennent pas le coût de transport sur route. Cette section étudie sept différentes méthodes de récolte. L'étude suppose que les mêmes équipements servent à récolter les milieux naturels et les plantations. Le temps d'utilisation des machines est réparti en 22 semaines en milieux naturels à raison de 40 heures cédulées par semaine et 8 semaines de récolte dans les plantations à raison de 72 heures cédulées par semaine, soit un total de 1456 h. Une telle utilisation dans les conditions canadiennes correspond aux mois de novembre et décembre en plantations (quand les feuilles sont tombées, avec un peu de neige au sol) et de la mi-mai à la mi-octobre en milieu naturel. Il pourrait être nécessaire de décaler une partie de la récolte en plantation au printemps (avril) si trop de neige empêche la récolte en décembre. Afin d'être capable d'obtenir un coût moyen pour ces deux types de récolte, les paramètres techniques sont présentés dans le Tableau 20. Le coût total suppose une répartition de 576 heures en plantation et 880 heures en milieu naturel sur une base annuelle. Des pondérations basées sur cette répartition d'heures sont présentées en annexe au Tableau 41.

Tableau 20 : Paramètres techniques pour l'estimation des coûts de récolte en plantations et en milieux naturels (formules de pondération au Tableau 41)

Donnée	Variable	Unité	Valeur
Heures de récolte en plantation par an	TempsRécoltePlan	Heure cédulée (h)	576
Heures de récolte en milieu naturel par an	TempsRécolteNat	Heure cédulée (h)	880
Heures de récolte totales	TempsRécolte	Heure cédulée (h)	1456
Teneur en eau moyenne des balles en plantation	TEEBallePlant	%	48,62%
Teneur en eau moyenne des balles en milieu naturel	TEEBalleNat	%	46,40%
Masse moyenne humide des balles en plantation	MasseBalleMHPlant	Kg MH	424
Masse moyenne sèche des balles en plantation	MasseBalleMSPlant	Kg MS	218
Masse moyenne des balles en milieu naturel	MasseBalleMHNat	Kg MH	487
Masse moyenne des balles en milieu naturel	MasseBalleMSNat	Kg MS	261
Capacité de pressage en plantation	CapBiobalerPlantBalle	balles/h	35,3
Capacité de pressage en plantation	CapBiobalerPlantMH	t MH/h	14,97
Capacité de pressage en plantation	CapBiobalerPlant	t MS/h	7,69
Capacité de pressage en milieu naturel	CapBiobalerNatballe	balles/h	13,4
Capacité de pressage en milieu naturel	CapBiobalerNatMH	t MH/h	6,55
Capacité de pressage en milieu naturel	CapBiobalerNat	t MS/h	3,51
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en plantation	CapChargeurBallePlantBalle	balles/h	55,0
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en plantation	CapChargeurBallePlantMH	t MH/h	23,36
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en plantation	CapChargeurBallePlant	t MS/h	12,00
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en milieu naturel	CapChargeurBalleNatBalle	balles/h	21,0
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en milieu naturel	CapChargeurBalleNatMH	t MH/h	10,22
Capacité de manutention sèche pour autochargeuse en milieu naturel	CapChargeurBalleNat	t MS/h	5,48
Capacité de broyage sèche avec une puissance disponible supérieure à 242 kW	CapBroyeur	t MS/h	11,00
Capacité de broyage avec puissance de 190 kW (pdf)	CapBroyeurPDF	t MS/h	9,05

5.2.2.1. Présentation des méthodes de récolte étudiées

Dans cette section, sept méthodes de pressage, de transport hors route et de broyage sont comparées. Toutes les méthodes ont en commun l'utilisation de Biobaler® WB55, et la transformation des balles en « broyure » c'est-à-dire des morceaux de bois broyés finement à moins de 100 mm en moyenne (équivalent du « hog fuel » en anglais). Les sept méthodes se différencient selon la grosseur du tracteur principal (138 ou 190 kW), le broyeur (Haybuster ou Duratech), l'usage d'un accumulateur de balles derrière le Biobaler® ou d'un autochargeur après le pressage et l'option d'un tracteur secondaire pour le déplacement des balles (Tableau 22). Voici la description de ces différentes méthodes de récolte.

La méthode #1 utilise un tracteur de 190 kW pour presser avec le Biobaler® et pour broyer avec « Tub Grinder HayBuster H1130 » muni d'une prise de force (pdf). Toutes les autres méthodes (#2 à #7) utilisent un plus petit tracteur (138 kW), adéquat pour opérer le Biobaler® lorsque les paramètres du moteur sont ajustés pour obtenir 150 kW, mais elles requièrent un moteur électrique ou diesel indépendant pour opérer le broyeur. On suppose que le Biobaler® a toujours la même capacité moyenne pondérée indépendamment du tracteur (5,16 t MS/h ou 21,1 balles/h) et que tous les broyeurs ont la même capacité moyenne (11 t MS/h) à l'exception du « Tub Grinder HayBuster H1130 » avec une prise de force (9,05 t MS/h). Ces hypothèses ont été élaborées à partir d'essais effectués.

Trois systèmes (#1, 3, 5) utilisent un tracteur secondaire de 86 kW et une autochargeuse pour le déplacement des balles simultanément au pressage. Deux systèmes (#2 et 6) utilisent l'autochargeuse sans tracteur secondaire, ce qui oblige le tracteur principal d'arrêter la récolte durant le déplacement des balles et réduit le potentiel de récolte annuel. Les autres différences entre les systèmes #2 à 7 sont le modèle de broyeur, Duratech 2009 avec moteur diesel (242 kW) indépendant (#2, 4 et 5) ou Haybuster H1130 avec moteur électrique (231 kW) branché sur une entrée de 550 V (#3, 6 et 7). On suppose que l'entrée

est disponible, sans frais de branchement. Puisque le 550 V n'est pas commun en milieu rural, cette particularité doit être tenue en compte lors du choix d'un système de récolte.

La Figure 48 illustre le système autochargeur pour le déplacement des balles au champ. Cette autochargeuse devrait avoir la plus grande capacité possible. Si le patron de plantation le permet, il serait avantageux que cette autochargeuse puisse ramasser des balles par les deux côtés, en ayant deux bras de chargement afin de limiter les déplacements. La chargeuse doit manutentionner les balles le plus rapidement possible tout en passant le moins possible sur les rangs de la plantation pour limiter les dommages à la plantation. De même, il serait aussi avantageux de placer un dispositif en avant du tracteur afin de déplacer les balles en avant du tracteur lors du ramassage des balles au champ. De cette façon, le tracteur pourra ramasser toutes les balles présentes au champ sur quatre rangées en même temps sur un seul passage sans passer une seule fois sur les rangs et ce, pour la majorité des plantations.

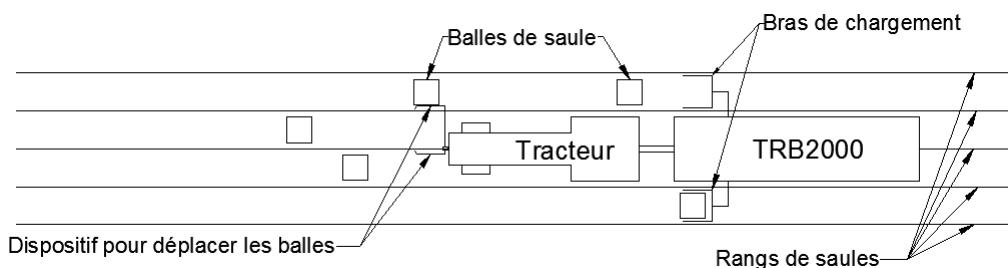


Figure 49 : Système autochargeur pour le déplacement des balles rondes.

Les méthodes #4 et #7 utilisent un accumulateur traîné derrière la Biobaler®. L'accumulateur est une machine conceptuelle, non encore disponible sur le marché. Il accumule les balles pressées dans un rang et les dépose au bout du rang. Ensuite, un tracteur est utilisé en dehors des périodes de récolte pour déplacer et déposer les balles avec un chargeur et une pince à balle ronde dans un broyeur. Cette méthode implique un certain risque technologique au niveau du développement de machine. Selon les rendements, les dimensions de l'accumulateur devraient être différentes, alors il est difficile de déterminer les dimensions universelles. Finalement, l'un des avantages majeurs

du Biobaler[®], c'est-à-dire sa grande manoeuvrabilité, sera gênée par la longueur et le poids de l'accumulateur.

Les sept systèmes utilisent des équipements communs décrits au Tableau 21 et des équipements distincts décrits au Tableau 22. Les gardes et pneus protègent le tracteur. Le chargeur sert à manipuler les balles dans le broyeur à l'aide d'une pince à balle ronde. Le Biobaler[®] WB-55 est également commun aux sept systèmes comparés.

Tableau 21 : Équipements communs pour la récolte et le broyage des sept systèmes

Équipement	Coût (\$)
Garde et pneus	20 000
Chargeur	10 000
Pince à balle ronde	2 250
Biobaler [®] WB55	150 000

Tableau 22 : Équipements distincts pour les sept systèmes

Système	Tracteur Principal	Coût (\$)	Broyeur	Coût (\$)	Accumulateur ou Autochargeuse	Coût	Tracteur Secondaire	Coût (\$)
1	190 kW	174500	Haybuster H1130 (pdf)	76000	Autochargeuse	35000	86 kW	72500
2	138 kW	130000	Duratech 2009	185000	Autochargeuse	35000	-	-
3	138 kW	130000	Haybuster H1130 électrique	140000	Autochargeuse	35000	86 kW	72500
4	138 kW	130000	Duratech 2009	185000	Accumulateur	35000	-	-
5	138 kW	130000	Duratech 2009	185000	Autochargeuse	35000	86 kW	72500
6	138 kW	130000	Haybuster H1130 électrique	140000	Autochargeuse	35000	-	-
7	138 kW	130000	Haybuster H1130 électrique	140000	Accumulateur	35000	-	-

5.2.2.2. Résultats d'analyse des coûts de méthode de récolte

Le coût de pressage représente le coût nécessaire pour faire fonctionner une unité motrice et le Biobaler[®]. Le coût de manutention représente le coût nécessaire pour faire fonctionner un dispositif de manutention et son unité motrice afin d'acheminer les balles du champ vers le bord du champ pour un entreposage et un séchage naturel jusqu'au broyage. Le coût de broyage représente le coût nécessaire pour faire fonctionner le broyeur et son unité motrice de même que l'unité motrice nécessaire pour déposer les balles dans le broyeur. Les résultats d'estimation des coûts de pressage, transport hors route et broyage sont présentés dans le Tableau 23. Les calculs détaillés se trouvent à l'annexe I.

Les systèmes #2 et 6 n'avaient pas de tracteur secondaire, ni d'accumulateur, mais seulement un autochargeur. Ce dernier devrait donc être opéré par le tracteur principal qui ne pouvait pas récolter pendant le déplacement des balles. C'est pourquoi la capacité annuelle était de 40% plus faible (3207 t MS vs 5263 t MS pour les cinq autres systèmes) et les coûts totaux pondérés relativement élevés (57,46 et 53,50 \$/t MS). Quand il n'y avait pas de deuxième tracteur, il valait mieux avoir un accumulateur qu'un autochargeur (systèmes 4 et 7) dont les coûts totaux pondérés étaient de 46,73 et 43,04 \$/ t MS, respectivement.

Les estimations des coûts du Tableau 23 montrent que les coûts de récolte en plantation sont moins grands que les coûts de récolte en milieu naturel. Cette différence est due à la capacité de récolte plus grande en plantation. Le Tableau 23 montre que la méthode de récolte la plus économique est la méthode #7 (43,04 \$/t MS) suivie dans l'ordre par les méthodes #4, #3, #5, #6, #1 et #2. Ainsi, les deux méthodes les plus économiques (#7 et #4) utilisent un accumulateur sans avoir besoin d'un deuxième tracteur de transport. Le Tableau 23 montre aussi que le coût de pressage représente généralement la plus grande partie du coût de récolte suivie du broyage et de la manutention des balles.

Tableau 23 : Résultats d'estimation des coûts de pressage, transport hors route et broyage

Descriptif	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3	Méthode 4
	Tracteur 190 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder HayBuster H1130 PTO	Tracteur 138 kW + Autochargeuse + Tub grinder Duratech 2009	Tracteurs 138 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder H1130 électrique HayBuster	Tracteur 138 kW + Accumulateur + Tub grinder Duratech 2009
Coût moyen de pressage en plantation (\$/tMS)	20,31	19,68	19,21	14,20
Coût moyen de mantutension du champ au bord du champ en plantation (\$/t MS)	5,95	7,80	5,98	6,90
Coût moyen de broyage en plantation (\$/t MS)	17,80	16,53	9,94	15,31
Coût total en plantation (\$/t MS)	44,07	44,01	35,13	36,41
Coût total en plantation (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	2,46	2,46	1,96	2,03
Coût moyen de pressage en milieu naturel (\$/t MS)	44,50	43,12	42,08	31,11
Coût moyen de mantutension du champ au bord du champ en milieu naturel (\$/t MS)	13,04	17,10	13,10	15,11
Coût moyen de broyage en milieu naturel (\$/t MS)	17,80	16,53	9,94	15,31
Coût total en milieu naturel (\$/t MS)	75,34	76,74	65,12	61,53
Coût total en milieu naturel (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	4,21	4,29	3,64	3,44
Coût total moyen pondéré (\$/tMS)	56,92	57,46	47,45	46,73
Coût total moyen pondéré (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	3,18	3,21	2,65	2,61
Capacité (t MS/an)	5263	3207	5263	5263
Investissement total (\$)	540 250,00	532 250,00	559 750,00	532 250,00

Tableau 23 : Résultats d'estimation des coûts de pressage, transport hors route et broyage
(suite)

Descriptif	Méthode 5	Méthode 6	Méthode 7
	Tracteurs 138 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder Duratech 2009	Tracteurs 138 kW + Autochargeuse + Tub grinder H1130 électrique HayBuster	Tracteurs 138 kW + Accumulateur + Tub grinder H1130 électrique HayBuster
Coût moyen de pressage en plantation (\$/tMS)	19,21	19,68	14,20
Coût moyen de maintenance du champ au bord du champ en plantation (\$/t MS)	5,98	7,80	6,90
Coût moyen de broyage en plantation (\$/t MS)	13,62	12,56	11,62
Coût total en plantation (\$/t MS)	38,81	40,05	32,72
Coût total en plantation (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	2,17	2,24	1,83
Coût moyen de pressage en milieu naturel (\$/t MS)	42,08	43,12	31,11
Coût moyen de maintenance du champ au bord du champ en milieu naturel (\$/t MS)	13,10	17,10	15,11
Coût moyen de broyage en milieu naturel (\$/t MS)	13,62	12,56	11,62
Coût total en milieu naturel (\$/t MS)	68,80	72,78	57,84
Coût total en milieu naturel (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	3,84	4,07	3,23
Coût total moyen pondéré (\$/tMS)	51,13	53,50	43,04
Coût total moyen pondéré (\$/GJ à une teneur en eau de 30% b.h.)	2,86	2,99	2,40
Capacité (t MS/an)	5263	3207	5263
Investissement total (\$)	604 750,00	487 250,00	487 250,00

5.2.3. Résultats d'analyse AHP

L'analyse AHP a été complétée à l'aide de six critères de décision dont la pondération est illustrée à la Figure 50. Le poids de chaque critère a été déterminé par l'auteur. Les critères de coûts de récolte et de capacité de récolte annuelle sont les plus importants, car lorsqu'ils sont favorables, c'est-à-dire un petit coût de récolte et une grande capacité de récolte, ils permettent de générer des profits et un coût compétitif. Ensuite, le coût d'investissement suit, car un faible coût d'investissement permettra de générer un bon rendement du projet d'acquisition d'équipement. Aussi, le critère de risque technologique est important, puisqu'il peut influencer à la hausse, et de façon significative, les coûts de récolte lorsque les équipements ne sont pas bien maîtrisés. Finalement, les critères de polyvalence des équipements et de convivialité ont le même poids décisionnel et sont placés au dernier rang en termes de poids décisionnel.

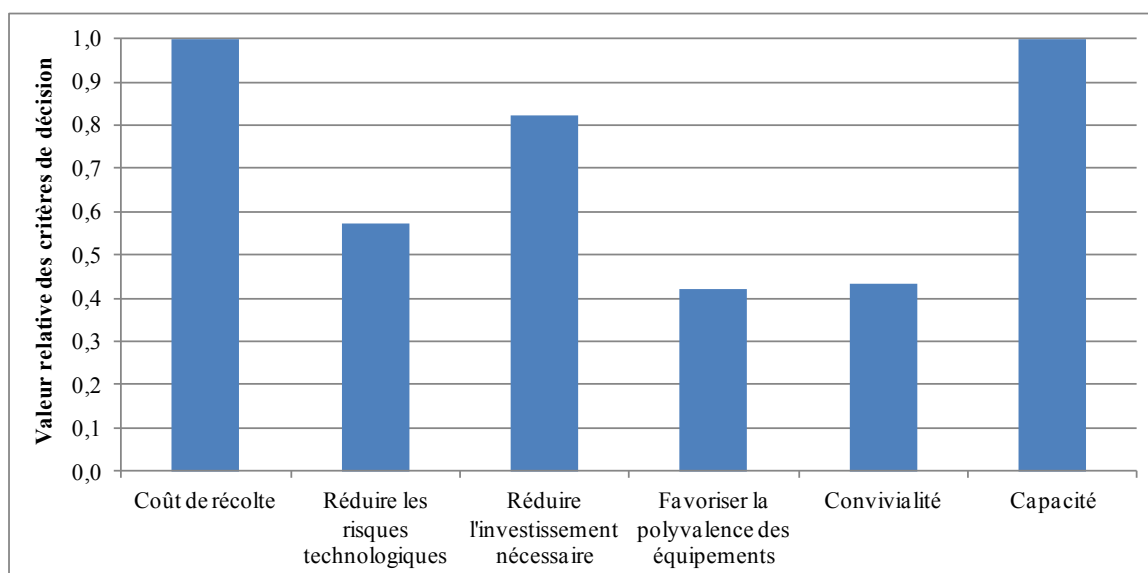


Figure 50 : Importance relative des critères de décision de l'étude AHP.

Le Tableau 24 montre les valeurs quantitatives des critères calculés selon les formules présentées dans le même tableau. Les données qualitatives et quantitatives ont été insérées dans l'analyse AHP en comparant les méthodes. Les matrices produites par le logiciel *Expert Choice* sont présentées en annexe J. La Figure 50 présente le poids de chacun des critères de l'étude AHP. Le poids de chacun de ses critères a été déterminé par l'auteur de l'analyse. La Figure 51 résume les résultats intermédiaires de l'analyse AHP. La Figure 52 résume les résultats finaux de l'analyse AHP.

