

## Evaluation technico-économique de nouveaux itinéraires de récolte pour le développement d'une filière de bois énergie issu de taillis à très courte rotation de saule en Seine-Maritime



*Mémoire de dominante*

Ressources forestières et filière bois



Evaluation technico-économique de nouveaux itinéraires de récolte  
pour le développement d'une filière de bois énergie issu de taillis à  
très courte rotation de saule en Seine-Maritime



## RESUME

Depuis 2009, le programme Innobioma est conduit en Seine-Maritime. Il conjugue protection de la ressource en eau et production durable de biomasse via le développement de bandes lignocellulosiques (BLC) de taillis à très courte rotation de saule. Dans ce cadre, l'agence de l'eau subventionne la plantation et l'achat d'une machine de récolte pour 2017.

L'étude présente a pour but de consolider le choix de la machine et de déterminer un coût de revient des plaquettes. Ainsi, une simulation technico-économique sur une période d'exploitation prévisionnelle de 7 ans, pour 60 ha plantés, est construite pour évaluer le coût de plusieurs itinéraires de production (une machine associée à une logistique). Trois nouvelles machines sont étudiées; les broyeurs embarqués GMHT 140 (Jenz) et JF Harvester (Ny Vraa) et la récolteuse STEMSTER MKIII (Nordic Biomass).

La simulation démontre que c'est le JF Harvester associé à deux chaînes logistiques complémentaires, qui optimise le mieux le coût de revient, en obtenant après 7 ans, un coût compris entre 23 et 24 €/MWh selon les chaînes logistiques. Le combustible est commercialisable à un prix acceptable par l'acheteur, soit 27 €/MWh et permet une marge pour le producteur encourageante, comprise entre 9 % et 12 %, soit un bénéfice de 90 à 120 €/ha/an. Enfin, cette machine possède les qualités techniques recherchées pour récolter les bandes, tout en préservant leur capacité anti-ruissellement. Néanmoins, le coût de revient est dépendant des subventions accordées. Une analyse de sensibilité montre que l'élargissement des bandes, leur concentration et l'augmentation de la surface visée peuvent diminuer le coût de revient et la dépendance aux subventions.

Par ailleurs, des essais de récolte et de logistiques doivent être réalisés pour valider les itinéraires retenus, la plantation doit être optimisée et les rôles concernant l'organisation de la filière sont encore à répartir parmi les membres du programme.

## SUMMARY

Since 2009, the program Innobioma is conducted in Seine-Maritime area. It combines protection of water resources and sustainable biomass production through the development of lignocellulosic strips (BLC) of willow short rotation coppice. In this context, the water agency subsidizes the planting and the purchase of a harvesting machine for 2017.

The present study aims to consolidate the choice of the machine and determinate a cost of production for wood chips. Thus, a technical-economic simulation on a projected operating period of 7 years with 60 hectares planted is built to assess the costs of several production schemes (a machine associated with a supply chain). Three new machines are studied; the mowers chippers GMHT 140 (Jenz) and JF Harvester (Ny Vraa) and the harvester STEMSTER MKIII (Nordic Biomass).

The simulation shows this is the JF Harvester associated with two complementary supply chains that best optimizes the cost of production, obtaining at the end of seven years, a cost between 23 and 24 € / MWh depending on supply chains. The fuel is marketable at an acceptable price by the purchaser, meaning 27 € / MWh and allows a margin for producers, between 9 % and 12 %, meaning a profit of 90-120 € / ha / year. Finally, this machine has the technical qualities to harvest the strips, while maintaining their anti-runoff capacity. However, the cost is dependent on subsidies. A sensitivity analysis shows that the widening of the strips, their concentration and the increase of the targeted area may reduce the cost and dependence on subsidies.

Furthermore, tests on harvesting and supply chains need to be performed to confirm the selected schemes, planting must be optimized and roles regarding the organization of the sector are still to be allocated among the members of the program.



## **REMERCIEMENTS**

Je souhaiterais d'abord remercier mes encadrants successifs pour leurs conseils et leur expertise: Laurie Ducatillon de la Chambre d'agriculture de Seine-Maritime; particulièrement Dominique Plumail et Dominique Boulday du bureau d'étude CEDEN pour m'avoir accueilli au sein de leur structure et m'avoir apporté leur aide afin que mon stage se poursuive dans les meilleures conditions. Je les remercie également pour leur pédagogie et leur écoute, ainsi que pour la méthode et les précieux enseignements qu'ils m'ont procuré sur le domaine du bois énergie et pour la suite de mon parcours.

Je voudrais de même, remercier spécialement François Pouillau et toute l'équipe du Ceden pour m'avoir apporté des éléments méthodologiques précieux et une ambiance de travail chaleureuse. Merci également à Bastien Langlois pour son soutien à la Chambre d'agriculture et sa collaboration sur le terrain, qui m'ont aidé à mener à bien la mission.

Enfin, je voudrais remercier les agriculteurs et les professionnels contactés pour avoir répondu à mes questions et m'avoir témoigné leur attention.



## TABLES DES MATIERES

Remerciements.....	1
Tables des matières .....	3
Table des figures et des tableaux.....	7
SIGLES ET ABREVIATIONS .....	9
Introduction .....	11
I. Contexte et problématique de l'étude .....	12
I.1. Présentation des organismes d'accueil .....	12
I.1.1 La Chambre d'agriculture de Seine-Maritime .....	12
I.1.2 Le bureau d'étude CEDEN.....	12
I.2 Contexte agricole et géographique de l'étude .....	13
I.2.1 L'agriculture de Seine-Maritime.....	13
I.2.2 La forêt et le bois énergie en Normandie.....	14
I.2.3 Le Pays de Caux, une région océanique soumise à l'érosion .....	14
I.3 Le programme Innobioma .....	15
I.3.1 Définition.....	15
I.3.2 Les enjeux du programme sur la Seine-Maritime.....	15
I.3.3 Mise en œuvre du programme Innobioma.....	17
II L'étude bibliographique.....	20
II.1 La méthodologie.....	20
II.1.1 Les mots clés français et anglais retenus .....	20
II.1.2 Ressources utilisées .....	20
II.1.3 Sélection des articles pertinents.....	20
II.2 Synthèse des connaissances sur les plantations de saule et leurs itinéraires de production, de la récolte à la chaufferie. ....	21
II.2.1 L'intérêt du TTCR de saule. ....	21
II.2.2 Les caractéristique des plantations de TTCR de saule .....	22
II.2.3 La récolte des TTCR.....	24
II.2.4 Des machines de récolte diversifiées.....	25
II.2.5 Caractéristiques du bois produit .....	30
II.2.6 La chaîne d'approvisionnement de la récolte à la chaufferie .....	31
II.2.7 Conclusion de la synthèse bibliographique .....	33
III Avis des professionnels sur la récolte et la logistique.....	34
III.1 Méthodologie.....	34
III.1.1 Les producteurs .....	34
III.1.2 Les professionnels du bois énergie et l'acheteur.....	34
III.1.3 Les développeurs et les constructeurs de machines.....	34
III.2 Enseignements de l'enquête des producteurs.....	34
III.2.1 Préférences de récolte et problèmes rencontrés.....	34
III.2.2 Préférences sur les débouchés .....	34
III.2.3 Préférences sur les matériels.....	35
III.2.4 Préférences logistiques .....	35
III.3 Enseignements de l'enquête de l'acheteur et des professionnels du bois énergie .....	35
III.3.1 Qualifier le bois produit.....	35
III.3.2 Le débardage et le broyage de tiges sont compliqués.....	35
III.3.3 La récolte par broyage sur parterre de coupe est la plus pratique.....	35
III.3.4 Deux modes de transport complémentaires pour la livraison.....	36

III.4	Conclusion des enquêtes.....	36
IV	Démarche expérimentale de l'étude .....	37
IV.1	Rappel des objectifs de l'étude.....	37
IV.2	Problématique.....	37
IV.3	Hypothèses de travail .....	37
IV.4	Méthodologie générale de l'étude.....	38
V	Phase de sélection des machines et des chaînes logistiques.....	38
V.1	Sélection des machines .....	38
V.1.1	Orientation sur les machines à étudier.....	38
V.1.2	Description technique des machines retenues .....	39
V.2	Sélection des chaînes logistiques à étudier pour la Seine-Maritime.....	40
V.2.1	Présentation des chaînes logistiques (cf. Figure 21).....	40
V.2.2	Forces et faiblesses des chaînes retenues.....	41
VI	L'étude de coût .....	43
VI.1	Méthodologie.....	43
VI.1.1	Calcul des coûts de plantation et de fermage.....	43
VI.1.2	Calcul du coût de récolte .....	43
VI.1.3	Calcul du coût logistique .....	46
VI.1.4	Les hypothèses prises dans la simulation .....	48
VI.2	Résultats de l'étude de coût.....	50
VI.2.1	Coûts intermédiaires .....	50
VI.2.2	Coûts de plantation .....	50
VI.2.3	Coût de fermage .....	50
VI.2.4	Coût de récolte.....	51
VI.2.5	Capacité de récolte annuelle sur la fenêtre de récolte.....	52
VI.2.6	Coûts logistiques .....	53
VI.2.7	Coût de revient des plaquettes de saule .....	55
VI.2.8	Répartition des charges.....	57
VII	Bilan sur l'étude technico-économique .....	57
VII.1	Résultats économiques .....	57
VII.2	Résultats techniques .....	57
VII.2.1	Une limitation de la compaction du sol et des émissions .....	57
VII.2.2	Une flexibilité sur les diamètres de tiges.....	58
VII.2.3	Une compatibilité avec les matériels les plus courants .....	58
VIII	Détermination du prix du combustible produit avec le JF Harvester.....	58
VIII.1	Méthodologie.....	58
VIII.1.1	La marge nette .....	58
VIII.1.2	Le prix de vente de la plaquette.....	58
VIII.2	Bénéfice et marge obtenus.....	59
IX	Analyse de sensibilité.....	60
IX.1	Méthodologie.....	60
IX.1.1	La largeur de bandes.....	60
IX.1.2	Le montant des subventions .....	60
IX.1.3	Augmentation des surfaces .....	60
IX.1.4	Augmentation du temps de trajet entre bandes.....	60
IX.2	Résultats de l'analyse .....	61

IX.2.1	Schéma de synthèse .....	61
IX.2.2	Présentation du cas moyen .....	61
IX.2.3	Présentation des cas particuliers .....	61
IX.2.4	Conclusion sur les résultats .....	62
X	Discussion des résultats de l'étude .....	63
X.1	Des coûts de récolte qui demeurent élevés .....	63
X.2	La supériorité économique de la récolte avec broyage sur parterre de coupe pour la récolte de BLC.....	63
X.3	La complémentarité des chaînes logistiques avec stockage de copeaux .....	64
X.4	Une marge plutôt faible .....	64
X.5	L'apport de l'analyse de sensibilité .....	64
X.5.1	Une marge de manœuvre positive .....	64
X.5.2	Une filière dépendante des subventions .....	64
X.6	La péréquation des coûts parmi les producteurs.....	64
X.7	Une modification des modalités de plantation encore envisageable .....	65
X.8	La préservation du sol et de l'eau comme ligne directrice.....	65
XI	Analyse critique de la démarche utilisée.....	65
XI.1	Retour sur les hypothèses de surface et les BLC .....	65
XI.2	Retour sur la méthode de calcul et les résultats .....	66
XI.3	Retour sur les chaînes logistiques élaborées.....	67
	Conclusion.....	68
	Bibliographie.....	70
	Liste des contacts établis .....	73
	Liste des entreprises références pour la plantation de saule.....	73
	LEXIQUE.....	74
	ANNEXES .....	77
	Annexe I : Liste des partenaires du projet Innobioma	78
	Annexe II : Charte constitutive de l'Association Terre eau énergie	76..... 80
	Annexe III : Typologie des producteurs ayant déjà plantés. ....	83
	Annexe IV Conditions écologiques optimales pour la culture du TTCR de saule.....	84
	Annexe V : Itinéraire technique des plantation de TTCR de saule. ....	84
	Annexe VI : Schéma fonctionnel des processus d'épuration se déroulant à l'échelle de la plante .....	85
	Annexe VII : Fiches descriptives des variétés de saule utilisées en Seine-Maritime.....	86
	Annexe VIII : Questionnaire à destination des producteurs.....	94
	Annexe IX : Méthode de calcul du coût d'utilisation prévisionnel d'un matériel agricole.....	97
	Annexe X : Vues en coupe du GMHT 140 et de la Stemster MK III .....	100
	Annexe XI : Photographies supplémentaires du broyeur JF Harvester en fonctionnement. ....	101
	Annexe XII : Prix de la plaquette forestière pour le deuxième trimestre 2015 (hors coût de transport). .....	102
	Annexe XIII : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de bennes.....	103
	Annexe XIV : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de plateforme. ....	106
	Annexe XV : Carte des chaufferies biomasse sur la zone Normandie-Picardie-Ile de France .....	109



## TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Répartition des productions agricoles de Seine-Maritime. ....	13
Figure 2 : Surface agricole utile et nombre d'exploitations sur le départements. ....	13
Figure 3 : MAE Erosion et DCE sur le département. ....	13
Figure 4 : Zones soumises à l'érosion sur le bassin versant de la Pointe de Caux. ....	15
Figure 5 : Historique d'implantation des ouvrages hydrauliques en Seine-Maritime. ....	16
Figure 6 : Localisation des BLC et de la zone d'érosion concernée en priorité par l'étude. ....	19
Figure 7 : Surface actuelle de TTCR en Europe. ....	21
Figure 8 : Plantation de TTCR de saules en plein champ et BLC de saules. ....	22
Figure 9 : Schéma de plantation en simple rang et double rang. ....	22
Figure 10 : Broyat hétérogène, tiges entières et balles de saule. ....	25
Figure 11 : Ensileuses à saule, New Holland à gauche et Class à droite. ....	26
Figure 12 : Broyeurs JF Z200 Hydro E, GMHT 140, JF Harvester. ....	26
Figure 13 : Broyeurs JF 292, GMHS 100 et RT500P. ....	27
Figure 14 : Stemster MK III, prototype Rod-Picker et Biobaler. ....	28
Figure 15 : Schématisation de la position dans le rang des machines lors de la récolte de doubles rangs. ....	30
Figure 16 : Chaîne d'approvisionnement agricole en copeaux. ....	31
Figure 17 : Récolte en balles et organisation logistique. ....	32
Figure 18 : Récolte de tiges entières et organisation logistique agricole. ....	32
Figure 19 : Récolte de tiges et organisation logistique forestière (abatteuse forestière, récolteuse, coupe manuelle et broyeur forestier). ....	33
Figure 20 : Eclatement des souches et mauvais désherbage sur une BLC de saules. ....	34
Figure 21 : Chaînes logistiques établies. ....	42
Figure 22 : Déroulement du débardage pour les deux tracteurs. ....	47
Figure 23 : Répartition des opérations de production sur le coût de revient moyen. ....	57
Figure 24 : Evolution du bénéfice des producteurs en fonction du prix de vente de la plaquette. ....	59
Figure 25 : Impact de la variation des différents facteurs sur le coût de revient moyen de la plaquette de saule. ....	61
Figure 26 : Schéma récapitulatif de l'étude. ....	69
Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et géologiques du Pays de Caux. ....	14
Tableau 2 : Caractéristiques du projet Innobioma. ....	15
Tableau 3 : Avantages et inconvénients des modalités de plantation. ....	23
Tableau 4 : Dimensions des tiges récoltées en Seine-Maritime en 2012. ....	23
Tableau 5 : Caractéristiques de la période de récolte des saules. ....	24
Tableau 6 : Avantages et inconvénients des modes de récolte et des produits obtenus. ....	25
Tableau 7 : Caractéristiques des machines avec broyage sur parterre de coupe en simple rang. ....	26
Tableau 8 : Caractéristiques des machines avec broyage sur parterre de coupe en simple rang. ....	27

Tableau 9 : Caractéristiques des machines sans broyage .....	28
Tableau 10 : Ensemble des performances et des coûts de récolte issus des articles étudiés. ....	29
Tableau 11 : Un bois de faible qualité pour la combustion. ....	30
Tableau 12 : Classification professionnelle simplifiée des combustibles bois déchiquetés. ....	31
Tableau 13 : Bilan sur la selection des machines de récolte.....	38
Tableau 14 : Données techniques nécessaires à l'évaluation des coûts. ....	39
Tableau 15: Des chaînes ambitieuses et complémentaires. ....	41
Tableau 16 : Actions incluses dans la récolte selon les modes de récolte étudiés.....	43
Tableau 17 : Durée moyenne de chaque opération unitaire. ....	44
Tableau 18 : Calcul de la fenêtre de récolte disponible.....	44
Tableau 19 : Typologie des charges influençant le coût de récolte. ....	45
Tableau 20 : Valeurs prises pour l'entretien et le remisage des machines. ....	45
Tableau 21 : Coûts des tracteurs entraînant les machines. ....	46
Tableau 22 : Valeurs prises pour calculer l'amortissement et l'assurance annuels des machines. ....	46
Tableau 23 : Caractéristiques de la bande référence dans l'étude. ....	48
Tableau 24 : Montée en charge des surfaces .....	49
Tableau 25 : Relation entre le nombre de bandes plantées et le temps de trajet inter bandes. ....	50
Tableau 26 : Coût d'implantation par ha de BLC de saule.....	50
Tableau 27 : Détail du temps de récolte par bande et par ha pour les trois machines. ....	51
Tableau 28 : Coût de récolte de la plaquette obtenu pour les trois machines.....	52
Tableau 29 : Utilisation de la fenêtre de récolte en fonction de la surface cible .....	52
Tableau 30 : Coûts d'utilisation des bennes ramenée à la tonne. ....	53
Tableau 31 : Coût horaire de l'engin de débardage .....	53
Tableau 32 : Calcul du coût de débardage sur la parcelle pour les broyeurs embarqués. ....	53
Tableau 33 : Calcul du coût de transport au lieu de stockage. ....	54
Tableau 34 : Calcul des coûts de stockage, de séchage et de broyage. ....	54
Tableau 35 : Calcul des coûts de transport, du lieu de transfert intermédiaire à la chaufferie .....	55
Tableau 36 : Calcul du coût de chargement avec un chargeur. ....	55
Tableau 37 : Coût de revient moyen.....	56
Tableau 38 : Coût de revient pour la surface de 60 ha. ....	56
Tableau 39 : Comparaison du coût de récolte obtenu avec la récolteuse, avec la bibliographie.....	63

## SIGLES ET ABREVIATIONS

ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AILE	Association d'Initiatives Locales pour l'Energie et l'environnement
AREAS	Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols
BE	Bois énergie
BFD	Bois Forêt Développement durable
BLC	Bandes Lignocellulosiques
BRF	Bois Raméal Fragmenté
BV	Bassin Versant
CA 76	Chambre d'agriculture de Seine-Maritime
CEDEN	Cabinet d'Etude sur les Déchets et l'Energie
CEP	Compte d'Exploitation Prévisionnel
ch	cheval moteur
CIBE	Comité Interprofessionnel du Bois énergie
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CS	Consommation Spécifique
CRAN	Chambre régional d'agriculture normande
CREFF	Cost reduction and efficiency improvement of short rotation coppice
CUMA	Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole
DRAAF	Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
EPA	Etablissement Public de l'état à caractère Administratif
FCBA	Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement
FMA	Fond Mouvant Alternatif
GIEE	Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental
h	Heure
ha	Hectare
H <sub>2</sub> O	Eau
GER	Gros Entretien et Réparation
j	jour
km	Kilomètre
KWh	Kilowatt heure
m <sup>2</sup>	Mètre carré
m <sup>3</sup>	Mètre cube
MAE	Mesure Agro-Environnementale
MAP	Mètre cube apparent
min	minute
Mtep	Mégatonne équivalent pétrole
mm	Millimètre
MWh	Mégawatt-heure
PF	Plaquette Forestière
pH	potentiel Hydrogène
RMT	Réseau Mixte Technologique
SAU	Surface Agricole Utile
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SRC	Short Rotation Coppice
t	Tonne
TCR	Taillis à Courte Rotation
TTCR	Taillis à Très Courte Rotation
t MB	Tonne de Matière Brute
t MS	Tonne de Matière Sèche



## INTRODUCTION

L'évolution de l'agriculture traditionnelle vers l'apogée de l'agriculture intensive de la fin du XX<sup>e</sup> siècle fut le fruit d'un développement majeur de la mécanisation, des fertilisants et des pesticides entraînant des problèmes d'érosion des sols agricoles, de qualité des eaux et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Chaque année en France, en moyenne 2,25 t /ha de terre agricole disparaissent à cause de l'érosion engendrée par le ruissellement. La qualité de l'eau est également particulièrement affectée par ce ruissèlement chargé des pollutions solubles provenant des eaux résiduaires agricoles, urbaines et industrielles. Le remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables est également un grand défi du monde agricole.

Les responsables politiques mondiaux ont exposé ces problématiques environnementales par la tenue de conférences mondiales et la mise en place de textes de loi novateurs : les cinq sommets de la terre ont visé à stimuler le développement durable à l'échelle mondiale ; la directive cadre sur l'eau (DCE) du 23 octobre 2000 a donné une cohérence à l'ensemble de la législation communautaire dans le domaine de l'eau ; la nouvelle Politique agricole commune applicable depuis janvier 2015 et la conférence sur le climat en 2015 cherchent également à financer la mise en œuvre de mesures environnementales.

En 2007, le Grenelle de l'environnement a abouti à la mise en place de deux lois Grenelle. Elles visaient notamment à accroître la part des énergies renouvelables en France d'ici 2020, à promouvoir une agriculture durable, écologique et productive, privilégiant les modes de production favorables à l'environnement. Des zones de protection et des captages "grenelle" ont été établis en vue de la protection de la ressource en eau. Ces captages au nombre de 500 en France sont très impactés par les pollutions diffuses, particulièrement par les nitrates et les substances phytosanitaires agricoles.

Actuellement, dans le prolongement des lois Grenelle, le paquet Energie Climat a pour but d'atteindre au moins 23 % d'énergies renouvelables, ce qui représente 20 Mtep supplémentaires par rapport à 2006. D'après IFN et al.(2009), la consommation française de biomasse forestière va passer ainsi de 9,3 Mtep en 2006 à plus de 13 Mtep en 2020, soit une augmentation de 40 %. Cependant, le bois mobilisable (forêt, peupleraie et haie) s'élève à 10,3 Mtep/an, compte tenu des contraintes techniques et environnementales actuelles. D'autres sources doivent donc être mobilisées.

Pour répondre à ces problématiques, la plantation de bandes lignocellulosiques (BLC) d'espèces à courte rotation comme le saule constitue une solution sur un territoire comme la Seine-Maritime. La Chambre d'Agriculture avec le concours de nombreux partenaires, a élaboré le projet Innobioma, dont les prémices datent de 2009. Ce projet vise à conjuguer protection de la ressource en eau et production durable de biomasse via le développement de plantations pérennes (saule, peuplier, miscanthus). Installées en bandes plus ou moins larges, ces plantations favorisent l'infiltration, le freinage des eaux de ruissellement et la sédimentation de fines particules en suspension. Contrairement aux aménagements d'hydraulique douce qui ont un coût d'implantation compris entre 20 € et 80 € par mètre linéaire, les bandes ligneuses aboutissent à une production de biomasse, dont la commercialisation doit permettre de couvrir la plus grande partie des frais de plantations, d'entretien et d'exploitation laissant présager ainsi le développement d'aménagements financièrement moins contraignants pour la Collectivité publique.

La plantation de bandes ligneuses poursuit de nombreux autres objectifs que la seule production énergétique : la lutte contre l'érosion des sols, la reconquête de la qualité de l'eau, l'amélioration offerte des rendements culturels, des intérêts cynégétique et de biodiversité. Or, les progrès en terme de mécanisation de la récolte ont été plutôt faibles, constituant un frein au développement de ces plantations. De plus, les circuits logistiques permettant d'acheminer le produit à l'utilisateur final restent à établir. L'optimisation des techniques de récolte et de la logistique est donc un pré requis pour étendre ces plantations.

C'est pourquoi, dans ce contexte la présente étude vise à évaluer le coût de revient de la plaquette de saules à l'aide de nouvelles machines de récolte de TTCR prometteuses et de chaînes logistiques adaptées à la Seine-Maritime, en cherchant à identifier les facteurs de nature à les optimiser.

# I. Contexte et problématique de l'étude

## I.1. Présentation des organismes d'accueil

Le stage s'est déroulé dans un premier temps à la chambre d'agriculture, puis le cabinet d'étude CEDEN a repris la suite de l'encadrement.

### I.1.1 La Chambre d'agriculture de Seine-Maritime

La Chambre d'agriculture de Seine-Maritime est un établissement public de l'Etat à caractère administratif (EPA) qui a pour vocation de représenter le monde agricole. Ses 45 membres sont élus par différents groupes d'électeurs, dont les plus importants, sont les chefs d'exploitation et des membres élus par les groupements professionnels agricoles (MSA, coopératives).

La Chambre d'Agriculture remplit deux missions principales :

- Une mission consultative : C'est l'instance consultative qui représente les intérêts du monde agricole au contact des collectivités et de l'Etat. Elle fait part des revendications des agriculteurs sur le terrain aux pouvoirs publics et base ses actions afin de satisfaire l'opinion générale.
- Une mission d'intervention : Elle a alors un rôle d'entreprise de services, par lequel, elle construit et met en œuvre des projets innovants afin de développer l'agriculture départementale, tout en diffusant des informations générales aux acteurs du monde agricole (agriculteurs, professionnels et collectivités). Elle apporte son expertise technique par le biais de conseils, de formations et des réponses afin de satisfaire au mieux les demandes du monde agricole, tout en relevant les nouveaux défis de l'agriculture.

### I.1.2 Le bureau d'étude CEDEN

CEDEN est spécialisé dans la valorisation agro-énergétique des biomasses (biomasse sèche et biomasse humide). Il a pour vocation de promouvoir une gestion écologique et durable de l'environnement sous l'angle de la promotion des énergies renouvelables, d'une utilisation rationnelle de l'énergie et d'une optimisation de la gestion des sous-produits et déchets.

CEDEN apporte à toutes les étapes du montage d'un projet et en toute indépendance des professionnels de la construction ou de l'exploitation, un soutien opérationnel au développement des énergies renouvelables, et notamment du bois énergie et des traitements biologiques des déchets biodégradables. Cet organisme conduit différents types de missions :

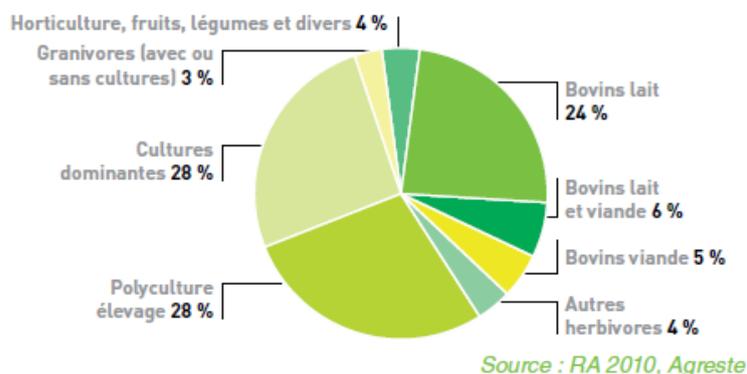
- Les études à caractère stratégique (schéma, planification, stratégie de développement) à l'échelle d'un vaste territoire (Région, Département, Parc naturel régional...).
- Les approches préalables au lancement d'un projet, au travers de missions (étude de faisabilité, étude d'opportunité, conseil et diagnostic)
- Les missions à caractère opérationnel (la maîtrise d'œuvre, l'assistance à maîtrise d'ouvrage, l'assistance à la mobilisation de ressource et à la structuration de l'écoulement des sous-produits.)
- Les missions de contrôle à l'issue de la mise en service des installations (assistance à l'exploitation et au suivi des installations, expertise d'installations).