On observe que l'analyse AHP a favorisé certains choix de gestion et certaines technologies. Par exemple, les systèmes avec un deuxième tracteur pour déplacer les balles aux champs (#5, #1 et #3) arrivent aux 1^{er}, 2^e et 3^e rang de l'étude AHP même s'ils étaient chers (4^e, 6^e et 3^e rang au niveau du coût). Les systèmes utilisant un broyeur autonome sans branchement électrique (#5, #1, #2 et #4) arrivent aux 1^{er}, 2^e, 4^e et 5^e rang dans l'étude AHP (ils étaient aux 4^e, 6^e, 7^e et 2^e rang au niveau du coût). Cependant, les systèmes avec un accumulateur de balles (#4 et #7) étaient désavantagés (5^e et 6^e rang dans l'étude AHP) même s'ils étaient moins chers (2^e et 1^{er} rang pour le coût) car il s'agit d'un équipement non encore disponible commercialement et présentant par le fait même un risque technologique. De plus, le système #7 requiert un branchement électrique, un autre inconvénient. Le système #1 avec un tracteur plus puissant de 190 kW se positionnait bien dans l'étude AHP (2^e rang) et par rapport au coût (6^e rang). Au final, le système #5 est recommandé sur la base de l'analyse AHP. Il inclut un deuxième tracteur, un autochargeur et un broyeur Duratech 2009 autonome.

Tableau 24 : Critères décisionnels relatifs à l'étude AHP

Descriptif	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3	Méthode 4	Formules
	Tracteur 190 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder HayBuster H1130 PTO	Tracteur 138 kW + Autochargeuse + Tub grinder Duratech 2009	Tracteurs 138 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder H1130 électrique HayBuster	Tracteur 138 kW + Accumulateur + Tub grinder Duratech 2009	
Coût total (\$/t MS)	56,92	57,46	47,45	46,73	
Valeur unitaire du coût de récolte relative à l'option minimum (%)	76	75	91	92	1/ (Coût de récolte/Coût de récolte minimum)
Coût + marge de profit (20%) (\$/t MS)	68,30	68,95	56,94	56,07	
Investissement total (\$)	540 250	532 250	559 750	532 250	
Valeur unitaire de l'investissement relative à l'option minimum (%)	90	92	87	92	1/ (Investissement/I nvestissement minimum)
Risque technologique	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé	
Polyvalence des équipements	Moyenne	Moyenne	Moyenne-faible	Faible	
Convivialité	Faible	Moyenne	Faible	Faible	
Capacité (t MS/an)	5263	3207	5263	5263	
Capacité annuelle relative au maximum (%)	100	61	100	100	Capacité/Capacité maximum

Tableau 24 : Critères décisionnels relatifs à l'étude AHP (Suite)

Descriptif	Méthode 5	Méthode 6	Méthode 7	Formules
	Tracteurs 138 kW + Tracteur 86 kW + Autochargeuse + Tub grinder Duratech 2009	Tracteurs 138 kW + Autochargeuse + Tub grinder H1130 électrique HayBuster	Tracteurs 138 kW + Accumulateur + Tub grinder H1130 électrique HayBuster	
Coût total (\$/t MS)	51,13	53,50	43,04	
Valeur unitaire du coût de récolte relative à l'option minimum (%)	84	80	100	1/ (Coût de récolte/Coût de récolte minimum)
Coût + marge de profit (20%) (\$/t MS)	61,36	64,20	51,65	
Investissement total (\$)	604 750	487 250	487 250	
Valeur unitaire de l'investissement relative à l'option minimum (%)	81	100	100	1/ (Investissement/Investissement minimum)
Risque technologique	Moyen	Moyen	Élevé	
Polyvalence des équipements	Moyenne	Moyenne-faible	Très faible	
Convivialité	Moyenne	Faible	Faible	
Capacité (t MS/an)	5263	3207	5263	
Capacité annuelle relative au maximum (%)	100	61	100	Capacité/Capacité maximum

Dans l'étude de sensibilité, le seul critère qui favoriserait une autre méthode de récolte est le critère du coût de récolte. Cependant, le poids du critère du coût de récolte devra atteindre le poids relatif décisionnel de 64,2% avant que les méthodes de récolte #3 et #7 puissent être aussi valables que la méthode #5. De plus, ces méthodes ne sont pas praticables dans bien des situations. Ces méthodes nécessitent l'accès au courant 550 volts et tel que mentionné précédemment, le courant 550 volts n'est pas accessible dans bien des régions.

Une fois que le Biobaler[®] sera bien accepté sur le marché, il deviendra sans doute intéressant de développer l'accumulateur de balles, car il présente une économie de près de 5 \$/t MS (systèmes #4 et #7) par rapport aux autres systèmes les plus économiques sans l'accumulateur (système #3 et #5). Il est toutefois prématuré de recommander l'accumulateur parce qu'il n'a pas été éprouvé en pratique.

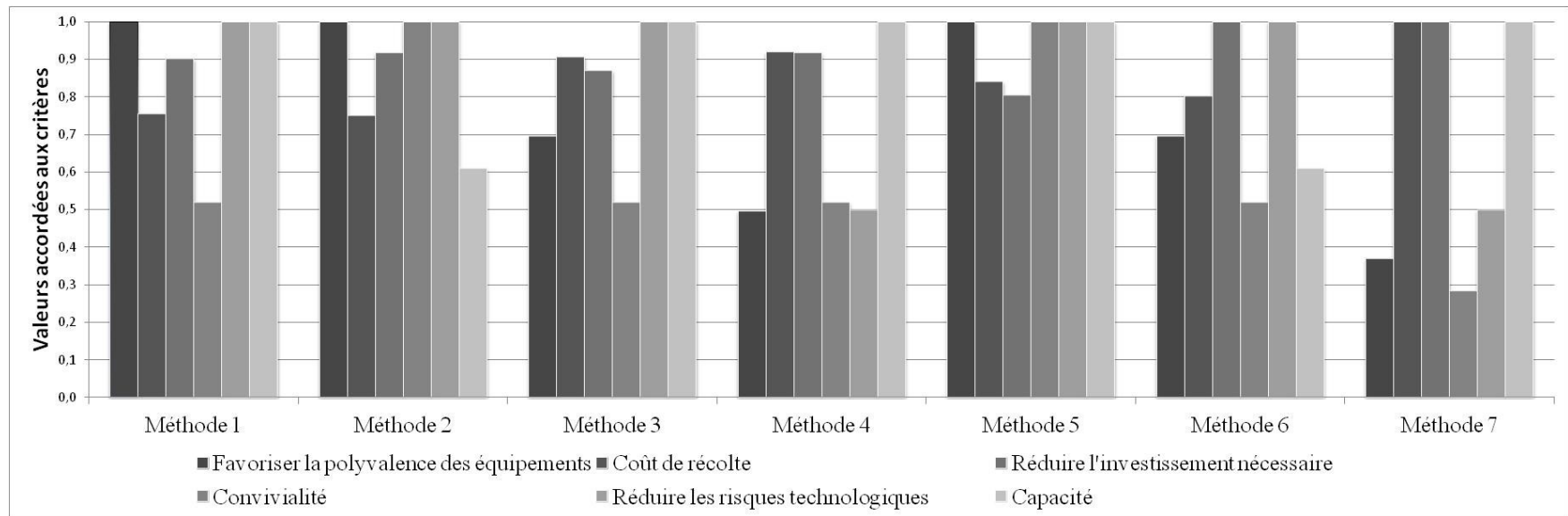


Figure 51 : Résultats détaillés de l'étude AHP.

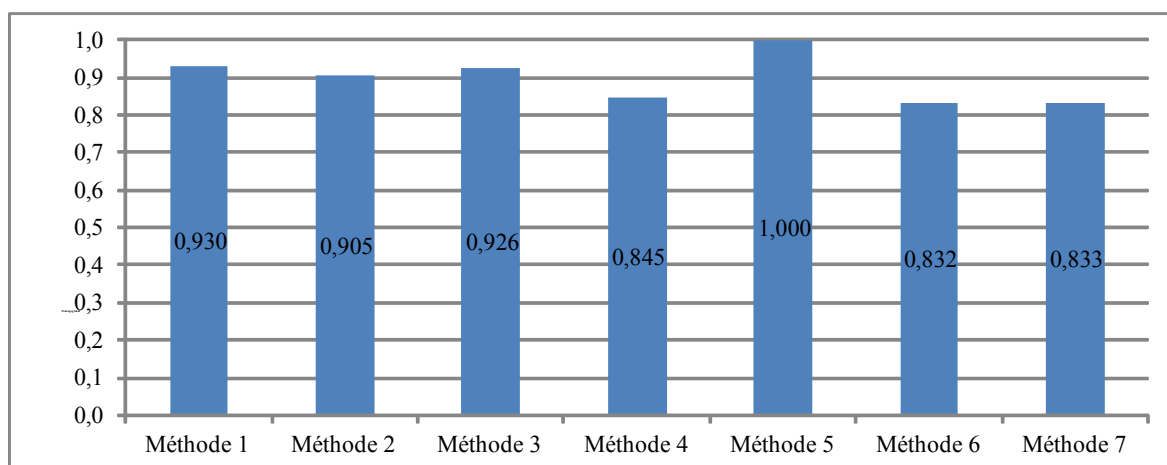


Figure 52 : Résultats finaux de l'étude AHP.

5.2.4. Transport de la biomasse

Cette section estime le coût de transport de la biomasse. Les calculs supposent l'utilisation d'un camion de 336 kW et d'une remorque de 53 pieds de longueur (91,75 m³). Des distances moyennes de 25 km sur route et 0,75 km hors route sont considérées (51,5 km aller-retour). La masse totale de biomasse transportée est de 12,24 t MH à 30% d'humidité par charge. Cette faible masse s'explique par le fait que le broyage en morceaux effilochés crée une densité plus faible que le déchetage en copeaux de bois. Les détails des calculs d'estimation de coût de transport sont présentés dans le Tableau 50 de l'Annexe K.

Le coût de transport selon les hypothèses de base est de 10,72 \$/ t MS ou 0,21 \$/t MS/km. La Figure 53 montre l'influence du coût du diesel et la distance sur route parcourue sur le coût de transport. Plus la distance de transport sur route est grande, plus l'influence du coût du diesel est importante.

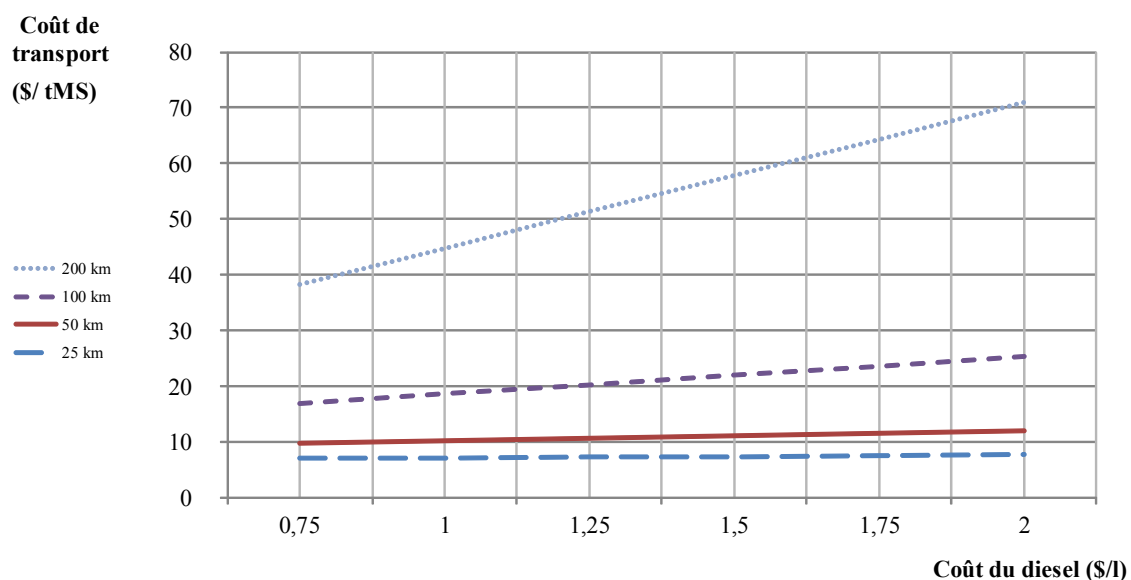


Figure 53 : Influence du coût du diesel et de la distance parcourue sur route sur le coût de transport.

Une autre méthode de transport pour la méthode de récolte avec le Biobaler[®] serait de transporter la biomasse sous forme de balles rondes avec un camion et une remorque plateforme de 53 pieds de longueur. Cette méthode de transport permettrait de transporter 46 balles par chargement. Il y aurait 24 balles sur un premier niveau (2 rangées de 12 balles) et 22 balles au deuxième niveau (2 rangées de 11 balles). Un tel chargement pourrait transporter 10,03 t MS avec un coût de 9,16 \$/t MS (Tableau 51 en Annexe K). Cependant, si les balles doivent être broyées à destination, elles devront être manipulées une fois de plus, ce qui augmentera les coûts. La disponibilité d'un broyeur électrique où la combustion directe des balles dans une chaudière adaptée aux balles rondes pourrait justifier le transport en balles plutôt qu'en morceaux broyés.

6. Discussion

Suite aux essais de pressage de biomasse arbustive, il a été constaté que peu de résultats de récolte avaient été réalisés sur des sites avec des rendements supérieurs à 25 t MS/ha. Il est important d'obtenir plus de résultats sur des sites à rendements élevés afin d'y connaître le comportement de la machine par rapport à la capacité, la consommation de carburant et le taux de recouvrement de la biomasse. Il serait utile d'obtenir des données sur de plus longues périodes de récolte continues (40 à 72 heures/semaine) afin de préciser la fréquence et le coût de réparation et d'entretien du Biobaler[®].

Dans le futur, il serait avantageux d'intégrer dans le Biobaler[®] un système d'attachement plus rapide et un système de redirection des balles lors de l'éjection. Ces améliorations techniques augmenteraient la capacité et réduiraient le coût de pressage de la biomasse. De même, un accumulateur de balles pourrait réduire le coût de manutention et de déplacement au champ. Un autre point à améliorer serait la flottabilité du Biobaler[®]. En effet, lors des récoltes en 2009 et 2010, le Biobaler[®] s'est enlisé à plusieurs reprises. Les plantations de saules et de peupliers hybrides sont établies souvent sur des terres marginales. De même, les récoltes dans des peuplements naturels ou des terres en friche sont généralement sur des terres mal drainées où le risque d'enlèvement est élevé. Les fenêtres de récolte pour les plantations arbustives sont limitées au Canada, souvent à un moment de l'année généralement pluvieux à l'automne ou humide au printemps. Le Biobaler[®] se doit d'être portant afin de profiter au maximum des fenêtres de récolte.

Le coût de récolte en plantation avec le Biobaler[®], incluant le pressage, le transport et le broyage varie entre 32,72 \$/ t MS (1,83 \$/GJ) et 44,07 \$/t MS (2,46 \$/GJ) pour les sept différentes méthodes analysées. Si l'on considère une marge de 20%, le prix de récolte sur une base d'énergie varie entre 2,20 \$/GJ et 2,95 \$/GJ. Selon Spinelli et al. (2009), la récolte avec des fourragères automotrice a un coût qui se situe entre 11 et 35 €/t MH (1,5 à 4,7

€/GJ ou 2,1 \$/GJ à 6,58 \$/GJ) si l'on considère une marge de 20% et un taux de change de 1,40 \$/€. Ces coûts ne tiennent pas compte des pertes de matière sèche qui peuvent s'élever à près de 30% après un an d'entreposage pour la récolte sous forme de copeaux. Alors, il est plausible de croire que la récolte avec le Biobaler[®] est concurrentielle à la méthode de récolte avec la fourragère automotrice.

Le coût de récolte en milieu naturel avec le Biobaler[®] varie entre 57,84 \$/ t MS (3,23 \$/GJ) et 76,74 \$/t MS (4,26 \$/GJ) pour les sept méthodes de transport et broyage. Si l'on considère une marge de 20%, le prix de la récolte de la biomasse en milieu naturel sur une base d'énergie varie entre 3,88 \$/GJ et 5,11 \$/GJ pour les sept méthodes.

Si l'on considère que le coût de la biomasse oscille généralement entre 4 et 6 €/GJ (5,60 et 8,40 \$/GJ) en Europe (Figure 36 et Figure 37), il est plausible que la récolte de biomasse arbustive en milieu naturel avec le Biobaler[®] soit viable.

Finalement, le transport de la biomasse sous forme de broyure a un coût de 10,72 \$/tMS (0,60 \$/GJ) pour une distance de 51,5 km. Le coût de transport sous forme de balle ronde est de 9,16 \$/t MS (0,51 \$/GJ).

Finalement, il serait intéressant de réaliser des tests de combustion de balles complètes (sans broyage) dans des unités de chauffage spécialement conçues pour les balles rondes. Le broyage des balles représente un coût non négligeable qui pourrait être évité avec une combustion directe des balles de biomasse arbustive. De surcroît, le coût de transport est comparable, voire même inférieur, lorsque la biomasse est livrée sous forme de balles rondes. Enfin, ce type d'unité de chauffage a un coût d'acquisition très raisonnable. Des expériences de combustion concluantes démontrant une bonne efficacité et une bonne rentabilité de ce type d'unité de chauffage pourraient, par la suite, mener à la conception d'une unité d'autochargement des balles.

7. Conclusion

Les essais de pressage réalisés en 2009 et 2010 ont démontré que le Biobaler[®] pouvait récolter entre 23 et 48 balles/h, en moyenne 35 balles/h ou 7,69 t MS/h. La capacité de récolte avait tendance à augmenter quand le rendement au champ augmentait : la capacité moyenne passait de 6,5 à 9,1 t MS/h quand le rendement récolté passait de 10 à 32 t MS/ha. La consommation de carburant diminuait avec la capacité de récolte de 6 à 3 l de diesel / t MS lorsque la capacité de récolte passait de 4 à 10 t MS/h. Les pertes relatives variaient de 5 à 20 % et étaient plus faibles à un haut rendement. Les grandes variations de rendement et de conditions de récolte (sol, cultivar, opérateur) faisaient en sorte que les coefficients de détermination n'étaient pas élevés.

À partir des valeurs de performance moyenne de chacun des essais, le coût de récolte variait entre 36 et 15 \$/ t MS pour une capacité de récolte de 4 à 10 t MS/h. Donc lorsque la machine pouvait être opérée à une haute capacité le coût de récolte unitaire diminuait. L'étude de sensibilité a montré qu'une vie utile prolongée à 9 au lieu de 7 ans diminuait le coût de récolte d'environ 10%. Si le coût de carburant double (1,50 au lieu de 0,75 \$/l) le coût de récolte augmente de 22%. La biomasse sera vraisemblablement plus valorisée dans le futur si le prix du pétrole continue à augmenter.

Les expériences menées dans le cadre de ce mémoire ont fourni des données de caractérisation de performance du biobaler dans des conditions de récolte variées. L'analyse de coûts a montré l'intérêt d'utiliser le biobaler des plantations à haut rendement. Plusieurs autres aspects de la filière doivent encore être expérimentés comme l'entreposage, le transport, le déchiquetage et l'utilisation de la biomasse. De cette façon, une technologie québécoise pourra prendre son envol et se tailler une place de choix sur le marché mondial de la récolte de la biomasse arbustive.