## I.2 Contexte agricole et géographique de l'étude

### I.2.1 L'agriculture de Seine-Maritime

Par la présence de sols limoneux très profonds, l'agriculture en Seine-Maritime est majoritairement orientée vers des grandes cultures à forte valeur ajoutée (28% de la production). Il s'agit principalement du blé, d'orge, de pomme de terre et de lin. L'élevage est aussi très présent dans la partie Est du département plus bocager.

Figure 1 : Répartition des productions agricoles de Seine-Maritime.



L'activité de polyculture élevage et notamment la production laitière sont des activités tout aussi importantes (28 % et 24 %).

Figure 2 : Surface agricole utile et nombre d'exploitations sur le départements.

	2011		Nombre 2010	Tendance par an (2010-2000)	SAU moyenne 2010
SAU département	413 643	Exploitations moyennes et grandes	3 855	- 1,8 %	98,8 ha
<i>Dont surface toujours en herbe</i>	125 750				
Autres surfaces	216 762	Exploitations petites <sup>1</sup>	2 616	- 3,2 %	6,3 ha
<i>Dont surface boisée</i>	115 100				
<b>Surface Totale</b>	<b>630 405</b>	<i>(1) Production brute standard &lt; à 25 000 €</i>			

Source : SAA 2013

Sources : RA 2010, Agreste

La surface agricole utile du département était égale à 413 643 ha en 2011 pour une surface boisée de 115 100 ha.

D'après le recensement agricole de 2010, on recense environ 6 470 exploitations toutes tailles confondues avec une SAU moyenne de 100 ha pour les grandes à moyenne exploitations (Figure 2). La dynamique de croissance reflète la tendance nationale de réduction et de concentration des exploitations. 708 ha sont concernés par des mesures agro-environnementales Erosion et 315 ha par des MAE concernant la Directive cadre sur l'eau (Figure 3).

Figure 3 : MAE Erosion et DCE sur le département.

Source: RA 2010, Agreste.

Les démarches		Nombre d'exploit.	
MAE-T Erosion	Dossiers 2010	39	708 ha
MAE-T DCE	Directive cadre sur l'eau : nb de contrats 2010	15	315 ha

## I.2.2 La forêt et le bois énergie en Normandie

En Normandie, la surface boisée s'étend sur 400 000 ha soit 16 % du territoire. Elle est composée à 85 % de feuillus et à 15 % de résineux. Le volume de bois sur pied atteint 110 millions de tonnes (www.haute-normandie.ademe.fr). La production annuelle est de 4,5 millions de tonnes de bois valorisables. Un quart de la forêt est publique, majoritairement domaniale, notamment en Seine-Maritime. La quantité de bois énergie utilisée correspond à 2,7 millions de tonnes de bois par an : 2 millions de bûches (et de granulés) pour le chauffage domestique; 590 000 t/an pour les chaufferies et 100 000 t/an pour le chauffage collectif et tertiaire.

En Normandie, les trois-quarts de ces produits proviennent de bois sur pied (IFN et al. 2013) :

- du bois forestier représenté par environ 100 000 m<sup>3</sup> de bois (régénération de peuplements pauvres et rémanents forestiers) et 500 000 t de bois impropres au sciage,
- du bois bocager très présent via la nature des paysages. Ainsi, le linéaire de haies de 110 000 km et la surface de vergers de 60 000 ha représente un gisement annuel de 270 000 t,
- du bois de refus de compostage à hauteur de 400 000 t.

Le reste du bois est partagé entre des connexes de scierie et des bois de rebut (palette, caisse, bois faiblement adjuvanté). D'après l'Ademe (2013), la demande en bois énergie supplémentaire serait de 250 000 t par an de puis 2013. Pour satisfaire cette demande, la mobilisation de plus de peuplements pauvres et de rémanents est envisagée.

En moyenne le prix de la plaquette forestière rendue chaufferie est égale à 18,5-20,5 €/MWh PCI avec une livraison directe et de 22-24 €/MWh PCI si les plaquettes sont reprises sur une plateforme.

La carte des chaufferies sur la zone Normandie est disponible dans Annexe XV.

## I.2.3 Le Pays de Caux, une région océanique soumise à l'érosion

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques et géologiques du Pays de Caux.

Source: IFN, 2006.

Type de sol	profond et hydromorphe
Textures majoritaires	limoneux (29 %) (épaisseur de 10-15 m) limon sur argile (28%) sableuse (25%) argilo-sableuse ( 9%)
Type de roche mère	siliceux meuble
pH du milieu	6 à 7,5
Disponibilité en eau	forte, ruissèlement agricole marqué
Ennoyage saisonnier	ponctuel
Altitude maximale (m)	170
Type de climat	océanique
Précipitations annuelles (mm)	800-1000
Température annuelle moyenne (°c)	10,5
Température sur la période végétative moyenne (°c)	18
Durée moyenne d'insolation (h)	1600
Nombre de jours de pluie moyen annuel	170
Nombre de jours de gel annuel	30-50
Vent jours/an	89

Le Pays de Caux est soumis à un climat de type océanique. Son sol est profond et très sensible à l'érosion du limon, à faible teneur en argile (15 %) qui recouvre le plateau de Caux.

## I.3 Le programme Innobioma

Cette partie présente le programme Innobioma d'après le rapport d'Hubert Guérault (2014) et les données de la Chambre d'agriculture de Seine-Maritime, notamment de l'appel à projet Innobioma (Chambre d'agriculture de Seine-Maritime, 2014).

### I.3.1 Définition

Ce programme vise à remplacer les aménagements d'hydraulique douce, en accélérant la dynamique de replantation de cultures pérennes à haute productivité biologique (saule et miscanthus) initié depuis 2011 par la Chambre d'agriculture de la Seine-Maritime en étroite relation avec l'Agence de l'eau Seine Normandie et de nombreux organismes du territoire.

Tableau 2 : Caractéristiques du projet Innobioma.

Un projet..		
<p><b>... novateur</b></p> <p>Implanter des cultures pérennes à très haute productivité biologique en bandes est une innovation nationale.</p>	<p><b>... transversal</b></p> <p>Cancilier protection de la ressource en eau, lutte contre l'érosion, préservation de la biodiversité et développement économique (filière bois-énergie, diversification des revenus agricoles).</p>	<p><b>... multipartenarial</b></p> <p>Associer collectivités, agriculteurs, acteurs de la filière bois-énergie, organismes de recherches et de développement.</p>

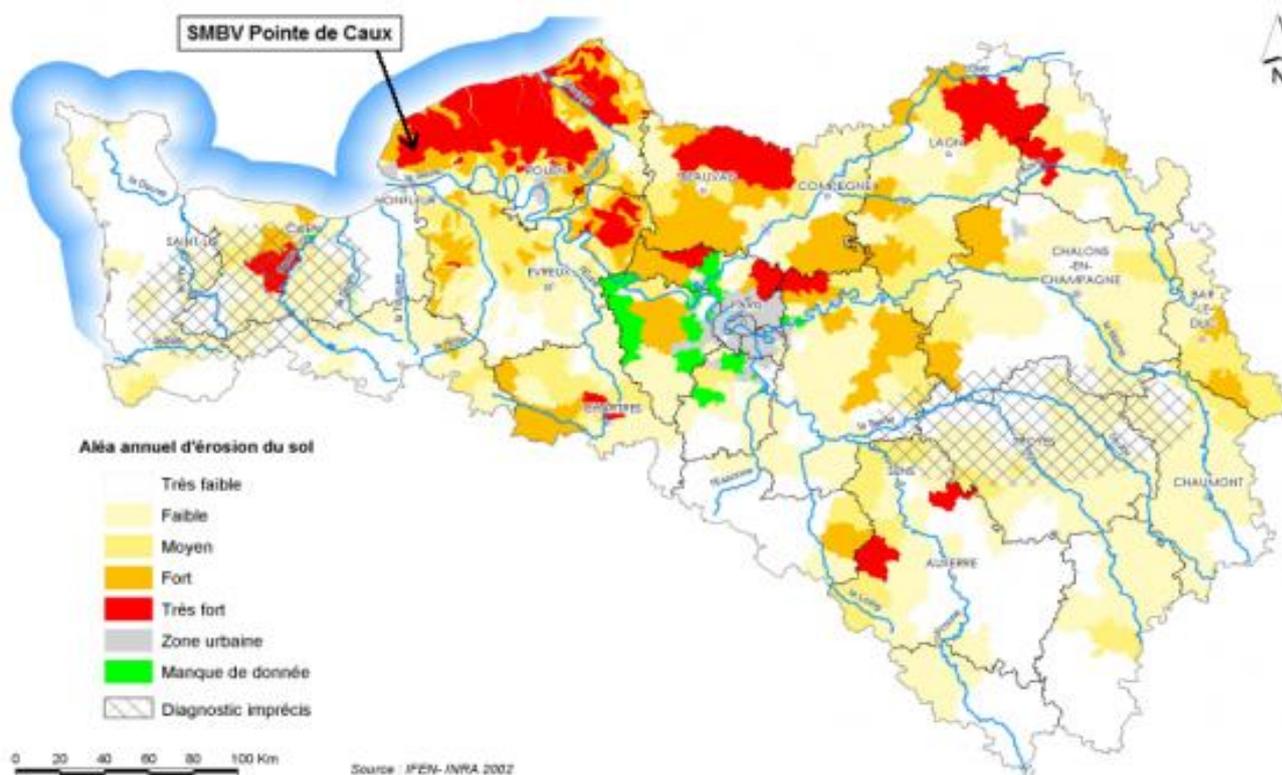
### I.3.2 Les enjeux du programme sur la Seine-Maritime

#### I.3.2.1 Du point de vue des collectivités publiques

La protection de la ressource en eau est un objectif majeur pour les collectivités dans le département et en particulier sur le secteur de la Pointe de Caux, où le risque d'érosion est très fort.

Figure 4 : Zones soumises à l'érosion sur le bassin versant de la Pointe de Caux.

Source: [smbv-pointedecaux.fr](http://smbv-pointedecaux.fr)

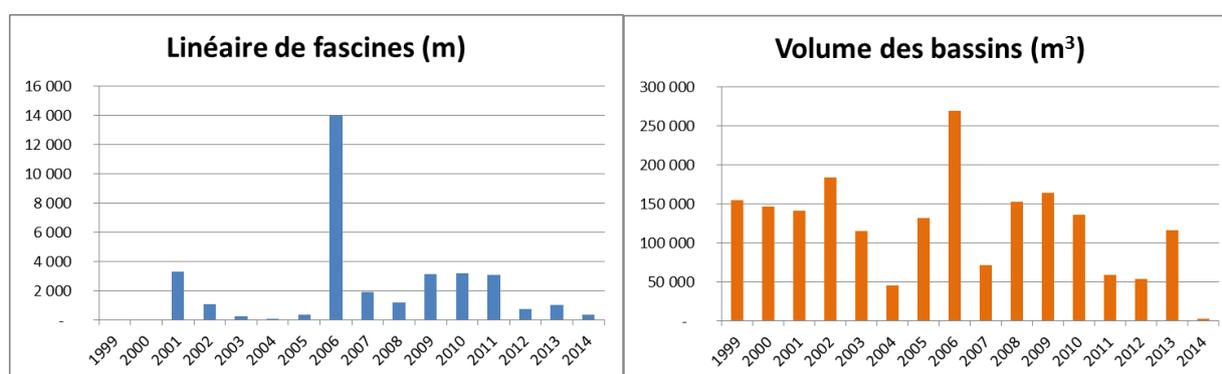


Jusqu'à présent, la protection de la ressource en eau a suscité la modification des pratiques agricoles (conversion à l'agriculture biologique, suppression des intrants, remise en herbe de prairie...) et s'est traduit par des aménagements de différentes natures (retenues d'eau, fascines, bandes enherbées), qui mobilisent des surfaces agricoles demeurant durablement improductives. Pour préserver cette ressource, depuis la fin des années 90, des ouvrages d'hydraulique douce ont donc été établis ; près de 2,5 km de fascines et de bandes enherbées et plus de 460 000 m<sup>3</sup> de bassins sur les bassins versants de la Pointe de Caux (Figure 5).

Mais ces aménagements représentent une importante charge financière pour la collectivité publique, comme pour l'agriculteur, ce qui constitue clairement un obstacle à la préservation ou à la reconquête de la qualité des eaux de surface et souterraines. Parallèlement, les collectivités souhaitent développer des sources d'approvisionnement énergétique locales pour répondre aux enjeux du Paquet Energie Climat. De nouvelles mesures doivent donc être prises.

Figure 5 : Historique d'implantation des ouvrages hydrauliques en Seine-Maritime.

Source : [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).



### 1.3.2.2 Du point de vue des agriculteurs

Les ouvrages d'hydraulique douce mis en place prennent souvent la forme de bandes enherbées. Avec la diminution de l'élevage, ces bandes sont souvent peu valorisées par les agriculteurs. Parallèlement, certains agriculteurs peinent à valoriser des terres impropres à la production alimentaire tout en ne souhaitant pas recourir à l'élevage.

### 1.3.2.3 Du point de vue des acteurs de l'énergie en Seine-Maritime

L'approvisionnement en combustibles bois est assuré en Normandie par un nombre croissant d'acteurs économiques. Principalement des chaufferies collectives qui sont approvisionnées par Biocombustible SAS. La gouvernance de cette société, qui rassemble les détenteurs de matières premières ligneuses, les entreprises d'exploitation forestière et du paysage, les transports et les consommateurs de bois pour l'énergie, s'apparente à celle d'une coopérative. Très impliquée dans le développement des territoires, elle cherche à promouvoir l'usage de nouvelles ressources ligneuses locales, notamment d'origine agricole.

Incitée par CEDEN, assistant de la ville du Havre, elle s'est ainsi engagée à intégrer 1000 t/an de saule qui représenteraient e l'ordre de 5 % des besoins de la chaufferie du quartier de Mont-Gaillard au Havre (chaufferie au bois de 12 MW). Le saule serait utilisé en mélange à d'autres bois et permettrait de diversifier les approvisionnements.

Cette opération pourrait contribuer substantiellement à la structuration d'une filière de valorisation durable de la biomasse produite par les BLC. En alliant préservation de l'environnement, économie et création d'une nouvelle filière, la mise en place de ces bandes pourrait devenir un outil de développement durable du territoire, qui permet de concilier simultanément plusieurs objectifs du Grenelle de l'environnement.

### **I.3.3 Mise en œuvre du programme Innobioma**

#### ***I.3.3.1 Périmètre concerné***

La carte de la zone d'étude est la Figure 6. Le périmètre concerné par le projet est celui des bassins versants et autres bassins d'alimentation de captage situés dans un triangle dont les sommets sont Le Havre, Lillebonne et Fécamp. Il totalise 900 km<sup>2</sup> soit un peu moins de 15 % de la Seine-Maritime. En priorité la plantation concerne le secteur de la Pointe de Caux.

Le projet vise un territoire à enjeux eau s'articulant autour du point de valorisation de la biomasse issue des saules : la communauté de l'agglomération Havraise (sur un rayon de moins de 50 km).

#### ***I.3.3.2 Surface et exploitations concernées***

L'objectif est de passer de la démonstration à un pré-développement en replantant de 30 à 35 ha sur quinze à vingt exploitations agricoles et sur des terres appartenant à des collectivités et à forts enjeux en matière de protection du réservoir d'eau (périmètres rapprochés de captage d'eau potable, bétouilles et ravines principalement, puis les cours d'eau dans un second temps). Afin d'atteindre ces objectifs, deux volets d'action ont été mis en place.

#### ***I.3.3.3 Premier volet exploratoire***

Un premier volet exploratoire du projet BLC a été réalisé entre 2011 et 2013 dans le but de donner un premier éclairage sur :

- la faisabilité économique et technique d'établir des BLC sur le territoire,
- l'effet sur le ruissellement érosif,
- les localisations possibles à l'échelle du territoire et de la parcelle,
- la forme et les itinéraires techniques en s'appuyant sur les premières BLC implantées en 2011 sur une surface d'1,5 ha.

Ce programme a abouti à la construction d'un comité de pilotage multipartenarial (dont la liste est disponible dans l'Annexe I) et à l'émergence d'un groupe d'agriculteurs moteur. Cependant, le déploiement massif des BLC nécessite d'approfondir les connaissances sur différentes thématiques. Un second volet a donc été lancé en 2015 avec le soutien de l'Agence de l'eau de Seine-Normandie.

#### ***I.3.3.4 Démarrage du second volet d'exploration du projet***

Le second volet est lancé car des questions restent à résoudre, concernant la faisabilité et l'optimisation matérielle des itinéraires techniques, la productivité et la caractérisation de la biomasse produite et les autres avantages environnementaux (avantage carbone, externalités positives).

##### **I.3.3.4.1 Faisabilité des BLC pour la production de biomasse : validation technico- économique et adéquation au marché**

Les essais réalisés antérieurement n'ont pas permis d'arrêter les itinéraires techniques définitifs, les équipements les plus appropriés à la plantation, à l'entretien et à l'exploitation des BLC. La biomasse produite demande ensuite à être caractérisée afin d'identifier les points forts et les points faibles vis-à-vis des filières de valorisation à mettre en place. Les plantations complémentaires ont enfin pour objectif d'affiner les conditions de réussite de ces plantations et de définir plus précisément les coûts d'investissement et d'exploitation de la filière.

- Mesurer la productivité et caractériser la biomasse produite (teneurs en azote et autres paramètres contribuant à évaluer le captage d'éléments minéraux par les plantes).
- Optimisation des itinéraires techniques, depuis la plantation, l'entretien, la récolte, jusqu'aux choix logistiques et filières de valorisation (test de broyage – compatibilité du produit obtenu avec les demandes du marché).
- Préciser l'économie de la filière : coût de production et étude de la pertinence de la filière et du coût de revient des combustibles/matériaux produits par rapport au marché.

Cette étape sera pilotée par la chambre d'agriculture, CEDEN et Biomasse Normandie.

### **1.3.3.4.2 Qualifier d'autres avantages environnementaux et sociaux .**

Les atouts de cette filière sont également liés aux retombées socio-économiques. Il conviendra d'évaluer les quantités de carbone immobilisées et à substituer aux énergies fossiles d'une part, et les avantages apportés en terme de biodiversité d'autre part. Les conditions de réussite de ce programme sont aussi liées à son équilibre économique, qui peut également provenir d'une politique de compensation carbone, émanant d'activités industrielles (agroalimentaire, chimie, pétrole) émettrices de gaz à effet de serre.

### **1.3.3.5 Etat actuel**

Début 2015, une candidature pour établir un groupement d'intérêt écologique et environnemental (GIEE) a été déposée et l'association « Terre eau énergie 76 » a été créée pour les producteurs.

Le recrutement de sites et d'agriculteurs sur le département se poursuit. Actuellement en 2015, 10 ha de BLC sont plantés en Seine-Maritime dont 4 ha de saule, dont les caractéristiques sont visibles dans l'Annexe III et la localisation dans la Figure 6. Ces BLC ne sont pour le moment pas majoritairement implantées dans la zone de la pointe de Caux soumise à forte érosion (en bleu). L'objectif fixé est le déploiement en conditions réelles, de 30 ha d'ici 2018 de BLC en priorité sur la Pointe de Caux. Mais le déploiement des BLC repose sur une adhésion forte des agriculteurs. Ils ne planteront qu'avec une garantie technique de récolte.

Les coûts de récolte et de revient de la plaquette de saule ont été autrement estimés par la Chambre d'agriculture, en utilisant une récolteuse Stemster MKII puis un Biobaler comme machine de récolte (Bonnafous, 2010 ; Nicolas, 2011). Les coûts de revient obtenus fluctuent entre 174 €/ t MS et 116 €/t MS. Cependant, il s'agissait d'une première approche technique où les matériels étudiés n'ont pas donné entière satisfaction et les coûts sont encore très incertains et nécessitent d'être optimisés.

L'étude présente a donc été commanditée dans ce but par la Chambre d'agriculture en partenariat avec CEDEN.

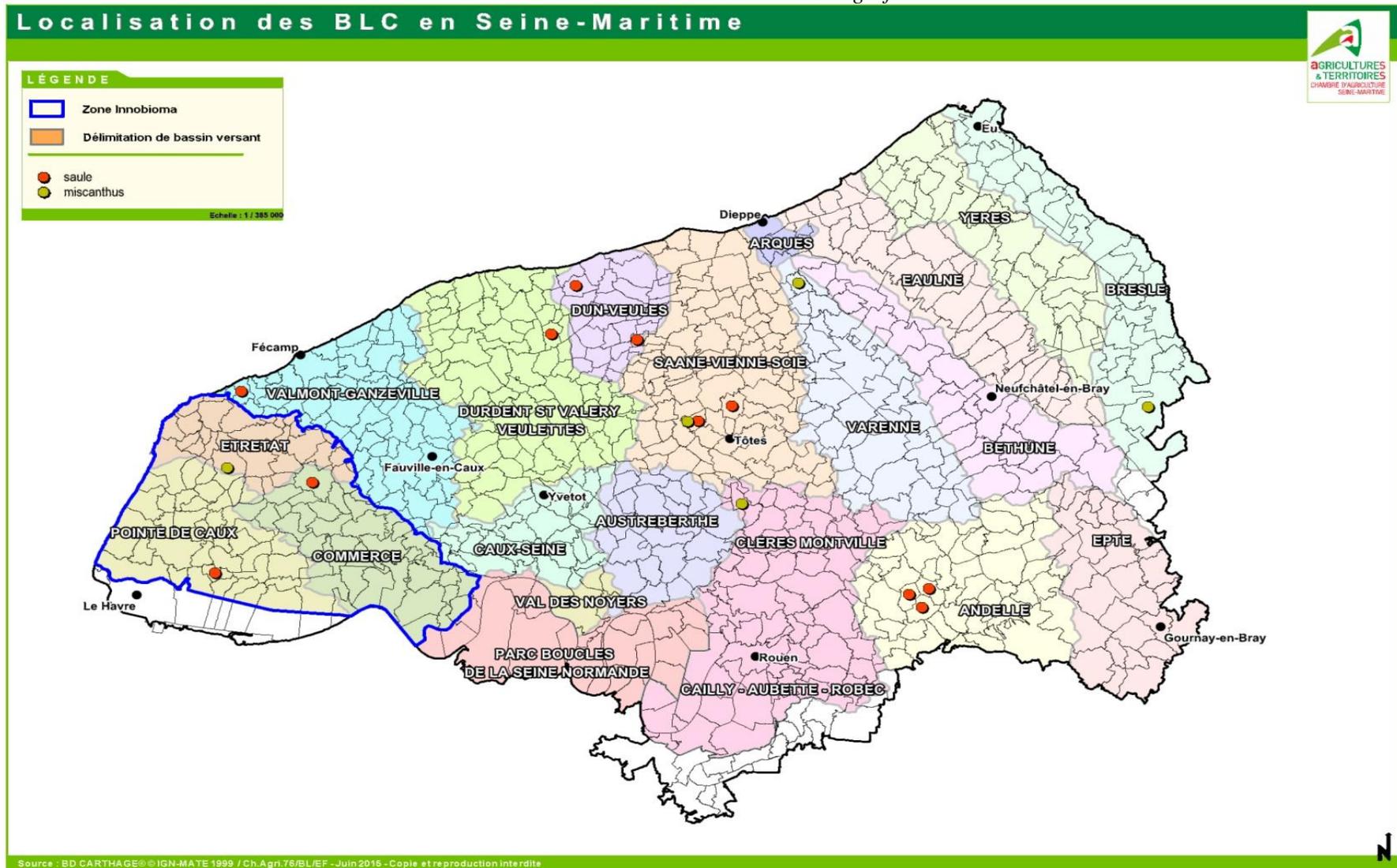
### **1.3.3.6 Objectifs de l'étude**

L'étude réalisée s'inscrit dans la continuité des travaux précédents avec plusieurs objectifs :

- consolider le choix d'une machine de récolte pour 2017 dans le contexte d'Innobioima,
- déterminer un prix de revient des plaquettes,
- obtenir une marge satisfaisante pour le producteur,
- resituer la compétitivité de la filière par rapport aux sources forestières,
- jeter les bases d'une filière d'écoulement et d'un partenariat durable entre producteurs et repreneur de biomasse.

Figure 6 : Localisation des BLC et de la zone d'érosion concernée en priorité par l'étude.

Source : [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).



## II L'étude bibliographique

Afin de remplir les objectifs, une étude bibliographique a été réalisée. Elle fait le point sur les plantations de TTCR de saule en plein champ ou en bandes, leur récolte et les chaînes logistiques utilisées.

### II.1 La méthodologie

La recherche bibliographique permet de recueillir les données techniques sur les nouvelles machines (coûts, performances, durée des opérations unitaires composants la récolte) et sur la logistique mise en place pour le bois énergie produit.

#### II.1.1 Les mots clés français et anglais retenus

Des mots clés sont sélectionnés pour faciliter la recherche et sont classés ci-dessous par thèmes :

- TTCR, saules, sylviculture intensive, culture du saule, bois énergie agricole, plantation forestière, cultures dédiées.
- Récolte des plantations à courte rotation, récolter la biomasse, mécanisation des TTCR, ensileuse à saule modifiée, récolteuse tiges entières, broyeur à saule, Biobaler, itinéraires techniques des TTCR.
- Logistique du bois énergie, stockage et séchage du bois énergie, transport du bois énergie.
- Short rotation coppice (SRC), Willow short rotation coppice, intensive silviculture, short rotation forestry, woody biomass, forest plantations.
- Harvesting short rotation coppice, mechanization of short rotation coppice, harvest line for short rotation coppice, modified harvester forager, whole stems harvester, billet harvester, forest mower-chipper, self-propelled harvester, crop management of SRC, energy crops.
- Woody biomass logistic, wood chipping, storage of wood chips, characteristics of willow wood.

#### II.1.2 Ressources utilisées

Plusieurs ressources documentaires ont été utilisées :

- des bases de données d'articles scientifiques comme Web of Science, Google scholar, Science Direct, SpringerLink et Taylor et Francis,
- les travaux en ligne d'instituts techniques comme le FCBA, l'ONF et le CREFF,
- les travaux de groupes et d'associations qui promeuvent l'usage de la biomasse comme AILE et le RMT Biomasse,
- la documentation interne à la chambre d'agriculture,
- la recherche à partir des références évoquées à la fin des articles scientifiques lus.

#### II.1.3 Sélection des articles pertinents

La recherche sur le machinisme de récolte des TTCR fut fortement productive ces deux dernières années. C'est pourquoi, la lecture s'est concentré sur les articles les plus pertinents sur le sujet. Principalement des articles récents et étrangers (rarement publiés avant l'an 2000). La lecture de documents techniques propres à des expériences françaises fut aussi riche d'enseignements.

Pour réaliser la synthèse bibliographique suivante, une centaine de références ont été lues et rassemblées. Seule une quarantaine, les plus pertinentes a été utilisée dans la synthèse.

## II.2 Synthèse des connaissances sur les plantations de saule et leurs itinéraires de production, de la récolte à la chaufferie.

### II.2.1 L'intérêt du TTCR de saule.

Les études conduites en Bretagne par l'association AILE (2007), en Wallonie par Jossart(2003) et par le CREFF(2011)<sup>1</sup>, ont permis de comprendre la multifonctionnalité des TTCR.

#### II.2.1.1 Définition

Le taillis à très courte rotation de saule (*Salix viminalis*) (cf figure 2) est une culture pérenne intensive, d'une durée de vie de 20-25 ans composée d'espèces ligneuses plantées à très haute densité (environ 15 000 pieds/ha), destinées à la production de bois-énergie. La fréquence de récolte est généralement de trois ans.

La plantation maintient son rendement jusqu'à cinq ans sans qu'il soit observé des problèmes de compétition entre tiges. Les souches produisent après la récolte de nouveaux rejets qui seront récoltés à leur tour à la fin d'un autre cycle de production. L'opération peut se répéter jusqu'à 7 ou 8 fois selon les régions (Labrecque et Teodorescu, 2008). Ces plantations sont répandues dans la plupart des pays d'Europe du Nord, notamment en Suède, au Danemark et au Royaume Uni (voir

Figure 7 ci-dessous), pour l'alimentation des chaufferies collectives et industrielles.

Figure 7 : Surface actuelle de TTCR en Europe.

Source: Pecenka et al.2014.

Pays	Essence	Surface maximal plantée (ha)
Suède	Saule, Peuplier	16 000
Pologne	Saule, Peuplier	8200
Italie	Saule, Peuplier	6500
Danemark	Saule	6300
Allemagne	Saule, Peuplier	4700
Royaume-Unis	Saule	3600
France	Saule, Peuplier	2300
Autriche	Saule, Peuplier	2100
<b>Total (ha)</b>		<b>49700</b>

#### II.2.1.2 Rôle d'épuration et de rétention

Les plantations de TTCR (cf.Figure 8) furent d'abord introduites pour l'épuration des eaux usées et agricoles et la phytoremédiation des sols pollués (Dimitriou et Aronsson, 2005). L'Association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols (AREAS), a montré que par leur capacité d'infiltration, de sédimentation et de freinage, les TTCR en bande ou en plein champ, réduisent le ruissèlement sur des parcelles sensibles à l'érosion (Ducatillon, 2013). Elles constituent de véritables pompes à nitrates qui diminuent le risque de lessivage d'azote, d'après le programme Wilwater (AILE, 2007), qui a confirmé leur intérêt pour la valorisation des boues de station d'épuration, tel que l'ont développé les collectivités suédoises dans le début des années 90.

---

<sup>1</sup> Un groupe de recherche international qui promeut l'usage des énergies renouvelables et de la biomasse.

### II.2.1.3 Production d'une source d'énergie locale et durable

Ce type de plantation est une source d'énergie renouvelable acceptable du point de vue environnemental car le bilan CO<sub>2</sub> du bois produit est neutre, sa combustion libérant du CO<sub>2</sub> préalablement fixé par l'arbre grâce à la photosynthèse (Somer, 2013).

Par ailleurs, ces plantations peuvent améliorer l'économie rurale locale car elles sont plutôt destinées à des parcelles qui ne sont pas ou peu valorisées : des parcelles trop humides, trop sèches pour y planter des cultures alimentaires, ou encore trop distantes du siège de l'exploitation (CREFF, 2011). Le revenu des agriculteurs est sécurisé par la diversification des produits : bois déchiqueté, paillage ou bois raméal fragmenté (BRF).

Figure 8 : Plantation de TTCR de saules en plein champ et BLC de saules.

Source: [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).



Le TTCR de saules est une plantation multifonctionnelle, qui permet de :

- lutter contre le ruissellement et maintenir la qualité des sols,
- préserver la qualité des eaux de surface ou souterraines,
- immobiliser temporairement le carbone atmosphérique,
- produire de la biomasse localement et valoriser les déprises agricoles.

## II.2.2 Les caractéristique des plantations de TTCR de saule

### II.2.2.1 Schéma de plantation

Les TTCR sont plantés majoritairement selon deux schémas de plantation (cf. Figure 9) aux qualités propres (cf. Tableau 3) :

- en simple rang (à gauche sur la figure), avec un écartement entre rang de 1,8-3 m et d'au moins 0,5 m dans le rang,
- en double rang (à droite sur la figure) , avec un écartement entre double rang égal à 1,5 m, de 0,75 m entre les lignes et d'au moins 0,5 m dans le rang.

Figure 9 : Schéma de plantation en simple rang et double rang.

Source: CREFF, 2011.

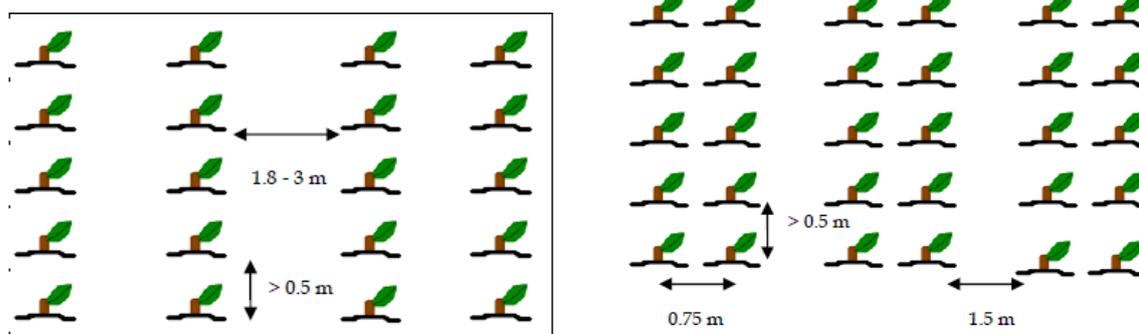


Tableau 3 : Avantages et inconvénients des modalités de plantation.

Source: CREFF, 2011; Pecenka et al. 2014.

Modalités de plantation	Avantages	Inconvénients
simple rang	désherbage mécanique de l'inter-rang facilité	emprise plus grande de la culture
	récolte facilitée	moins de rendement par ha
double rang	facilite le désherbage par la fermeture des cimes	désherbage par les machines plus complexe, problème de circulation dans l'inter rang,

Pour des raisons économiques, les professionnels tendent vers des rangs simples (Pecenka et al. 2014). Mais, dans le cadre d'Innobioma, les plantations ont pour objectif principal d'augmenter l'infiltration des eaux de ruissellement sur les zones d'érosion agricoles. Elles comportent donc des rangs doubles qui améliorent l'infiltration et le freinage des eaux de ruissellement.

### II.2.2 Itinéraire technique post-récolte

Le choix du site d'implantation et de l'itinéraire technique sont particulièrement importants. Ils conditionnent les résultats de la plantation sur 21 ans (AILE, 2007). L'Annexe IV et l'Annexe V présentent les conditions de culture optimales et l'itinéraire pratiqué en Normandie.

A la vue des conditions d'humidité présente en Normandie et des températures (Tableau 1), les plantations de saules sont adaptées à la région.

### II.2.3 Rendement et diamètres à la récolte des plantations rencontrées.

Les variétés utilisées en Seine-Maritime sont Tora, Inger et Tordis. Un descriptif de chacune est disponible dans l'Annexe VII. Le rendement par ha, varie selon les variétés entre 16 et 20 t MB/ha/an, soit 48 à 60 t MB/ha/récolte. La dimension des tiges rencontrées est importante à considérer pour la récolte. Les dimensions observées ont été relevées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Dimensions des tiges récoltées en Seine-Maritime en 2012.

Source: www.Chambre d'agriculture de Seine-Maritime.

TORA			INGER			TORDIS			
Bandes simples									
	Section (cm)	Hauteur (m)	Poids (Kg)	Section (cm)	Hauteur (m)	Poids (Kg)	Section (cm)	Hauteur (m)	Poids (Kg)
<b>Médiane</b>	2,6	4,075	0,8	2,9	4,6	1	3,6	6,15	2,4
<b>Min</b>	1,1	1,8	0,1	1	1,42	0,1	1,1	1,4	0,1
<b>Max</b>	4,8	5,55	4	4,6	6,6	3,2	5,4	7,45	5,2
Plein champ									
	Section (cm)		Section (cm)		Section (cm)				
<b>Médiane</b>	3,9		4,05		4,1				
<b>Min</b>	1,2		1,2		1				
<b>Max</b>	5,9		6,4		6,5				

#### Enseignements bibliographiques :

En Seine-Maritime, le diamètre de tiges maximal est égal à 6,5 cm. Compte tenu des conditions climatiques qui peuvent varier (abondance d'eau, fort ensoleillement), il est important de considérer qu'il peut atteindre 7-8 cm.

La conduite en très courte rotation des TTCR justifie la réalisation d'une récolte mécanisée agricole. Ses particularités sont présentées ci-dessous.

### II.2.3 La récolte des TTCR

Les données suivantes sont majoritairement issues de l'article de Pecenka et al.(2014), qui a recensé les différentes chaînes de production de TTCR, des articles de Berhongaray et al.(2013), Schweier et al. (2012) et Vanbeveren et al.(2015), qui ont mené des études comparatives sur plusieurs machines de récolte. Cette synthèse sur la récolte fait aussi plus succinctement référence à Dawson (2007), Nicolas (2010), Pecenka (2015); RMT Biomasse (2014) et Savoie et al.(2013).

#### II.2.3.1 Les conditions de récolte

La période de récolte préconisée est l'hiver avant la reprise de la végétation de printemps (décembre à mi mars), pour des raisons bien spécifiques (Tableau 5 ci- dessous).

Tableau 5 : Caractéristiques de la période de récolte des saules

Conditions de récolte	Avantages	Inconvénients
sol gelé	préservation de la structure du sol	fenêtre de récolte courte, faible flexibilité de récolte
feuilles tombées	réduction des exportations	
	pas de feuilles dans la plaquette	
sève redescendue	préserve la viabilité de la plantation	
	réduction de la teneur en eau du bois	

Deux systèmes de récolte sont utilisés, le système de broyage sur parterre de coupe et le système sans broyage Plusieurs produits peuvent être obtenus (Figure 10).

#### II.2.3.2 Les modes de récolte

##### II.2.3.2.1 La récolte avec broyage sur parterre de coupe.

C'est la méthode la plus répandue en Europe (Lechasseur, 2007). Les saules sont broyés directement lors de la coupe pour obtenir un broyat frais (du copeau), directement utilisable.

##### II.2.3.2.2 La récolte sans broyage

Ce mode de récolte se caractérise par la coupe puis le stockage de la matière. Le broyage est additionnel. Il mène à la production de deux produits, des tiges entières et des balles.

###### II.2.3.2.2.1 Récolte en tiges entières

Les tiges de saule sont récoltées entières et déposées en tas au bout de la parcelle. Elles sèchent puis sont broyées quelques mois plus tard ou juste après la récolte (Schweier et al.2012). La récolte nécessite des récolteuses spécialisées ou des méthodes forestières (Pecenka et al.2014; Dawson, 2007). Ces machines augmentent l'emprise des plantations car des fourrières d'au moins 12 m de large sont nécessaires pour tourner en bout de rang (Vanbeveren et al.2015).

###### II.2.3.2.2.2 Récolte en balles

A la récolte, les tiges sont coupées et pré-broyées, enroulées et compressées en balles à l'aide d'un round baller à saules (RMT Biomasse, 2014, Savoie et al, 2013 ; Somer, 2013). La manutention et le transport sont également optimisés. La matière est densifiée ; 30- 40 balles peuvent être transportées par remorque (Nicolas, 2007).

Figure 10 : Broyat hétérogène, tiges entières et balles de saule.

Source: Pecenka et al.2015; www.nordicBiomass.dk



### II.2.3.3 Synthèse sur les produits de récolte

Tableau 6 : Avantages et inconvénients des modes de récolte et des produits obtenus

Récolte en copeaux	Récolte en tiges entières	Récolte en balles
Avantages		
coupe et broyage simultanés	conservation des tiges facilitée	densification de la biomasse
minimise l'énergie nécessaire	séchage naturel des tiges	facilité de stockage et de manutention
meilleure qualité de broyat (broyage frais)	peu de dégradation par fermentation	séchage naturel des balles
densification du transport	bonne adaptation aux petites parcelles sans infrastructures de séchage à disposition	peu de dégradations par fermentation
possibilité d'envoi direct à la chaufferie	flexibilité dans la récolte	
Inconvénients		
coût de séchage supplémentaire	manutention supplémentaire et coût de broyage élevé	coût de broyage supplémentaire
risque de perte de PCI par fermentation	difficultés de transport	nécessite une rupture de charge
perte par envol lors de la récolte	qualité de plaquette plus faible par le broyage de bois sec (augmentation de la fraction fine)	dégâts sur les souches, difficulté de reprise
		perte de matières (~16%)

La récolte des TTCR est mécanisée et s'apparente à une récolte agricole. Elle se décline en plusieurs méthodes dépendantes de la forme de produit recherchée.

## II.2.4 Des machines de récolte diversifiées

La volonté de diminuer le coût de production des TTCR a fait émerger de nouveaux modèles très prometteurs, s'ajoutant aux modèles existants. Ils sont parfois proches des machines forestière<sup>2</sup>.

### II.2.4.1 Les matériels de récolte avec broyage sur parterre de coupe

#### II.2.4.1.1 Les ensileuses modifiées équipées d'une tête de récolte à saules

On utilise des ensileuses à maïs de différents constructeurs. Les ensileuses Class Jaguar sont les plus utilisées. Des ensileuses Krone Big X 1100, New Holland FR9000/450 et John Deere sont également adaptées à la coupe du saule (Pecenka et al.2014). Elles comportent des têtes adaptées à la coupe de taillis HS-2 et HS-1 (Spinelli et al.2008). L'usage de ce type de machine n'est justifié qu'à partir d'une surface plantée de 300-400 ha (Pecenka et al.2014 ; Rosenqvist et al. 2013).

<sup>2</sup> Pour utiliser ces machines, l'équipement du tracteur en mode forestier est nécessaire (Savoie et al. 2013). Il s'agit de protéger le réservoir, le système de refroidissement et la tuyauterie hydraulique et d'ajouter des pneus forestiers pour éviter les crevaisons causées par les souches.

Figure 11 : Ensileuses à saule, New Holland à gauche et Class à droite.

Source: [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).



#### II.2.4.1.2 Les broyeurs embarqués simple et double rang

Spécialement conçu pour la récolte des TTCR, ce type de matériel est monté sur un tracteur (Berhongaray et al. 2013 ; Pecenka et al. 2014). Ils s'inspirent des broyeurs mobiles à tambour de bois déchiqueté, développés en agriculture mais il y a actuellement peu de recul sur ces matériels.

Figure 12 : Broyeurs JF Z200 Hydro E, GMHT 140, JF Harvester.

Source : [www.jenz.de](http://www.jenz.de); [www.nyvraa.dk](http://www.nyvraa.dk); [www.jenz.de](http://www.jenz.de)



Tableau 7 : Caractéristiques des machines avec broyage sur parterre de coupe en simple rang

	Ensileuse à saules	JF Z200 Hydro E	JF Z200 Hydro C	GMHT 140	JF Harvester	BR 600
Type de machine	Ensileuse	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué
Constructeur	Claas, New Holland, John Deere	Ny vraa	Ny vraa	Jenz	Ny vraa	Plaisance Equipements
Type de produit	copeaux	copeaux	copeaux	copeaux	copeaux	copeaux
Poids récolteuse (t)	13	1,5	2	3,5	2,3	4,85
Poids du tracteur (t)	–	6	6	6	6	14
Schéma de plantation	simple/double rang	double rang	double rang	simple/double rang	double rang	simple/double rang
Diamètre de récolte maximal (cm)	15	6	4	10	8	15
Coût d'acquisition (€)	35000+ 85 000 pour la tête de coupe	36 000	46 000	85 000	55 000	85 000
Puissance requise (Ch)	768	255	150	340	170	400
Rendement de récolte (t MS/h)	20	–	–	20	–	–
Vitesse d'avance maximale (km/h)	6	5	5	8	5	–
Compaction du sol	forte	faible	faible	faible	faible	forte

### II.2.4.1.3 Les broyeurs embarqués simple rang

Ces broyeurs permettent uniquement la récolte de simples rangs (Figure 13) :

Tableau 8 : Caractéristiques des machines avec broyage sur parterre de coupe en simple rang

	JF 292	GMHS 100	RT500P
Type de machine	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué	Broyeur embarqué
Constructeur	Ny vraa	Jenz	Spapperi
type de produit	copeaux	copeaux	copeaux
Poids récolteuse (t)	1,2	0,6	1,8
Poids du tracteur (t)	6	6	6
Schéma de plantation	simple	simple	simple
Diamètre de récolte maximal (cm)	6	15	10
Coût d'acquisition (€)	29 200	<40 000	–
Puissance minimale (Ch)	120	102	180
Rendement de récolte (t MS/h)	–	–	–
Vitesse d'avance maximale (km/h)	5	5	–
Compaction du sol	faible	faible	faible

Figure 13 : Broyeurs JF 292, GMHS 100 et RT500P.

Source: [www.nyvraa.dk](http://www.nyvraa.dk); [www.jenz.de](http://www.jenz.de) ; [www.spaperi.it](http://www.spaperi.it).



#### Enseignements bibliographiques

Deux types de machines sont utilisés pour la récolte avec broyage sur parterre de coupe :

- des ensileuses adaptées aux grandes surfaces et avec une performance de récolte importante
- des broyeurs embarqués qui sont assez récents et plus adaptés à de petites parcelles avec une performance de récolte plus faible mais une utilisation moins contraignante.

Ces machines sont toutefois rapidement limitées sur des diamètres de tiges trop importants. Pour les broyeurs, une majorité ne récolte pas les plantations plantées en double rang.

### II.2.4.2 Les matériels de récolte sans broyage

Ces matériels sont proches de matériels forestiers (cf. Figure 14).

#### II.2.4.2.1 Les récolteuses de tiges entières

Ce sont des machines similaires à une fourragère agricole attelée sur un tracteur. Les principaux modèles sont la Stemster MK III de Nordic Biomass et la récolteuse Rod Picker. Le stockage des tiges est assuré par une remorque située à l'arrière de l'engin. Lorsque la capacité de stockage est atteinte, il est nécessaire de déposer les tiges au milieu du rang (Berhongaray et al.2014; Schweier et al.2012).

La récolteuse Rod-Picker est une alternative à la Stemster, conçue à l'occasion d'un programme de recherche européen qui s'est achevé en 2015. Elle comporte une fagoteuse de tiges en plus. Le brevet d'exploitation sera exploité par la firme danoise Egedal Maskinfabrik (Peshel et al.2014).

### II.2.4.2.2 Le Biobaler

C'est un round baller à saules développé par le constructeur agricole canadien Andersson. Il permet la coupe de tiges qui sont enroulées sur elles mêmes pour former des balles (Savoie et al.2013).

Figure 14 : Stemster MK III, prototype Rod-Picker et Biobaler.

Source: [www.nordicbiomass.dk](http://www.nordicbiomass.dk); [rod-picker.eu](http://rod-picker.eu); [www.grpanderson.com](http://www.grpanderson.com).



Tableau 9 : Caractéristiques des machines sans broyage

	<b>Stemster MKIII</b>	<b>Biobaler</b>	<b>Rod-Picker</b>
<b>Type de machine</b>	récolteuse tiges entières	round baller	récolteuse tiges entières
<b>Constructeur</b>	Nordic Biomass	Groupe Andersson	Egedal Maskinfabrik
<b>Type de produit</b>	tiges entières	balles	tiges entières
<b>Poids récolteuse (t)</b>	7	6,8	2,9
<b>Poids du tracteur (t)</b>	6	6	6
<b>Schéma de plantation</b>	simple/double rang	simple/double rang	simple/double rang
<b>Diamètre de récolte maximal (cm)</b>	20	10	8
<b>Coût d'acquisition récolteuse (€)</b>	215 000	115 000	90 000
<b>Puissance requise (Ch)</b>	130	125	82
<b>Rendement de récolte (t MS/h)</b>	9,5	6,7	–
<b>Vitesse d'avance maximale (km/h)</b>	7	5	12
<b>Capacité de stockage remorque (t)</b>	4,5	–	1,5
<b>Compaction du sol</b>	modérée	modérée	faible

#### Enseignements bibliographiques :

Deux types de machines sont utilisés pour la récolte sans broyage:

- des récolteuses, proches de la récolte forestière et permettant la récolte de tiges entières.
- un Biobaler qui produit des balles de saules et qui facilite la manipulation du produit.

Ces deux types de machines sont assez peu sensibles aux diamètres de tiges.

### II.2.4.3 Les performances de récolte

Suite à cette veille technologique sur les machines, on s'est intéressé aux performances de récolte.

Tableau 10 : Ensemble des performances et des coûts de récolte issus des articles étudiés.

Modèle	Machine	Performance ha/h	Coût €/h	Coût €/ha	Coût €/t MB	dont tracteur	dont broyage	Source
FR90x0	ensileuse	2	281	455	13	-	-	Schweier et al.2012b
FR90x0	ensileuse	2	281	503	25	-	-	Schweier et al.2012b
FR90x0	ensileuse	1	281	419	14	-	-	Schweier et al.2012b
FR90x0	ensileuse	3	281	752	22	-	-	Schweier et al.2012b
FR90x0	ensileuse	0	281	464	29	-	-	Berhongaray et al.2015
Claas	ensileuse	0	0	436	0	-	-	Jossart, 2003
<b>moyenne ensileuse</b>		2	281	505	21			
Stemster MKII	récolteuse	0		1726	29	oui	non	Bonnafous, 2010
Stemster MKIII	récolteuse	2	330	815	21	oui	oui	Schweier et al.2012a
Stemster MKIII	récolteuse	/	196	541	34	oui	non	Berhongaray et al.2014
Stemster MKIII	récolteuse	1	289	779	17	oui	non	Vanbeveren et al.2015
<b>moyenne récolteuse</b>		1	272	712	24			
JF Z200 Hydro E	broyeur embarqué	0	0	387	24	oui	-	Berhongaray et al.2014

D'après le Tableau 10, pour la récolte de plein champ on constate les coûts suivants :

- la récolte à l'ensileuse coûte en moyenne **505 €/ha**,
- la récolte avec une récolteuse, coûte en moyenne **660 €/ha**,
- la seule référence sur les broyeurs embarqués est 387 €/ha.

Pour les BLC, on trouve les coûts estimés par Bonnafous (2010) et Nicolas (2011).

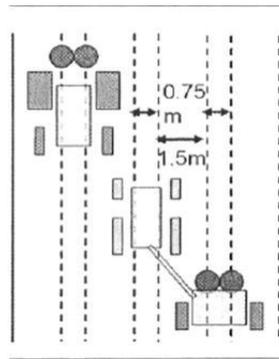
### II.2.4.4 Les critères de sélection des machines de récolte.

La bibliographie et notamment Lavoie (2007) a permis d'identifier les caractéristiques d'une récolteuse à respecter pour les plantations de Seine-Maritime :

- récolter de petites parcelles peu portantes et plantées en doubles rangs ;
- couper des diamètres de **60-80 mm** ;
- avoir une largeur de coupe d'au moins **1,15 m** pour récolter un double rang (deux rangs de saule espacés de 0,75 m), plus **0,20 m** de débordement au-delà du centre des rangées ;
- avoir une largeur maximum de **2,6 m** pour circuler dans les rangs simples espacés de 1,5 m, avec une distance de **0,20 m** entre l'extérieur des roues et le centre de la rangée ;
- régler la hauteur de coupe à **100 mm du sol** (tout en restant ajustable, pour ne pas user les lames.
- minimiser la compaction du sol ;
  - maintenir la vitalité et la reprise des plants en évitant l'éclatement des souches ;
  - garantir l'infiltration des eaux car la compaction diminue la macroporosité du sol, c'est-à-dire l'espace occupé par l'air dans un sol. De ce fait, la conductivité hydraulique à saturation et l'infiltration de l'eau sont réduites (Destain, 2013).
- pouvoir se déporter d'une distance de **2,5 m** de chaque côté de l'axe central du tracteur (la distance centre à centre des paires de rangs à récolter) pour les récolteuses tractées (Figure 15 ci-dessous).

Figure 15 : Schématisation de la position dans le rang des machines lors de la récolte de doubles rangs.

Source: Lavoie, 2007.



## II.2.5 Caractéristiques du bois produit

### II.2.5.1 Propriétés du bois de saule

Tableau 11 : Un bois de faible qualité pour la combustion.

Source :RMT Biomass, (2012) ; Phyllis 2.

	Humidité	PCI anhydre	Taux de cendres	Température de fusion de cendre
<b>TTCR de saule</b>	49%	17,3 MJ/ kg 4800 KWh/t	2,9%	1218 °c

Le bois issu des TTCR n'est pas de très grande qualité :

- c'est un bois riche en écorce, avec un taux de cendres élevé, évalué à 2,9 %,
- c'est un bois humide (50 % d'humidité sur brute à la récolte),
- c'est un bois hétérogène ; la plaquette produite n'a pas toujours la même forme (Figure 10),
- c'est un bois foisonnant, tendre et cassant, ce qui complique la récolte.

La masse volumique du saule est égale à 760 kg/ m<sup>3</sup> pour du bois plein. La masse volumique apparente (MAP) moyenne s'élève à 250 kg/m<sup>3</sup> pour des copeaux et à 190 kg/m<sup>3</sup> pour des tiges.

A 50% d'humidité, le PCI est égal à 2,06 MWh/ t MB. A 45 % d'humidité, il est égal à 2,33 MWh/t MB. Ces valeurs viennent de la formule suivante<sup>3</sup> :

$PCI (KWh \text{ par } t \text{ MB}) = PCI \text{ du saule anhydre} \times (100 - \text{taux d'humidité en } \%) / 100 - 6.786 \times \text{taux d'humidité en } \%$ .

#### Enseignements bibliographiques :

Le saule issu de TTCR est un bois de faible qualité du à un PCI faible, un taux de cendre et à un taux d'humidité élevé. Il est également très foisonnant, notamment lorsqu'il est rangé en tiges.

<sup>3</sup> La valeur 6.786 correspond à la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

## II.2.5.2 Débouchés possibles pour la plaquette de saule.

Tableau 12 : Classification professionnelle simplifiée des combustibles bois déchiquetés.

Source: CIBE, 2011.