Bibliographie

Abrahamson, L.P., Volk, T.A., Kopp, R.F., White, E.H., and Ballard, J.L. (2002). Willow biomass producer's handbook. Document récupéré le 24 mars 2011 de : <http://www.esf.edu/willow/pdf/2001%20finalhandbook.pdf>.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Kinggsman RBM-217 round bale mover. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed : April, 1992.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Laurier H-2125 round bale mover. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed : March, 1989.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Laurier H-4250 round bale mover. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed : March, 1987a.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Morris M-881 hay hiker round bale mover. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed : March, 1987b.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Massey Ferguson 505 round bale mover. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed : March, 1986.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Sperry New Holland model 8500 round bale wagon. Evaluation Report. ISSN 0383-3445. Printed: June, 1983.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. B & K bale karrier 815. Evaluation Report No. E0376D. ISSN 0383-3445. Printed : June, 1977a.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. New Holland model 85 bale handler. Evaluation Report No. E0376C. ISSN 0383-3445. Printed : June, 1977b.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Farmhand model F126-B five-bale mover. Evaluation Report No. E0376B. ISSN 0383-3445. Printed : June, 1977c.

Alberta Farm Machinery Research Centre and The Prairie Agricultural Machinery Institute. Hesston 5200 round-up multiple bale mover. Evaluation Report No. E0376A. ISSN 0383-3445. Printed : May, 1977d.

ASABE Standards. (2009). D497.6. Agriculture Machinery Management Data. St-Joseph, Mich.: ASAE.

Bandit Bar. (2011). Consulté le 11 mars 2011 de: <http://www.banditbar.com/>.

Banque du Canada. (2011). Consulté le 9 août 2011 de: <http://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/convertisseur-de-devises-taux-du-jour/>

Biomass Energy Centre. (2011). Fuel costs per kWh. Consulté le 8 août 2011 de: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75,59188&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Brinker, R.W., Kinard, J., Rummer, B., and Lanford, B. (2002). Machine rates for selected forest harvesting machines. Alabama Agricultural Experiment Station, Circular 296 (revised). Auburn University, Auburn, AL, 29.

Cardinael, R., Thevathasan, N., Gordon, A., Sidders, D., and Mohammad, I. (2011). Powerpoint Presentation: Growing woody biomass for bioenergy in southern Ontario, Canada - A case study using tree-based intercropping as an example. Consulté le 4 avril 2011 de : <ftp://ftp.nofc.cfs.nrcan.gc.ca/downloads/Joss/guelph>

Caslin, B., Finnan, J., and McCracken, A. (2010). Short rotation coppice willow best practice guidelines. Consulté le 24 mars 2011 de : <http://www.agriculture.gov.ie/ruralenvironment/climatechangebioenergybiodiversity/bioenergy/bioenergyscheme/>.

Coalition BOIS Québec. (2011). Consulté le 24 mars 2011 de <http://www.coalitionbois.org/fr>.

Comité Européen de normalisation-Spécification technique (CEN/TS), Biocombustibles solides – Classes et spécifications des combustibles, Prénorme CEN/TS 14961, Austria, 2005.

Cundiff, J.S., Grisso, R.D., and Jason, J. (2009). Operations at Satellite Locations (SSL) to deliver round bales to a biorefinery plant. ASABE Paper and Presentation No. 095896. St. Joseph, Mich.: ASABE.

Ericsson, K., Rosenqvist, H., and Nilsson, L.J. (2009). Energy crop production costs in the EU. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1577-1586.

EuBioNet3. (2010). WP3- Wood fuel price statistics in Europe – D3.1. Consulté le 8 août 2011 de : <http://www.eubionet.net/GetItem.asp?item=digistorefile;242235;1540¶ms=open;gallery>

Expert choice. (2010). Consulté le 11 mars 2011 de: <http://www.expertchoice.com/academic-program/>.

Financière agricole Québec. (2011). L'Agroindicateur. Consulté le 26 février 2012 de : http://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/cent_docu/docu_publ/etud/econ/agro_indi/agro_indi_1112.pdf

Forest Products Laboratory. (2004). Consulté le 26 mars 2011 de : <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/techline/fuel-value-calculator.pdf>.

Francescato, V., Antonini, E., and Bergomi, L.Z. (2008). Wood Fuels Handbook. Italy. Italian Agriforestry Energy Association

Gagnon-Bouchard, M., et Savoie, P. (2009). Caractérisation des tiges de saules et conditionnement à l'aide de rouleaux hacheurs à basse vitesse. Rapport de recherche. 61 pages. Avril 2009. Centre de recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, QC G1V 2J3.

Gascol, G.C., Martinez, S., Rigola, M., Rieradevall, J., Anton, A., Carrasco, J., Ciria, P., and Gabarrell, X. (2009). Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the southern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 801-812.

Gigler, J.K., Meerdink, G., and Hendrix, E.M.T. (1999). Willow supply strategies to energy plants. *Biomass and Bioenergy*, 17, 185–198.

Gigler, J.K., Van Loon, W.K.P., Vissers, M.M., and Bot, G.P.A. (2000). Forced convective drying of willow chips. *Biomass and Bioenergy* 19: 259–270.

Gingras, J.-F. (1995). Harvesting small trees and forest residues. *Biomass and Bioenergy* 9 (1-5): 153–160.

Gharbi, A., et Carier, M. (2010). Module 11: Analytic Hierarchy Process –AHP. Notes de cours dans le cadre du cours GES802 Analyse de faisabilité. École de technologie supérieure, Montréal, Québec.

Groupe Agéco. (2010). Consulté le 11 mars 2011 de <http://www.groupeageco.ca/fr/statistiques/index.html>.

Groupe Anderson. (2011). Consulté le 11 mars 2011 de: <http://www.grpanderson.com>.

Haybuster H1130. (2011). Consulté le 3 avril 2011 de : http://www.haybuster.com/hb/tg_h1130.html

Hillring, B. (2002). Rural development and bioenergy—experiences from 20 years of development in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 23 (6): 443–451.

The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing (HBCC). (2008). Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, UK.

Hillman, D., et Michaelsen, J. (2008). Semi-remorque multi-usage pour augmenter les retours en charge et réduire l'intensité énergétique. Article tiré d'un rapport de contrat préparé pour l'Agence d'efficacité énergétique du Québec (AEEQ). Consulté le 26 mars 2011 de: <http://www.aqtr.qc.ca/documents/Congres2008/pdfs/MichaelsenJan.pdf>.

Hytönen, J. (1994). Effect of cutting season, stump height and harvest damage on coppicing and biomass production of willow and birch. *Biomass and Bioenergy* 6(5): 349-357.

Jirjis, R. (1995). Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy* 9 (1-5).

Johansson, J., Liss, J.-E., Gullberg, T., and Bjorheden, R. (2006). Transport and handling of forest energy bundles advantages and problems. *Biomass and Bioenergy* 30: 334_341.

Junginger, M., Faaij, A., Bjorheden, R., and Turkenburg, W.C. (2005). Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 29 (6): 399–418.

Klepac, J., and Rummer, B. (2009). Evaluation of the WB55 Bio-baler for baling woody biomass in a forest application. Southern Research Station. USDA Forest Service SRS. Auburn, Alabama.

Kofman, P.D., Spinelli, R. (1997). Storage and handling from willow from short rotation coppice. Forskningscentret for skovoch landskab. Rapport ELSAM project, ISBN nr.87-986376-2-2.

Labrecque, M., and Teodorescu, T.I. (2005). Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy*, 29, 1–9.

Ladan, L.J., Sokhansanj, S., Mani, S., Hoque, M., and Bi, T. (2006). Cost and performance of woody biomass size reduction for energy production. Paper No. 06-107. Presented at the CSBE/SCGAB 2006 Annual Conference in Edmondton, Ab, June 16-19, Winnipeg, MB.: CSBE/SCGAB.

Lavoie, F. (communication personnelle, 2011). Groupe Anderson, Téléphone : (819) 382-2952.

Lavoie, F., Savoie, P., D'Amours, L., and Joannis, H. (2008). Development and field performance of a willow cutter-shredder-baler. *Applied Engineering in Agriculture* 24(2): 165-172.

Lechasseur, G., and Savoie, P. (2005). Cutting, bundling and chipping short-rotation willow. Paper no. 05-080. Presented at the CSAE/SCGR 2005 Meeting, Winnipeg, MB, 26-29 June. CSAE-SCGR.

Legroulx, L. (communication personnelle, 14 et 18 avril, 2011). Téléphone : 613-525-3162.

Lehtikangas, P., and Jirjis, R. (1993). Lagring av buntade hyggesrester av barrtrid. Summary: The storage of softwood residues in bundles. Projekt Skogskrafi. Rapport no. 16. U(B)1 993/22, Vattenfall, Sweden.

Miyata, E. S. (1980). Determining fixed and operating costs of logging equipment. U.S. Department of Agriculture Forest Service Gen. Tech. Rep. NC-55, 1-16.

Mukenda, A., Ileleji, K.E., and Wan, H. (2006). Simulation of corn stover logistics from on-farm storage to an ethanol plant. ASABE Paper No. 066177. Presented at the ASABE Annual International Meeting in Portland, July 9-12, St. Joseph, Mich.: ASABE.

Nebraska Tractor Test Laboratory. (2010). *Fendt 818*. Consulté le 11 mars 2011 de : <http://tractortestlab.unl.edu/Misc-tests/Fendt818.pdf>.

Pari, L., Civitarese, V., and Del Giudice, A. (2010). Evaluation of chips quality by the analysis of two different harvesting methodologies. Presented at CIGR, Section III: Equipment engineering for plant production. CSBE/SCGAB 2010 meeting, Quebec, Quebec, Canada, June 13-17, 2010.

Régie de l'énergie du Québec. (2011). Consulté le 6 juin 2011 de: http://www.regie-energie.qc.ca/energie/petrole_tarifs.php.

Ressources Naturelles Canada. (2010). À propos du Charbon. Consulté le 2 août 2011 de <http://www.rncan.gc.ca/eneene/sources/coacha-fra.php>

Roise, J.P., L.C. Hannum and G.P. Catts. 2009. Machine System for Harvesting Small Diameter Woody Biomass and Reducing Hazardous Fuels : A Developmental Report. ASABE Paper No. Bio090001. St. Joseph, Mich. : ASABE.

Robert, F.-S., P. L. Hébert and P. Savoie. 2011. Clearing and Valuing Natural Woody Crops with a Biobaler. Presentation at the XXXIV CIOSTA CIGR V Conference, 29 June to 1 July 2011. 9 pages. Theme: Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry. University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna - Austria.

Savoie, P., D'Amours, L., Lavoie, F., Lechasseur, G., and Joannis, H. (2006). Development of a cutter-shredder-baler to harvest long-stem willow. ASABE Paper No. 061016. St. Joseph, Mich.: ASABE.

Savoie, P., Hébert, P.L. (2010). Broyage de balles de saule avec un *Haybuster* modèle H1130, Rapport de recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Québec.

Savoie, P., Lavoie, F., and D'Amours, L. (2008a). A modified round baler to harvest small-diameter woody biomass. *Tarım Makinalrı Bilimi Dergisi (Turkish Journal of Agricultural Machinery Science)*, 4(4), 365-370.

Savoie, P., Lavoie, F., D'Amours, L., Schroeder, W., and Kort, J. (2008b). Harvesting willow rings around prairie marshes. CSBE Paper No. 08-145. Présenté à the CSBE/SCGAB Annual Conference in Vancouver, BC, 13-16 Juillet. Winnipeg, MB: CSBE/SCGAB.

Savoie, P., Ouellet-Plamondon, C., Morissette, R., and Preto, F. (2009). Engineering Developments for Small-Scale Harvest, Storage and Combustion of Woody Crops in Canada. Poster Presentation. Ecological Engineering: from Concepts to Applications (EECA) Conference. (<http://www.biologie.ens.fr/eeca>). 2-4 Décembre, 2009, Paris, France.

Sean, S.T., and Labrecque, M. (2006). Use of short-rotation coppice willow clones of *Salix viminalis* as furnish in panel production. *Forest Products Journal*, 56(9), 47-52.

Spinelli, R., and Hartsough, B.R. (2001). A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy* 21: 433–444.

Spinelli, R., Nati, C., and Magagnotti, N. (2009). Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 817-821.

State University of New York College of Environmental Science and Forestry (SUNY-ESF). (2010). Willow / Woody Biomass at ESF. Consulté le 11 mars 2011 de <http://www.esf.edu/willow/download.htm>.

Thermo-System. (2010). Consulté le 11 mars 2011 de : <http://www.thermo-system.com/fr/produits/sechage-du-bois/exemples-dinstallations/exemples-dinstallations/news/frankreich-3>.

Tresearch. (2008). New strategies for drying willow chips. (3)2. Consulté le 31 mars 2011 de : http://www.teagasc.ie/publications/2008/19/19_tresearch200805.pdf.

Turhollow, A. (2002). Methodology for costing production and delivery options for energy crops. Bioenergy Feedstock Development Program. Oak Ridge National Laboratory.

United States Department of Agriculture (USDA). (2005). Residue trucking model. Consulté le 26 mars 2011 de : www.srs.fs.usda.gov/forestops/downloads/FoRTSv4.xls.

University of Illinois Farm Business Management. (2005). Machinery Cost Estimates: Tractors. Handbook. Consulté le 29 mars 2011 de: <http://www.farmdoc.illinois.edu/manage/machinery/machinery%20tractors%202010.pdf>.

Annexe A : Valeur des terres

Le Groupe Agéco (2010) produit chaque année une compilation de données statistiques des transactions des terres agricoles transigées au Québec. La compilation donne de l'information telle que l'évolution de la valeur moyenne de terre en culture ainsi que le prix des terres transigées au Québec. La compilation montre l'utilisation des superficies agricoles par région au Québec et fournit la valeur des terres agricoles transigées par région au Québec. Les terres en culture sont des superficies cultivables. Les terres en culture ne comprennent pas l'espace occupé par les bâtiments, les pâturages, les vergers, les érablières et les boisés. Les terres agricoles comprennent les terres en culture et les autres terres agricoles, dont les érablières, les vergers, les boisés et les pâturages. Pour les fins de l'étude de rentabilité, le Tableau 25 étale les valeurs des terres agricoles transigées au Québec. Le Groupe Agéco (2010) fournit les valeurs inférieures et supérieures. Ces valeurs correspondent aux premier et quatrième quartiles des valeurs des terres transigées par région au Québec. La valeur moyenne des prix, inférieurs et supérieurs, a été calculée pour fournir une valeur moyenne à l'étude de faisabilité.

Tableau 25 : Valeur des terres agricoles transigées dans certaines régions du Québec (modifié de Groupe Agéco, 2010)

Région	Prix inférieur transigé (\$/ha)	Valeur moyenne des prix inférieur et supérieur (\$/ha)	Prix supérieur transigé (\$/ha)
Abitibi-Témiscamingue	350	826	1 302
Bas St-Laurent	906	1 803	2 700
Capitale-Nationale	2 598	4 065	5 532
Centre-du-Québec	3 405	5 414	7 423
Chaudière-Appalaches-Nord	2 679	4 243	5 806
Chaudière-Appalaches-Sud	2 826	3 887	4 948
Estrie	3 033	3 603	4 173
Lanaudière	6 702	8 351	10 000
Laurentides	4 988	6 548	8 108
Mauricie	3 956	5 394	6 831
Montérégie-Est	6 019	8 741	11 463
Montérégie-Ouest	8 824	10 412	12 000
Outaouais	1 793	1 916	2 038
Saguenay – Lac-Saint-Jean	1 132	1 703	2 273

Annexe B : Prix de liste de différentes machineries

Selon le document *Machinery Cost Estimates: Tractors*, fait par la division de gestion d'entreprise agricole de l'université de l'Illinois, aux États-Unis (2005), le Tableau 26 présente une estimation du prix de liste de différents types de tracteurs selon leur puissance. Selon la norme ASABE D497.6. (2009), la durée de vie d'un tracteur deux roues motrices est de 12 000 heures et celle d'un tracteur quatre roues motrices est de 16 000 heures.

Tableau 26 : Prix de liste de tracteur selon le type et la puissance³

Type de tracteur	Prix de liste (\$)
48 kW	43 000
71 kW	62 000
78 kW	66 500
86 kW	72 500
104 kW	93 000
116 kW	99 500
127 kW	127 000
142 kW	135 000
160 kW RAA	149 000
175 kW RAA	162 000
190 kW RAA	174 500
209 kW 4RM	144 000
242 kW 4RM	164 000
280 kW 4RM	190 000
317 kW 4RM	206 500
336 kW 4RM	230 500
373 kW 4RM	244 000

³ RAA : Roues avant assistées, 4RM : 4 roues motrices.

Le Tableau 27 étale le prix d'acquisition de diverses machineries. Les données tirées de l'USDA (2005) font référence aux Figure 54 à Figure 58 et le broyeur rotatif de Savoie et Hébert (2010) fait référence à la Figure 59.

Tableau 27 : Prix d'acquisition et caractéristiques de machinerie

Équipement	Modèle	Coût d'acquisition (\$)	Durée de vie (h)	Puissance (kw)	Capacité t MS/h	Charge légale (tonne)	Source
Broyeur rotatif	Mobark 1100 (prix 2004)	350 000	10000	373	13,6		USDA, 2005
Camion à conteneur	Freightliner w/Stellar industrie hook-lift avec deux conteneurs (prix 2004)	138 000	16000	321		8,16	USDA, 2005
Camion à deux conteneurs	Freightliner w/Stellar industrie hook-lift avec remorque et deux conteneurs (prix 2004)	146 000	16000	321		19,05	USDA, 2005
Camion à copeaux 91,75 m ³ (53 pieds = 16,15 m)	(prix 2004)	125 000	16000	336		22,68	USDA, 2005
Camion à copeaux 113,15 m ³	(prix 2004)	135 000	16000	336		30,84	USDA, 2005
Broyeur rotatif attaché à un tracteur	Haybuster H1130	76 000					Savoie et Hébert, 2010 et Haybuster H1130, 2011
Broyeur rotatif électrique	Haybuster H1130E	140 000					Savoie et Hébert, 2010 et Haybuster H1130, 2011
Broyeur rotatif	Duratech 2009	185 000		242	11,0		Legroulx, 2011
Auto-chargeuse	TRB-2000	35 000	6 000				Lavoie, 2011 et ASABE, 2009



Figure 54 : Broyeur rotatif Morbark 1100 (USDA, 2005).



Figure 55 : Camion à conteneur (USDA, 2005).



Figure 56 : Camion à deux conteneurs (USDA, 2005).



Figure 57 : Camion à copeaux 91,75 m³ (53 pieds = 16,15 m) (USDA, 2005).



Figure 58 : Camion à copeaux 113,15 m³ (USDA, 2005).



Figure 59 : Broyeur rotatif Haybuster H1130 (Savoie et Hébert, 2010).