Classification professionnelle simplifiée des combustibles bois déchiquetés propres (non adjuvantés)						
catégorie et forme	classe de granulométrie	classe d'humidité	taux cendres	Contenu énergétique	préconisations d'utilisation	nature, origine combustible
Petites plaquettes bois calibrées fins sèches C1	P16-P45A	M15-M30	A0.5-A0.7	3,4 à 4,2 MWh/t moy: 3800 kWh/t	petite à très petite chaudière P < 200kW - 300 kW foyer volcan, désilage vis	PF, CIB sans écorces
Plaquettes calibrées séchées ou ressuyées C2	P45-P63	M30-M40	A1.0-A2.0	2,8 à 3,4 MWh/t moy: 3100 kWh/t	petite à moyenne chaudière de 400 kW jusqu'à 1,5 MW foyer volcan, désilage vis	PF, CIB % écorces faible
Plaquettes-broyats non calibrés séchés ou ressuyés C3	P63-P125	M35-M45	A1.5-A3.0	2,5 à 3,1 MWh/t moy: 2800 kWh/t	moyenne chaudière 800 kW < P < 3 - 5 MW foyer grille (voire volcan)	mix-produit PF, CIB, BFV % écorces < 50%
Broyats non calibrés très secs C4	P100-P200	M10-M20	A1.0 - A3.0	3,9 à 4,5 MWh/t moy: 4200 kWh/t	moyenne à grosse chaudière 0,8 - 1 MW < P < 3 à 5 MW foyer grille ou équivalent	broyat palettes BFV, CIB sans écorces
Broyats non calibrés très humides C5	P100-P200	M40-M55	A3.0-A5.0	1,9 à 2,8 MWh/t moy: 2400 kWh/t	très grosse chaudière P > 5 - 6 MW foyer grille ou équivalent	Mix produit PF, CIB % écorces élevé % BFV peu élevé

La classification des combustibles bois déchiqueté ci-dessus permet d'identifier les débouchés de la plaquette de saule. Elle correspond donc à la catégorie C5. C'est donc un bois qui ne peut être utilisée sans ressuyage que dans de très grosses chaufferies, à savoir de grosses chaufferies collectives comme celles du Havre ou des chaufferies industrielles. Avec un ressuyage d'un mois, la plaquette appartient à la catégorie C3, qui peut être utilisée en chaufferies collectives moyennes.

### Enseignement bibliographiques :

Le taux de cendre du saule et sa forte humidité ne permettent pas un usage en petites chaudières. Les producteurs de saule ne pourront donc pas valoriser leur plaquette en interne pour le chauffage. L'usage en grosses chaufferies est privilégié.

La partie suivante présente les chaînes d'approvisionnement logistiques identifiées.

## II.2.6 La chaîne d'approvisionnement de la récolte à la chaufferie

### II.2.6.1 Définition

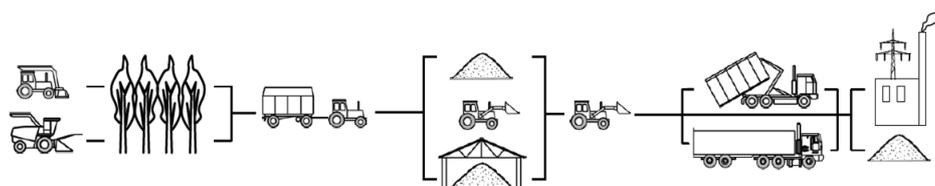
La chaîne d'approvisionnement inclue toutes les opérations comme le débardage du produit sur la plantation, le séchage, le stockage, le broyage du bois et le transport. Les coûts et la sélection de la chaîne d'approvisionnement dépendent fortement de la matière finale délivrée (Huisman, 2003 ; Keefe et al.2014). Les travaux de Pecenka et al. (2014) notamment, ont mis en lumière les chaînes logistiques pratiquées pour la production de saule (tous les schémas suivants sont issus de cet article).

### II.2.6.2 Présentation des chaînes d'approvisionnement logistique

#### II.2.6.2.1 Récolte par broyage sur parterre de coupe

Ce mode de récolte mène à la production d'un produit directement broyé et collecté sur la parcelle. Les opérations sont donc moins nombreuses. Ce type de chaîne est illustré dans la Figure 16.

Figure 16 : Chaîne d'approvisionnement agricole en copeaux.



## Enseignements bibliographiques

La récolte avec broyage sur parterre de coupe et l'organisation logistique agricole se définissent par :

- le recours à une collecte sur la parcelle durant la coupe est obligatoire,
- le produit est très vulnérable à la fermentation,
- un séchage du copeau est impératif faute d'une utilisation rapide en chaufferie,
- le broyage est simultané,
- la plaquette produite est peu calibrée et s'apparente à un broyat grossier.

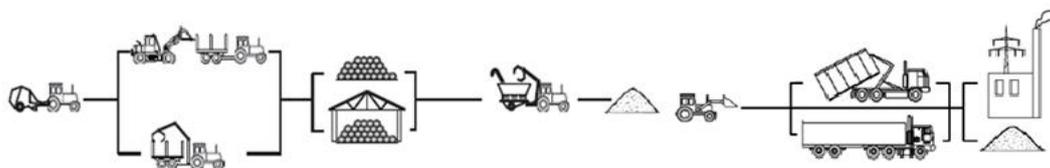
### II.2.6.2.2 Système de récolte sans broyage

La chaîne est légèrement différente car un broyage additionnel est nécessaire. Trois chaînes sont possibles (Pecenka et al.2014) selon le produit obtenu à la récolte : la chaîne agricole en balles, la chaîne agricole en tiges et la chaîne forestière en tiges (Figure 17, Figure 18 et Figure 19).

Le ressuyage naturel est l'avantage de ces produits car les tiges et les balles ne fermentent pas. Avec un ressuyage naturel à l'extérieur, l'humidité du bois va décroître vers les 25 % en 6 mois (Keefe et al, 2014 ; Somer, 2013). Le ressuyage est plus long mais il n'y a pas de frais de séchage<sup>4</sup>.

Les tiges doivent ressuyer car le broyage de tiges humides est compliqué. De plus, le fin bout des tiges entraîne un broyage très peu dense. Un effilochement du bois est observé et abîme les broyeurs.

Figure 17 : Récolte en balles et organisation logistique.

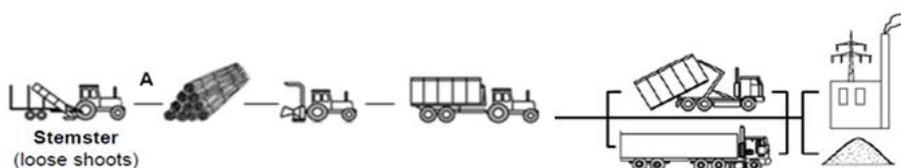


## Enseignements bibliographiques :

La récolte en balles et l'organisation logistique agricole se définissent par :

- la possibilité de laisser ressuyer le produit à l'air libre gratuitement,
- un ressuyage obligatoire avant broyage,
- une manipulation plus facile du produit,
- un transport des balles qui est densifié,
- un broyage additionnel sur plateforme couteux en raison de la taille des balles qui nécessitent et peuvent endommager un gros broyeur.

Figure 18 : Récolte de tiges entières et organisation logistique agricole.



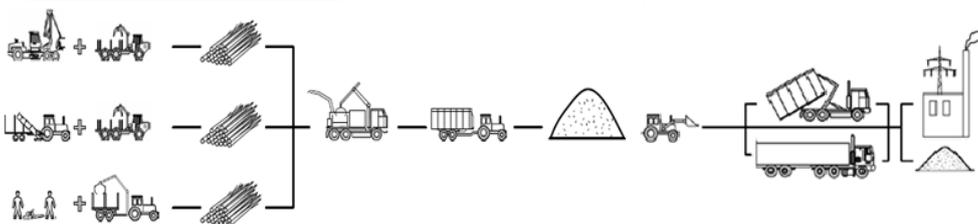
## Enseignements bibliographiques :

La récolte de tiges et l'organisation logistique agricole se définissent par :

- la possibilité de laisser ressuyer le produit à l'air libre gratuitement,
- un ressuyage obligatoire avant broyage,
- un débardage difficile du à des tiges longues,
- un transport peu dense du au foisonnement,
- un broyage additionnel sur parcelle ou sur plateforme couteux en raison de la faible densité des tiges à broyer et de la faible massification des flux à broyer.

<sup>4</sup> Au contraire du séchage, le ressuyage évite la perte de matière engendrée par la fermentation du bois.

Figure 19 : Récolte de tiges et organisation logistique forestière (abatteuse forestière, récolteuse, coupe manuelle et broyeur forestier).



### Enseignements bibliographiques :

La récolte de tiges et l'organisation logistique forestière se définissent par :

- la possibilité de laisser sécher le produit à l'air libre gratuitement,
- un ressuyage obligatoire avant broyage,
- un broyage directement sur la parcelle,
- le broyage additionnel sur parcelle est couteux en raison de la faible densité des tiges à broyer et de la faible massification des flux à broyer.

## II.2.7 Conclusion de la synthèse bibliographique

L'étude bibliographique a permis d'éclaircir plusieurs points :

- les spécificités de la plantation de TTCR de saules, leurs objectifs et sa plantation,
- les modalités de récolte et les chaînes logistiques utilisées par les filières productrices,
- les machines commercialisées et celles en développement,
- les performances et les coûts de récolte observés,
- les critères de sélection d'une machine pour la récolte de TTCR en bandes,
- les caractéristiques de la plaquette de saule et ses débouchés.

### Synthèse des enseignements :

- De nombreuses machines existent et entraînent des logistiques très différentes. Mais pour la récolte en Seine-Maritime, les critères de récolte identifiés doivent être respectés. Il est important d'avoir un produit valorisable sur le territoire, qui facilite la manutention et le transport.
- Les chaînes logistiques présentées nécessitent une rupture de charge. Il peut être opportun de la limiter. De même, le broyage additionnel est couteux, il faut donc essayer de l'éviter. La distance de transport jusqu'à la chaufferie doit également être la plus faible possible.
- Le saule est un bois de faible qualité, avec beaucoup de cendre et un faible PCI anhydre. Il est très foisonnant et ne peut être valorisé que par des chaufferies collectives ou industrielles.

Cependant, les expériences recensées précédemment concernent des plantations de pleins champs et des matériels utilisés à leur pleine capacité. C'est sur ce point que le sujet abordé dans cette étude se différencie. Effectivement, la plantation de saules en bandes est une innovation propre à la Seine-Maritime et elle mène à de nouvelles contraintes :

- un morçèlement important des parcelles,
- une surface cible qui est faible (35 ha),
- une surface unitaire et une quantité de biomasse par bande de faible importance,
- une obligation de minimiser la compaction des sols.

De ce fait, l'étude bibliographique a du être ensuite complétée par des échanges avec différents professionnels.

### **III Avis des professionnels sur la récolte et la logistique.**

Des contacts avec les producteurs, l'acheteur et les professionnels du domaine ont été établis pour compléter les enseignements de la bibliographie et pour obtenir la vision des personnes impliquées sur le terrain. La liste des personnes consultées lors de l'étude est disponible à la fin du rapport.

#### **III.1 Méthodologie**

##### **III.1.1 Les producteurs**

Un questionnaire a été soumis à une quinzaine de producteurs ayant déjà plantés. 8 réponses seulement ont été obtenues, soit plus de 50 % des enquêtés, ce qui est satisfaisant. Ces réponses probablement peu représentatives de la position des agriculteurs en général, apportent un point de vue intéressant. Un exemplaire de ce questionnaire est disponible dans l'Annexe VIII.

##### **III.1.2 Les professionnels du bois énergie et l'acheteur**

Des contacts avec les professionnels du bois énergie du territoire ont été établis. Les échanges avec Dominique Plumail et Dominique Boulday de CEDEN, les entretiens avec Jean-Luc Gadois de Biocombustible SA et avec Philippe Dillard de la Cuma Haies'nergie, ont permis de définir les chaînes logistiques les plus adaptées pour la future filière. Les caractéristiques du produit attendu par l'acheteur ont également été identifiées.

##### **III.1.3 Les développeurs et les constructeurs de machines**

Par ailleurs, la lecture attentive a permis de prendre connaissance des scientifiques travaillant sur le domaine, des développeurs et des constructeurs de machines. Les contacts établis ont complété les données relatives aux performances et aux caractéristiques techniques des machines.

Les enseignements tirés de ces échanges ont permis d'obtenir certaines caractéristiques techniques des machines présentées dans la synthèse bibliographique.

#### **III.2 Enseignements de l'enquête des producteurs**

##### **III.2.1 Préférences de récolte et problèmes rencontrés.**

Le coût de récolte, la compaction du sol et le diamètre des tiges récoltables sont les critères de sélection de la machine les plus importants. Les producteurs pourraient consacrer ½ journée à 1 journée de leur temps à la récolte d'un ha de BLC de saules. La récolte ne doit pas créer d'ornières et de compaction et le produit pas trop humide pour éviter toute fermentation hors du stockage. Quelques problèmes ont été observés sur les plantations (Figure 20), principalement des dégâts de gibiers, des dégâts sur les souches dus au Biobaler et un échec du désherbage sur certaines parcelles, qui a conduit à l'envahissement des plantations par les adventices.

*Figure 20 : Eclatement des souches et mauvais désherbage sur une BLC de saules.*

*Source: [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).*



##### **III.2.2 Préférences sur les débouchés**

Ils souhaitent majoritairement produire de la plaquette pour leur usage personnel, du BRF pour augmenter le taux de matière organique de leur sol et enfin de la plaquette pour les chaufferies.

Le BRF est en effet un agrandant qui améliore la structure du sol et un biostimulant de la vie du sol, en augmentant le taux d'humus. Même si ce n'est pas le but recherché en Seine-Maritime, il peut permettre de limiter l'érosion car avec lui, les capacités de rétention, d'infiltration d'eau et la filtration des produits phytosanitaires vers la nappe sont augmentées. Notamment grâce à l'augmentation de la macroporosité du sol par l'apport d'éléments grossiers.

Néanmoins, son utilisation en grandes cultures peut attirer des ravageurs d'une part, et une grande quantité doit être épandue d'autre part, environ 100 t/ha sur 1-3 cm de hauteur. Il faut donc environ 2 ha de bandes de saules pour épandre un ha de cultures par exemple. C'est pourquoi, l'intérêt est limité avec les BLC au regard des grandes parcelles alimentaires présentes sur le département. L'usage du bois en chaufferie semble plus intéressant et cela doit convaincre les agriculteurs d'adopter ce dernier débouché.

### **III.2.3 Préférences sur les matériels**

La majorité des agriculteurs a privilégié une récolte avec broyage sur parterre de coupe avec les broyeurs embarqués, hormis 2 agriculteurs qui privilégient une récolte de tiges. Parmi les qualités souhaitées pour la machine, la robustesse, la fiabilité, la facilité de mise en œuvre et la légèreté sont apparues. Pour la machine, les tracteurs pouvant le plus facilement être mis à disposition sont des tracteurs de 120-170 Ch.

### **III.2.4 Préférences logistiques**

Concernant le stockage de la plaquette, ils ont plébiscité l'usage de plateformes de stockage agricole, mais ils sont réservés sur leur mise en place directement sur les exploitations.

Pourtant, beaucoup d'agriculteurs disposent d'aires stabilisées ou bétonnées. Des hangars en bois pouvant être mis à disposition également.

## **III.3 Enseignements de l'enquête de l'acheteur et des professionnels du bois énergie**

### **III.3.1 Qualifier le bois produit**

Il faut s'assurer par des prélèvements, de la granulométrie et du taux de cendre de la plaquette pour pouvoir envisager une livraison des chaufferies sur le territoire. Le produit doit également être séché (à 45 % d'H<sub>2</sub>O minimum) s'il n'est pas mélangé avec d'autres bois.

### **III.3.2 Le débardage et le broyage de tiges sont compliqués.**

Cela est du principalement au fort foisonnement de ce type de produit. La densité du bois à l'organe de broyage entraîne un débit de broyage plus faible. La solution la plus économique est le broyage en bout de parcelle avec une déchiqueteuse à grappin, mais sur ces matériels de broyage à faible puissance, le temps de broyage est long et entraîne un temps d'immobilisation du camion FMA trop important.

Un broyage sur plateforme est plus intéressant car on peut utiliser un broyeur forestier de forte puissance (500 t/jour) qui augmente le débit de broyage. Un broyeur autonome Albach est disponible chez Biocombustibles. C'est un moindre mal mais le débit sera toujours plus faible car il ne s'agit pas de billons pleins.

Par ailleurs, seul un matériel de débardage équipé d'un grappin forestier peut permettre de débarder et de ranger parfaitement des tiges de saule en pile sur une plateforme. Il facilite aussi l'introduction dans la bouche du broyeur. Ainsi, un matériel plus forestier doit être utilisé : soit une remorque forestière ou un porteur forestier. Ces matériels densifient le transport par leur capacité proche de 10 t de tiges, au lieu de 4 t avec une simple remorque agricole. Ils coûtent entre 75 et 100 €/jour.

### **III.3.3 La récolte par broyage sur parterre de coupe est la plus pratique**

Le produit obtenu dispense du broyage additionnel et facilite la manutention. Mais le produit doit être séché. Pour cela, on doit utiliser une plateforme et une perte de matière par fermentation est entraînée.

Une pesée doit aussi être pratiquée à l'entrée du chargement pour avoir une gestion au tonnage de bois livré et pour enregistrer le propriétaire de la cargaison.

### **III.3.4 Deux modes de transport complémentaires pour la livraison**

Une livraison par camion FMA de 90 m<sup>3</sup> est la plus pratique. On peut utiliser une plateforme où les copeaux sont séchés et les chaufferies sont livrées de manière conventionnelle, en utilisant des ponts bascules. Toutefois, il faut rassembler au moins 90 m<sup>3</sup> de bois ou des multiples sur la plateforme, pour charger un camion.

Une livraison par camion benne de 80 m<sup>3</sup> a été proposée par Dominique Plumail, pour éviter la rupture de charge sur une plateforme. Plusieurs bennes de 40 m<sup>3</sup> seraient stockées sur une exploitation puis chargées par les tracteurs débardeurs de copeaux, équipés de bennes élévatrices. Un camion benne reprendrait ensuite ces bennes remplies, pour les livrer directement à la chaufferie.

Jean Luc Gadois a confirmé l'intérêt de cette livraison car il n'y a pas de frais de gestion de plateforme et le camion benne a un coût journalier plus faible que le FMA. Il y a néanmoins deux inconvénients :

- Il faut l'accord des chaufferies pour livrer avec ces camions car ils sont peu sécuritaires, avec un risque d'abimer les fondations des silos enterrés, par la chute instantanée de tout les copeaux et un risque de basculement des bennes.
- Il faut être autorisé à livrer du bois très humide.

## **III.4 Conclusion des enquêtes**

En définitive, les enseignements des professionnels ont permis d'avoir une vision plus claire des attentes des producteurs et des limites de la récolte et des logistiques sur le terrain en Seine-Maritime. D'une part, les producteurs accordent une grande importance dans le choix de la machine à la préservation du sol de la parcelle et à sa fiabilité. Ils peuvent également mettre à disposition des tracteurs de moyenne puissance, ce qui est à prendre en compte dans le choix de la machine. D'autre part, la récolte de tiges entières semble la plus compliquée à mettre en œuvre sur le territoire tandis que le broyage direct favorise l'utilisation du produit en chaufferie. Néanmoins, plusieurs modes de récolte et chaînes logistiques sont possibles. Par ailleurs, du aux qualités du bois de saule, il faut favoriser l'usage de la plaquette en chaufferie et convaincre les agriculteurs souhaitant faire du BRF du plus grand intérêt de produire du combustible.

## **IV . Démarche expérimentale de l'étude**

### **IV.1 Rappel des objectifs de l'étude**

L'étude présente a pour but de consolider le choix d'une machine de récolte pour 2017 dans le contexte du programme Innobioma et de déterminer un prix de revient des plaquettes, afin de jeter les bases d'une filière d'écoulement et d'un partenariat durable entre producteurs et acheteur de biomasse.

### **IV.2 Problématique**

L'étude bibliographique et les contacts avec les professionnels ont permis de définir la problématique suivante :

**De quelle manière le TTCR de saule doit être conduit en Seine Maritime, de la récolte à la chaufferie, afin d'assurer le développement d'une filière opérationnelle d'un point de vue technico-économique et satisfaisant l'ensemble des acteurs du programme Innobioma ?**

### **IV.3 Hypothèses de travail**

Pour répondre à la problématique, les hypothèses suivantes sont formulées

#### **Hypothèse 1 :**

Parmi les nouvelles machines étudiées, certaines sont compatibles avec les BLC et garantissent un coût de revient de la plaquette de saule, qui permet le développement de la filière. Ces machines assurent la récolte de plantations en double rang et de diamètres de tiges supérieurs à 6 cm. Elles produisent un produit facilement valorisable par les chaufferies du territoire, tout en préservant les capacités d'infiltration des BLC.

#### **Hypothèse 2 :**

Le mode de récolte avec broyage sur parterre de coupe par l'usage de broyeurs embarqués est le système le plus performant pour diminuer les coûts de récolte et les coûts logistiques. Ce mode de récolte garantit la coupe et le broyage simultanés des tiges, limite les manipulations post-récolte, optimise le transport, fournit un produit directement utilisable en chaufferie et limite la compaction du sol. Il doit garantir le coût de revient de la plaquette le mieux maîtrisé.

## IV.4 Méthodologie générale de l'étude

Ainsi, pour répondre à la problématique et valider ou non ces hypothèses, la suite de l'étude prend la forme d'une évaluation du coût de revient de plusieurs itinéraires de production (de la récolte jusqu'à la logistique). Cette évaluation est construite sous Excel, par la simulation de ces itinéraires sur une période d'exploitation prévisionnelle des machines et sur une surface de bandes cohérente. L'étude s'organise plus précisément selon quatre phases qui doivent produire les résultats et confirmer ou non les itinéraires :

- La sélection des machines et des chaînes logistiques à étudier.
- Une étude technico-économique (coûts, temps, contraintes), qui mène à l'obtention du coût de revient de la plaquette de saule et à la réalisation d'un compte d'exploitation prévisionnel pour chaque itinéraire technique retenu.
- La détermination du prix du combustible pour connaître la marge pour les producteurs.
- Une analyse de sensibilité du coût de revient sur le meilleur itinéraire technique pour identifier les leviers existants pour diminuer davantage le coût de revient.

## V Phase de sélection des machines et des chaînes logistiques

### V.1 Sélection des machines

Suite aux enseignements bibliographique, aux contacts avec les professionnels et aux réponses des producteurs, les machines à étudier ont été sélectionnées et les chaînes logistiques établies.

#### V.1.1 Orientation sur les machines à étudier

Les machines écartées et retenues sont présentées dans le Tableau 13. On a retenu deux types de matériels : les broyeurs embarqués JF Harvester et GMHT 140 et la récolteuse Stemster MKIII. Ce sont les trois machines qui sont en adéquation technique avec les plantations et les avis des agriculteurs, tout en ayant une disponibilité commerciale sur le court terme. En effet, elles remplissent les critères de Lavoie (2007) tout étant les plus compatibles avec de petites parcelles et les plus adaptées à la préservation des capacités d'infiltration du sol. Leur choix permet d'étudier les deux itinéraires de production principaux, l'un menant à la production de copeaux et l'autre à la production de tiges entières.

Tableau 13 : Bilan sur la sélection des machines de récolte.

Critères de sélection	Capacité à récolter des rangs doubles	Capacité à récolter des diamètres de 80 mm	Limitation de la compaction	Produit adapté aux débouchés
Machines écartées	Broyeur JF 292	Broyeur JF Z200 Hydro E	Ensileuses à saules	BioBaler
	Broyeur GMHS 100	Broyeur JF Z200 Hydro C	Broyeur BR600	
	Broyeur RP500			
	Récolteuse Rod Picker			
Machines retenues	Broyeur JF Harvester, broyeur GMHT 140, récolteuse, Stemster MKIII			

Même s'ils ne sont pas pertinents ici, les modèles écartés ne sont pas à exclure définitivement.

## V.1.2 Description technique des machines retenues

Le Tableau 14 présente les caractéristiques techniques des machines retenues. Les vues en coupe du GMHT 140 et de la Stemster MK III sont disponibles en Annexe X.

Tableau 14 : Données techniques nécessaires à l'évaluation des coûts.

Machine	Broyeur GMHT 140	Broyeur JF harvester	Récolteuse Stemster MK III
prix d'achat (€)	85 000	55 000	215 000
vitesse d'avance maximale (km/h)	8	5	7
puissance requise (Ch)	340	170	130
longueur (m)	3	3	7
largeur (m)	2	2	3
hauteur (m)	4		3
poids (t)	4	2	7
montage sur le tracteur	prise de force avant ou arrière	prise de force avant ou arrière	prise de force arrière
sens d'avance du tracteur	marche avant ou arrière	marche avant ou arrière	marche avant
capacité de chargement (t)	aucune	aucune	4,5
type de lame	circulaire	circulaire	circulaire
diamètre de lame (mm)	800	300	100
nombre de lame	2	2	2
largeur de coupe (mm)	1400	800	2 150
vitesse de coupe (tours/min)	1 000	1 000	2 700
hauteur de coupe (mm)	10 à 20	10 à 20	10 à 20
nombre de broyeurs	1	2	-
type d'outil	couteaux	couteaux	-
nombre de couteaux	28	6	-

### Enseignements :

La Stemster et le GMHT 140 sont plus lourds et plus coûteux que le JF Harvester.

La Stemster et le GMHT 140 sont plus rapides que le JF Harvester.

Le JF harvester et la Stemster nécessitent des tracteurs d'une puissance raisonnable.

## **V.2 Sélection des chaînes logistiques à étudier pour la Seine-Maritime.**

Il a été décidé d'étudier trois chaînes logistiques pour la future filière : deux pour les broyeurs embarqués et une pour la récolteuse de tiges. Elles sont visibles dans la Figure 21 et sont établies d'après les hypothèses suivantes :

- Il y a en moyenne 0,5 ha récolté par exploitation, soit 4 bandes de 0,135 ha.
- Le rendement par récolte et par bande est compris entre 8-10 t MB.
- La journée est composée de 10 h de travail utile, à savoir les heures disponibles où les personnels peuvent récolter et transporter le produit, définies selon le temps moyen d'une journée de travail agricole.

La partie suivante présente les chaînes logistiques élaborées.

### **V.2.1 Présentation des chaînes logistiques (cf. Figure 21)**

#### ***V.2.1.1 La chaîne logistique avec stockage en plateforme de tiges.***

Cette chaîne est compatible avec la récolteuse Stemster MKIII. Elle comprend: la récolte de tiges, le ressuyage en bord de parcelle d'une durée d'un mois, le débardage par un porteur forestier ou un tracteur équipé d'une remorque forestière à grappin, le broyage sur une plateforme, le chargement et la livraison de la plaquette de la plateforme jusqu'à la chaufferie par camion FMA.

Pour la récolte en copeaux, deux logistiques ont été retenues. Chacune est compatible avec les broyeurs JF Harvester et GMHT 140.

#### ***V.2.1.2 La chaîne logistique avec stockage en plateforme de copeaux***

Cette chaîne comprend : la production de copeaux, le débardage par des tracteurs équipés de bennes agraires de 20 m<sup>3</sup>, le séchage des copeaux sur une plateforme, le chargement et la livraison de la plaquette de la plateforme jusqu'à la chaufferie par camion FMA.

La filière vise à récolter 1200 t/an. On établit alors un réseau de 6 plateformes maillant le Pays de Caux. Ces plateformes de 250 m<sup>2</sup> d'une capacité individuelle de 200 t, soit une occupation 1,25 m<sup>2</sup>/t. Le rendement est compris entre 8-10 t MB/ bande et par récolte. On stocke donc le bois de 20 à 25 BLC sur une plateforme, soit la surface de 6 à 7 agriculteurs.

#### ***V.2.1.3 La chaîne logistique avec stockage en bennes de copeaux***

Cette chaîne comprend : le production de copeaux, le débardage par des tracteurs équipés de bennes élévatrices de 20 m<sup>3</sup>, le stockage des copeaux directement par basculement dans des bennes de 40 m<sup>3</sup> qui sont déposées sur l'exploitation agricole, la reprise des bennes et la livraison de la plaquette de la plateforme jusqu'à la chaufferie par camion bennes.

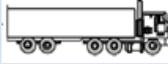
A la chaufferie, le camion décharge les deux bennes pleines et recharge deux bennes vides. Il peut dans le meilleur des cas, déposer les deux bennes vides là où la récolte se déroulera la fois suivante.

## V.2.2 Forces et faiblesses des chaînes retenues

Tableau 15: Des chaînes ambitieuses et complémentaires.

	Forces	Faiblesses
<b>Logistique avec stockage en plateforme de tiges</b>	Le grappin forestier peut ranger parfaitement les tiges en piles	Rupture de charge
	La contenance de la remorque forestière densifie le transport	Broyage coûteux
	Ressuyage sans coût supplémentaire	Il faut rassembler au moins 20 t sur la plateforme pour faire venir un FMA
<b>Logistique avec stockage en plateforme copeaux</b>	Plaquette séchée	Rupture de charge
	Livraison correspondante aux normes de sécurité	Besoin d'un système de pesée pour enregistrer le produit de chaque agriculteur
	Rassurante pour les producteurs qui n'ont pas le sentiment d'être dépossédés de leur produit	
<b>Logistique avec stockage en bennes copeaux</b>	Pas de rupture de charge	Plaquette non séchée
	Pas de coût de plateforme	Convaincre les chaufferies d'accepter des camions bennes

Figure 21 : Chaînes logistiques établies.

BLC de TtCR de saules (bande de 0,135 ha, 8-10 t MB/récolte)		
Récolte 4 bandes/exploitation, 1 exploitation/jour, soit 40 t/jour de bois récolté		
Logistique avec stockage en plateforme de tiges	Logistique avec stockage en plateforme de copeaux	Logistique avec stockage en bennes de copeaux
Coupe de 40 t de tiges 	Coupe et broyage de 40 t de tiges + débardage par 2 tracteurs avec bennes agraires de 20 m <sup>3</sup> 	Coupe et broyage de 40 t de tiges + débardage par 2 tracteurs avec bennes élévatrices de 20 m <sup>3</sup> 
Mise en tas et ressuyage naturel sur parcelle (1 mois) 	Transport par tracteur + bennes agraires 8 rotations/jour (5 t par rotation) 	Transport par tracteur + bennes élévatrices 8 rotations/jour (5 t par rotation) 
Débardage + transport par remorque forestière (porteur ou tracteur) 4 rotations/jour, (10 t par rotation)  	Déchargement sur plateforme agricole (250 m <sup>2</sup> , 200 t/an) et séchage (1 mois) 	Déchargement dans 2 Bennes de 40 m <sup>3</sup> stockées sur l'exploitation agricole  
Déchargement sur plateforme agricole et mise en pile (250 m <sup>2</sup> , 200 t/an) 	Chargement du camion FMA avec chargeur à godet.  	Chargement des 2 bennes sur un camion benne  
Broyage avec un broyeur forestier Albach 65 m <sup>3</sup> /h 	Transport par camion FMA de 90 m <sup>3</sup> 20 t par rotation 	Transport par camion benne 2 x 40 m <sup>3</sup> 20 t par rotation 
Chargement du camion FMA avec chargeur à godet  	Livraison en chaufferies industrielles de plaquette séchées à 45 % d'humidité 	Livraison en chaufferies industrielles de plaquettes non séchées à 50 % d'humidité 
Transport par camion FMA de 90 m <sup>3</sup> 20 t par rotation 		
Livraison en chaufferies industrielles de plaquettes séchées à 45 % d'humidité 		

A l'issue de la phase de sélection des machines et des chaînes logistiques, les associations entre les machines et les chaînes logistiques forment les itinéraires de production dont le coût est évalué. La partie suivante présente l'étude de coût et sa méthodologie.

## VI L'étude de coût

### VI.1 Méthodologie

La méthode de calcul utilisée reprend les méthodes des études précédentes, tout en étant actualisée et plus proche du contexte du projet Innobioma. Les principes de calcul sont issues de la méthode de calcul du coût d'utilisation des matériels agricoles, utilisée par la Cuma 76 (Coopérative d'utilisation des matériels agricoles) et détaillée en Annexe IX. Elle fut aussi complétée par les échanges avec Dominique Plumail et Dominique Boulday de CEDEN. Le but est d'être le plus fiable possible par rapport à la réalité des coûts pratiqués en agriculture. Cette méthode est ainsi adaptable à n'importe quelle machine de récolte.

#### VI.1.1 Calcul des coûts de plantation et de fermage

Dans cette étude, le coût de plantation et de fermage ne sont pas recalculés. Ils se basent sur les coûts moyens observés par la Chambre d'agriculture. Ces coûts sont généralement exprimés par ha pour toute la durée de vie de la plantation. Ces coûts sont donc actualisés à l'année de récolte et divisés par le nombre de récolte dans la durée de vie de la plantation (7 récoltes sur 21 ans).

#### VI.1.2 Calcul du coût de récolte

##### VI.1.2.1 Composition du coût de récolte

Il a d'abord fallu définir les opérations incluses dans la récolte (voir Tableau 16).

*Tableau 16 : Actions incluses dans la récolte selon les modes de récolte étudiés.*

	Opérations intégrées	Opérations non intégrées
<b>Broyage direct</b>	coupe et broyage simultanés des tiges	collecte du broyat par un roulement de tracteurs benne
<b>Tiges entières</b>	coupe des tiges et déchargement des tiges sur la parcelle	débardage et broyage des tiges

La récolte est ensuite décomposée en opérations unitaires.

### **VI.1.2.2 Décomposition de la récolte en opérations unitaires**

La récolte par bande est décomposée par les opérations unitaires rassemblées dans le Tableau 17.

*Tableau 17 : Durée moyenne de chaque opération unitaire.*

<b>Temps de déchargement tiges (min/ t MB)</b>	3
<b>Temps de déchargement copeaux (min/ t MB)</b>	2
<b>Mise en route du déchargement (min)</b>	1
<b>Temps de demi tour (min)</b>	1
<b>Réglage machine (min)</b>	10
<b>Passage de la machine en mode route (min)</b>	5
<b>Temps de panne (min)</b>	1,5
<b>Temps de chargement (min/t MB)</b>	4

Ces opérations unitaires fixent la durée nécessaire à la récolte d'une bande selon la machine.

La durée des opérations unitaires varie principalement selon les facteurs suivants :

- la vitesse de récolte,
- la surface de la bande type,
- les temps de réglage, de panne et de déploiement de la machine sur la bande,
- le mode de récolte.

Ces opérations unitaires sont ensuite ramenées par ha.

### **VI.1.2.3 Le calcul du temps de récolte par ha de BLC**

Pour obtenir le temps de récolte sur parcelle d'un ha de BLC, on multiplie le temps de récolte sur parcelle par bande par le nombre de BLC composant un ha. Ce nombre de bandes peut varier suivant la surface unitaire fixée pour les BLC.

### **VI.1.2.4 Détermination de la fenêtre de récolte**

La fenêtre de récolte est la période où les conditions sont favorables pour récolter. Elle est évaluée à 75 jours, soit 676 h de récolte disponibles. Sa définition prend en compte, les jours de maintenance et d'intempéries qui empêchent la récolte.

*Tableau 18 : Calcul de la fenêtre de récolte disponible.*

<b>Jours disponibles théoriques/an</b>	90
<b>Jours de pluie forte /mois</b>	3
<b>Jours de maintenance/mois</b>	2
<b>Jours/mois</b>	30
<b>Jours indisponibles/mois</b>	5
<b>Jours possibles de travail/an</b>	75
<b>Durée de la journée de base (h)</b>	9
<b>Heures disponibles de travail (h/an)</b>	676

La définition de la fenêtre de récolte permet de connaître le temps de récolte disponible à l'année.

### **VI.1.2.5 Le calcul du temps de récolte annuel**

Selon le temps de récolte qu'il faut à la machine pour récolter un ha de bandes, la surface totale à récolter, sans oublier le temps de déplacement de l'outil vont déterminer le temps de récolte annuel.

### VI.1.2.6 Présentation des charges de récolte

Le tableau ci-dessous présente les charges de récolte. Elles se divisent en 2 types :

- Les charges variables varient en fonction de la durée d'utilisation de la machine, du type de machine de récolte, du coût d'utilisation du tracteur, du coût du carburant et de la main d'œuvre.
- Les charges fixes ne dépendent pas de ces paramètres et sont imputées à l'année. Elles dépendent du coût d'achat, de la durée d'amortissement et des dimensions de la machine.

Tableau 19 : Typologie des charges influençant le coût de récolte.

Charges fixes	Charges variables
l'amortissement annuel	le carburant
l'assurance annuelle de la machine	le lubrifiant et l'huile
le remisage de la machine	la main d'œuvre
	l'entretien courant de la machine
	le gros entretien et les réparations(GER)
	l'utilisation du tracteur tractant la machine

Les charges de GER prennent en compte le remplacement des pièces à usure régulière. Dans les charges fixes, l'amortissement se décompose en deux parties, le remboursement de l'emprunt et l'amortissement technique. L'emprunt est contracté sur 5 ans et la machine est amortie sur 7 ans.

Le montant de ces charges est défini selon des coûts horaires ou unitaires.

### VI.1.2.7 Valeurs utilisées pour le calcul des charges de récolte

Tableau 20 : Valeurs prises pour l'entretien et le remisage des machines.

Machine	Broyeur GMHT 140	Broyeur JF Harvester	Récolteuse Stemster
<b>Entretien courant €/h</b>	6	6	7
<b>Nombre de lames</b>	2	2	2
<b>Nombre de couteaux</b>	28	6	
<b>Coût d'utilisation lames €/h</b>	5,5	5,3	3,3
<b>Affûtage lames€/h</b>	1,3	1,3	1,0
<b>Utilisation couteaux €/h</b>	5,3	1,1	
<b>Affûtage couteaux €/h</b>	2,1	0,5	
<b>Gros entretien et réparation €/h</b>	14,1	8,1	4,2
<b>Construction bâtiment €/m<sup>2</sup></b>	150		
<b>Durée de vie du bâtiment (année)</b>	20		
<b>Entretien €/m<sup>2</sup></b>	5		
<b>Nombre de jours de remisage</b>	275		
<b>Remisage €/an</b>	70,6	61,2	216,6

Les données ci-dessus permettent de calculer pour chaque machine, le coût d'entretien courant (€/h), le coût de GER (€/h) et le coût de remisage annuel (€/an). Le coût de GER est un coût annuel, ici il est imputé par heure de récolte.

Tableau 21 : Coûts des tracteurs entrainant les machines.

Coûts communs aux tracteurs			
consommation spécifique (CS) (l/Ch)	0,22		
taux d'utilisation sur parcelle	0,70		
consommation sur parcelle (l/h)	0,15		
taux d'utilisation sur route	0,40		
consommation sur route (l/h)	0,09		
prix du fioul (€/l)	0,87		
coût horaire chauffeur (€/h)	27		
Coûts spécifiques à chaque tracteur			
puissance Ch	340	170	130
coût de carburant sur parcelle (€/h)	45,6	22,8	17,4
coût de carburant sur route (€/h)	26	13	9,9
coût d'utilisation tracteur caréné hors MO et carburant, 10 % de frais de carénage forestier ajoutés) (€/h)	36	20,4	15,8
coût de lubrifiant (€/h)	9,1	4,6	3,5

Pour chaque type de tracteur, les coûts de carburant, de lubrifiant et d'utilisation sont rassemblés dans ci-dessus. Le coût de main d'œuvre est lui indépendant du type de tracteur.

Tableau 22 : Valeurs prises pour calculer l'amortissement et l'assurance annuels des machines.

Taux d'intérêt (%)	3
Taux d'assurance (%)	10
Durée de l'emprunt machine (années)	5
Durée d'amortissement technique (années)	7
Nombre de versements par an	1
Subvention à l'achat de machine (% du coût)	70
Livraison et mise en service (€/machine)	4 000

Les taux utilisés pour l'amortissement et l'assurance des machines sont présentées ci-dessus. L'acheminement et la mise en service de la machine une fois achetée est évalué à 4 000 €.

#### VI.1.2.8 Coût de trajet entre BLC.

Le coût de trajet comprend le coût de transfert de la machine et des matériels d'une BLC à une autre. Il est inclus dans le coût de récolte et dépend principalement du temps de trajet entre bande qui varie dans l'étude. Le temps de trajet nécessaire pour relier les BLC les unes des autres est ajouté au temps de récolte sur parcelle pour obtenir le temps de récolte réel nécessaire pour que la machine puisse récolter un ha de BLC. Lors du transfert, on établit que la machine est relevée sur la prise de force du tracteur ou qu'elle circule sur la route. Néanmoins, la question de recourir au transport par camion pour certaines machines plus volumineuses et plus fragiles (récolteuse de tiges) peut se poser.

L'ensemble de ces données permet de calculer le coût de récolte par ha. La partie suivante présente la méthodologie de calcul des opérations logistiques.

#### VI.1.3 Calcul du coût logistique

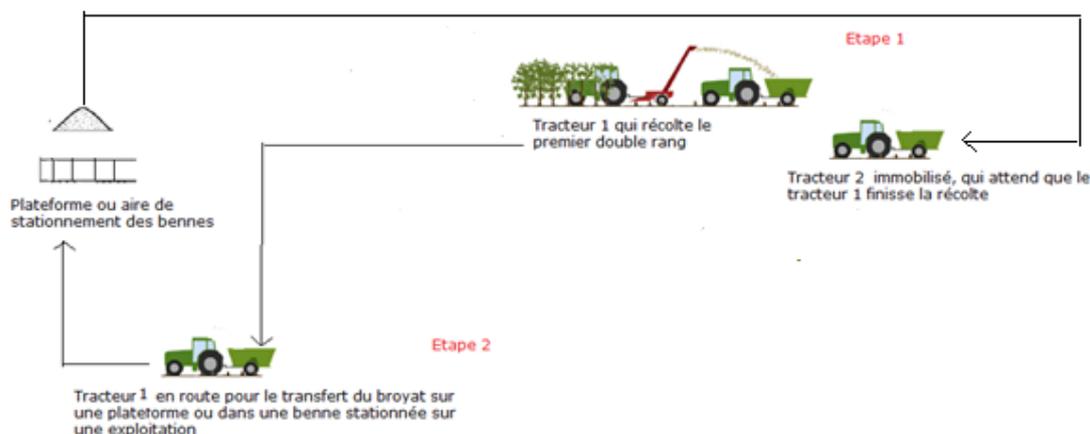
Les charges logistiques sont imputées indépendamment des charges de récolte. Elles sont calculées selon le coût journalier des matériels nécessaires et le volume de produit transportable dans les limites de la durée de la journée utile.

### VI.1.3.1 Coût de transport et débardage vers le lieu de stockage.

Le coût de débardage pour la récolte à l'aide de broyeurs embarqués dépend de plusieurs facteurs :

- la distance effectuée sur la bande par les tracteurs,
- le temps d'immobilisation partiel induit pour l'un des deux tracteurs le temps que le premier finisse la collecte,
- le transfert à la bande suivante pour les deux tracteurs,
- le temps de trajet inter bandes,
- le coût d'utilisation des tracteurs associés.

Figure 22 : Déroulement du débardage pour les deux tracteurs



Pour des tiges, le coût de débardage observe la même logique, à l'exception que le débardage n'est pas simultané.

Dans les deux cas, le coût de transport vers le lieu de stockage dépend de plusieurs paramètres :

- la distance aller-retour de la parcelle au lieu de stockage que nous avons fixé à 20 km pour la plateforme et 6 km pour les bennes,
- la vitesse du tracteur qui tracte le produit sur route,
- le coût d'utilisation horaire de l'engin de débardage, qui inclus le coût du carburant mais pas la main d'œuvre,
- le coût du matériel de transport (bennes agricole, élévatrices, remorque forestière).

### VI.1.3.2 Coût de stockage

Avec une plateforme, le coût de stockage prend en compte la gestion du bois, le séchage et la perte par fermentation engendrée. Avec des bennes, le coût de stockage prend en compte la location de 4 bennes de 40 m<sup>3</sup>.

### VI.1.3.3 Coût de broyage

Le coût du broyage est calculé d'après les préconisations de Dominique Plumail et de Jean-Luc Gadois. Il prend en compte l'amené du broyeur et le coût de la main d'œuvre associée. Un broyeur dont le débit est réduit à 65 m<sup>3</sup>/h, du à l'important foisonnement des tiges qui empêche d'avoir un débit réel avec le saule, correspondant aux standards du broyeur employé.

### VI.1.3.4 Coût de livraison à la chaufferie

Ce coût est calculé pour une distance moyenne de 30 km. Le coût de transport prend en compte l'amenée de l'engin, l'immobilisation de l'engin pendant le chargement, le coût de carburant et le coût du chauffeur. Vu la densité de chaufferies sur le territoire, on considère que la distance à la chaufferie est la même quel que soit le lieu de départ. Le coût dépend de plusieurs facteurs :

- le type d'engin de transport, un camion FMA coûte 650 €/jour alors qu'un camion benne pouvant charger deux bennes de 40 m<sup>3</sup> coûte 550 €/jour,
- le coût de chargement lié à l'emploi d'un chargeur à godet de 3 m<sup>3</sup>.

#### **VI.1.4 Les hypothèses prises dans la simulation**

Tout d'abord, des comptes d'exploitation prévisionnelle (CEP) sont réalisés pour les itinéraires de production retenus. Ces CEP sont élaborés en tenant compte des plusieurs hypothèses :

- Les BLC sont standardisées, ce sont des bandes de 0,135 ha, plantées à raison de 12 500 pieds de saule /ha, en 2 doubles rangs.
- La période d'exploitation s'étend 2017 à 2023, soit la période d'amortissement de la machine et la période de montée en régime régulière des plantations pour atteindre en 2023 60 ha.
- La subvention de l'Agence de l'eau à hauteur de 70 % pour l'acquisition d'une machine de récolte est incluse.
- La subvention de l'Agence de l'eau à hauteur de 70 % pour la plantation de trente hectares jusqu'en 2018 est incluse.

##### **VI.1.4.1 Des bandes standardisées**

Les caractéristiques de la bande étudiée correspondent à la majorité des bandes implantées et aux caractéristiques prises dans les études précédentes (voir Tableau 23).

*Tableau 23 : Caractéristiques de la bande référence dans l'étude.*

<b>Longueur (m)</b>	300
<b>Largeur (m)</b>	4,5
<b>Surface (ha)</b>	0,135
<b>Rendement (t MB/bande/récolté)</b>	8,1
<b>Rendement (t MB/ha/récolte)</b>	60
<b>Nombre de bandes pour faire 1 ha</b>	7,4

Il faut environ 7,4 bandes pour faire un ha. Cette bande constituera la plantation type dans l'élaboration des CEP.

### VI.1.4.2 Une montée en régime des surfaces pour 2023

Tableau 24 : Montée en charge des surfaces

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
surface plantée (ha/an)	1	1	3	5	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0
nombre de bandes cumulé	7	15	37	74	148	222	296	370	444	444	444	444	444	444
surface total cumulée (ha)	1	2	5	10	20	30	40	50	60	60	60	60	60	60
surface récoltée (ha/an)				1	1	3	6	11	13	16	21	23	16	21
volume récoltée (t MB/an) (pour un rendement de 60 t MB/ha)	0	0	0	60	60	180	360	660	780	960	1260	1380	960	1260
temps de trajet entre bandes (min)	20	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	15	15	15

Le tableau ci-dessus montre la montée en charge des surfaces sur laquelle se base l'étude. Les surfaces plantées avant 2015 sont prises en compte. 4 ha de saules sont disponibles actuellement pour l'énergie (Annexe III). Si les agriculteurs envisagent pour partie et dans l'immédiat une fabrication de BRF, on a retenue l'hypothèse d'une valorisation énergétique en chaufferie collective de forte puissance. La montée en régime est justifiée par plusieurs données :

- La surface plantée de saule doit atteindre 30 ha en 2018<sup>5</sup>.
- Environ 30 ha d'ouvrages d'hydraulique douce ont précédemment été financés sur les 4 bassins versants de la pointe de Caux. Ces ouvrages pourraient déjà être à terme remplacés par des plantations de saule.
- On compte environ 200 agriculteurs sur les 300 km<sup>2</sup> de ce secteur. Si chacun plante au moins 0,5 ha de BLC pour répondre au décret érosion, un potentiel de plantation de 100 ha est envisageable.

Une surface de 130 ha semble donc atteignable à moyen terme pour le programme Innobioma. 60 ha visés pour 2023, est donc un objectif réaliste.

### VI.1.4.3 Un rythme de plantation annuel

Le rythme de plantation respecte les objectifs du projet Innobioma : la surface une fois développée doit permettre de récolter annuellement 1 200 t MB.

Comme la culture se récolte tous les 3 ans, chaque année on récolte les plantations plantées ou récoltées 3 ans auparavant. C'est pourquoi, en 2023, on récolte 21 ha avec 60 ha plantés.

On plante annuellement 10 ha de BLC de 2017 à 2021. Ce volume de plantation est atteignable selon l'expérience de plantation de 2015 où environ 6 ha de BLC (miscanthus inclus) furent plantés en 2 semaines, soit environ 2 jours/ha.

### VI.1.4.4 Un temps de trajet inter bande qui varie

Dans l'étude, on considère que plus il y a de bandes plantées sur le territoire et plus le temps de trajet entre les bandes diminue. Les différentes valeurs sont issues des valeurs observées sur le terrain lors de la période de plantation de 2015. Ces valeurs évoluent selon la logique présentée ci-dessous.

<sup>5</sup> Cette surface doit aussi inclure du miscanthus mais pour l'étude, on fait l'hypothèse que les agriculteurs se tourneront en majorité vers le saule du aux manque de débouchés pour le miscanthus sur le territoire.

Tableau 25 : Relation entre le nombre de bandes plantées et le temps de trajet inter bandes.

Nombre de bandes		Temps de trajet entre bandes (min)	Lien avec les plantations réalisées
valeur basse	valeur haute		
0	250	20	Valeur maximum observée actuellement
250	500	15	Valeur moyenne observée actuellement
500	750	12	Valeur moyenne observée actuellement
750	1000	9	Valeur minimum observée actuellement
1000	1250	7	Valeur optimisée souhaitée
1250	1500	5	Valeur optimisée souhaitée
1500	1750	3	Valeur très optimisée

## VI.2 Résultats de l'étude de coût

Afin d'obtenir le coût de revient, les coûts de plantation, de fermage, de récolte et les coûts logistiques sont calculés.

### VI.2.1 Coûts intermédiaires

On appelle coûts intermédiaires, les coûts de plantation et de fermage.

### VI.2.2 Coûts de plantation

Le coût de plantation est fixé à 2500 €/ha pour les bandes. A ce coût viennent s'ajouter d'autres coûts liés à la préparation et à l'entretien des plantations qui fixent le montant définitif à 2900 €/ha (cf. Tableau 26). Une subvention de 70 % de l'Agence de l'eau est attribuée à la plantation (dans la limite de 35 ha plantés). Chaque plantation est amortie sur 21 ans, ce qui correspond à la durée de production de biomasse. La récolte étant triennale, le coût de la plantation s'élève à 124 €/ha par récolte pour les 30 premiers ha plantés.

Tableau 26 : Coût d'implantation par ha de BLC de saule.

Coût d'implantation	
Préparation du sol €/ha	200
Plantation €/ha	2 500
Entretien €/ha	80
Désherbage post-levée toute la bande €/ha	120
<b>Total €/ha</b>	<b>2 900</b>

### VI.2.3 Coût de fermage

Le coût de fermage correspond à 167 €/ha/an, soit la moyenne des exploitations suivies par la Chambre d'agriculture. Cela équivaut à 501 €/ha/récolte.

## VI.2.4 Coût de récolte

Pour calculer le coût de récolte, il faut établir le temps de récolte pour une bande.

### VI.2.4.1 Temps effectif de récolte sur bande.

Tableau 27 : Détail du temps de récolte par bande et par ha pour les trois machines.

Machine	Broyeur GMHT 140	Broyeur JF Harvester	Récolteuse Stemster
<b>Temps productif (min/bande)</b>			
Récolte	15	20	17
Demi-tour en bout de parcelle	3	3	3
Déchargement en bout de parcelle			38
Mise en route du déchargement			2
<b>Temps non productif (min/bande)</b>			
Réglage avant récolte	15	15	15
Passage de la machine en mode route	5	5	5
Panne	2	2	2
<b>Total par bande (min/bande)</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	<b>82</b>
<b>Temps de récolte par hectare de bandes (h/ha)</b>			
<b>Total par ha de bandes (h/ha)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>Dont temps de coupe h/ha</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

Il faut donc en moyenne 5 h pour récolter 1 ha de BLC avec les broyeurs et le double, soit 10 h avec la récolteuse. Pour celle-ci, un déchargement est effectué au bout de chaque double rang d'après le rendement par bande et la capacité de chargement. Le temps de récolte par ha est élevé principalement car les parcelles sont très morcelées sur le territoire.

La vitesse de récolte est abaissée pour toutes les machines de 70% par rapport à la vitesse maximale afin d'être comprise entre 3 et 4 km/h. Cela pour quatre raisons :

- les vitesses initiales sont des maximums observés par les constructeurs et des données légèrement surestimées dans un but commercial,
- obtenir une vitesse de récolte plus proche de celle utilisée lors de travaux agricoles,
- protéger la plantation et la machine,
- minimiser les pertes de matière.

Pour obtenir le temps de récolte réel pour 1 ha de BLC, il faut ajouter au temps de récolte précédent, le temps de trajet requis pour transporter la machine entre les 8 BLC (7.41 arrondi) nécessaires pour représenter une surface d'un ha. Le temps de récolte par ha, permet de calculer le coût de récolte avec les trois machines.