Annexe C : Équations empiriques de la masse de tiges de saule et de diamètres mesurés à 0,10 et à 1,20 m au dessus du sol

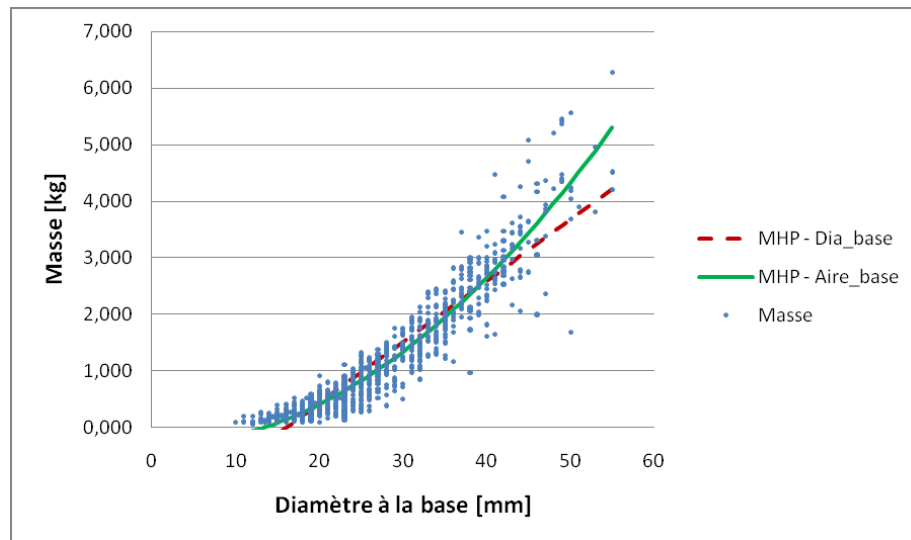


Figure 60 : Les données de Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) basées sur 1150 tiges de saule et la relation entre la masse et le diamètre des tiges ou la section transversale mesurée au point de coupe. Les tiges ont été coupées à 0,10 m au-dessus du sol.

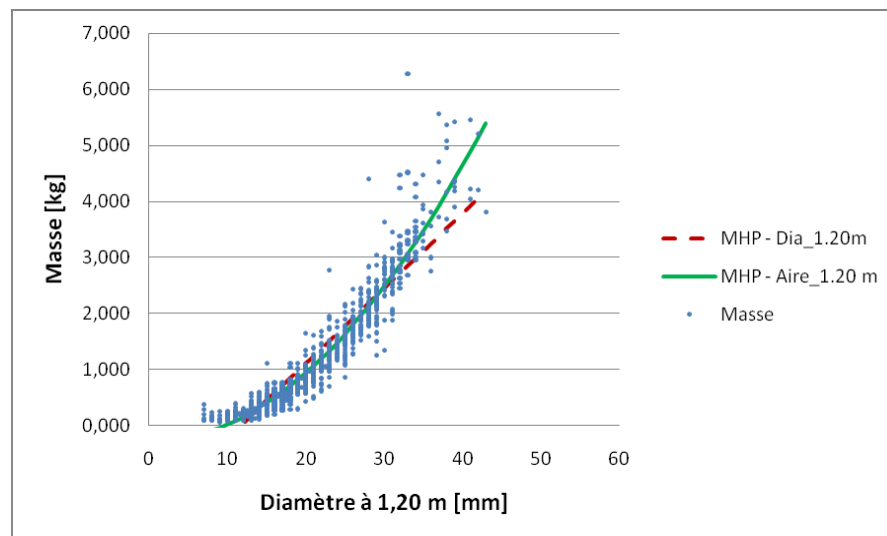


Figure 61 : Les données de Gagnon-Bouchard et Savoie (2009) basées sur 1150 tiges de saule et la relation entre la masse et le diamètre des tiges ou la section transversale mesurée à 1,20 m du sol.

Quatre relations linéaires ont été obtenues : deux en fonction du diamètre, deux en fonction de la section. En principe, la masse est fonction du volume (pour une densité fixe) donc la relation doit être meilleure avec la section qu'avec le diamètre seulement.

Équation 5 : Masse (M, en kg humide) en fonction du diamètre à la base (Db, mm)

$$M = 0,1082 D_b - 1,7392 \quad (R^2 = 0,871).$$

Équation 6 : Masse (kg humide) en fonction de la surface transversale à la base (Db, en mm)

$$M = 0,0024 (D_b \pi^2 / 4) - 0,3306 \quad (R^2 = 0,909).$$

Équation 7 : Masse (M, en kg humide) en fonction du diamètre à 1,20 m du sol (D, mm)

$$M = 0,1328 D - 1,5437 \quad (R^2 = 0,874).$$

Équation 8 : Masse (kg humide) en fonction de la surface transversale à 1,20 m du sol (D, en mm)

$$M = 0,0039 (D \pi^2 / 4) - 0,2804 \quad (R^2 = 0,924).$$

Les équations en fonction de la section sont préférées en raison du R^2 plus important et d'une bonne base théorique (la masse est proportionnelle à D^2 pour les cylindres et les cônes). Les équations ci-dessus doivent être utilisées pour des diamètres de l'ordre de 15 à 50 mm. Pour les petites tiges <14 mm de diamètre à la base, une règle simple consiste à supposer une masse moyenne de 36,5 g par tige. Pour les tiges de diamètre > 50 mm, les données sont insuffisantes pour permettre une estimation correcte. Plus de données sont nécessaires, où chaque tige (unité expérimentale) doit être pesée. Les équations, basées sur le diamètre à 0,1 m au-dessus du sol, sont utiles pour l'estimation de la masse de tiges

tombées sur le sol ou les tiges non coupées. Si une tige n'est pas pleine longueur, un deuxième diamètre doit être mesuré à la fin de la tige. La masse nette est estimée comme la différence de masse pleine de D1 de moins de masse pleine de D2. Par exemple, si une tige a un grand diamètre à la base de 38 mm et un petit diamètre de 22 mm au point le plus haut de la coupe, sa masse est 2391 g (estimation à 38 mm) moins 582 g (estimation à 22 mm), c'est à dire 1809 g net. Les équations, basées sur le diamètre à 1,20 m du sol, sont utiles pour les estimations pré-récolte.

Annexe D : Coordonnées des collaborateurs (sites de récolte)

Agro-Énergie (Personne contact : M. Francis Allard)

588, Ruisseau des Anges Sud
St-Roch de l'Achigan, Québec, Canada
J0K 3H0

Téléphone : (450) 588-0013

Fax : (450) 588-5675

Cellulaire : (514) 605-5675

<http://www.agroenergie.ca>

Domaine de la templerie (Personne contact : M. Roland Guillon)

312, New Erin Road
Godmanchester, Québec, Canada
J0S 1H0

Téléphone : (450) 264-9405

Fax : (450) 264-9405

<http://domainedelatemplerie.com>

Willow Shade Farm (Personne contact: M. Philippe Quinn)

406, New Erin Road
Godmanchester, Québec, Canada
J0S 1H0

Téléphone : (450) 264-5235

Plantations en Ontario (Personne contact : M. Derek Sidders)

Canadian Wood Fibre Centre
Natural Resources Canada
5320-122nd Street
Edmonton, AB T6H 3S5

Téléphone : (780) 435-7355

Annexe E : Fiches techniques pour le tracteur Fendt™ 818

SUMMARY OF OECD TEST 2263—NEBRASKA SUMMARY 492 FENDT 818 VARIO DIESEL

POWER TAKE-OFF PERFORMANCE

Power HP (kW)	Crank shaft speed rpm	Gal/hr (l/h)	lb/hp.hr (kg/kWh)	Hp.hr/gal (kW/hl)	Mean Atmospheric Conditions
MAXIMUM POWER AND FUEL CONSUMPTION					
Rated Engine Speed (PTO speed-1108 rpm)					
161.3 (120.3)	2099	10.28 (38.90)	0.440 (0.267)	15.69 (3.09)	
Standard Power Take-off Speed(1000rpm)					
169.2 (126.2)	1903	10.17 (38.49)	0.414 (0.252)	16.84 (3.28)	
Maximum Power (2hours)					
171.1 (127.6)	1796	9.95 (37.65)	0.401 (0.244)	17.20 (3.39)	
VARYING POWER AND FUEL CONSUMPTION					
161.3 (120.3)	2099	10.28 (38.90)	0.440 (0.267)	15.69 (3.09)	Air temperature
138.8 (103.5)	2123	9.12 (34.53)	0.453 (0.276)	15.22 (3.00)	60°F(19°C)
105.0 (78.3)	2144	7.21 (27.29)	0.473 (0.288)	14.57 (2.87)	Relative humidity
70.6 (52.7)	2165	5.34 (20.23)	0.522 (0.317)	13.22 (2.60)	30%
36.2 (27.0)	2186	3.60 (13.62)	0.686 (0.417)	10.05 (1.98)	Barometer
--	2203	1.99 (7.53)	--	--	29.7"Hg(100.7 kPa)

Maximum torque - 583 lb.-ft.(790Nm) at 1400 rpm
Maximum torque rise - 44.2%
Torque rise at 1700 engine rpm - 29%

DRAWBAR PERFORMANCE

(Unballasted-Front Drive Engaged)
FUEL CONSUMPTION CHARACTERISTICS

Power Hp (kW)	Drawbar pull lbs (kN)	Speed mph (km/h)	Crank- shaft speed rpm	Slip %	Fuel Consumption lb/hp.hr (kg/kWh)	Hp.hr/gal (kW/hl)	Temp.*F (°C)	Barom. inch Hg (kPa)
Maximum Power—Low Range								
139.7 (104.2)	11260 (50.09)	4.65 (7.49)	2101	2.8	0.508 (0.309)	13.76 (2.71)	162 (72)	61 (16)
75% of Pull at Maximum Power—Low Range								
107.5 (80.2)	8425 (37.48)	4.78 (7.70)	2134	2.0	0.531 (0.323)	13.16 (2.59)	158 (70)	61 (16)
50% of Pull at Maximum Power—Low Range								
72.8 (54.3)	5605 (24.92)	4.87 (7.84)	2158	1.4	0.581 (0.354)	12.03 (2.37)	151 (66)	61 (16)
75% of Pull at Reduced Engine Speed—Low Range								
108.0 (80.5)	8430 (37.49)	4.80 (7.73)	1475	2.0	0.441 (0.268)	15.86 (3.12)	160 (71)	57 (14)
50% of Pull at Reduced Engine Speed—Low Range								
72.3 (53.9)	5615 (24.97)	4.83 (7.77)	1463	1.4	0.467 (0.284)	14.97 (2.95)	154 (68)	57 (14)

Location of tests: DLG Testing Station for
Agricultural Machinery Max - Eyth - Weg 1,
D-64823, Gros-Umstadt, Germany

Dates of tests: March to May, 2004

Manufacturer: AGCO GmbH & Co. D-87616
Marktobendorf, Germany

FUEL and OIL: Fuel No. 2 Diesel Specific
gravity converted to 60°/60° F (15°/15°C) 0.829
Fuel weight 6.90 lbs/gal (0.8269 kg/l) Oil SAE
10W40 API service classification CD
Transmission lubricant SAE 10W40 Hydraulic
lubricant SAE 10W40 Front axle lubricant 85W/
90 gear oil, API GL-5

ENGINE: Make Deutz Diesel Type six
cylinder vertical with turbocharger and air to
air intercooler Serial No. 00000860836
Crankshaft lengthwise Rated engine speed
2100 Bore and stroke 3.858" x 4.961" (98.0 mm
x 126.0 mm) Compression ratio 18.0 to 1
Displacement 348 cu in (5702 ml) Starting system
12 volt Lubrication pressure Air cleaner two
paper elements and aspirator Oil filter one full
flow cartridge Oil cooler engine coolant heat
exchanger for crankcase oil, radiator for hydraulic
and transmission oil Fuel filter one paper element
Fuel cooler radiator for pump return fuel Muffler
underhood Exhaust vertical Cooling medium
temperature control thermostat and variable
speed fan

CHASSIS: Type front wheel assist Serial No.
718/22/0018 Tread width rear 60.0" (1524 mm)
to 120.0" (3048 mm) front 60.0" (1524 mm) to
88.0" (2235 mm) Wheel base 106.3" (2700 mm)
Hydraulic control system direct engine drive
Transmission Fendt Vario. A combination of
mechanical and hydrostatic sections allow an
infinite speed adjustment within the ranges noted.
The transmission has two mechanical ranges.
Nominal travel speeds mph (km/h) forward: Low
range 0-17 (0-28), high range 0-31 (0-50) reverse:
Low range 0-11 (0-17), high range 0-25 (0-40)
Clutch a foot pedal controls the hydrostatic oil
flow Brakes wet disc hydraulically operated by two
foot pedals which can be locked together Steering
hydrostatic Power take-off 540 rpm at 1931
engine rpm or 1000 rpm at 1903 engine rpm.
Unladen tractor mass 15960 lb (7240 kg)

DRAWBAR PERFORMANCE
(Unballasted-Front Drive Engaged)
MAXIMUM POWER AT SELECTED TRAVEL SPEEDS

Power Hp (kW)	Drawbar pull lbs (kN)	Speed mph (km/h)	Crank- shaft speed rpm	Slip %	Fuel Consumption lb/hp.hr (kg/kWh)	Temp. °F (°C) cool- ing med	Air dry bulb (°C)	Barom. inch Hg (kPa)
Low Range								
125.5 (93.6)	17430 (77.53)	2.70 (4.35)	2069	14.9	0.581 (0.353)	12.05 (2.37)	55 (68)	29.6 (100.2)
Low Range								
141.3 (105.4)	17190 (76.46)	3.08 (4.96)	1801	8.2	0.488 (0.297)	14.31 (2.82)	160 (71)	54 (12) (100.3)
Low Range								
143.8 (107.2)	13720 (61.03)	3.93 (6.32)	1801	4.1	0.475 (0.289)	14.72 (2.90)	169 (76)	61 (16) (99.8)
Low Range								
146.2 (109.0)	11460 (50.97)	4.78 (7.70)	1801	3.0	0.470 (0.286)	14.87 (2.93)	163 (73)	64 (18) (99.9)
Low Range								
145.2 (108.3)	9360 (41.63)	5.82 (9.36)	1801	2.4	0.472 (0.287)	14.82 (2.92)	160 (71)	63 (17) (99.9)
Low Range								
144.0 (107.4)	7935 (35.29)	6.81 (10.96)	1801	1.8	0.475 (0.289)	14.72 (2.90)	158 (70)	64 (18) (99.8)
Low Range								
142.3 (106.1)	6740 (29.98)	7.92 (12.74)	1802	1.5	0.483 (0.294)	14.72 (2.85)	162 (72)	64 (18) (99.8)
Low Range								
141.4 (105.4)	6035 (26.85)	8.79 (14.14)	1802	1.5	0.487 (0.296)	14.37 (2.83)	162 (72)	61 (16) (99.8)
High Range								
136.0 (101.4)	11115 (49.44)	4.59 (7.38)	1801	2.8	0.506 (0.308)	13.81 (2.72)	165 (74)	57 (14) (100.2)
High Range								
143.0 (106.6)	9405 (41.83)	5.70 (9.18)	1801	2.3	0.483 (0.294)	14.47 (2.85)	165 (74)	57 (14) (100.2)
High Range								
146.2 (109.0)	8055 (35.84)	6.80 (10.95)	1802	1.9	0.473 (0.288)	14.47 (2.91)	162 (72)	57 (14) (100.3)
High Range								
147.4 (109.9)	7145 (31.77)	7.74 (12.45)	1803	1.7	0.472 (0.287)	14.82 (2.92)	162 (72)	59 (15) (100.3)
High Range								
146.7 (109.4)	6140 (27.31)	8.96 (14.42)	1807	1.5	0.473 (0.288)	14.77 (2.91)	160 (71)	57 (14) (100.2)

REPAIRS AND ADJUSTMENTS: No repairs or adjustments.

REMARKS: All test results were determined from observed data obtained in accordance with official OECD test procedures. The performance results on this summary were taken from OECD tests conducted under the Code II Test Code procedure.

We, the undersigned, certify that this is a true summary of data from OECD Report No. 2263, Nebraska Summary 492, December 15, 2005.

Leonard L. Bashford
Director

M.F. Kocher
V.I. Adamchuk
J.A. Smith
Board of Tractor Test Engineers

TIRES AND WEIGHT

Rear Tires-No., size, ply & psi (kPa)
Front Tires-No., size, ply & psi (kPa)
Height of Drawbar
Static Weight with operator-Rear
-Front
-Total

Tested Without Ballast

Two 650/65R42**; 12(80)
Two 540/65R30**; 12(80)
19.7in (500 mm)
9765 lb (4430 kg)
6360 lb (2885 kg)
16125 lb (7315 kg)

TRACTOR SOUND LEVEL WITH CAB	Front Wheel Drive	
	Engaged dB(A)	Disengaged dB(A)
Maximum Sound level	76.0	76.0
Sound level at 4.6 mph (7.5 km/h) - no load	68.0	68.0
Bystander	--	--

THREE POINT HITCH PERFORMANCE (OECD Static Test)

CATEGORY: III

Quick Attach: Walterscheid lower links

Maximum force exerted through whole range: 13250 lbs (58.9 kN)

i) Opening pressure of relief valve:

NA

one outlet set

two outlet sets combined

Sustained pressure of the open relief valve:

2900 psi (200 bar)

2900 psi (200 bar)

ii) Pump delivery rate at minimum pressure:

20.9 GPM (79.1 l/min)

29.5 GPM (111.5 l/min)

iii) Pump delivery rate at maximum

hydraulic power:

20.5 GPM (77.5 l/min)

26.3 GPM (99.6 l/min)

Delivery pressure:

2465 psi (170 bar)

2685 psi (185 bar)

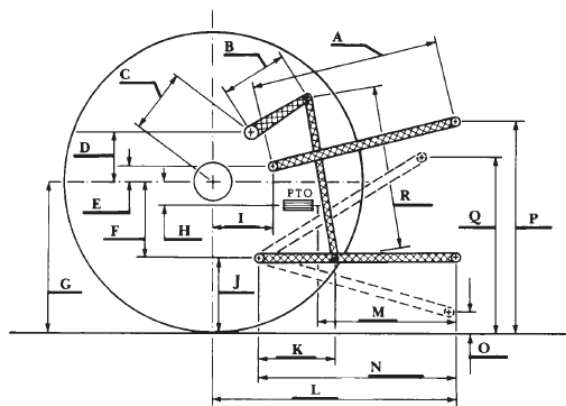
Power:

29.4 HP (21.9 kW)

41.2 Hp (30.7 kW)

HITCH DIMENSIONS AS TESTED—NO LOAD

	inch	mm
A	29.1	740
B	13.8	350
C	19.3	390
D	15.4	315
E	9.4	240
F	10.0	255
G	55.6	905
H	2.2	55
I	16.1	410
J	25.6	650
K	26.2	665
L	45.1	1145
M	25.0	635
N	99.4	1000
O	9.1	230
P	52.6	1335
Q	38.6	980
R	30.5	775



Agricultural Research Division
 Institute of Agriculture and Natural Resources
 University of Nebraska-Lincoln
 Darrell Nelson, Dean and Director

Annexe F : Résultats de régression linéaire selon la méthode d'analyse par élimination graduelle

Les huit variables dépendantes (Y1 à Y8 dans le Tableau 12 ont été analysées en fonction des huit variables indépendantes (X1 à X8 dans le Tableau 11 et Tableau 28). Chacune des variable dépendante est exprimée sous forme de régression linéaire par élimination graduelle aux tableaux 29 à 36. Seulement les variables indépendantes significatives ($p < 0.05$) sont retenues dans le modèle final.

Tableau 28: Variables indépendantes et plage de valeurs expérimentales

Xi	Description	Plage évaluée pour analyse de sensibilité		
		Valeur minimale	Valeur maximale	Moyen
X1	Culture (Saule = 1; Saule + Peuplier = 1,5; Peuplier = 2)	1	2	1,5
X2	Diamètre moyen des tiges ≥ 10 mm à 1,3 m du sol (mm)	13	28	19,3
X3	Diamètre maximum des tiges ≥ 10 mm à 1,3 m du sol (mm)	23	50	35
X4	Nb de tiges par hectare avec un diamètre: < 10 mm à 1,3 m du sol	14550	192400	67642
X5	Nb de tiges par hectare avec un diamètre: ≥ 10 mm à 1,3 m du sol	17300	98000	56168
X6	Teneur en eau (%)	40,8%	56,0%	48,60%
X7	Présence de feuilles (Oui = 1/Non = 0)	0	1	NA
X8	Rendement récolté (t MS/ha)	9,7	31,8	19,5

Tableau 29: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y1, la masse moyenne des balles (kg MH)

Y1 Masse moyenne des balles (kg MH)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,672423824	X2	0,757385729
2	7	0,669121407	X3	0,701537242
3	6	0,664465986	X4	0,410468062
4	5	0,644130647	X8	0,170959106
5	4	0,586635064	X5	0,172422476
6	3	0,525583341	X6	0,25665991
7	2	0,481599713		
$Y1 = 271,80 + 122,97 * X1 + 61,83 * X7$				

Tableau 30: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y2, la densité moyenne des balles (kg MH/m³)

Y2 Densité moyenne des balles (kg MH/m ³)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,661985478	X1	0,833982536
2	7	0,660420972	X4	0,699825343
3	6	0,65558496	X8	0,5817364
4	5	0,646386024	X3	0,127282427
5	4	0,574199738	X5	0,117470844
6	3	0,489556365	X2	0,222737967
7	2	0,434496466	X7	0,184907338
8	1	0,366648523		
$Y2 = 58,25 + 436,16 * X6$				

Tableau 31: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y3, la masse moyenne des balles (kg MS)

Y3 Masse moyenne des balles (kg MS)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,558469678	X2	0,712902293
2	7	0,552141041	X3	0,686202554
3	6	0,545132878	X4	0,343644638
4	5	0,508288763	X6	0,314819127
5	4	0,466940228	X8	0,284704051
6	3	0,419824215		
$Y3 = 113,21 + 56,10 * X1 + 0,000616 * X5 + 27,001 * X7$				

Tableau 32: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y4, la densité moyenne des balles (kg MS/m³)

Y4 Densité (kg MS/m ³)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,455254913	X6	0,948049569
2	7	0,45501176	X1	0,934254641
3	6	0,454658835	X8	0,603263057
4	5	0,441712151	X4	0,530736542
5	4	0,423897924	X3	0,149257743
6	3	0,328061006	X2	0,114519312
7	2	0,202281914	X5	0,181939661
8	1	0,105191969	X7	0,175507031
Aucune variable indépendante n'explique la variation de Y4				

Tableau 33: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y5, la capacité moyenne (balle/h)

Y5 Capacité (balle/h)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,75976528	X5	0,754969412
2	7	0,757293043	X4	0,66545098
3	6	0,752937812	X6	0,527077441
4	5	0,744202118	X1	0,270970806
5	4	0,718192185	X7	0,296277107
6	3	0,694498182		
$Y5 = 15,50 + 1,14 * X2 - 0,654 * X3 + 1,04 * X8$				

Tableau 34: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y6, la capacité moyenne (t MS/h)

Y6 Capacité (t MS/h)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,795319034	X1	0,787199369
2	7	0,793745159	X5	0,609656582
3	6	0,788566968	X4	0,181897799
4	5	0,753185467		
$Y6 = 9,90 + 0,45001 * X2 - 0,172 * X3 - 17,15 * X6 + 2,05 * X7 + 0,143 * X8$				

Tableau 35: Étapes de calculs de régression linéaire pour Y7, la capacité moyenne
(t MH/h)

Y ₇ Capacité (t MH/h)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,812386085	X6	0,867303085
2	7	0,811834705	X1	0,834470518
3	6	0,811051402	X5	0,55841419
4	5	0,805346176	X4	0,187808281
5	4	0,776407182		
$Y_7 = 2,75 + 0,899 * X2 - 0,354 * X3 + 3,88 * X7 + 0,3106 * X8$				

Tableau 36: Étapes de calculs de régression linéaire pour la consommation de carburant
(l/t MS)

Y8 Consommation de carburant (l/t MS)				
Étape	Nb de Variables dépendantes	R ²	Variable la moins significative	P de la variable la moins significative
1	8	0,270421017	X6	0,995011352
2	7	0,270418019	X1	0,955997237
3	6	0,270206681	X4	0,811750653
4	5	0,266601527	X5	0,688859447
5	4	0,257142497	X8	0,384496629
6	3	0,214377241	X3	0,19267616
7	2	0,116929426	X2	0,387396608
8	1	0,073352013	X7	0,262065585
Aucune variable indépendante n'explique la variation de Y8				

Suite à la production d'équations de régression linéaire, une étude de sensibilité a été réalisée à l'aide des valeurs du Tableau 28. Le Tableau 37 montre les résultats pour ces études de sensibilité.

Tableau 37: Résultats d'analyse de sensibilité de régression linéaire

Variable dépendante	Variable indépendante étudiée	Min	Max	Moy	Note
Y1 (kg MH)	X1	394,8	517,7		X7 = 0
Y1 (kg MH)	X7	456,3	518,1		
Y2 (kg MH/m ³)	X6	236,2	302,5	270,2	
Y3 (kg MS)	X1	203,9	260,0		X7 = 0
Y3 (kg MS)	X5	208,0	257,7		X7 = 0
Y3 (kg MS)	X7	232,0	259,0		
Y5 (balle/h)	X2	27,8	44,9		
Y5 (balle/h)	X3	42,6	25,0		
Y5 (balle/h)	X8	24,7	47,7		
Y5 (balle/h)				34,9	Utilisation des X moyens (X2, X3, X8)
Y6 (t MS/h)	X2	4,2	11,0		X7 = 0
Y6 (t MS/h)	X3	9,0	4,4		X7 = 0
Y6 (t MS/h)	X6	8,4	5,8		X7 = 0
Y6 (t MS/h)	X7	7,0	9,1		
Y6 (t MS/h)	X8	5,6	8,8		X7 = 0
Y6 (t MS/h)				7,0	X7 = 0 et utilisation des X moyen (X2, X3, X6, X8)
Y7 (t MH/h)	X2	8,1	27,9		X7 = 0
Y7 (t MH/h)	X3	17,9	8,4		X7 = 0
Y7 (t MH/h)	X7	13,8	17,7		X7 = 0
Y7 (t MH/h)	X8	10,7	17,6		X7 = 0
Y7 (t MH/h)				13,8	

Masse moyenne des balles (Y1 en kg MH) : Selon l'équation Y1 ($R^2=0,48$), la masse moyenne humide des balles serait de 395 kg MH pour le saule ($X1 = 1$) et de 518 kg MH pour le peuplier ($X1 = 2$). De plus, la présence de feuilles ($X7 = 1$) lors de la récolte augmenterait la masse des balles en moyenne de 62 kg. Le coefficient de détermination (R^2) est plutôt faible, ce qui indique que d'autres facteurs non mesurés expliqueraient la variation de la masse des balles. Il peut paraître étonnant que la teneur en eau ($X6$) n'influençait pas la masse humide des balles, mais c'était la dernière variable à être éliminée de l'analyse au Tableau 29 ($p = 0,26$). L'ajustement du Biobaler® serait un facteur important pour influencer Y1.

Densité moyenne des balles (Y2 en kg MH/m³) : Selon l'équation Y2 ($R^2=0,37$), la densité moyenne des balles humides serait seulement influencée par la teneur en eau des balles ($X6$). Plus la teneur en eau est importante, plus la densité serait grande. Selon Y2, la densité moyenne des balles varie entre 236 et 303 kg MH/m³ et est en moyenne de 270 kg MH/m³. Il est noté que le coefficient de détermination (R^2) est plutôt faible.

Masse moyenne des balles (Y3 en kg MS) : Selon l'équation Y3 ($R^2=0,42$), la masse moyenne des balles est de 204 kg MS pour le saule ($X1 = 1$) et de 260 kg MS pour le peuplier ($X1 = 2$). De plus, la masse moyenne des balles est plus importante si le nombre de tiges grosse par hectare ($X5$) est élevé et vice-versa; 208 kg MS pour 17300 tiges/ha et 258 kg MS pour 98000 tiges/ha. Finalement, la présence de feuilles ($X7=1$) lors de la récolte ajouterait 27 kg MS par balle en moyenne. Il est noté que le coefficient de détermination (R^2) est plutôt faible.

Densité moyenne des balles (Y4 en kg MS/m³) : Aucun modèle n'a pu être déterminé avec un seuil de confiance de 95% à partir des huit variables indépendantes mesurées.

Capacité (Y5 en balles/h) : Selon l'équation Y5 ($R^2=0,69$), la capacité de récolte en balles/h dépend du diamètre moyen des tiges ($X2$), du diamètre maximum des tiges ($X3$) et du rendement récolté ($X8$). Plus le diamètre moyen des tiges est important, plus la capacité est importante et vice-versa (27,8 balles/h pour 13 mm et 44,9 balles/h pour 28 mm). Cependant, plus le diamètre maximum des tiges est grand, plus la capacité diminue et vice-versa (42,6 balles/h pour 23 mm et 25,0 balles/h pour 50 mm). En effet, il a été remarqué que les grosses tiges diminuaient considérablement les capacités du Biobaler® lors des essais. De plus, lorsque le rendement récolté est important, la capacité (balles/h) augmente (24,7 balles/h pour 9,7 t MS/ha et 47,7 balles/h pour 31,8 t MS/ha). Finalement, lorsque les variables indépendantes ont des valeurs moyennes, la capacité moyenne est de 34,9 balles/h.

Capacité (Y6 en t MS/h) : Selon l'équation Y6 ($R^2=0,75$), la capacité de récolte en t MS/h dépend du diamètre moyen des tiges ($X2$), du diamètre maximum des tiges ($X3$), de la teneur en eau ($X6$), de la présence de feuilles à la récolte ($X7$) et du rendement récolté ($X8$). Plus le diamètre moyen des tiges est important, plus la capacité est importante et vice-versa (4,2 t MS/h pour 13 mm et 11,0 t MS/h pour 28 mm). Cependant, plus le diamètre maximum des tiges est grand, plus la capacité diminue et vice-versa (9,0 t MS/h pour 23 mm et 4,4 t MS/h pour 50 mm). Aussi, un rendement récolté élevé a tendance à faire augmenter la capacité (5,6 t MS/h pour 9,7 t MS/ha et 8,8 t MS/h pour 31,8 t MS/ha). Finalement, lorsque les variables indépendantes ont des valeurs moyennes et en présence de feuilles, la capacité est de 9,1 t MS/h. Elle est de 7,0 t MS/h en absence de feuilles.

Capacité (Y7 en t MH/h) : Selon l'équation Y7 ($R^2=0,78$), la capacité de récolte en t MH/h dépend du diamètre moyen des tiges (X2), du diamètre maximum des tiges (X3), de la présence de feuilles à la récolte (X7) et du rendement récolté (X8). Plus le diamètre moyen des tiges est important, plus la capacité est importante et vice-versa (8,1 t MH/h pour 13 mm et 27,9 t MH/h pour 28 mm). Cependant, plus le diamètre maximum des tiges est grand, plus la capacité diminue et vice-versa (17,9 t MH/h pour 23 mm et 8,4 t MH/h pour 50 mm). Aussi, un grand rendement récolté a tendance à faire augmenter la capacité (10,7 t MH/h pour 9,7 t MS/ha et 17,6 t MH/h pour 31,8 t MS/ha). Finalement, lorsque les variables indépendantes ont des valeurs moyennes et en présence de feuilles, la capacité est de 17,7 t MH/h. Elle est de 13,8 t MH/h en l'absence de feuilles.

Consommation de carburant (Y8 en l/ t MS) : Aucun modèle n'a pu être déterminé avec un seuil de confiance de 95% à partir des variables indépendantes mesurées.

Annexe G : Données de pressage en milieu naturel

Tableau 38 : Performances de pressage du Biobaler® en milieu naturel

Site	Date	Nb de balles	Masse moyenne des balles (kg MH)	Teneur en eau (%)	Masse moyenne des balles (kg Ms)	Balle/h	Capacité (t MS/h)	Rendement (t MS/ha)	Consommation de carburant (l/t MS)
Klepac et Rummer (2009), modifié	mars-09	26	455	38,1%	282	14,7	4,1	15,7	4,46
Québec, Ste-Perpétue A	2009-09-09	7	451	46,9%	239	17,0	4,1	8,0	6,87
Québec, Ste-Perpétue B	2009-09-09	1	495	47,1%	262	11,6	3,0	2,4	23,10
Québec, Ste-Perpétue C	2009-09-09	10	457	46,1%	246	19,5	4,8	7,2	5,05
Minnesota, Madelia	2009-09-18	15	491	47,1%	260	12,8	3,3	8,6	6,23
Minnesota, Faribault C	2009-09-19	8	425	36,7%	269	16,9	4,5	5,2	6,26
Minnesota, Ogilvie A	2009-09-21	17	472	45,2%	259	16,0	4,2	8,9	5,44
Minnesota, Ogilvie B	2009-09-21	23	493	51,4%	240	18,0	4,3	16,5	5,40
Minnesota, Hinckley	2009-09-22	4	528	36,0%	338	2,4	0,8	1,6	14,35
Minnesota, Hibbing	2009-09-24	28	513	50,8%	252	15,6	3,9	9,8	4,98
Ontario, Hearst	2010-09-27	11	464	48,6%	239	9,2	2,2	10,7	13,58
Ontario, Cochrane	2010-09-30	11	633	52,7%	299	8,9	2,7	4,2	7,15
Québec, Pouлары A #1	2010-10-02	27	469	50,0%	234	19,7	4,6	15,0	3,78
Québec, Pouлары A #2	2010-10-02	20	469	50,0%	234	18,1	4,2	17,6	6,85
Québec, Pouлары B	2010-10-03	6	499	49,4%	252	7,0	1,8	7,6	11,23
Moyenne	2009-2010	14	488	46,4%	260	13,8	3,5	9,3	8,32
Minimum	mars-09	1	425	36,0%	234	2,4	0,8	1,6	3,78
Maximum	2010-10-03	28	633	52,7%	338	19,7	4,8	17,6	23,10

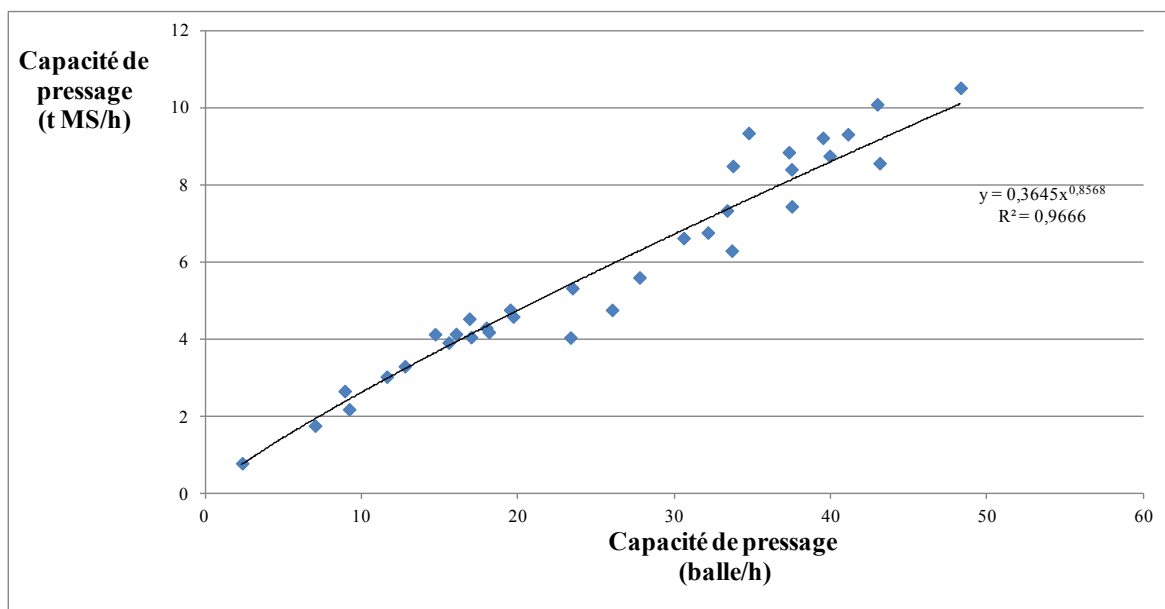


Figure 62 : Courbe de régression de la capacité (t MS/h) en fonction de la capacité (balle/h) pour toutes les données provenant des milieux naturels (Tableau 38) et des plantations (Tableau 10). Cette relation a théoriquement une pente de 1, la variation est due à l'inhomogénéité des balles (masse et teneur en eau).

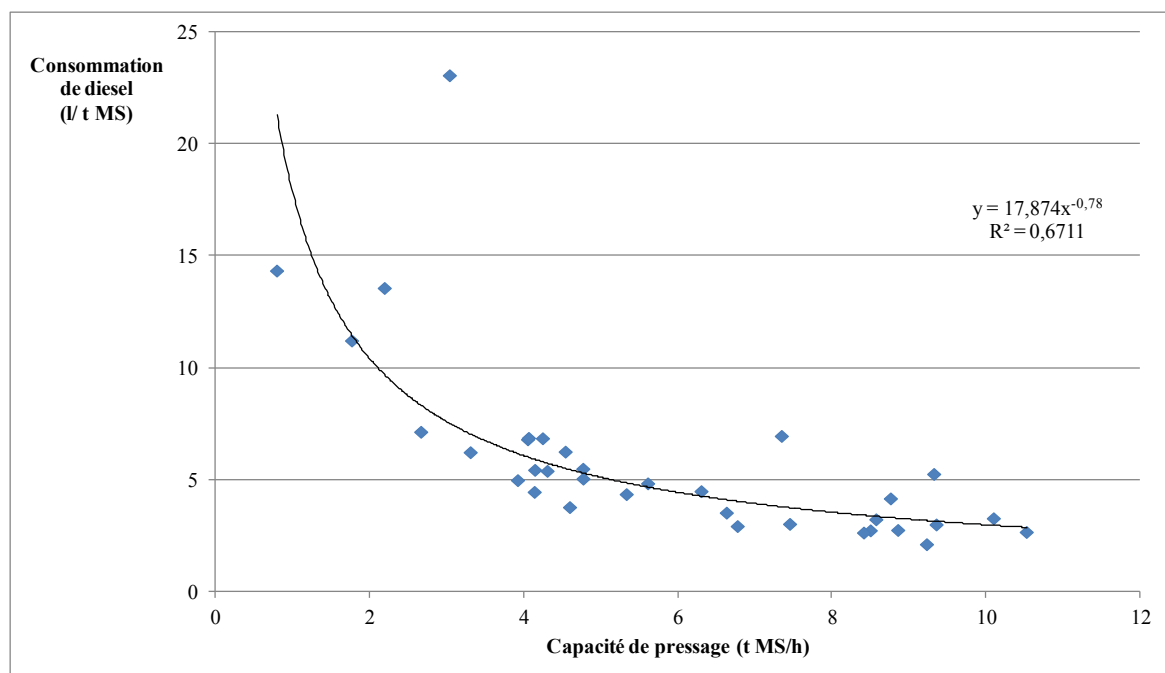


Figure 63 : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction de la capacité (t MS/h) pour toutes les données de milieux naturels et de plantations.