### VI.2.4.2 Coût de récolte par ha obtenu

Tableau 28 : Coût de récolte de la plaquette obtenu pour les trois machines.

Machine de récolte	Coût moyen sur 7 ans (€/ha)			Coût la 7 <sup>ème</sup> année (€/ ha)		
	Broyeur JF harvester	Broyeur GMHT 140	Récolteuse Stemster	Broyeur JF harvester	Broyeur GMHT 140	Récolteuse Stemster
Amortissement machine	272	411	1 010	120	182	447
Coût annuel tracteur	141	227	153	140	225	152
Coût de remisage annuel machine	6	7	21	3	3	10
Coût d'assurance machine	58	88	216	28	42	104
Coût de carburant	160	286	180	159	285	179
Coût entretien machine	49	52	62	49	52	62
Coût de main d'œuvre	187	170	261	186	169	260
Coût de récolte	873	1 240	1 903	686	958	1215
Diminution du coût par rapport au coût moyen (%)	0	0	0	21,4	22,7	36,2

### VI.2.4.3 Conclusion sur les coûts de récolte

Suivant le Tableau 28, les coûts de récolte par ha sont au mieux égaux à 686 €/ha avec le JF Harvester, 958 €/ha avec le GMHT 140 et 1 215 €/ha avec la récolteuse Stemster. A l'atteinte de l'objectif de plantation, ce coût diminue de 21 à 26 % selon les cas par rapport au coût moyen.

Le coût de récolte reste élevé, principalement à cause d'une surface plantée insuffisante qui ne permet pas d'amortir la machine sur toute la fenêtre de récolte disponible. A terme, les charges fixes de la machine seront ramenées à un volume récolté assez important.

La partie suivante révèle les capacités de récolte de chaque machine et présente la surface plantée à viser pour amortir au mieux la machine.

### VI.2.5 Capacité de récolte annuelle sur la fenêtre de récolte

Les capacités de récolte de chaque machine varient comme le montre le tableau ci-dessous

Tableau 29 : Utilisation de la fenêtre de récolte en fonction de la surface cible

Surface plantée en 2023	60	120	180	240	300	360
ha récolté/an en 2023	21	42	63	84	105	126
% d'occupation de la fenêtre de récolte						
JF Harvester (%)	21	40	54	69	82	98
GMHT 140 (%)	19	36	48	61	72	87
Stemster MKIII (%)	30	57	80	103	125	150

- Le JF Harvester peut récolter jusqu'à 126 ha/an pour une surface de 360 ha.
- Le GMHT 140 peut récolter plus de 130 ha/an pour un peu plus de 360 ha.
- La récolteuse Stemster ne peut dépasser 80 ha/an récoltés et 200 ha.

Les coûts de chaque chaîne logistique sont présentés dans la partie suivante.

## VI.2.6 Coûts logistiques

### VI.2.6.1 Coût d'utilisation des matériels de transport

#### VI.2.6.1.1 Les bennes

Le coût d'utilisation des matériels de transport comme les bennes est un coût de location mensuel qui a été divisé par le volume de produit transporté par mois ; 2 bennes agraires, 2 bennes élévatrices et 4 bennes de 40 m<sup>3</sup> sont louées. Ces coûts sont imputés à la tonne brute et sont détaillés dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Coûts d'utilisation des bennes ramenée à la tonne.

Type de bennes	Agraire 20 m <sup>3</sup>	Elévatrice 20 m <sup>3</sup>	Benne 40 m <sup>3</sup>
Tonnage transporté(t MB/benne)	5	5	10
coût d'utilisation unitaire (€/mois)	1200	300	350
Nombre de bennes	2	2	4
Rotations/jour	8	8	2
Rotations/mois	240	240	60
Tonnage (t MB/jour)	40	40	40
Tonnage (t MB/mois)	1200	1200	1200
coût total (€/t MB)	2	0,5	1,2

#### VI.2.6.1.2 Les tracteurs et le système de débardage forestier

Le coût des tracteurs a été évalué dans le tableau ci-dessous à 50 €/h pour un tracteur. Deux tracteurs sont utilisés simultanément. Dans le cas d'une récolte de tiges, le porteur forestier collecte les tiges disposées en tas en bout de bande. Son coût est évalué à 75 €/h, carburant et chauffeur compris.

Tableau 31 : Coût horaire de l'engin de débardage

Tracteur débardeur		Porteur forestier ou tracteur avec remorque forestière	
puissance (Ch)	110	capacité de transport (t MB)	10
coût main d'œuvre (€/h)	27	coût (€/h)	75
coût d'utilisation (€/h)	15	coût (€/h)	750
carburant (€/h)	8,4		
coût total unitaire (€/h)	50		
coût total 2 tracteurs (€/h)	101		

#### VI.2.6.2 Le coût de débardage des copeaux

Le coût de débardage propre aux copeaux est présenté dans le Tableau 32. Il dépend de la vitesse d'avance de la machine de récolte. Il est égal à 4 €/t MB pour le JF Harvester et à 3 €/t MB pour le GMHT 140.

Tableau 32 : Calcul du coût de débardage sur la parcelle pour les broyeurs embarqués.

Broyeur	Broyeur JF harvester	Broyeur GMHT 140
temps de récolte (min/bande)	23	18
coût de débardage sur parcelle (€/bande)	29	23
coût de débardage (€/t MB)	4	3

### VI.2.6.3 Coût de transport au lieu de stockage intermédiaire

Le transport du produit de la BLC au lieu de stockage intermédiaire est calculé pour les 3 chaînes logistiques dans le Tableau 33. Pour la récolte de tiges, le débardage est inclus dans le transport.

Tableau 33 : Calcul du coût de transport au lieu de stockage.

Modèles de bennes utilisées	bennes élévatrices	bennes agraires	remorque forestière
Engin de débardage	tracteur 110 Ch	tracteur 110 Ch	porteur ou tracteur
Lieu de stockage	bennes de 40 m <sup>3</sup>	plateforme agricole	plateforme agricole
Vitesse sur route (Km/h)	20	20	20
Distance aller/retour lieu de transfert (Km)	8	20	20
Trajet aller/retour lieu de transfert (min)	24	60	60
Temps de déchargement (min)	10	5	40
Durée par rotation (min)	34	65	100
Rotation/ jour	8,00	8	4
Coût de transport (€/t MB)	5,7	10,9	12,5

Pour rejoindre les bennes, le coût est de 5.7 €/t MB. Pour rejoindre une plateforme, il est égal à 10,9 €/ t MB pour des copeaux et à 12,5 €/t MB pour des tiges entières.

### VI.2.6.4 Coût de stockage

Le coût de gestion d'une plateforme agricole est arrondi à 1 €/t MB. Pour une plaquette séchée à 45 % d'humidité, il faut ajouter un coût de séchage de 2 €/t MB, plus 2 €/t MB du aux pertes par fermentation (Tableau 34). Le coût de broyage est évalué à 32,4 €/ t MB.

Coût de broyage	
coût du broyeur (€/h)	400
débit (m <sup>3</sup> /h)	65
débit (t/jour)	124
coût de broyage (€/t MB)	32,4

Tableau 34 : Calcul des coûts de stockage, de séchage et de broyage.

Coût de stockage	
coût du m <sup>2</sup> de plateforme(€/m <sup>2</sup> )	16
surface (m <sup>2</sup> )	250
coût de construction ( €)	4 000
durée d'amortissement (année)	20
coût annuel (€/an)	200
coût de stockage (€/t MB)	1
coût de séchage (€/ t MB)	2
perte de matière lié au séchage (€/ t MB)	2

### VI.2.6.5 Coût de chargement et de transport du stockage à la chaufferie

Le coût de transport varie principalement en fonction du type de matériel et du taux d'humidité de la plaquette transportée. Le détail du calcul se trouve dans le Tableau 35 ci-dessous :

- Par camion benne, le coût est égal à 9 €/t MB à 50 % d'humidité.
- Par camion FMA, le coût est égal à 7,8 €/t MB à 50 % d'humidité.
- Le coût de chargement du camion est évalué à 1 €/t MB (Tableau 36).

Tableau 35 : Calcul des coûts de transport, du lieu de transfert intermédiaire à la chaufferie

Engin de transport	camion benne	camion FMA
vitesse sur route Km/h	45	45
temps d'amené (min)	80	80
distance aller/retour chaufferie (Km)	60	60
trajet aller/retour chaufferie (min)	80	80
chargement (benne ou plaquettes) (min)	30	30
déchargement chaufferie (benne ou plaquettes) (min)	30	30
changement 2 benne (min)	30	
durée par rotation (min)	170	140
capacité camion (m <sup>3</sup> )	80	90
capacité copeaux (t)	20	22,5
rotations/jour	3,1	3,7
tonnage (t MB/j)	61	83,6
coût transport camion (€/jour)	550	650
coût transport camion (€/h)	55	65
coût (€/t MB)	9	7,8

Tableau 36 : Calcul du coût de chargement avec un chargeur.

Télescopique 120 ch avec godet 3 m <sup>3</sup>	
coût d'utilisation (€/h)	40
temps de chargement FMA (min)	30
coût de chargement (€/t MB)	0,9

### VI.2.6.6 Conclusion sur les coûts logistiques

Comme les coûts logistiques ont été définis, on peut maintenant calculer le coût de revient de la plaquette des 5 itinéraires présentés. Pour rappel, ces itinéraires sont :

- le JF Harvester avec la logistique avec stockage en plateforme et la logistique avec stockage en benne de copeaux,
- le GMHT 140 avec la logistique avec stockage en plateforme et la logistique avec stockage en benne de copeaux,
- la Stemster MK III avec la logistique avec stockage en plateforme de tiges entières.

### VI.2.7 Coût de revient des plaquettes de saule

Ce coût inclus la production et la livraison du produit mais pas la marge pour le producteur. Cette marge sera calculée ultérieurement. Ce coût est d'abord calculé sur la période prévisionnelle pour obtenir un coût moyen. Le coût spécifique à l'année d'atteinte de la surface cible est calculé ensuite.

Les coûts suivants sont issus de comptes d'exploitation prévisionnelle réalisés pour chaque itinéraire, dont 2 exemples sont visibles dans l'Annexe XIII et l'Annexe XIV.

### VI.2.7.1 Coût de revient moyen sur la période prévisionnelle

Tableau 37 : Coût de revient moyen

coût moyen sur 7 ans	JF Harvester + benne			JF Harvester+plateforme			GMHT + benne			GMHT + plateforme			Stemster MKIII		
	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh
plantation	3,7	206	1,8	3,7	206	1,6	3,7	206	1,8	3,7	206	1,6	3,7	213	1,6
fermage	9,1	501	4,4	9,1	501	3,9	9,1	501	4,4	9,1	501	3,9	9,1	517	3,9
récolte	15,8	873	7,7	15,8	873	6,8	22,5	1 240	10,9	22,5	1 240	9,6	34,5	1 965	14,8
débardage	12,8	705	6,2	16,2	895	7,0	11,8	653	5,7	16,2	895	7,0	14,5	828	6,2
stockage	-	-	-	4	221	1,7	-	-	-	4	221	1,7	-	-	-
broyage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,4	1 846	13,9
chargement et livraison	9,0	496	4,4	8,7	478	3,7	9,0	496	4,4	8,7	478	3,7	8,7	494	3,7
<b>total</b>	<b>50,4</b>	<b>2 781</b>	<b>24,5</b>	<b>57,5</b>	<b>3 175</b>	<b>24,7</b>	<b>56,1</b>	<b>3 096</b>	<b>27,2</b>	<b>64,1</b>	<b>3 541</b>	<b>27,5</b>	<b>102,9</b>	<b>5 863</b>	<b>44,1</b>

On obtient les coûts de revient présentés dans le tableau ci-dessus :

- 24,5 €/MWh à 24,7 €/MWh avec le JF Harvester.
- 27,2 €/MWh à 27,5 €/MWh avec le GMHT 140.
- 44,1 €/MWh avec la récolteuse Stemster MK III.

Ces coûts intègrent la montée en charge des investissements sur la période. Pour le coût de revient une fois la surface cible établie, il faut s'intéresser à l'année 2023.

### VI.2.7.2 Coût de revient à l'atteinte de la surface cible

Tableau 38 : Coût de revient pour la surface de 60 ha.

coût de revient la 7 <sup>ème</sup> année	JF Harvester + benne			JF Harvester+plateforme			GMHT + benne			GMHT + plateforme			Stemster MKIII		
	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh	€/tMB	€/ha	€/MWh
plantation	4,8	262	2,3	4,8	262	2	4,8	262,4	2,3	4,8	262	2	4,8	271	2
fermage	9,1	501	4,4	9,1	501	3,9	9,1	501	4,4	9,1	501	3,9	9,1	517	3,9
récolte	12,4	686	6	12,4	686	5,3	17,4	958,3	8,4	17,4	958	7,5	22	1 255	9,4
débardage	12,8	705	6,2	16,2	894	7	11,8	653	5,7	16,2	894	7	14,5	828	6,2
stockage	-	-	-	4	221	1,7	-	-	-	4,0	221	1,7	-	-	-
broyage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32,4	1 846	13,9
chargement et livraison	9	496	4,4	8,7	478	3,7	9,0	496,3	4,4	8,7	478	3,7	8,7	494	3,7
<b>total</b>	<b>48</b>	<b>2 651</b>	<b>23,3</b>	<b>55,1</b>	<b>3 043</b>	<b>23,7</b>	<b>52,0</b>	<b>870,9</b>	<b>25,2</b>	<b>60,1</b>	<b>3 315</b>	<b>25,8</b>	<b>91,4</b>	<b>5 211</b>	<b>39,2</b>

En 2023 avec 21 ha récoltés/an, on abouti aux coûts de revient présentés dans le tableau ci-dessus :

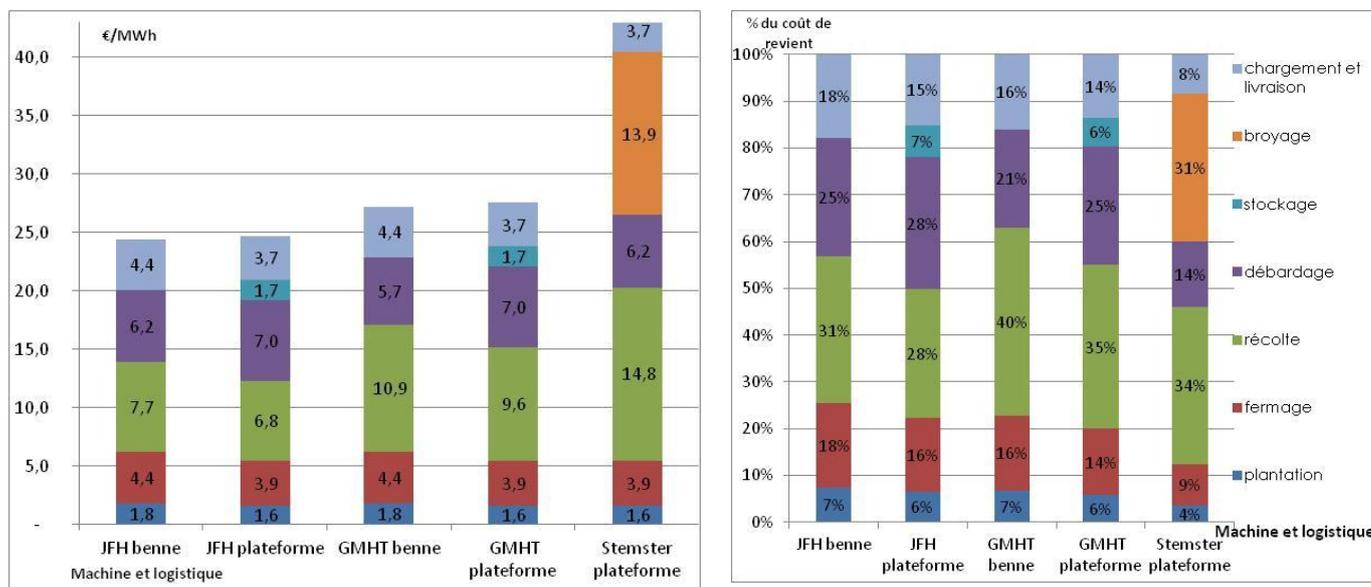
- 23,3 €/MWh à 23,7 €/MWh avec le JF Harvester.
- 25,2 €/MWh à 25,8 €/MWh avec le GMHT 140.
- 39,2 €/MWh avec la récolteuse Stemster.

La partie suivante met en valeur la répartition des postes de coût sur le coût de revient.

## VI.2.8 Répartition des charges

La répartition des charges sur le coût de revient final, n'est pas la même selon les machines.

Figure 23 : Répartition des opérations de production sur le coût de revient moyen



Le coût agricole, c'est-à-dire le coût de plantation, de fermage et de récolte réunis, occupe la plus grande part du coût de revient. Il varie entre 47 % et 63 % suivant les itinéraires. Le coût logistique varie de 37 % à 53 %. Pour l'itinéraire avec la récolteuse de tiges, le coût de broyage représente 31 % du coût de revient, soit 13,9 €/MWh, ce qui est très chère.

## VII Bilan sur l'étude technico-économique

### VII.1 Résultats économiques

Suite aux résultats obtenus, le JF Harvester entraîne avec la surface cible le coût le plus optimisé : 23,3 à 23,7 €/MWh selon les logistiques. Le GMHT 140 entraîne des coûts légèrement plus élevés : 25,2 à 25,8 €/MWh. En revanche la Stemster MKIII permet au mieux de produire une plaquette à 39,2 €/MWh ce qui est trop élevé pour envisager une commercialisation du combustible.

Par ailleurs, parmi les deux chaînes logistiques associées aux broyeurs embarqués, la chaîne avec stockage en bennes de copeaux est la plus économique.

### VII.2 Résultats techniques

Au-delà d'un coût de revient plus faible de sa plaquette, le JF Harvester comporte des avantages notamment à la lumière des objectifs environnementaux fixés par le programme Innobioma.

#### VII.2.1 Une limitation de la compaction du sol et des émissions

D'une part, il présente le poids le plus faible parmi les machines étudiées, soit 2 t contre respectivement, 4 et 7 t. C'est une caractéristique importante qui lui confère un avantage pour limiter la compaction du sol.

D'autre part, le bilan  $\text{CO}_2$  de la production avec ce matériel devrait être meilleur car il requiert un tracteur moins consommateurs que le broyeur GMHT 140 et le broyage est simultané à la coupe, comparé à la Stemster MKIII.

## **VII.2.2 Une flexibilité sur les diamètres de tiges**

D'après le constructeur (Henrik Back), le JF Harvester est plus flexible sur les diamètres de tiges récoltables. Une adaptation de sa conception est envisageable pour augmenter le diamètre de coupe au-delà de 60 mm. Cette machine pourra être adaptée aux diamètres constatés en Seine-Maritime. Ce broyeur sera disponible à la vente fin 2016 et il est d'ores et déjà possible de venir voir le prototype en fonctionnement au Danemark.

## **VII.2.3 Une compatibilité avec les matériels les plus courants**

Enfin, contrairement au GMHT 140 et son tracteur de 340 ch, il requiert un tracteur de puissance standard (130-170 ch), facilement disponible sur les exploitations et qui consomme moins de carburant.

Le meilleur itinéraire est donc le JF Harvester associé à la chaîne avec stockage en bennes. Des photos supplémentaires de ce matériel sont disponibles en Annexe XI. Le prix du combustible va maintenant être fixé, pour déterminer la marge garantie pour le producteur avec cet itinéraire.

# **VIII Détermination du prix du combustible produit avec le JF Harvester**

Le prix du combustible rendu chaufferie doit à la fois garantir une marge nette pour le producteur et être acceptable pour l'acheteur.

## **VIII.1 Méthodologie**

### **VIII.1.1 La marge nette**

La marge nette permet de déterminer ce que gagne le producteur une fois toutes ses charges d'exploitation payées. Elle est obtenue en faisant le ratio entre le bénéfice et le chiffre d'affaire. Ce dernier est la totalité des gains facturés au producteurs et le bénéfice est ce qui reste une fois toutes les charges d'exploitation déduites du chiffre d'affaire. On considère que pour une plantation qui vise à remplacer des ouvrages non productifs, la marge est satisfaisante à partir d'un bénéfice de 100 €/ha/an.

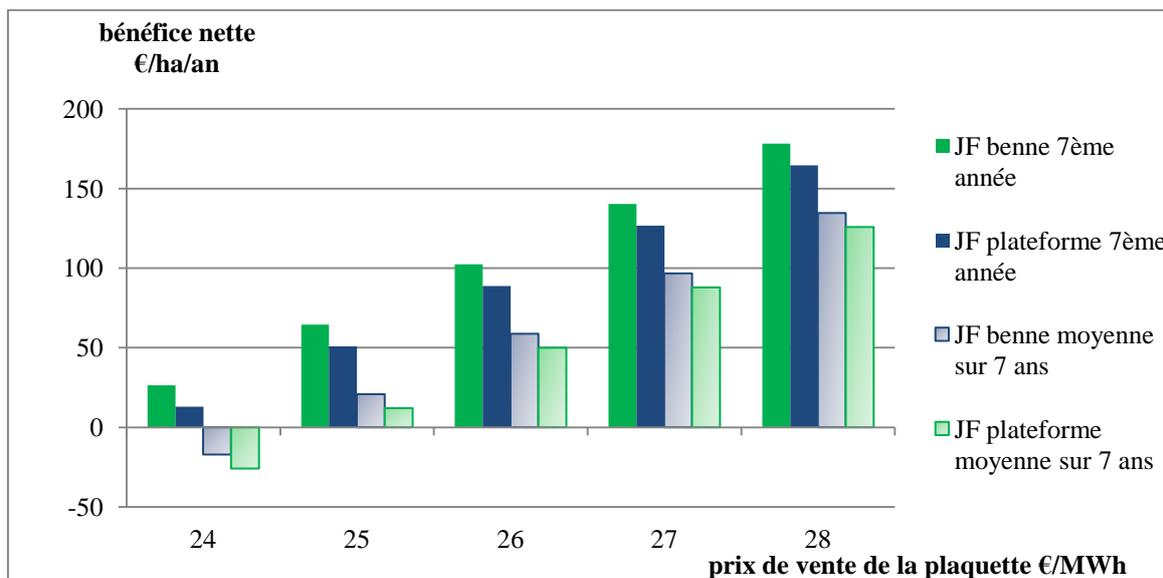
### **VIII.1.2 Le prix de vente de la plaquette**

Selon l'indice des prix du bois du CEEB de juillet 2015 (Annexe XII) et ceux rapportés dans la partie I.2.2, pour un taux d'humidité supérieur à 40 % et non calibrée, les coûts moyen de la plaquette forestière sont égaux à 23 €/MWh. Selon l'étude précédente (Nicolas, 2010) le prix maximal d'achat pour Biocombustibles est 28 €/MWh. Le prix de vente est donc compris entre 23 et 28 €/MWh.

Pour déterminer le meilleur prix, la variation du bénéfice en fonction du prix de vente de la plaquette de saule est étudiée. On distingue le bénéfice moyen et celui de la 7<sup>ème</sup> année.

## VIII.2 Bénéfice et marge obtenus

Figure 24 : Evolution du bénéfice des producteurs en fonction du prix de vente de la plaquette.



D'après la figure ci-dessus :

- En dessous de 26 €/MWh, la marge ne peut atteindre 100 €/ha/an.
- La 7<sup>ème</sup> année avec un prix de 28 €/MWh, le JF Harvester et la logistique avec stockage en bennes permettent un bénéfice de 178 €/ha/an, soit 16,7 % de marge nette.
- La 7<sup>ème</sup> année avec un prix de 28 €/MWh, le JF Harvester et la logistique avec stockage en plateforme permettent un bénéfice de 165 €/ha/an, soit 15,5 % de marge nette.
- Le bénéfice moyen est inférieur à celui de la 7<sup>ème</sup> année.

A la vue de ces enseignements, pour obtenir le meilleur bénéfice, le prix de vente de la plaquette issu du JF Harvester est 28 €/MWh. La marge nette pour le producteur à l'atteinte de la surface cible, oscille alors entre 15 % et 17 % selon les logistiques, soit un bénéfice de 165 à 178 €/ha/an pour le producteur.

## IX Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité vise à révéler les leviers susceptibles de diminuer davantage le coût de revient de la plaquette de saule. Compte tenu de la complexité de l'exercice, l'analyse a été entreprise uniquement sur le matériel donc l'acquisition est pressentie. L'impact des variations est étudié sur le coût de revient moyen du JF Harvester avec la logistique avec stockage en bennes.

### IX.1 Méthodologie

A travers cette analyse, l'influence de quatre facteurs sera testée.

#### IX.1.1 La largeur de bandes

On fait l'hypothèse que des bandes plus larges permettent de rassembler plus de biomasse en un point tout en garantissant des économies d'échelle. Différentes largeurs sont testées :

- de 2 à 3 doubles rangs pour une largeur de 6,75 m,
- de 2 à 4 doubles rangs pour une largeur de 9 m,
- de 2 à 6 doubles rangs pour une largeur de 13,75 m.

#### IX.1.2 Le montant des subventions

Actuellement, l'effet des subventions de l'Agence de l'eau sur le coût de revient ne peut être négligé. C'est pourquoi, on testera leur impact par une suppression de ces subventions.

#### IX.1.3 Augmentation des surfaces

Avec une augmentation des surfaces, on récolte plus de surface chaque année. et la fenêtre de récolte est mieux utilisée, permettant de mieux répartir les charges fixes de la machine sur d'avantage de produit récolté. On testera plusieurs variations :

- une augmentation de 100 %, 200% et 300 % des surfaces pour viser respectivement en 2023 une surface de 120 ha, 180 ha et 240 ha?
- une diminution de 50 %, comme si on restait figé à la surface cible soit 30 ha<sup>6</sup>

#### IX.1.4 Augmentation du temps de trajet entre bandes.

Le temps de trajet est défini suivant le nombre de bandes plantées sur le territoire comme l'a montré la Tableau 25. Il n'est donc pas le même suivant les années d'exploitation de la machine. Nous testerons l'effet d'augmenter le temps de trajet d'un facteur de 20 %, 50 % puis 100 %.