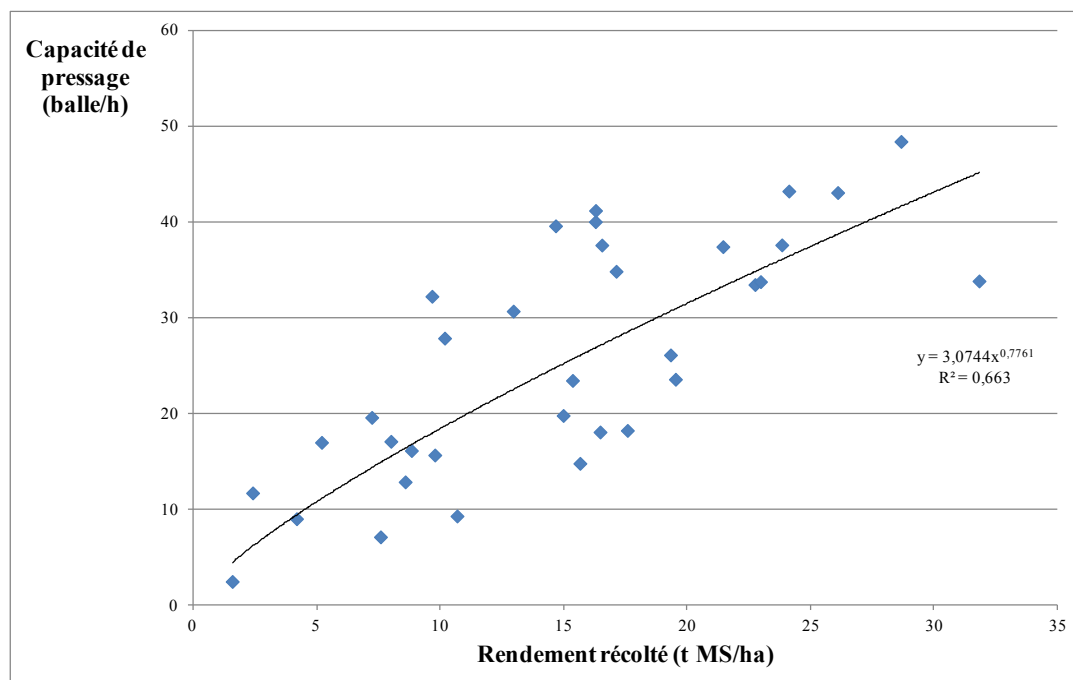


Figure 64 : Courbe de régression de la capacité (balle/h) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.

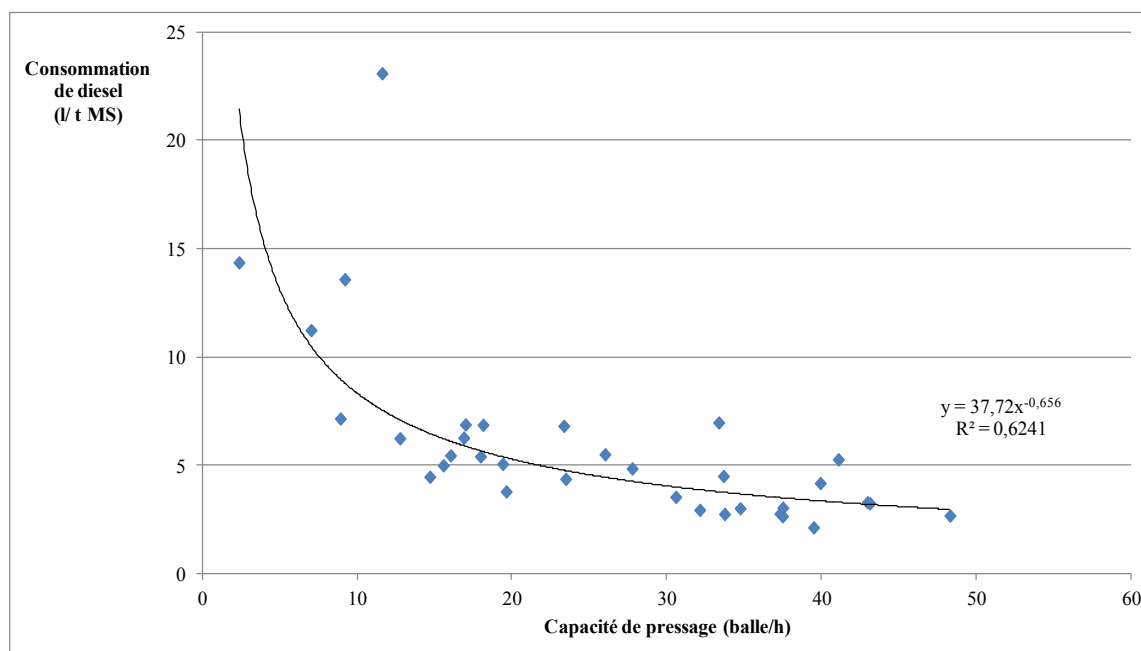


Figure 65 : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction de la capacité (balle/h) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.

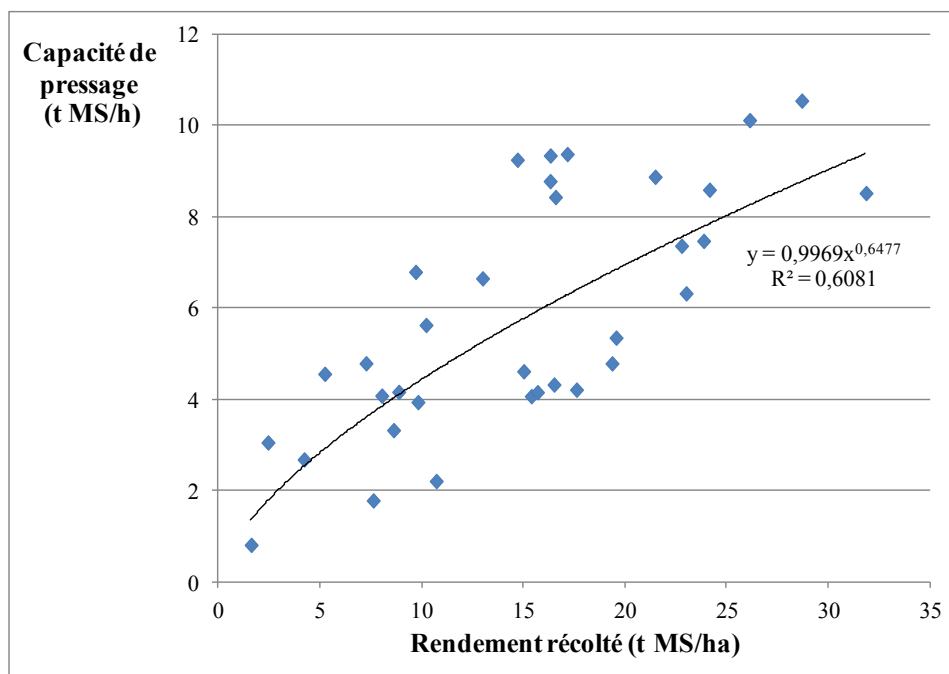


Figure 66 : Courbe de régression de la capacité (t MS/h) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.

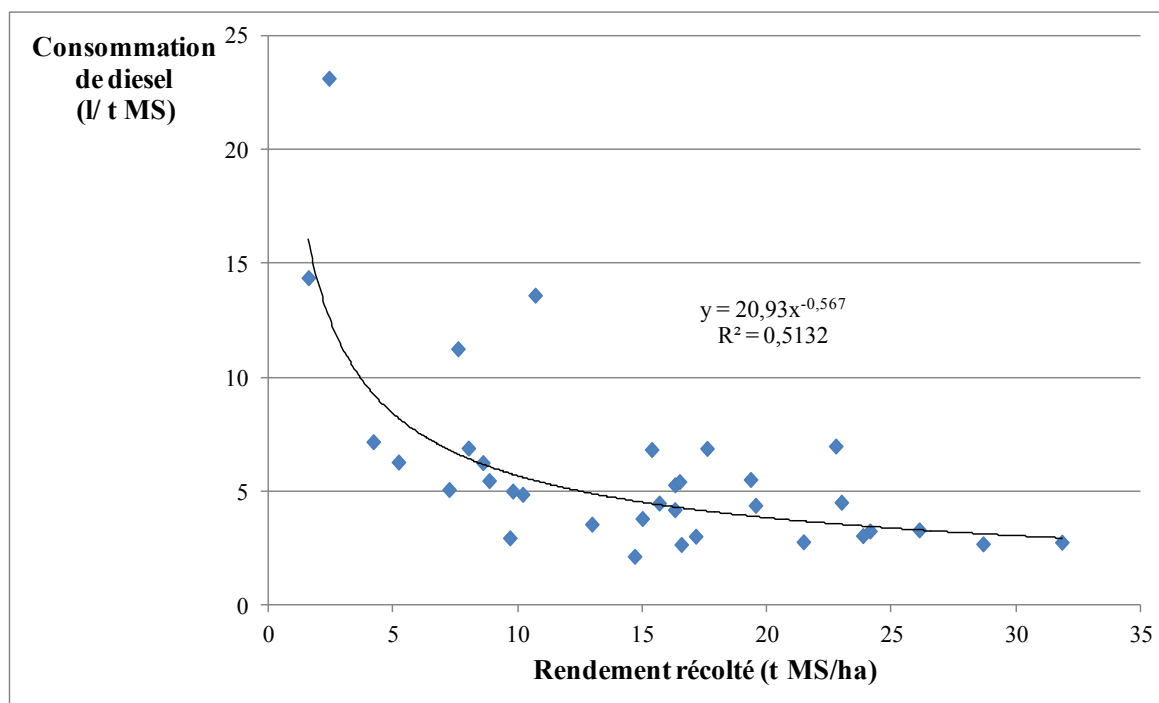


Figure 67 : Courbe de régression de la consommation de diesel (l/t MS) en fonction du rendement récolté (t MS/ha) pour toutes les données en milieux naturels et en plantations.

Annexe H : Prix de la ficelle et des filets à balle

Tableau 39 : Prix de la ficelle et des filets dans la région de la ville de Québec le 18 novembre 2010

<u>Fournisseur</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Résistance (lbs)</u>	<u>Longueur (pi)</u>	<u>Prix (\$)</u>
Unicoop	Polypropylène	18	2 x 9000	26,98 \$
	Polypropylène	20	2 x 9000	29,98 \$
	Polypropylène	13	2 x 20000	42,98 \$
BMR	Polypropylène	13	2 x 10 000	21,38 \$
	Polypropylène	18	2 x 14 000	29,38 \$
	Polypropylène	13	2 x 20 000	43,78 \$
Meunerie Soucy	Polypropylène	18	2 x 9000	28,00 \$
	Polypropylène	20	2 x 9000	31,00 \$
L'outilleur Agricole	Polypropylène	13	2 x 20 000	40,75 \$
	Polypropylène	13	2 x 10 000	19,00 \$

Prix et disponibilité filet à balle

<u>Fournisseur</u>	<u>Dimension</u>	<u>Prix (\$)</u>
Meunerie Soucy	48" x 9840 pi	195,00 \$
L'outilleur Agricole	48 " x 9840 pi	220,00 \$
Unicoop	48 " x 9840 pi	234,98 \$

* la ficelle 13 lbs est destinée aux balles rondes

** la ficelle 18 et 20 lbs est destinée les balles carrées

Tableau 40 : Calculs du coût d'attachement des balles

**Prix moyen de ficelage d'une balle ronde de biomasse
avec le Biobaler avec de la corde à balle (13 lbs x 2 rouleaux x 20 000 pi)**

<u>Fournisseur</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Résistance (lbs)</u>	<u>Longueur (pi)</u>	<u>Prix (\$) 18/11/2010</u>
Unicoop	Polypropylène	13	2 x 20 000	42,98 \$
BMR	Polypropylène	13	2 x 20 000	43,78 \$
L'outilleur Agricole	Polypropylène	13	2 x 20 000	40,75 \$

<u>Paramètres</u>	<u>Valeurs</u>	<u>Unités</u>
Prix moyen pour 2 rouleaux de ficelle de 20 000 pi (13lbs) :	42,50	\$
Diamètre moyen des balles :	1,28	m
	4,20	pi
Nombre de tours de ficelle par balle :	18	tours

Formule

Prix de ficelage par balle = Prix / ((2 x 20 000) / (πD X nb tour)) = 0,25\$

Annexe I : Estimation des coûts de récolte pour chaque méthode de récolte

Tableau 41 : Données moyennes de récolte pour l'estimation des coûts de récolte

Donnée	Variable	Formule	Unité	Valeur
Heure de récolte en plantation	TempsRécoltePlan		Heure cédulée (h)	576
Heure de récolte en milieu naturel	TempsRécolteNat		Heure cédulée (h)	880
Heure de récolte totale	TempsRécolte		Heure cédulée (h)	1456
Teneur en eau moyenne des balles en plantation	TEEBallePlant		%	48,62%
Teneur en eau moyenne des balles en milieu naturel	TEEBalleNat		%	46,40%
Teneur en eau moyenne des balles	TEEBalle	$\left(\frac{\text{TempsRécoltePlan}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{TEEBallePlant}\right) + \left(\frac{\text{TempsRécolteNat}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{TEEBalleNat}\right)$	%	47,28%
Masse moyenne sèche des balles en plantation	MasseBalleMSPlant		Kg MS	218
Masse moyenne des balles en milieu naturel	MasseBalleMSNat		Kg MS	261
Masse moyenne des balles	MasseBalleMS	$\left(\frac{\text{TempsRécoltePlan}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{MasseBallePlant}\right) + \left(\frac{\text{TempsRécolteNat}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{MasseBalleNat}\right)$	Kg MS	244
Masse moyenne des balles	MasseBalleMH	$\frac{\text{MasseBalleMS}}{(1-\text{TEEBalle})}$	Kg MH	463,44
Capacité de pressage en plantation	CapBiobalerPlant		t MS/h	7,69
Capacité de pressage en milieu naturel	CapBiobalerNat		t MS/h	3,51
Capacité de pressage moyen au prorata du nombre d'heures de récolte	CapBiobaler	$\left(\frac{\text{TempsRécoltePlan}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{CapBiobalerPlant}\right) + \left(\frac{\text{TempsRécolteNat}}{\text{TempsRécolte}} \times \text{CapBiobalerNat}\right)$	t MS/h	5,16
Capacité de pressage moyen au prorata du nombre d'heures de récolte	CapBiobalerMH	$\frac{\text{CapBiobaler}}{(1-\text{TEEBalle})}$	t MH/h	9,79
Capacité de pressage moyen au prorata du nombre d'heures de récolte	CapBiobalerBalle	$\text{CapBiobaler} \times 1000 / \text{MasseBalleMS}$	balle/h	21,13

Donnée	Variable	Formule	Unité	Valeur
Capacité manutention pour autochargeuse en plantation	CapChargeurBallePlant		t MS/h	12,00
Capacité manutention pour autochargeuse en milieu naturel (prorata)	CapChargeurBalleNat	$\frac{CapBiobalerNat}{CapBiobalerPlant} \times CapChargeurBallePlant$	t MS/h	5,48
Capacité manutention moyenne pour autochargeuse	CapChargeurBalle	$\frac{CapBiobaler}{CapBiobalerPlant} \times CapChargeurBalle$	t MS/h	8,06
Capacité manutention moyenne pour autochargeuse	CapChargeurBalleMH	$\frac{CapChargeurBalle}{(1-TEEBalle)}$	t MH/h	15,28
Capacité manutention moyenne pour autochargeuse	CapChargeurBalleBalle	CapChargeurBalle x 1000 / MasseBalleMS	balle/h	32,98
Capacité de broyage avec puissance supérieure à 242 kW	CapBroyeur		t MS/h	11,00
Capacité de broyage avec puissance supérieure à 242 kW	CapBroyeurMH	$\frac{CapBroyeur}{(1-TEEBalle)}$	t MH/h	20,86
Capacité de broyage avec puissance de 190 kW (pdf)	CapBroyeurPDF	$CapBroyeur \times \frac{190}{231}$	t MS/h	9,05
Capacité de broyage avec puissance de 190 kW (pdf)	CapBroyeurMHPDF	$\frac{CapBroyeurPDF}{(1-TEEBalle)}$	t MH/h	17,16

Tableau 42 : Estimation des coûts de récolte : méthode 1

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster HI130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
# Machine			#	1	2	3	4	5	
Utilisé avec ...	# Machine				1	1 et 5	5		
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	37,03	32,98		
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	9,05	8,06		
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	21 538	21 538	21 538	21 538	21 538	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	5 263	5 263	5 263	5 263	5 263	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	194 500,00	150 000,00	76 000,00	35 000,00	84 750,00	540 250,00
Puissance	Puissance		kW	190	-	-	-	86	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	10000	6000	12000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	10	6	17	9	10	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20%	10%	20%	10%	20%	
Taux d'utilisation	%Util		%	70%	70%	70%	70%	70%	
Taux de réparation et de maintenance	%R&M		%	100%	150%	80%	100%	100%	
Taux d'intérêt	%Int		%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster H1130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
Coût d'assurance et de taxes	%AssTaxe		%	3,5%	2,0%	2,0%	2,0%	3,5%	
Taux de consommation de carburant	%ConsCarb		l/kWh	0,22				0,22	
Coût du carburant	\$Diesel		\$/l	0,75				0,75	
Taux de coût de lubrification	%Lub		%	36,8%	18,4%	15,0%	15,0%	36,8%	
Coût de main-d'œuvre	\$Hor		\$/h	15,60 \$				15,60 \$	
Coût de main-d'œuvre, tient en compte du travail sans opérateur	\$HorRéel		\$/h	9,93 \$				15,60 \$	
Nb d'heures cédulées	TempsCédulé		h/an	2287	1456	831	933	1764	
Heures de production	TempsProd	TempsCédulé X %Util	h/an	1601	1019	582	653	1235	
1. Calculs de valeurs									
Valeur de revente	\$Revente	\$Acquisition X %Revente	\$	38 900,00	15 000,00	15 200,00	3 500,00	16 950,00	
Amortissement annuel	\$AmortisAnnuel	(\$Acquisition - \$Revente) / Durée Vie	\$	15 568,50	22 932,00	3 536,58	3 428,97	6 976,69	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster H1130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
Valeur moyenne de la machine	ValeurMoyMachine	$(\$Acquisition + \$Revente) / 2$	\$	116 700,00	82 500,00	45 600,00	19 250,00	50 850,00	
2. Coûts de propriétés									
Coût d'intérêts	\$Int	$ValeurMoyMachine \times \%Int$	\$/an	5 835,00	4 125,00	2 280,00	962,50	2 542,50	
Coûts d'assurance et de taxes	\$AssTaxe	$ValeurMoyMachine \times \%AssTaxe$	\$/an	4 084,50	1 650,00	912,00	385,00	1 779,75	
Coût de propriété annuel	\$Prop	$\$AmortisAnnuel + \$Int + \$AssTaxe$	\$/an	25 488,00	28 707,00	6 728,58	4 776,47	11 298,94	
Coût de propriété par heure cédulée	\$PropTempsCédulé	$\$Prop / TempsCédulé$	\$/h	11,14	19,72	8,10	5,12	6,41	
Coût de propriété par heure de production	\$PropTempsProd	$\$Prop / TempsProd$	\$/h	15,92	28,17	11,57	7,31	9,15	
3. Coûts d'opérations									
Coût de carburant	\$CarbHor	$Puissance \times \%ConsCarb \times \$Diesel$	\$/h	31,69				14,34	
Coût de lubrification	\$LubHor	$\$CarbHor \times \%Lub$	\$/h	11,65	5,83	4,75	2,15	5,28	
Coût de maintenance et de réparation	\$R&M	$\$AmortisAnnuel \times \%R\&M / HeureProd$	\$/h	9,73	33,75	4,86	5,25	5,65	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster H1130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
Coût de main- d'œuvre, tient en compte du travail sans opérateur (heure prod)	\$HorRéalProd	\$HorRéal / %Util	\$/h	14,19				22,29	
Coût de ficelle	\$FicelleBalle		\$/balle		0,25				
Coût de ficelle	\$Ficelle	CapBalleHeure X \$FicelleBalle	\$/h		5,28				
Coût d'opération par heure de production	\$OpHeureProd	\$CarbHor + \$LubHor + \$R&M + (\$HorRéal / %Util) + \$Ficelle	\$/h	67,25	44,86	9,62	7,40	47,56	
Coût d'opération par heure cédulée	\$OpHeureCédulé	\$OpHeureProd X %Util	\$/h	47,07	31,40	6,73	5,18	33,29	
4. Coûts totaux									
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	83,17	73,03	21,18	14,71	56,71	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	58,22	51,12	14,83	10,30	39,69	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	25,30	14,14	2,34	1,83	13,30	56,92
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	6,18	3,46	0,57	0,45	3,25	13,91

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster H1130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
Coût annuel	\$Annuel	$\$TotalTempsProd \times$ $HeureProd$	\$/an	133 145,62	74 431,63	12 322,43	9 610,51	70 020,73	299 530,93
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	$\$tMS \times \% \text{ utilisation du}$ $tracteur \text{ pour l'opération}$	\$/t MS		30,25	17,80	8,86		56,92
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	$\$Balle \times \% \text{ utilisation du}$ $tracteur \text{ pour l'opération}$	\$/balle		7,39	4,35	2,17		13,91
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	$\$Annuel \times \% \text{ utilisation}$ $du tracteur \text{ pour}$ $l'opération$	\$/an		159 199,07	93 684,80	46 647,06		299 530,93
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	$CapBiobalerPlant \times$ $TempsProd \times$ $(TempsRécoltPlant /$ $TempsRécolte)$	t MS/an		3 100,61	3 100,61	3 100,61		
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	$CapBiobalerNat \times$ $TempsProd \times$ $(TempsRécolteNat /$ $TempsRécolte)$	t MS/an		2 162,16	2 162,16	2 162,16		
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	$CapTmsAnPlant /$ $CapTmsHeurePlant$	h		403	343	258		1 004
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	$CapTmsAnNat /$ $CapTmsHeureNat$	h		616	239	395		1 250

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 190 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Broyeur Haybuster H1130 PDF	Auto- Chargeuse	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince à balle ronde	Total
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	$\$ \text{AnnuelAcTrac} \times \left(\frac{\text{TempsProdPlant}}{\text{TempsProd}} \right)$	\$/an		62 979,85	55 195,26	18 453,78		136 628,89
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	$\$ \text{AnnuelAcTrac} \times \left(\frac{\text{TempsProdNat}}{\text{TempsProd}} \right)$	\$/an		96 219,22	38 489,54	28 193,28		162 902,03
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	$\frac{\$ \text{AnnuelPlantAcTrac}}{\text{CapTmsAnPlant}}$	\$/t MS		20,31	17,80	5,95		44,07
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	$\frac{\$ \text{AnnuelNatAcTrac}}{\text{CapTmsAnNat}}$	\$/t MS		44,50	17,80	13,04		75,34

Tableau 43 : Estimation des coûts de récolte : méthode 2

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Duratech 2009	Total
#Machine			#	1	2	3	4	
Utilisé avec ...	# Machine				1	1		
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	32,98	45,02	
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	8,06	11,00	
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	13 126	13 126	13 126	13 126	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	3 207	3 207	3 207	3 207	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	162 250,00	150 000,00	35 000,00	185 000,00	532 250,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	242	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	12	10	15	34	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20	10	10	20	
Taux d'utilisation	%Util		%	70	70	70	70	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Duratech 2009	Total
4. Coûts totaux								
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	76,30	75,06	17,34	105,48	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	53,41	52,55	12,14	73,83	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	31,18	14,54	2,15	9,59	57,46
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	7,62	3,55	0,53	2,34	14,04
Coût annuel	\$Annuel	\$TotalTempsProd X HeureProd	\$/an	100 011,42	46 626,43	6 901,14	30 754,79	184 293,78
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	\$tMS X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/t MS		29,31	11,62	16,53	57,46
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	\$Balle X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/balle		7,16	2,84	4,04	14,04
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	\$Annuel X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/an		94 019,51	37 272,20	53 002,07	184 293,78
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	CapBiobalerPlant X TempsProd X (TempsRécoltPlant/Temps Récolte)	t MS/an		1 889,65	1 889,65	1 889,65	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Duratech 2009	Total
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	CapBiobalerNat X TempsProd X (TempsRécolteNat/Temps Récolte)	t MS/an		1 317,72	1 317,72	1 317,72	
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	CapTmsAnPlant / CapTmsHeurePlant	h		246	157	172	575
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	CapTmsAnNat / CapTmsHeureNat	h		375	241	120	736
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdPlant / TempsProd)	\$/an		37 194,53	14 745,05	31 226,66	83 166,23
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdNat / TempsProd)	\$/an		56 824,98	22 527,15	21 775,42	101 127,55
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	\$AnnuelPlantAcTrac / CapTmsAnPlant	\$/t MS		19,68	7,80	16,53	44,01
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	\$AnnuelNatAcTrac / CapTmsAnNat	\$/t MS		43,12	17,10	16,53	76,74

Tableau 44 : Estimation des coûts de récolte : méthode 3

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
#Machine			#	1	2	3	4	5	
Utilisé avec ...	# Machine				1	5	5		
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	32,98	45,02		
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	8,06	11,00		
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	21 538	21 538	21 538	21 538	21 538	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	5 263	5 263	5 263	5 263	5 263	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	150 000,00	150 000,00	35 000,00	140 000,00	84 750,00	559 750,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	231	86	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	12000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	16	6	9	21	11	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20%	10%	10%	20%	20%	
Taux d'utilisation	%Util		%	70%	70%	70%	70%	70%	
Taux de réparation et de maintenance	%R&M		%	100%	150%	100%	80%	100%	
Taux d'intérêt	%Int		%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
2. Coûts de propriétés									
Coût d'intérêts	\$Int	ValeurMoyMachine X %Int	\$/an	4 500,00	4 125,00	962,50	4 200,00	2 542,50	4 500,00
Coûts d'assurance et de taxes	\$AssTaxe	ValeurMoyMachine X %AssTaxe	\$/an	3 150,00	1 650,00	385,00	2 940,00	1 779,75	3 150,00
Coût de propriété annuel	\$Prop	\$AmortisAnnuel + \$Int + \$AssTaxe	\$/an	15 294,00	28 707,00	4 776,47	12 498,45	10 715,62	15 294,00
Coût de propriété par heure cédulée	\$PropTempsCédulé	\$Prop / TempsCédulé	\$/h	10,50	19,72	5,12	18,29	6,63	10,50
Coût de propriété par heure de production	\$PropTempsProd	\$Prop / TempsProd	\$/h	15,01	28,17	7,31	26,12	9,47	15,01
3. Coûts d'opérations									
Coût de carburant	\$CarbHor	Puissance X %ConsCarb X \$Diesel	\$/h	23,01			15,02	14,34	23,01
Coût de lubrification	\$LubHor	\$CarbHor X %Lub	\$/h	8,46	4,23	2,15	2,25	5,28	8,46
Coût de maintenance et de réparation	\$R&M	\$AmortisAnnuel X %R&M / HeureProd	\$/h	7,50	33,75	5,25	8,96	5,65	7,50
Coût de main-d'œuvre, tient en compte du travail sans opérateur (heure prod)	\$HorRéalProd	\$HorRéal / %Util	\$/h	22,29				22,29	22,29
Coût de ficelle	\$FicelleBalle		\$/balle		0,25				

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Coût de ficelle	\$Ficelle	CapBalleHeure X \$FicelleBalle	\$/h		5,28				
Coût d'opération par heure de production	\$OpHeureProd	\$CarbHor + \$LubHor + \$R&M + (\$HorRéel / %Util) + \$Ficelle	\$/h	61,26	43,27	7,40	26,23	47,56	
Coût d'opération par heure cédulée	\$OpHeureCédulé	\$OpHeureProd X %Util	\$/h	42,88	30,29	5,18	18,36	33,29	
4. Coûts totaux									
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	76,27	71,43	14,71	52,35	57,02	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	53,39	50,00	10,30	36,65	39,92	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	14,77	13,83	1,83	4,76	12,26	47,45
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	3,61	3,38	0,45	1,16	3,00	11,59
Coût annuel	\$Annuel	\$TotalTempsProd X HeureProd	\$/an	77 731,56	72 805,39	9 610,51	25 046,45	64 527,77	249 721,69
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	\$tMS X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/t MS		28,60	8,90	9,94		47,45

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	\$Balle X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/balle		6,99	2,18	2,43		11,59
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	\$Annuel X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/an		150 536,95	46 855,64	52 329,10		249 721,69
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	CapBiobalerPlant X TempsProd X (TempsRécoltPlant/TempsRécolte)	t MS/an		3 100,61	3 100,61	3 100,61		
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	CapBiobalerNat X TempsProd X (TempsRécolteNat/TempsRécolte)	t MS/an		2 162,16	2 162,16	2 162,16		
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	CapTmsAnPlant / CapTmsHeurePlant	h		403	258	282		943
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	CapTmsAnNat / CapTmsHeureNat	h		616	395	197		1 207
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdPlant / TempsProd)	\$/an		59 553,08	18 536,30	30 830,17		108 919,54
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdNat / TempsProd)	\$/an		90 983,87	28 319,34	21 498,93		140 802,15
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	\$AnnuelPlantAcTrac / CapTmsAnPlant	\$/t MS		19,21	5,98	9,94		35,13
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	\$AnnuelNatAcTrac / CapTmsAnNat	\$/t MS		42,08	13,10	9,94		65,12

Tableau 45 : Estimation des coûts de récolte : méthode 4

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Duratech 2009	Total
#Machine			#	1	2	3	4	
Utilisé avec ...	# Machine				1	1	1	
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	21,13	45,02	
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	5,16	11,00	
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	21 538	21 538	21 538	21 538	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	5 263	5 263	5 263	5 263	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	162 250,00	150 000,00	35 000,00	185 000,00	532 250,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	242	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	11	6	6	21	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20	10	10	20	
Taux d'utilisation	%Util		%	70	70	70	70	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Duratech 2009	Total
4. Coûts totaux								
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	75,51	71,43	15,27	92,90	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	52,86	50,00	10,69	65,03	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	21,49	13,83	2,96	8,45	46,73
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	5,25	3,38	0,72	2,06	11,42
Coût annuel	\$Annuel	\$TotalTempsProd X HeureProd	\$/an	113 088,64	72 805,39	15 567,41	44 446,91	245 908,35
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	\$tMS X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/t MS		21,15	10,27	15,31	46,73
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	\$Balle X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/balle		5,17	2,51	3,74	11,42
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	\$Annuel X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/an		111 286,08	54 048,10	80 574,17	245 908,35

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Duratech 2009	Total
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	CapBiobalerPlant X TempsProd X (TempsRécoltPlant/Temps Récolte)	t MS/an		3 100,61	3 100,61	3 100,61	
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	CapBiobalerNat X TempsProd X (TempsRécolteNat/Temps Récolte)	t MS/an		2 162,16	2 162,16	2 162,16	
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	CapTmsAnPlant / CapTmsHeurePlant	h		403	403	282	1 088
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	CapTmsAnNat / CapTmsHeureNat	h		616	616	197	1 429
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdPlant / TempsProd)	\$/an		44 025,26	21 381,67	47 471,01	112 877,94
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdNat / TempsProd)	\$/an		67 260,82	32 666,44	33 103,16	133 030,41
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	\$AnnuelPlantAcTrac / CapTmsAnPlant	\$/t MS		14,20	6,90	15,31	36,41
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	\$AnnuelNatAcTrac / CapTmsAnNat	\$/t MS		31,11	15,11	15,31	61,53

Tableau 46 : Estimation des coûts de récolte : méthode 5

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
#Machine			#	1	2	3	4	5	
Utilisé avec ...	# Machine				1	5	5		
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	32,98	45,02		
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	8,06	11,00		
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	21 538	21 538	21 538	21 538	21 538	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	5 263	5 263	5 263	5 263	5 263	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	150 000,00	150 000,00	35 000,00	185 000,00	84 750,00	604 750,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	242	86	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	12000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	16	6	9	21	11	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20	10	10	20	20	
Taux d'utilisation	%Util		%	70	70	70	70	70	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Taux de réparation et de maintenance	%R&M		%	100	150	100	80	100	
Taux d'intérêt	%Int		%	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
Coût d'assurance et de taxes	%AssTaxe		%	3,5	2,0	2,0	3,5	3,5	
Taux de consommation de carburant	%ConsCarb		l/kWh	0,22			0,22	0,22	
Coût du carburant	\$Diesel		\$/l	0,75			0,75	0,75	
Taux de coût de lubrification	%Lub		%	36,8	18,4	15,0	15,0	36,8	
Coût de main-d'œuvre	\$Hor		\$/h	15,60				15,60	
Coût de main-d'œuvre, tient en compte du travail sans opérateur	\$HorRéal		\$/h	15,60				15,60	
Nb d'heures cédulées	TempsCédulé		h/an	1456	1456	933	683	1617	
Heures de production	HeureProd	TempsCédulé X %Util	h/an	1019	1019	653	478	1132	
1. Calculs de valeurs									
Valeur de revente	\$Revente	\$Acquisition X %Revente	\$	30 000,00	15 000,00	3 500,00	37 000,00	16 950,00	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Amortissement annuel	\$AmortisAnnuel	$(\$Acquisition - \$Revente) / \text{Durée Vie}$	\$	7 644,00	22 932,00	3 428,97	7 080,82	6 393,37	
Valeur moyenne de la machine	ValeurMoyMachine	$(\$Acquisition + \$Revente) / 2$	\$	90 000,00	82 500,00	19 250,00	111 000,00	50 850,00	
2. Coûts de propriétés									
Coût d'intérêts	\$Int	$\text{ValeurMoyMachine} \times \%Int$	\$/an	4 500,00	4 125,00	962,50	5 550,00	2 542,50	
Coûts d'assurance et de taxes	\$AssTaxe	$\text{ValeurMoyMachine} \times \%AssTaxe$	\$/an	3 150,00	1 650,00	385,00	3 885,00	1 779,75	
Coût de propriété annuel	\$Prop	$\$AmortisAnnuel + \$Int + \$AssTaxe$	\$/an	15 294,00	28 707,00	4 776,47	16 515,82	10 715,62	
Coût de propriété par heure cédulée	\$PropTempsCédulé	$\$Prop / \text{TempsCédulé}$	\$/h	10,50	19,72	5,12	24,16	6,63	
Coût de propriété par heure de production	\$PropTempsProd	$\$Prop / \text{TempsProd}$	\$/h	15,01	28,17	7,31	34,52	9,47	
3. Coûts d'opérations									
Coût de carburant	\$CarbHor	$\text{Puissance} \times \%ConsCarb \times \$Diesel$	\$/h	23,01			40,42	14,34	
Coût de lubrification	\$LubHor	$\$CarbHor \times \%Lub$	\$/h	8,46	4,23	2,15	6,06	5,28	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Coût de maintenance et de réparation	\$R&M	\$AmortisAnnuel X %R&M / HeureProd	\$/h	7,50	33,75	5,25	11,84	5,65	
Coût de main-d'œuvre, tient en compte du travail sans opérateur (heure prod)	\$HorRéalProd	\$HorRéal / %Util	\$/h	22,29				22,29	
Coût de ficelle	\$FicelleBalle		\$/balle		0,25				
Coût de ficelle	\$Ficelle	CapBalleHeure X \$FicelleBalle	\$/h		5,28				
Coût d'opération par heure de production	\$OpHeureProd	\$CarbHor + \$LubHor + \$R&M + (\$HorRéal / %Util) + \$Ficelle	\$/h	61,26	43,27	7,40	58,32	47,56	
Coût d'opération par heure cédulée	\$OpHeureCédulé	\$OpHeureProd X %Util	\$/h	42,88	30,29	5,18	40,82	33,29	
4. Coûts totaux									
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	76,27	71,43	14,71	92,84	57,02	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	53,39	50,00	10,30	64,99	39,92	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	14,77	13,83	1,83	8,44	12,26	51,13

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Coût moyen par balle	\$Balle	$\frac{\$TotalTempsProd \times}{HeureProd / CapBalleAn}$	\$/balle	3,61	3,38	0,45	2,06	3,00	12,49
Coût annuel	\$Annuel	$\frac{\$TotalTempsProd \times}{HeureProd}$	\$/an	77 731,56	72 805,39	9 610,51	44 417,22	64 527,77	269 092,46
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	$\$tMS \times \% \text{ utilisation du tracteur pour l'opération}$	\$/t MS		28,60	8,90	13,62		51,13
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	$\$Balle \times \% \text{ utilisation du tracteur pour l'opération}$	\$/balle		6,99	2,18	3,33		12,49
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	$\$Annuel \times \% \text{ utilisation du tracteur pour l'opération}$	\$/an		150 536,95	46 855,64	71 699,87		269 092,46
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	$\frac{CapBiobalerPlant \times}{TempsProd \times}$ (TempsRécoltPlant/Temps Récolte)	t MS/an		3 100,61	3 100,61	3 100,61		
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	$\frac{CapBiobalerNat \times}{TempsProd \times}$ (TempsRécolteNat/Temps Récolte)	t MS/an		2 162,16	2 162,16	2 162,16		
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	$\frac{CapTmsAnPlant}{CapTmsHeurePlant}$	h		403	258	282		943
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	$\frac{CapTmsAnNat}{CapTmsHeureNat}$	h		616	395	197		1 207
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	$\frac{\$AnnuelAcTrac \times}{(TempsProdPlant / TempsProd)}$	\$/an		59 553,08	18 536,30	42 242,63		120 332,01
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	$\frac{\$AnnuelAcTrac \times}{(TempsProdNat / TempsProd)}$	\$/an		90 983,87	28 319,34	29 457,23		148 760,45