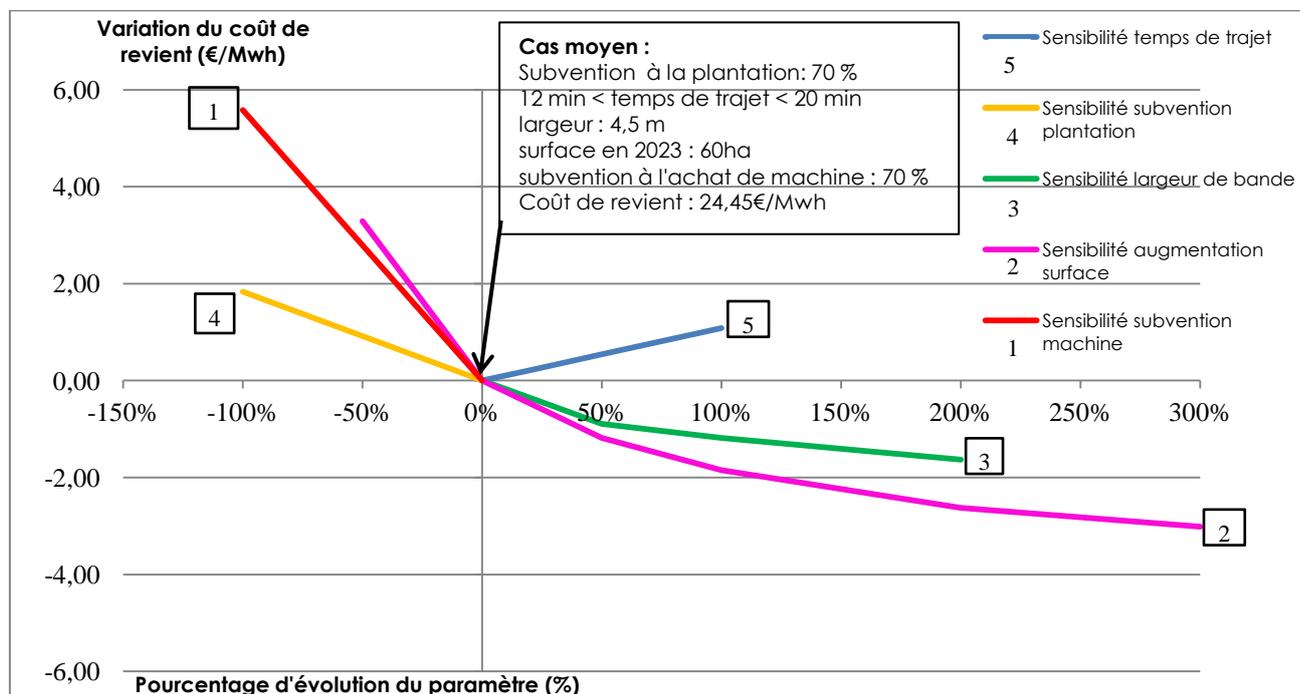
---

<sup>6</sup> Bien sur ces hypothèses ne sont possibles qu'en disposant d'une logistique de plantation plus optimisée qu'actuellement.

## IX.2 Résultats de l'analyse

### IX.2.1 Schéma de synthèse

Figure 25 : Impact de la variation des différents facteurs sur le coût de revient moyen de la plaquette de saule.



La Figure 25 démontre que les variables n'ont pas toutes le même effet sur le coût de revient de la plaquette de saule. La variation de certains facteurs faisant d'avantage varier le coût que d'autres.

D'après cette analyse, le coût de revient est plus sensible par ordre décroissant : à la subvention à l'achat, à la surface plantée, à la subvention à la plantation, à la largeur de bandes puis au temps de trajet inter BLC. Les différents cas présentés vont mettre en lumière l'influence des facteurs.

### IX.2.2 Présentation du cas moyen

Le cas moyen correspond aux paramètres pris dans l'étude de coût précédent :

- une surface cible de 60 ha en 2023, pour une surface récoltée de 21 ha,
- la surface moyenne récoltée sur la période est égale à 30,4 ha/an,
- une largeur de bande de 4,5 m,
- une subvention de l'Agence de l'eau de 70 % pour la plantation avant 2018 et pour l'acquisition de la machine de récolte,
- un temps de trajet entre bandes variant de 12' à 20' suivant le nombre de bandes plantées.

Le coût de revient moyen obtenu s'élève à 24,45 €/MWh.

### IX.2.3 Présentation des cas particuliers

#### IX.2.3.1 Cas le plus favorable à la filière

Avec pour objectif de proposer à Biocombustible SA un coût de la plaquette de saule le plus compétitif, la filière devrait idéalement :

- bénéficier d'un taux de subventions à la plantation de 70 %,
- bénéficier d'un taux de subventions à l'achat de la machine de 70 %,
- disposer d'une surface plantée de 240 ha en 2023, qui entraînerait une économie de 3,1 €/MWh,
- avoir des bandes de largeur triplée à 13,5 m. Cela entraînerait une économie égale à 1,6 €/MWh,

- avoir un temps de trajet inter bandes compris entre 15' et 20', qui entraînerait une économie égale à 1,1 €/MWh.

On atteint alors un coût de revient de 19,75 €/MWh, soit inférieur de 19,2 % au coût de référence actuel de 24,45 €/MWh.

Cependant, certaines valeurs inférieures suffisent pour optimiser le coût et il est plus intéressant de souligner l'impact de ces actions qui peuvent être mise en œuvre plus facilement dans le cadre du projet Innobioma. La partie suivante présente l'impact de ces actions.

### ***IX.2.3.2 Suppression des subventions de l'Agence de l'eau.***

Il est d'abord intéressant de regarder l'effet de supprimer les subventions (-100 % la courbe n°4 et pour la courbe n°1 sur la Figure 25).

La suppression à la subvention à l'achat entraîne un surplus de 5.6 €/MWh soit un coût de revient de 30 €/MWh. Cela représente 637 €/ha supplémentaires sur le coût de revient moyen<sup>7</sup>.

La suppression de la subvention à la plantation entraîne un surplus de 1.8 €/MWh, soit un coût de revient de 26,3 €/MWh. Cela représente 204 €/ha supplémentaire sur le coût de revient moyen.

Les 2 subventions supprimées entraînent combinées, un surplus de 7,4 €/MWh, soit de 840 €/ha récolté. Donc cela entraîne un surplus de 8 532 €/an en moyenne sur les 7 ans.

### ***IX.2.3.3 Doublement de la largeur de bandes.***

Le passage d'une largeur de bandes de 4,5 m à 9 m (+100 % pour la courbe n°3 sur la Figure 25) entraîne une réduction du coût de 1,2 €/MWh, soit un coût de revient moyen de 23,3 €/MWh. Cela représente une économie de 136,5 €/ha sur le coût de revient moyen, soit 1 384 €/an en moyenne sur les 7 ans. C'est le surplus entraîné par la suppression de la subvention à la plantation. On constate donc que doubler la largeur de bande pourrait permettre de se passer de la subvention à la plantation.

### ***IX.2.3.4 Une surface de 180 ha en 2023.***

Atteindre une surface de 180 ha en 2023 (+200 % pour la courbe n°2 sur la Figure 25), donne un coût de revient de 21,8 €/MWh. Cela permet de réduire de 2,62 €/MWh le coût de revient, soit une économie de 298 €/ha récolté ou de 3 021 €/an en moyenne sur les 7 ans. En effet, les charges fixes de la machine sont ramenées sur un volume récolté plus important.

### ***IX.2.3.5 Des bandes plus concentrées ou espacées.***

Eloigner les bandes, avec un trajet moyen compris entre 22' et 30' (+50 % pour la courbe n°5 sur la Figure 25) donne un coût de 23,9 €/MWh. Cela entraîne un surplus de 0,5 €/MWh, soit 57 €/ha récolté. Réduire de moitié le temps de trajet entre bandes, c'est-à-dire passer d'un temps de trajet moyen entre chaque bande de 12'-15' à 7-10', entraîne une économie égal au surplus précédent.

## **IX.2.4 Conclusion sur les résultats**

L'analyse a permis d'identifier les paramètres ayant le plus d'impact sur le coût de revient moyen. Il s'agit des subventions de l'Agence de l'eau et de la surface de bandes plantée. Des leviers d'action existent donc pour diminuer le coût de revient sur sa composante agricole (plantation, fermage et récolte).

---

<sup>7</sup> Avec un rendement de récolte de 55,2 t MB/ha et un PCI de 2.06 MWh/t MB).

## X Discussion des résultats de l'étude

Le travail réalisé permet de consolider le choix d'une machine de récolte plus adaptée au contexte du projet Innobioma, tout en déterminant le coût de revient de la plaquette produite et la marge pour le producteur. Sur l'ensemble de l'étude de coût, l'itinéraire basé sur le JF Harvester et le stockage en bennes se détache. Il permet également d'apporter quelques éléments supplémentaires sur l'itinéraire technique des BLC et le développement de la filière.

### X.1 Des coûts de récolte qui demeurent élevés

Les résultats de l'étude ont montré que la récolte de BLC entraîne des coûts de récolte bien supérieurs à ceux obtenus pour des cultures de plein champ. En 2023, les coûts les plus optimisés s'élèvent à 686 €/ha, 958 €/ha et 1 215 €/ha, pour le JF Harvester, le GMHT 140 et la Stemster MKIII.

Les coûts obtenus pour les broyeurs embarqués atteignent presque le double des 387 €/ha estimés par Berhongaray et al.(2014) pour le JF Hydro E. Pour la Stemster, le coût est bien supérieur à ceux observés dans la bibliographie (Tableau 39). Les BLC subissent l'influence du morcellement, leur faible surface et la faible utilisation de la fenêtre de récolte, au contraire de la récolte de plantation de plein champ qui n'entraîne pas de temps de trajet et amène une économie d'échelle sur certaines opérations. Par exemple les réglages de la machine sont effectués une seule fois.

Par ailleurs, les coûts de récolte sont plus élevés comparés au Biobaler (476 €/ha, pour 400 ha plantés) mais ils sont mieux optimisés : au contraire de ce dernier, le broyage est pris en compte ; le produit obtenu est directement valorisable en chaufferie et la surface cible est atteignable à court terme.

Tableau 39 : Comparaison du coût de récolte obtenu avec la récolteuse, avec la bibliographie.

Source	Etude 2015	Schweier et al.(2012)	Berhongaray et al.(2014)	Vanbeveren et al.(2015),	Bonnafous (2010)
Coût de récolte €/ha	1215	815	541	779	1726

Bien qu'élevés, les coûts obtenus restent dans la même échelle de valeurs que ceux de la bibliographie et des études précédentes. L'approche réalisée intègre donc des précautions et traduit une démarche marquée d'hypothèses conservatrices.

### X.2 La supériorité économique de la récolte avec broyage sur parterre de coupe pour la récolte de BLC.

Les broyeurs embarqués ont montré leur supériorité sur la récolteuse de tiges Stemster, en produisant un produit directement valorisable par la chaufferie. La coupe et le broyage simultanés réduisent également la consommation énergétique. Au contraire, la récolte de tiges a mené à l'obtention d'un coût de revient trop élevé pour le marché, causé principalement par une capacité de récolte plus limitée (80/ha/an récolté contre 130 ha/an en moyenne pour les broyeurs), par une chaîne logistique coûteuse nécessitant des méthodes plus forestières, au delà du ressuyage naturel et de la flexibilité d'utilisation des tiges qui sont offerts.

Cependant, sur ce type de récolte, le fagotage pourrait permettre d'atténuer en priorité le foisonnement en densifiant le transport et le broyage. Or, une fagoteuse représente un investissement supplémentaire, plutôt peu justifié à la vue du faible tonnage récolté, en comparaison des chantiers forestiers de bois énergie où de grands volumes de rémanents sont transportés.

## **X.3 La complémentarité des chaînes logistiques avec stockage de copeaux**

Parmi les deux chaînes logistiques associées aux broyeurs embarqués, la chaîne avec stockage en bennes de 40 m<sup>3</sup> est la plus économique. Mais le risque de refus par les chaufferies est élevé. Pour que cette chaîne logistique fonctionne, il faut obtenir plusieurs garanties :

- avoir des bennes élévatrices et des bennes de 40 m<sup>3</sup> à disposition, au près de la Cuma 76 ou des professionnels du territoire durant la période de récolte des saules,
- effectuer la livraison de décembre à février, là où une chaufferie comme celle du Havre fonctionne à pleine capacité et où le saule ne représenterait qu'une faible part de son approvisionnement journalier. Elle pourrait alors accepter 40 t de saule à 50 % d'humidité mélangées avec d'autres bois séchés.

C'est pourquoi, la chaîne logistique avec stockage en plateforme doit rester une option envisageable. Elle est mieux acceptée grâce à l'emploi de camions FMA, utilise des matériels disponibles sur les exploitations et permet de faire sécher le produit.

## **X.4 Une marge plutôt faible**

La marge nette obtenue s'étalonne au mieux entre 15 et 17 % pour un bénéfice de 165 à 178 €/ha/an. Néanmoins, cela reste faible comparé à un blé où elle est proche de 400 €/ha/an. Mais les plantations concernent des surfaces qui demeurent normalement improductives (bandes enherbées) et qui représentent uniquement un coût pour l'agriculteur. Par ailleurs les producteurs cherchent à protéger leur sol en priorité.

## **X.5 L'apport de l'analyse de sensibilité**

### **X.5.1 Une marge de manœuvre positive**

En combinant plusieurs actions par rapport au cas moyen (doubler la largeur de bandes, concentrer deux fois plus les bandes, viser une surface de 150 ha en 2023) on atteint un coût de revient égal à 20,13 €/MWh. On réalise ainsi une économie de 4,32 €/MWh, soit 491 €/ha récolté. Ce qui correspond à une économie de 163 €/ha/an, soit environ 40 % de la marge nette d'un blé.

Au total, on économise en moyenne 4 978 €/an sur les 7 ans. Ces leviers peuvent être actionnés sans demander un effort démesuré et ils apportent une marge de manœuvre intéressante au programme.

### **X.5.2 Une filière dépendante des subventions**

La dépendance actuelle de la filière aux subventions de l'Agence de l'eau est à souligner. La suppression des subventions entraîne un surplus de 7,4 €/MWh, soit 8 532 €/an sur 7 ans.

Ainsi, sans les subventions, la filière ne se monte pas car même avec le meilleur itinéraire, le coût de revient de la plaquette augmente de 7,4 €/MWh, pour atteindre 32 €/MWh, un coût trop important pour l'acheteur. Les leviers d'action peuvent en partie contrebalancer la suppression des subventions ; par exemple doubler la largeur de bandes peut déjà permettre de se passer des subventions à la plantation, mais il restera quand même un surplus 3 554 €/an à combler.

## **X.6 La péréquation des coûts parmi les producteurs**

La question de la péréquation des coûts parmi les producteurs peut se poser. Lors de la fixation du prix du combustible, l'écart entre la marge moyenne et celle de la 7<sup>ème</sup> année, a montré que les producteurs ne bénéficient pas de la même marge avant ou après 2023. Les premiers gagneront moins que les suivants. Au nom du développement de la filière, un accord concernant les porteurs de l'investissement pour atteindre la surface cible doit donc être fixé entre les membres du programme.

## **X.7 Une modification des modalités de plantation encore envisageable**

Le schéma de plantation le plus efficace entre le double rang et le simple rang peu encore être discuté. En effet, les machines de récolte spécifiques aux rangs simples n'ont pas été abordées. Notamment, la récolteuse Rod Picker et le broyeur embarqué GMHS 100. Ce sont les machines au plus fort potentiel pour diminuer les coûts de production et étendre les surfaces de TTCR. Elles sont à la fois bon marché, disponibles à l'échelle de l'exploitation agricole et flexibles sur l'espèce, la taille des arbres et les conditions de la parcelle. Elles doivent répondre au manque de récolteuses universelles de TTCR.

Ainsi, il serait intéressant d'analyser, si la plantation de BLC en simple rang et la récolte en utilisant ces machines, ne permet pas de réduire les coûts de plantation et les coûts de revient de la plaquette de saule. Ces machines ont été présentées précédemment et leur développement doit être suivi attentivement par les membres du programme Innobioma.

## **X.8 La préservation du sol et de l'eau comme ligne directrice**

Pour limiter le ruissellement, les plantations doivent s'accompagner d'une démarche visant à préserver leur capacité d'infiltration : éviter le plus possible la compaction du sol, en limitant la circulation sur les parcelles ; laisser des fourrières en bout de rang pour faciliter la circulation des machines. Ensuite la pression au sol doit être limitée par une répartition optimale du poids des engins, en augmentant si besoin la force de traction (limitant le patinage). Ce dernier point peut affecter le coût de la récolte avec une consommation de carburant, plus importante. Préserver la qualité de l'eau est aussi un objectif fort du programme dont dépendent les subventions de l'Agence de l'eau. Des lubrifiants biodégradables et non écotoxiques, comme ceux utilisés pour les travaux forestiers, peuvent être utilisés pour les matériels.

## **XI Analyse critique de la démarche utilisée**

L'ensemble du calcul de coût a permis de distinguer la machine et la logistique les plus économiques pour la future filière de BLC de saules. Cette analyse a pour but de prendre de la hauteur par rapport aux hypothèses et aux méthodes prises pour répondre à la problématique. Comme dans toute démarche de simulation, il faut prendre en compte une certaine incertitude sur les résultats, qui peut être estimée à environ 10 %.

### **XI.1 Retour sur les hypothèses de surface et les BLC .**

Les hypothèses retenues sont discutables. D'une part, la montée en charge pour 2023 des plantations peut sembler très optimiste compte tenu de la surface plantée actuellement. Un potentiel d'au moins 130 ha a été évalué mais il se base sur un engouement des agriculteurs pour la plantation, qui n'est pas constaté pour le moment.

D'autre part, dans la simulation on a privilégié l'intégration d'un rythme de plantation entraînant une véritable cyclicité de récolte, à l'hypothèse souvent admise qui considère que chaque année un tiers de la surface plantée est récoltée. Ainsi, comme les plantations ne sont pas toutes plantées la même année, le tonnage de bois récolté ne sera pas identique pour les années qui vont suivre 2023. En effet, le tonnage récolté chaque année va osciller entre 960, 1 260 et 1 380 t/an, soit une surface récoltée par an égal à 16, 21 et 23 ha. C'est l'une des principales limites de la simulation.

Par ailleurs, en regardant le graphique bilan de l'étude (Figure 26), on remarque que le coût de revient est plus élevé en 2022 qu'en 2021. Cela met en lumière une autre limite de la simulation, à savoir qu'en 2022, les plantations récoltées sont les premières plantations à ne pas bénéficier de la subvention des plantations de l'Agence de l'eau. Ainsi, le coût de revient est plus élevé cette année là, mais il diminue de suite en 2023, car la surface récoltée réaugmente.

Enfin, l'étude s'est basée sur des bandes, dont les dimensions fixées à l'origine du programme sont identiques, or ce ne sera pas le cas sur le terrain car il faudra s'adapter à certains cas particulier.

## **XI.2 Retour sur la méthode de calcul et les résultats**

Les valeurs utilisées pour le calcul du coût sont parfois incertaines et nécessitent d'être approfondies.

Concernant la récolte, des pertes égales à 8 % pour les broyeurs ont été incluses (selon la bibliographie sur les ensileuses). Ces pertes peuvent être surestimées. La vitesse d'avancement de la machine a été fortement réduite (-70 %) par rapport aux indications de performance données par les constructeurs, pour retenir une vitesse de récolte plus crédible. Toutefois, des tests sur le terrain pourront confirmer si ces machines peuvent réellement récolter à une vitesse comprise entre 7 et 12 km/h.

Par ailleurs, les coûts d'entretien sont fixés sur la base d'un broyeur tracté à axe vertical pour les broyeurs embarqués et sur une remorque auto-chargeuse pour la récolteuse Stemster. En ce qui concerne, l'entretien des lames et des couteaux de broyage, les coûts sont estimés d'après les données de l'entreprise Dutheil-affutage. De même, le coût de certains matériels de transport comme les bennes élévatrices, est estimé selon les usages propres à Biocombustibles SAS.

La consommation de carburant des tracteurs peut aussi varier, tout comme le taux d'utilisation sur parcelle des tracteurs. Il est fixé pour l'étude à 70 %, ce qui correspond à celui d'une ensileuse en phase de récolte.

Pour le calcul de l'amortissement, nous avons choisi une durée d'amortissement sur 7 ans à un taux de 3% tout en remboursant les intérêts de, l'emprunt sur 5 ans. Ce qui correspond aux durées de vie moyennes d'utilisation des broyeurs agricoles.

Les charges de structure ne sont par ailleurs pas incluses dans le calcul du coût. Leur montant n'est pas négligeable (150 €/ha/an dans le cas d'une culture agricole en moyenne). Ces charges devront être estimées et incluses rapidement dans le coût pour la suite du programme. Leur prise en compte devrait ainsi augmenter légèrement le coût de revient obtenu.

### **XI.3 Retour sur les chaînes logistiques élaborées**

Tout d'abord, simuler le morcellement des parcelles fut l'une des choses les plus compliquée. Le temps de trajet moyen entre BLC a été fixé selon une valeur haute (15 à 20 min). Mais le temps de trajet peut être bien plus faible. Le temps de réglage par BLC a été fixé quant à lui à 10'. Ce temps devrait diminuer à la faveur de l'expérience accumulée sur la machine.

Les chaînes logistiques élaborées se basent sur un volume de récolte bien définis, à savoir 40 t/jour récoltées. Ce volume permet d'utiliser les matériels sur une journée moyenne de 10 heures utiles de façon à ne pas être en flux tendu. Néanmoins, on pourrait récolter au-delà de 40 t/j. La logistique devrait alors s'adapter en louant des tracteurs et des bennes supplémentaires si besoin. Ces chaînes sont donc un modèle type, mais comme tout modèle il n'est pas rigide et doit pouvoir s'adapter à une situation légèrement différente.

<p>En définitive, l'étude menée reste une démarche de simulation qui a visée à s'approcher au plus près de la réalité. Vu le peu de recul sur les matériels, notamment pour les broyeurs embarqués, seuls l'expérience et davantage d'échanges avec les constructeurs, peuvent affiner le calcul de coût et appréhender dans leur globalité, les limites des matériels abordés.</p>
---

## CONCLUSION

L'étude présente a répondu à la problématique et a vérifié les hypothèses émises. De nouveaux itinéraires ont pu être étudiés et les broyeurs embarqués offre une solution nouvelle pour la récolte des BLC ; les itinéraires producteurs de copeaux par broyage sur parterre de coupe sont les plus économiques.

L'équilibre économique est atteint avec le broyeur embarqué JF Harvester du constructeur Ny Vraa associée à une logistique avec stockage en bennes de copeaux. Le coût de revient de la plaquette produite est encourageant et s'élève à 23,3 à 23,7 €/MWh pour une surface cible de 60 ha en 2023. Cette machine dégage une marge variant de 15 à 17 % pour le producteur, tout en garantissant un prix de vente acceptable pour l'acheteur égal à 28 €/MWh rendue chaufferie. L'acquisition du JF Harvester est donc pressentie pour 2017. Cependant, les deux chaînes logistiques associées sont complémentaires et aucune ne doit être éliminée.

Pour valider définitivement ces itinéraires techniques il faut toutefois réaliser des essais :

- de récolte en conditions réelles, en faisant venir la machine du Danemark en Normandie, pour approfondir les connaissances sur le JF Harvester, notamment son montage sur le tracteur et sur la façon de le transporter d'une bande à l'autre ;
- des chaînes logistiques pour appréhender les limites et affiner les coûts
- de combustion, pour caractériser le produit obtenu.

Par ailleurs, la filière reste fortement dépendante des subventions. Un plan d'action doit être appliqué pour améliorer le coût de revient et l'organisation de la filière, tout en diminuant la dépendance aux subventions pour le futur. Il rassemble 7 mesures phares :

1. Elargir les bandes en doublant la largeur actuelle.

Cela permet une massification de la récolte et des économies d'échelle en réduisant le nombre de bandes plantées.

2. Concentrer les bandes en augmentant la surface de BLC par exploitation.

Pour le moment la surface minimale proposée par exploitation est égale à 0,3 ha, mais atteindre 1 ha est nécessaire pour concentrer la production.

3. Etendre les surfaces pour diminuer le coût de récolte.

Il faut planter des TTCR sur les déprises en plus des zones érosives disponibles, pour atteindre surface cible plus élevée comprise entre 100 et 180 ha.

4. Optimiser la phase de plantation des BLC.

Plusieurs problèmes ont été observés à cause de la planteuse louée en 2015 ou des conditions de plantations. Un matériel de plantation plus performant, qui évite la cassure des boutures doit être acquis avec l'aide des subventions de l'Agence de l'eau. Ces cassures peuvent limiter la reprise des tiges, réduire le rendement ou entraîner des maladies sur les plantations.

5. Monter une contractualisation.

En élaborant un contrat entre l'acheteur et les producteurs, qui pourrait être similaire à un contrat d'approvisionnement forestier, le risque pris par les producteurs qui s'engagent sur des plantations de 21 ans est couvert et ils peuvent disposer d'une possibilité d'achat de leur produit sur le long terme en posant les bases d'un partenariat durable. L'association devra avoir le rôle de négociateur unique, pour servir au mieux les intérêts des producteurs.

6. Planifier l'usage des matériels et la logistique sur le territoire.

Avec cet objectif, une personne pourrait être prise en charge par l'association Terre Eau Energie 76 pour organiser la gestion des matériels ou bien les matériels pourraient être gérés par une Cuma.

## 7. Evaluer les aménités environnementales.

Au delà de la vente de la biomasse, ce sont ces aménités qui permettront de justifier le développement des BLC auprès du monde agricole, de l'agence de l'eau et des collectivités. La valorisation de ces aménités peut permettre également de pérenniser le programme au-delà des subventions, en proposant par exemple des crédits carbone aux industriels de la vallée de Seine pour séquestrer du carbone, en échange de subventions à la plantation. Leur évaluation est prévue pour la suite du projet Innobioma en 2016 et 2017.

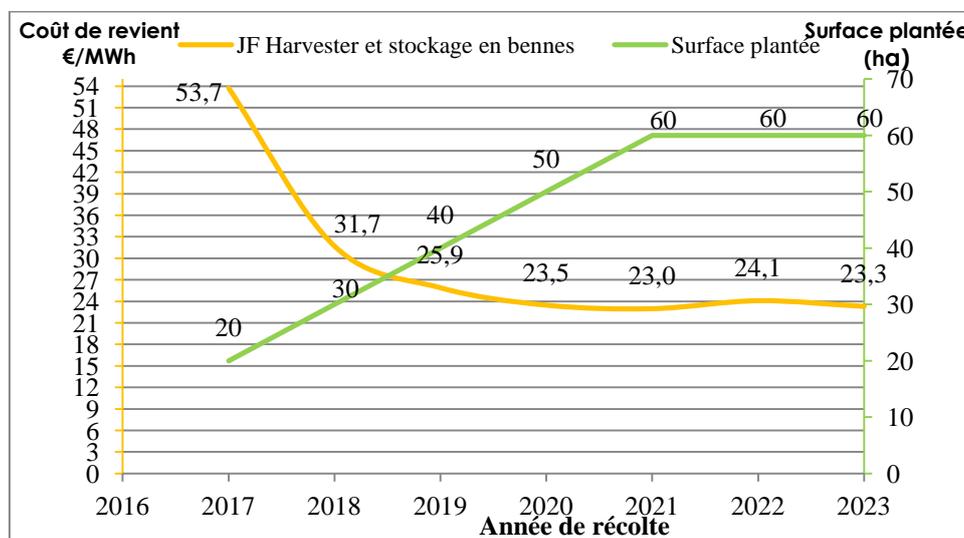
Cependant, malgré ces recommandations, c'est bien la volonté des agriculteurs à augmenter l'effort de plantation qui est le pré requis fondamental pour que la filière s'établisse à court terme. Pour cela le programme peut compter sur un contexte propice au développement des BLC. Notamment, la mise en place de l'association Terre Eau Energie 76 qui devrait dans un premier temps faciliter le recrutement de nouveaux agriculteurs.