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Broyeur Duratech 2009	Tracteur 86 kW + Chargeur + Pince	Total
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	$\frac{\$AnnuelPlantAcTrac}{CapTmsAnPlant}$	\$/t MS		19,21	5,98	13,62		38,81
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	$\frac{\$AnnuelNatAcTrac}{CapTmsAnNat}$	\$/t MS		42,08	13,10	13,62		68,80

Tableau 47 : Estimation des coûts de récolte : méthode 6

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
#Machine			#	1	2	3	4	
Utilisé avec ...	# Machine				1	1	1	
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	32,98	45,02	
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	8,06	11,00	
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	13 126	13 126	13 126	13 126	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	3 207	3 207	3 207	3 207	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	162 250,00	150 000,00	35 000,00	140 000,00	487 250,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	231	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	12	10	15	34	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20%	10%	10%	20%	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
4. Coûts totaux								
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	76,30	75,06	17,34	61,91	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	53,41	52,55	12,14	43,34	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	31,18	14,54	2,15	5,63	53,50
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	7,62	3,55	0,53	1,38	13,07
Coût annuel	\$Annuel	\$TotalTempsProd X HeureProd	\$/an	100 011,42	46 626,43	6 901,14	18 053,02	171 592,01
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	\$tMS X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/t MS		29,31	11,62	12,56	53,50
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	\$Balle X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/balle		7,16	2,84	3,07	13,07
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	\$Annuel X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/an		94 019,51	37 272,20	40 300,31	171 592,01

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Auto- Chargeuse	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	CapBiobalerPlant X TempsProd X (TempsRécoltPlant/Temps Récolte)	t MS/an		1 889,65	1 889,65	1 889,65	
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	CapBiobalerNat X TempsProd X (TempsRécolteNat/Temps Récolte)	t MS/an		1 317,72	1 317,72	1 317,72	
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	CapTmsAnPlant / CapTmsHeurePlant	h		246	157	172	575
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	CapTmsAnNat / CapTmsHeureNat	h		375	241	120	736
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdPlant / TempsProd)	\$/an		37 194,53	14 745,05	23 743,29	75 682,87
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdNat / TempsProd)	\$/an		56 824,98	22 527,15	16 557,01	95 909,14
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	\$AnnuelPlantAcTrac / CapTmsAnPlant	\$/t MS		19,68	7,80	12,56	40,05
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	\$AnnuelNatAcTrac / CapTmsAnNat	\$/t MS		43,12	17,10	12,56	72,78

Tableau 48 : Estimation des coûts de récolte : méthode 7

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
#Machine			#	1	2	3	4	
Utilisé avec ...	# Machine				1	1	1	
Capacité par heure de production	CapBalleHeure		balle/h		21,13	21,13	45,02	
Capacité par heure de production	CapTmsHeure		t MS/h		5,16	5,16	11,00	
Quantité de biomasse produite par année	CapBalleAn		balle/an	21 538	21 538	21 538	21 538	
Quantité de biomasse produite par année	CapTmsAn		t MS/an	5 263	5 263	5 263	5 263	
Coût d'acquisition	\$Acquisition		\$	162 250,00	150 000,00	35 000,00	140 000,00	487 250,00
Puissance	Puissance		kW	138	-	-	231	
Durée de vie	VieHeure		h	16000	6000	6000	10000	
Durée de vie	VieAns	VieHeure / HeureProd	an	11	6	6	21	
Taux de valeur de revente	%Revente		%	20%	10%	10%	20%	
Taux d'utilisation	%Util		%	70%	70%	70%	70%	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
4. Coûts totaux								
Coût total par heure de production	\$TotalTempsProd	\$PropTempsProd + \$OpHeureProd	\$/h	75,51	71,43	15,27	52,35	
Coût total par heure cédulée	\$TotalTempsCédulé	\$PropTempsCédulé + \$OpHeureCédulé	\$/h	52,86	50,00	10,69	36,65	
Coût moyen par t MS	\$tMS	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapTmsAn	\$/t MS	21,49	13,83	2,96	4,76	43,04
Coût moyen par balle	\$Balle	\$TotalTempsProd X HeureProd / CapBalleAn	\$/balle	5,25	3,38	0,72	1,16	10,52
Coût annuel	\$Annuel	\$TotalTempsProd X HeureProd	\$/an	113 088,64	72 805,39	15 567,41	25 046,45	226 507,89
Coût moyen par t MS (avec tracteur)	\$tMSAvTrac	\$tMS X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/t MS		21,15	10,27	11,62	43,04
Coût moyen par balle (avec tracteur)	\$BalleAvTrac	\$Balle X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/balle		5,17	2,51	2,84	10,52
Coût annuel (avec tracteur)	\$AnnuelAcTrac	\$Annuel X % utilisation du tracteur pour l'opération	\$/an		111 286,08	54 048,10	61 173,71	226 507,89
Quantité de biomasse récoltée en plantation	CapTmsAnPlant	CapBiobalerPlant X TempsProd X (TempsRécoltPlant/Temps Récolte)	t MS/an		3 100,61	3 100,61	3 100,61	

Description	Variable	Formule	Unité	Tracteur 138 kW + Garde et pneu forestier + Chargeur + Pince	Biobaler WB55	Accumulateur	Tub grinder Haybuster H1130 électrique	Total
Quantité de biomasse récoltée en milieu naturel	CapTmsAnNat	CapBiobalerNat X TempsProd X (TempsRécolteNat/Temps Récolte)	t MS/an		2 162,16	2 162,16	2 162,16	
Temps de production en plantation	TempsProdPlant	CapTmsAnPlant / CapTmsHeurePlant	h		403	403	282	1 088
Temps de production en milieu naturel	TempsProdNat	CapTmsAnNat / CapTmsHeureNat	h		616	616	197	1 429
Coût annuel plantation (avec tracteur)	\$AnnuelPlantAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdPlant / TempsProd)	\$/an		44 025,26	21 381,67	36 041,05	101 447,98
Coût annuel milieu naturel (avec tracteur)	\$AnnuelNatAcTrac	\$AnnuelAcTrac X (TempsProdNat / TempsProd)	\$/an		67 260,82	32 666,44	25 132,66	125 059,91
Coût total par t MS en plantation (avec tracteur)	\$tMSAvTracPlant	\$AnnuelPlantAcTrac / CapTmsAnPlant	\$/t MS		14,20	6,90	11,62	32,72
Coût total par t MS en milieu naturel (avec tracteur)	\$tMSAvTracNat	\$AnnuelNatAcTrac / CapTmsAnNat	\$/t MS		31,11	15,11	11,62	57,84

Annexe K : Détails des coûts de transport de la biomasse

Tableau 50 : Détails des coûts de transport de la biomasse

Description	Unité	Variable	Biobaler®	Formule	Explication
% TEE	%	%TEELivraison	30,0		
Densité de la biomasse sur une base humide	t MH/m ³	Densité	0,1334	$\frac{\text{Densité}_{\text{Ref}}}{(1-\% \text{TEELivraison})}$	Correspond à la densité de la biomasse en fonction de son humidité (densité de référence 93,4 kg MS/m ³ selon Savoie et Hébert, 2010).
Volume maximal	m ³	VolumeMax	91,75		Correspond au volume maximum de biomasse qu'un camion peut transporter (Tableau 27).
Charge utile	t MH	ChargeUtile	12,24		Correspond à la masse transportée.
Charge utile sur une basse sèche	t MS	ChargeUtilebs	8,57		Correspond à la masse sèche transportée.
Vitesse sur la route	km/h	VitesseRoute	80		Correspond à la vitesse des camions sur la route lors du transport de la biomasse.
Vitesse hors route	km/h	VitesseHorsRoute	20		Correspond à la vitesse des camions dans le champ lors du transport de la biomasse.
Distance sur route	km	DistRoute	50		Correspond à la distance réalisée par les camions sur la route à chaque aller-retour.
Distance hors route	km	DistHorsRoute	1,5		Correspond à la distance réalisée par les camions en dehors de la route à chaque aller-retour.
Temps de transport sur route	min	TempsRoute	37,5	$\frac{\text{DistRoute}}{\text{VitesseRoute}} \times 60$	Correspond au temps de transport des camions sur la route à chaque aller-retour.

Description	Unité	Variable	Biobaler®	Formule	Explication
Temps de transport hors route	min	TempsHorsRoute	4,5	$\frac{\text{DistHorsRoute}}{\text{VitesseHorsRoute}} \times 60$	Correspond au temps de transport des camions en dehors de la route à chaque aller-retour.
Temps total de transport	min	TempsTransport	42	TempsRoute + TempsHorsRoute	Correspond au temps de transport des camions à chaque aller-retour.
Capacité de chargement	t MS/h	CapCharg	11		Correspond à la capacité de chargement du système de récolte. La capacité de chargement correspond à la capacité du broyeur.
Temps de chargement de la remorque	min	TempsCharg	47	$\text{Charge utile}/(\text{CapCharg}/(1 - \%TEELivraison)) \times 60$	Correspond au temp de chargement de la remorque en fonction de la capacité de chargement.
Temps de déchargement	min	TempsDécharg	15		Correspond au temps de déchargement d'un camion.
Temps total pour l'aller-retour	h	TempsAllerRetour	1,73	$(\text{TempsCharg} + \text{TempsTransport} + \text{TempsDécharg})/60$	Correspond au temps nécessaire pour réaliser un aller-retour de transport de biomasse.
Distance totale	km	DistTotal	51,5	DistHorsRoute + DistRoute	Correspond à la distance réalisée à chaque aller-retour.
Coût de main-d'œuvre	\$/h	\$HorChauf	25,00		Correspond au coût horaire du chauffeur de camion.
Coût indirect	%	%CoûtInd	33		Correspond au taux des coûts indirects de transport par rapport au salaire du chauffeur de camion.
Coût de carburant	\$/l	\$DieselTransport	1,31		Correspond au coût du diesel pour le transport de la biomasse par camion par litre. Régie de l'énergie du Québec (2011)
Coût d'acquisition	\$US	\$Acquisition	125 000		Tableau 27
Puissance	kW	Puissance	336		Tableau 27
Durée de vie	h	VieHeure	16 000		Tableau 27

Description	Unité	Variable	Biobaler®	Formule	Explication
Durée de vie	an	VieAns	20		Correspond à la durée de vie des équipements de transport par rapport à la durée de vie en heure et au nombre d'heures de production par année.
Valeur de revente, pourcentage du prix d'achat	%	%Revente	20		Correspond au taux de revente des équipements de transport par rapport à la valeur d'acquisition.
Taux d'utilisation	%	%Util	40	$\frac{\text{TempsTransport}}{\text{TempsTransport}+\text{TempsCharg}+\text{TempsDécharg}}$	Correspond au pourcentage d'heures cédulées durant lequel le camion se déplace.
Coût de réparation et de maintenance, pourcentage de l'amortissement	%	%R&M	60		Correspond au taux de réparation et maintenance par rapport à l'amortissement.
Coût d'intérêts	%	%Int	5		Correspond au taux d'intérêt par rapport à la valeur moyenne.
Coût d'assurance et de taxes	%	%Ass&Taxe	4		Correspond au taux d'assurance et de taxes par rapport à la valeur moyenne.
Taux de consommation de carburant	km/l	%ConsCarb	2,55		Correspond au taux de consommation de diesel du camion.
Coût des pneus	\$/ensemble	\$Pneus	3 500		Correspond au coût de remplacement d'un ensemble de pneu.
Durée de vie des pneus	an	ViePneusAn	2		Correspond à la durée de vie d'un ensemble de pneu.
Lubrification et huile, pourcentage du coût de carburant	%	%Lub	10		Correspond au taux de consommation de lubrifiant par rapport à la consommation de diesel.
Valeur de revente	\$	\$Revente	25 000	$\text{\$Acquisition} \times \% \text{Revente}$	Correspond à la valeur de revente des équipements de transport à la fin de leur vie utile.

Description	Unité	Variable	Biobaler®	Formule	Explication
Amortissement annuel	\$/an	\$AmortisAn	5060,61	$\frac{\$Acquisition - \$Revente}{VieAns}$	Correspond à l'amortissement annuel des équipements de transport.
Valeur moyenne de la machine	\$	ValeurMoyMachine	75 000	$\frac{\$Acquisition + \$Revente}{2}$	Correspond à la valeur moyenne de la machine.
Nombre d'heures cédulées	h/an	TempsCédulé	2 000		Correspond au temps durant lequel un camionneur est payé par le transporteur.
Heures de production	h/an	TempsProd	810	$HeureCédulée \times \%Util$	Correspond au temps durant lequel le camion se déplace par année.
Coût d'intérêts	\$/an	\$Int	3 750	$ValeurMoyMachine \times \%Int$	
Coût d'assurance et de taxes	\$/an	\$AssTaxe	2 625,00	$ValeurMoyMachine \times \%AssTaxe$	
Coût de propriété annuel	\$/an	\$PropAn	11435,61	$\$AmortisAn + \$Int + \$AssTaxe$	
Coût de propriété par heure cédulée	\$/h	\$PropHeureCédulé	5,72	$\frac{\$PropAn}{HeureCédulée}$	
Coût de propriété par heure de production	\$/h	\$PropHeureProd	14,12	$\frac{\$PropAn}{HeureProd}$	
Coût de carburant	\$/h	\$Carburant	26,45	$\frac{DistTotal}{\%ConsCarb} \times \$DieselTransport$	

Description	Unité	Variable	Biobaler®	Formule	Explication
Coût de lubrification	\$/h	\$Lub	2,64	$\$Carburant \times \%Lub$	
Coût de maintenance et de réparation	\$/h	\$R&MHeureProd	3,75	$\frac{\$DépréciationAn \times \%R \& M}{TempsProd}$	
Coût d'usure des pneus	\$/h	\$PneusHeureProd	2,16	$\frac{\$Pneu / ViePneusAn}{TempsProd}$	
Coût d'opération	\$/h	\$OpHeureProd	117,13	$\$Carburant + \$Lub + \$R\&MHeureProd + \dots$ $\dots \$PneusHeureProd + \dots$ $\dots \frac{(\$HorChauf \times (1 + \%CoûtInd))}{\%Util}$	
Coût d'opération	\$/h	\$OpHeureCédulé	47,42	$\$OpHeureProd \times \%Util$	
Coût total	\$/h	\$TotalHeureProd	131,26	$\$PropHeureProd + \$OpHeureProd$	
Coût total	\$/h	\$TotalHeureCédulé	53,14	$\$PropHeureCédulé + \$OpHeureCédulé$	
Coût total de transport	\$/t MH	\$TransportTonne	7,51	$\frac{TempsAllerRetour \times \$TotalHeureCédulée}{ChargeUtile}$	
Coût total de transport	\$/t MS	\$TransportTonnems	10,72	$\$TransportTonne / (1 - \%TEELivraison)$	
Coût total de transport	\$/tMS/km	\$TransportTonnemskm	0,21	$\$TransportTonnems / DistTotal$	

Tableau 51 : Calculs des coûts de transport de balles rondes avec camion et remorque plate-forme (53 pieds)

Description	Unité	Variable	Formule	Valeur
Longueur de la remorque (53 pieds)	m	Long		16,15
Diamètre moyen des balles	m	Dia		1,3
Nb de rangée	unité	NbRangée		2
Nb d'étage	unité	NbÉtage		2
Nb de balle par rangée première étage	unité	NbBalleE1	Long/Dia	12
Nb de balle par rangée deuxième étage	unité	NbBalleE2	NbBalleE1-1	11
Nb de balle	balle	NbBalle	(NbBalleE1+NbBalleE2) x 2	46
Masse des balles sèches	kg MS	MasseBallebs		218
%TEE	%	%TEELivraison		30,00
Masse des balles à 30% d'humidité	kg MH	MasseBalle30	MasseBallebs/(1-%TEELivraison)	311
Masse du chargement de balles rondes	t MH	ChargeUtile	NbBalle x MasseBalle30 / 1000	14,33
Masse du chargement de balles rondes	t MS	ChargeUtilebs	NbBalle x MasseBallebs / 1000	10,03
Volume de la remorque de 53 pieds	m ³	VolumeMax	Tableau 27	91,75
Densité équivalente	t/m ³	DensÉqui	MasseChargementBalle / VolumeMax	0,1561
Coût total	\$/heure cédulé	\$TotalHeureCédulé	Tableau 50	53,14
Temps total pour l'aller-retour	h	TempsAllerRetour	Tableau 50	1,73
Coût de transport	\$/t MS	\$TransportTonnems	(\$TotalHeureCédulé x TempsAllerRetour)/ (NbBalle x MasseBallebs/1000)	9,16
Coût de transport	\$/t MS/km	\$TransportTonnemskm	\$TransportTonnems/DistTotal	0,18

Annexe L : Évolution des taux d'intérêt au Canada

Selon le document l'Agroindicateur, produit par la Financière agricole (2011), les taux d'intérêt sont particulièrement bas depuis la crise financière de 2008. Il est cependant tout à fait plausible de penser que les taux d'intérêt vont remonter graduellement au cours des prochains mois de l'année 2012. La Figure 68 illustre l'évolution des taux d'intérêt selon la Banque du Canada. En 2009, le taux préférentiel se tenait sous la barre des 3%. Pour les calculs dans ce mémoire un taux d'intérêt de 5% a été choisi.

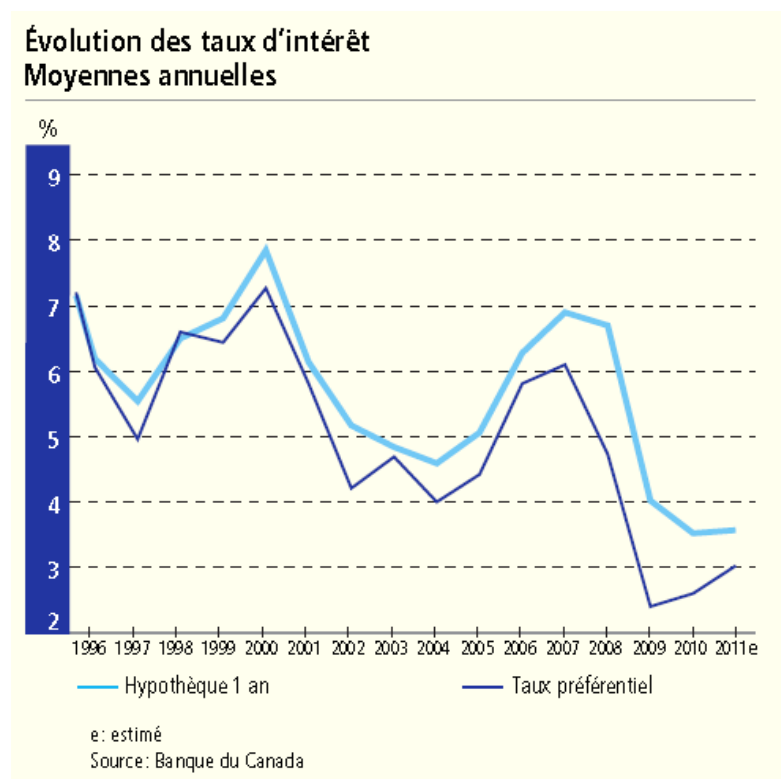


Figure 68 : Évolution des taux d'intérêt selon la Banque du Canada (Financière agricole, 2011).