L'appel à projets Dynamic de l'Ademe en 2015 qui vise à mobiliser du bois énergie supplémentaire pour les chaufferies du Fond Chaleur apporte aussi des perspectives intéressantes. Les partenaires du programme Innobioma pourrait ainsi inclure les BLC de saules au sein de la démarche de mobilisation du bois énergie bocager et communiquer la possibilité de planter des BLC auprès des agriculteurs et des porteurs de ce type de projets.

La conférence sur le climat de 2015 qui se tient à Paris en cette fin d'année 2015, représente de même une opportunité sans précédent, pour faire connaître à l'échelle nationale ce type de projet multifonctionnel, au niveau des professionnels ou du grand public.

Enfin, les agriculteurs sont également soumis à une contrainte réglementaire environnementale de plus en plus contraignante et le recours à la plantation de bandes productives paraît préférable aux bandes enherbées.

Figure 26 : Schéma récapitulatif de l'étude



## BIBLIOGRAPHIE

ASSOCIATION D'INITIATIVE LOCALE POUR L'ENERGIE. 2007. *Programme Life Environment 2004-2007 Wilwater, Le taillis de saule à Très Courte Rotation, Guides des bonnes pratiques agricoles*. 12 p.

BERHONGARAY (Gonzalo), EL KASMIQUI (Ouafik) et CEULEMANS (Reinhart). novembre 2013. Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: One-process versus two-process harvest operation. *Biomass and Bioenergy*. vol. 58, n° 342, p 333.

BONNEFOUS (Marion). 2010. *Création de bandes lignocellulosiques pour la production de biomasse dans le Pays de Caux (76) : Nature, intégration et gestion dans les exploitations agricoles et les bassins versants*. Toulouse : PURPAN, 96 p. + annexes (Mémoire de fin d'étude ingénieur).

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE SEINE MARITIME. 2014. Appel à projet Innobioma. 17 p.

CIVITARESE (Vincenzo), FAUGNO (Salvatore), PINDOZZI (Stefania), ASSIRELLI (Alberto) et PARI (Luigi). janvier 2015. Effect of short rotation coppice plantation on the performance and chips quality of a self-propelled harvester. *Biosystems Engineering*, vol. 129, p.370–377.

Comité Interprofessionnel du Bois Energie (CIBE). Classification professionnelle des combustibles bois déchetés. 2011. [Consulté le 15/07/2015. Disponible à l'adresse : <http://www.cibe.fr/IMG/pdf/classification-prof-combustible-DEF2011-2.pdf>.

COST REDUCTION AND EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR SHORT ROTATION COPPICE. 2012. *Guide technique Taillis à courte et à très courte rotation*. CREFF. 42 p.

DAWSON (Malcolm). 2007. Short rotation coppice willow best practice guidelines. Renew Project. [en ligne]. [Consulté le 8 avril 2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.spiritsolar.co.uk/wp-content/uploads/2013/05/short-rotation-coppice-willow.pdf>.

DESTAIN (Marie-France). 2013. La compaction des sols agricoles en Wallonie. [Consulté le 20/07/2015]. Disponible à l'adresse : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/170422>.

DIMITRIOU (Ioannis) et ARONSSON (Par). 2005. Des saules pour l'énergie et la phytoremédiation en Suède. *Unasyva*, vol. 56, n°221, p. 47-50 .

DO CANTO (Juliana Lorensi), KLEPAC (John), RUMMER (Bob), SAVOIE (Philippe) et SEIXAS (Fernando). 2011. Evaluation of two round baling systems for harvesting understory biomass. *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n 5, p.2163–2170.

DUCATILLON (Laurie). 2013. *Les bandes lignocellulosiques, leurs fonctions contre le ruissellement érosif et leurs agencements sur les parcelles agricoles*. Clermont-Ferrand : VetAgro Sup, 47p. + annexes (Mémoire de fin d'étude ingénieur).

FCBA. 2010: *Récolte en plaquettes des Taillis à Courte Révolution-Programme REGIX- Synthèse des résultats techniques et économiques*.

DI FULVIO (Fulvio), BERGSTRÖM (Dan), KONS (Kalvis) et NORDFJELL (Tomas). 2012. Productivity and Profitability of Forest Machines in the Harvesting of Normal and Overgrown Willow Plantations. *Croatian journal of forest engineering*, vol. 33, n°1, p. 25-37.

GUÉRAULT (Hubert). 2014. *PROJET « Bandes ligno cellulosiques dans le pays de caux »-Opération: Expérimentation d'un procédé innovant de lutte contre l'érosion des sols- 2011-2013 Rapport final*. Bois-Guillaume : Chambre d'agriculture de la Seine Maritime. 21 p .

HUISMAN (Willem). 2003. Optimising harvesting and storage systems for energy crops in The Netherlands. *International Conference on Crop Harvesting and Processing, Louisville, KY*, p. 9–11.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL. 2006. *Département de la Seine-Maritime. Résultats du*

troisième inventaire forestier (2002). 128 p.

INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL, INSTITUT FORET BOIS CELLULOSE, SOLAGRO. 2009. *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*. 105 p.

JENZ. 2012. *SRC harvester with a chipper drum-GMHT 140*. Jenz. 4 p.

JOSSART (Jean-Marc). 2003. *Développement de projets de démonstration de la filière taillis à très courte rotation pour la production d'énergie renouvelable en Wallonie*. Université Catholique de Louvain. 78 p.

KEEFE (Robert), ANDERSON (Nathaniel), HOGGLAND (John) et MUHLENFELD (Ken). 2014. *Woody Biomass Logistics. Cellulosic Energy Cropping Systems*. p.251–279.

LABRECQUE (Michel) et TEODORESCU (Traian Ion). 2004. *La culture intensive de saules en courtes rotations (CICR)*. Institut de recherche en biologie végétale. Jardin botanique de Montréal. 4 p.

LAVOIE (Frédéric). 2007. *Conception d'une récolteuse de saules en rotation courte*. Québec : Université Laval. 82 p +annexes. (Thèse de doctorat).

LECHASSEUR (Guillaume). 2007. *Étude et optimisation de la coupe des tiges de saule*. Québec : Université Laval. 68 p +annexes. (Mémoire de master).

NICOLAS (Emmanuel). 2011. *L'agriculture et en particulier celle du pays de Caux est-elle capable d'offrir de la biomasse ligno-cellulosique cultivée aux nouveaux marchés liés au développement des énergies renouvelables en France?* Rouen : ESITPA. 34 p. (Rapport de stage).

PECENKA (Ralf), LENZ (Hannes), IDLER (Christine), DARIES (Werner) et EHLERT (Detlef). 2014. *Development of bio-physical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. Biomass and Bioenergy*, vol. 65, p.13–19.

PECENKA (Ralf), EHLERT (Detlef), LENZ, Hannes. 2014. *Efficient harvest lines for short rotation coppices (SRC) in agriculture and agroforestry. Agronomy Research*, vol. 12, n 1, p. 151–160.

PESCHEL (Thoma), LINDNER (Mirko) et HERLITZIUS (Thomas). 2014. *Mechanized harvesting of one year old willow and poplar crops for producing planting material. Landtechnik*, vol. 69, n°3.

RESEAU MIXTE TECHNOLOGIQUE BIOMASSE. 2013. *Lignoguide*. RMT Biomasse. 206 p.

ROSENQVIST (Håkan), BERNDES (Göran) et BÖRJESSON, (Pål). 2013. *The prospects of cost reductions in willow production in Sweden. Biomass and Bioenergy*, vol. 48, p.139–147.

SAVOIE (Philippe), HÉBERT (Pierre-Luc), ROBERT (François-Simon) et SIDDEERS, (Derek). 2013. *Harvest of Short-Rotation Woody Crops in Plantations with a Biobaler. Energy and Power Engineering*, vol. 5, n°2, p.39–47.

SCHWEIER (Janine), BECKER (Gero) et others. 2012. *Harvesting of short rotation coppice—harvesting trials with a cut and storage system in Germany. Silva Fennica*. vol. 46, n 2, p. 287–299.

SOMER (Laurent). 2013. *Etat des lieux de la filière des Taillis à (très) courte rotation (TCR et TTCR) en Wallonie et Etude économique du Taillis à très courte rotation*. Valbiom. 25 p.

SPINELLI (Raffaele), NATI (Carla) et MAGAGNOTTI (Natascia). 2008. *Harvesting Short-Rotation Poplar Plantations for Biomass Production. Croatian journal of forest engineering*, vol. 29, n 2 p.129–139.

TEAGASC-Agriculture and Food Development Authority. *Willow Varietal Identification*. 2012. Disponible à l'adresse : [Guide.http://www.teagasc.ie/news/2012/201209-26.asp](http://www.teagasc.ie/news/2012/201209-26.asp). Consulté le 26/07/2015.

VANBEVEREN (Stephan), SCHWEIER (Janine), BERHONGARAY (Gonzalo) et CEULEMANS (Reinhart). 2015. *Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting? Biomass and Bioenergy*, vol. 72, p.8–18.

VERWIJST (Theo), LUNDKVIST (Anneli), EDELVELDT (Stina) et ALBERTSSO, (Johannes). 2013. Development of Sustainable Willow Short Rotation Forestry in Northern Europe. *Biomass Now - Sustainable Growth and Use* [en ligne]. Consulté le 8 avril 2015. Disponible à l'adresse : <http://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/development-of-sustainable-willow-short-rotation-forestry-in-northern-europe>.

## **Sites internet**

Agreste. Haute-Normandie. [en ligne]: Disponible sur <http://agreste.agriculture.gouv.fr/en-region/haute-normandie>. Consulté le 16/08/2015.

Chambre d'agriculture de Seine-Maritime. [en ligne]: Disponible sur <http://www.seine-maritime.chambagri.fr>. Consulté entre le 01/04/2015 et le 01/09/2015.

Dutheil-affutage. [en ligne]. Disponible sur <http://www.dutheil-affutage.fr/aff%C3%BBtagereparation>. Consulté le 25/05/2015.

FNB. Actus CEEB. [en ligne]. Disponible sur [http://www.fnbois.com/fr/actus\\_ceeb](http://www.fnbois.com/fr/actus_ceeb). Consulté le 10/09/2015.

Groupe Anderson. Biobaler. [en ligne]. Disponible sur <http://biobaler.com>. Consulté le 17/04/2015.

Jenz. Harvest technology for SRC. [en ligne]. Disponible sur <http://www.jenz.de/en/technology-innovation/harvest-technology-for-src/>. Consulté le 16/04/2015.

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. L'érosion hydrique des sols. [en ligne]. Disponible sur <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>. Consulté le 16/08/2015.

Nordic biomass. Innovative solutions. [en ligne]. Disponible sur <http://www.nordicbiomass.dk/harvester.htm>. Consulté le 15/04/2015.

Ny vraa. Brochure Energy Harvester.[en ligne]. Disponible sur [http://www.nyvraa.dk/Brochure\\_Energy\\_Harvester-30122.htm](http://www.nyvraa.dk/Brochure_Energy_Harvester-30122.htm). Consulté le 17/04/2015.

Energy research Centre of the Netherlands . Phyllis classification. [en ligne]. Disponible sur <https://www.ecn.nl/phyllis2/Browse/Standard/ECN-Phyllis#willow> Consulté le 15/09/2015.

Plaisance equipment. Broyeur récupérateur. [en ligne]. Disponible sur <http://www.plaisance-equipements.com/index.php/Accueil/Broyeurs/Broyeur-recuperateur>. Consulté le 17/04/2015.

SMBV Pointe de Caux. Décret Erosion. [en ligne]. Disponible sur [http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/decret\\_erosion2.html](http://www.smbv-pointedecaux.fr/web/decret_erosion2.html). Consulté le 08/06/2015.

Salix energi. Harvest. [en ligne]. Disponible sur <http://www.salixenergi.se>. Consulté le 14/06/2015.

Spapperi. rt500c-harvester-woodchipper. [en ligne]. Disponible sur <http://www.spapperi.it>. Consulté le 20/04/2015.

## LISTE DES CONTACTS ETABLIS

Nom du contact	Poste occupé	Organisme	Adresse mail
BACH Henrik	Directeur technique	Entreprise Ny Vraa (Danemark)	<a href="mailto:henrik@nyvraa.dk">henrik@nyvraa.dk</a>
BOULDAY Dominique	Responsable Environnement-Déchet-Energie	Bureau d'étude CEDEN	boulday@ceden.fr>
BOUQUET Samuel	Agriculteur		
BRASK Anja	responsable technique	Entreprise Egedal Maskinfabrik	info@egedal.dk
DILLARD Philippe	directeur	Cuma Haie'nergie	
DUPONT François	Conseiller machinisme	FD Cuma 76	francois.dupont@cuma.fr
GADOIS Jean-Luc	Responsable logistique	Biocombustible SA	Jl.Gadois@biocombustibles.fr
LANGLOIS Bastien	Conseiller bois énergie, responsable du projet Innobioma	CA 76	bastien.langlois@seine-maritime.chambagri.fr
LETIERCE Matthieu	Agriculteur		
MAZOYER Christophe	Chef de produit	Noremat France	c.mazoyer@noremat.fr
PALFRAY Emmanuel	Agriculteur, président de l'association Terre Eau Energie		emmanuel.palfray@orange.fr
PECENKA Ralf	Docteur sur les taillis à courte rotation et les bio fuels (Hongrois)	Institute for agricultural engineering of Leipzig	RPecenka@atb-potsdam.de
POUYAU François	Chargé de mission audit réseau de chaleur	Bureau d'étude CEDEN	pouyau@ceden.fr
PLUMAIL Dominique	Directeur	Bureau d'étude CEDEN	plumail@ceden.fr
SCHONHOFF Andreas	Chercheur sur les TCR	Research center ttz-Bremerhaven	aschonhoff@ttz-bremerhaven.de
VANDERMEESH Aldric	Agriculteur		

## LISTE DES ENTREPRISES REFERENCES POUR LA PLANTATION DE SAULE.

Entreprise spécialisé sur les TCR	Nationalité	Spécialité	Contact
Egedal Maskinfabrik	Danoise	machine de plantation	<a href="http://www.egedal.dk">www.egedal.dk</a>
Dion machinerie	Québécoise	machine de récolte	<a href="http://www.dionmachineries.com">www.dionmachineries.com</a>
JENZ	Allemande	machine de récolte	<a href="http://www.jenz.de">www.jenz.de</a>
Nordic Biomass	Danoise	machine de récolte, plantation, variétés	<a href="http://www.nordicbiomass.dk">www.nordicbiomass.dk</a>
Ny vraa	Danoise	machine de récolte, plantation, variétés	<a href="http://www.nyvraa.dk">www.nyvraa.dk</a> ; <a href="mailto:henrik@nyvraa.dk">henrik@nyvraa.dk</a>
Plaisance Equipement	Française	machine de récolte, plantation	<a href="http://www.plaisance-equipements.com">www.plaisance-equipements.com</a>
Salix Energi	Danoise	machine de récolte, plantation, variétés	<a href="http://www.salixenergi.se">www.salixenergi.se</a> ; <a href="mailto:info@salixenergi.se">info@salixenergi.se</a>
Spapperi	italienne	machine de récolte	<a href="http://www.spapperi.it">www.spapperi.it</a>

## LEXIQUE

**Amortissement comptable** : L'amortissement comptable d'un investissement d'entreprise est l'étalement de son coût sur sa durée d'utilisation.

**Appel à projets Dynamic bois** : Cet appel vise à faire émerger du terrain des projets collaboratifs permettant la mise en œuvre d'actions à l'échelle des territoires, afin de favoriser la mobilisation de bois additionnel pour les chaufferies biomasse du fonds chaleur de l'Ademe.

**Bassin versant** : Un bassin versant est une unité territoriale correspondant à l'ensemble du territoire qui alimente un cours d'eau en eau. Ces eaux se dirigeront vers un exutoire commun (cours d'eau, lac, fleuve, océan). Les limites du territoire d'un bassin versant sont appelées les lignes de partage des eaux et sont constituées des sommets qui séparent les directions d'écoulement des eaux de ruissellement. Les eaux souterraines, au même titre que les eaux de surface, font partie intégrante du bassin versant.

**Biocombustible** : Combustible issu de la biomasse qui représente l'ensemble des organismes vivants, par opposition aux combustibles fossiles. On fait la différence entre les biocombustibles d'origine forestière et ceux d'origine agricole.

**Biomasse** : La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale créée directement ou indirectement par photosynthèse. Cette matière (plantes agricoles ou ligneuses, huiles usagées, bois, déchets verts) peut servir de source d'énergie.

**Bois anhydre** : bois totalement sec, qui ne contient plus d'eau.

**Bois énergie** : Le bois-énergie est le bois utilisé en tant que combustible pour produire du feu, de la chaleur ou produire de l'électricité.

**Broyeur embarqué** : Broyeurs montés à l'avant ou l'arrière d'un tracteur et permettant le broyage de bois issu de plantations à courte rotation ou d'accrus naturels.

**Coût de revient** : représente la somme des coûts supportés par une entreprise pour la production et la distribution d'un bien ou d'un service.

**Débardage** : Transport des bois après abattage et façonnage depuis le lieu où ils ont été abattus jusqu'en bordure d'une voie de desserte.

**Fascine** : Fagot de menus branchages maintenus étroitement serrés par des liens, qui est employé dans les travaux de terrassement, d'hydraulique, et de fortification pour limiter le ruissellement des eaux.

**Foisonnement** : Augmentation du volume apparent d'un matériau (roche, bois) au moment de son extraction, du à son morcellement.

**Fonds chaleur** : Le fonds chaleur est un dispositif de soutien financier aux projets de chaleur renouvelable à base de biomasse créé en 2009 par l'Ademe. Les réseaux de chaleur peuvent bénéficier de ce dispositif, sous certaines conditions.

**Fourrière** : Surface laissée à la lisière d'une parcelle cultivée, pour permettre aux engins agricoles de tourner.

**Granulométrie** : mesure de la dimension des morceaux constituant un ensemble.

**Marge nette** : La marge nette est pour un producteur, la marge brute moins l'ensemble des coûts de production du produit. Elle correspond au profit réalisé sur un produit.

**Masse volumique** : rapport entre la masse d'une substance et le volume qu'elle occupe (en kg/m<sup>3</sup>).

**Masse volumique apparente** : masse d'une certaine quantité de substance foisonnante, divisée par le volume qu'elle occupe. Ce volume peut varier, selon le tassement des produits et la granulométrie.

**Matière brute** : Matière récemment abattu qui n'a pas significativement perdu d'humidité.

**Mètre cube Apparent (MAP)** : unité de volume foisonnant de plaquettes.

**Phytoremédiation** : C'est une technique de dépollution basée sur les plantes et leurs interactions avec le sol et les microorganismes.

**Plaquette forestière** : plaquette issue d'une matière première d'origine forestière ou bocagère n'ayant subi aucune transformation chimique.

**Pouvoir calorifique inférieur (PCI)** : Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible (1 kg), la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur non récupérée. C'est une propriété des combustibles. Plus il est élevée, mieux le produit brûle.

**Taux de cendres** : ratio entre la masse de cendres après combustion et la masse de bois anhydre avant combustion.

**Taux d'humidité sur brut** : rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse totale du bois à cette humidité.



## ANNEXES

Annexe I : Liste des partenaires du projet Innobioma.....	78
Annexe II : Charte constitutive de l'Association Terre eau énergie 76.....	80
Annexe III : Typologie des producteurs ayant déjà plantés. ....	83
Annexe IV Conditions écologiques optimales pour la culture du TTCR de saule. ....	84
Annexe V : Itinéraire technique des plantation de TTCR de saule. ....	84
Annexe VI : Schéma fonctionnel des processus d'épuration se déroulant à l'échelle de la plante .....	85
Annexe VII : Fiches descriptives des variétés de saule utilisées en Seine-Maritime. ....	86
Annexe VIII : Questionnaire à destination des producteurs.....	94
Annexe IX : Méthode de calcul du coût d'utilisation prévisionnel d'un matériel agricole .....	97
Annexe X : Vues en coupe du GMHT 140 et de la Stemster MK III.....	100
Annexe XI : Photographies supplémentaires du broyeur JF Harvester en fonctionnement. ....	101
Annexe XII : Prix de la plaquette forestière pour le deuxième trimestre 2015 (hors coût de transport). 102	
Annexe XIII : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de bennes.....	103
Annexe XIV : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de plateforme. ....	106
Annexe XV : Carte des chaufferies biomasse sur la zone Normandie-Picardie-Ile de France .....	109

### Annexe I : Liste des partenaires du projet Innobioma

*Source : Chambre d'agriculture de Seine-Maritime (2014).*

Partenaires	Comité de pilotage	Pilote des actions	Comités techniques et expertise	Partenaires pour la structuration de la filière	Associés (info, colloque...)
AESN	X				
CA	X	X	X	X	
Groupe d'agriculteur	X			X	
AREAS	X	X	X		
Département 76	X				
SMBV Pointe de Caux	X		X	X	
Animateurs BV			X		X
CODAH/ ville du Havre	X			X	
Animateurs BAC			X		X
Région HN	X				
DDTM 76 ou DRAAF					
ADEME					
CEDEN	X	X	X	X	
CC-CVS				X	
Biocombustibles SA				X	
EARL d'Arcy					
RMT Biomasse			X		X
Novabiom				X	
INRA			X		
FCBA			X		
Université de Tours ?			X		
AgroParisTech ?			X		



Annexe II : Charte constitutive de l'Association Terre eau énergie 76.

*Source : [www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr).*

**Association Loi 1901**

**Association des  
« Agriculteurs pionniers dans le développement des  
cultures énergétiques en bandes pour la reconquête  
de la qualité de l'eau »**

**Terre eau énergie 76**

**STATUTS DE L'ASSOCIATION**

#### **Article 4 : Circonscription territoriale**

L'association exerce son activité sur les zones érosives du département de la Seine-Maritime.

#### **Article 5 : Siège social**

Le siège social est établi au domicile du président à Gonfreville l'Orcher.

Il peut être transféré sur simple décision du Conseil d'administration à l'intérieur des limites de la circonscription définie à l'article 4.

#### **Article 6 : Qualité de membre**

Peuvent adhérer à l'association les sociétés d'exploitation agricole en tant que personnes morales et les exploitants agricoles en tant que personnes physiques qui souhaitent s'engager dans le projet triple performant de développement de cultures énergétiques telles que les saules ou le miscanthus ou ceux qui sont intéressés par ce projet. Des personnes morales ou physiques pourront également adhérer à l'association, à condition que les exploitants agricoles détiennent la majorité des voix dans l'instance décisionnelle.

Les conditions d'adhésion et la procédure d'admission seront précisées dans le règlement intérieur.

#### **Article 7 : Perte de la qualité de membre**

La qualité de membre se perd :

- par démission,
- par décès,
- par radiation prononcée par le Conseil d'administration, sauf recours à l'Assemblée générale, pour violation des présents statuts ou préjudice matériel ou moral porté à l'association.

#### **Article 8 : Cotisations**

Chaque membre doit verser annuellement une cotisation à l'association. Le montant de la cotisation des membres de l'association ainsi que les modalités de collecte sont fixés dans le règlement intérieur.

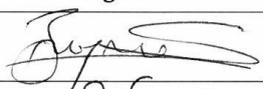
**Article 15 : Durée et dissolution**

La durée de l'association est illimitée.

Elle peut être dissoute sur proposition du Conseil d'administration par un vote de l'Assemblée générale, statuant à titre extraordinaire, pris à la majorité absolue des membres présents ou représentés.

En cas de dissolution volontaire, statutaire ou prononcée par la justice, l'Assemblée générale déterminera l'emploi de l'actif conformément à la loi.

Les présents statuts ont été adoptés en Assemblée générale constitutive, le 3 avril 2015 à Bois-Guillaume.

NOM Prénom	Fonction dans l'association	Signature
BOUJET Samuel	Treasorier	
PAULFRAY Emmanuel	Président	

Annexe III : Typologie des producteurs ayant déjà plantés.

<b>Producteurs de saules</b>	<b>Benoît Leforestier</b>	<b>Ludovic Dufour</b>	<b>Emmanuel Palfray</b>	<b>Samuel Bouquet</b>	<b>Eric Noblesse</b>	<b>Aldric Vandermeeshe</b>	<b>Groupe Boissay (4 agriculteurs)</b>
Date d'implantation	2009	2011	2014	2014	2015	2015	2015
Densité	12 500 pieds/ha						
Surface (ha)	0,8	0,3	0,17	0,4	0,8	0,45	1,2
Modalité de plantation	2 doubles rangs	2 doubles rangs	2 doubles rangs	2 doubles rangs	1 double rang	2 doubles rangs	2 doubles rangs
type de parcelle	plein champ	Bande	Bande	Bande	Bande	Bande	Bande
Débouchés visés	BRF	Chaudière personnelle	Chaufferie industrielle	Chaudière personnelle	BRF	Chaudière personnelle	Chaudière personnelle et chaufferie industrielle
<b>Total surface agriculteurs (ha)</b>	4,1						

## Annexe IV Conditions écologiques optimales pour la culture du TCR de saule.

Source : AILE, 2007

Caractéristiques et conditions optimales		Saule	Conditions optimales et caractéristiques		Saule			
Aspect			Risques d'engorgements	Ennoyages saisonniers ponctuels	Neutre			
				Ennoyages saisonniers fréquents	Neutre / Défavorable			
				Engorgements permanents	Défavorable			
Températures moyennes	Annuelle	> 7 °C	Attaques extérieures	Risques sanitaires	Rouille			
	Période végétative	> 13 °C		Autres risques	Abrouissement sur parcelles réduites			
Précipitations	Annuelles	600 - 1000 mm	Autres caractéristiques spécifiques		Valorise bien l'irrigation			
	Période végétative	> 300 mm						
Types de sols		Limoneux argileux à sableux				Résistant au froid (jusqu'à -30°C ponctuellement)		
pH du milieu		5.5 - 6.5						
Altitude adaptée		< 1300 m				Fort taux de rejet		
Parcelle	en pleine lumière	Favorable				Plantation en TCR / TCCR	Densité de plantation (plants / ha)	10 000 – 20 000
	fortement exposée au vent	Neutre					Longueur des rotations	2 à 4 ans
	fortement exposée au gel	Neutre / Défavorable					Hauteur moyenne à la récolte	3.5 à 5 m
Sol	irriguée	Favorable					Rendement moyen	7 à 12 t MS/ha/an *
	hydromorphe / asphyxiant marécageux	Défavorable					Coûts d'installation	Bas - moyens
	frais à humide	Favorable	Destination possible de la biomasse produite	Bois - énergie				
	bien aéré	Favorable	Teneur en eau	50 – 55 %				
	filtrant	Très défavorable	Plants	Boutures				
	sec	Très défavorable	Matériel végétal recommandé	Clones suédois, anglais				
Disponibilité en eau	profond	Favorable						
	calcaire actif	Neutre						
	Eau peu ou pas disponible	Défavorable						
	Bonne disponibilité dans le 1 <sup>er</sup> m de sol	Favorable						
	Connexion à l'eau souterraine	Favorable						

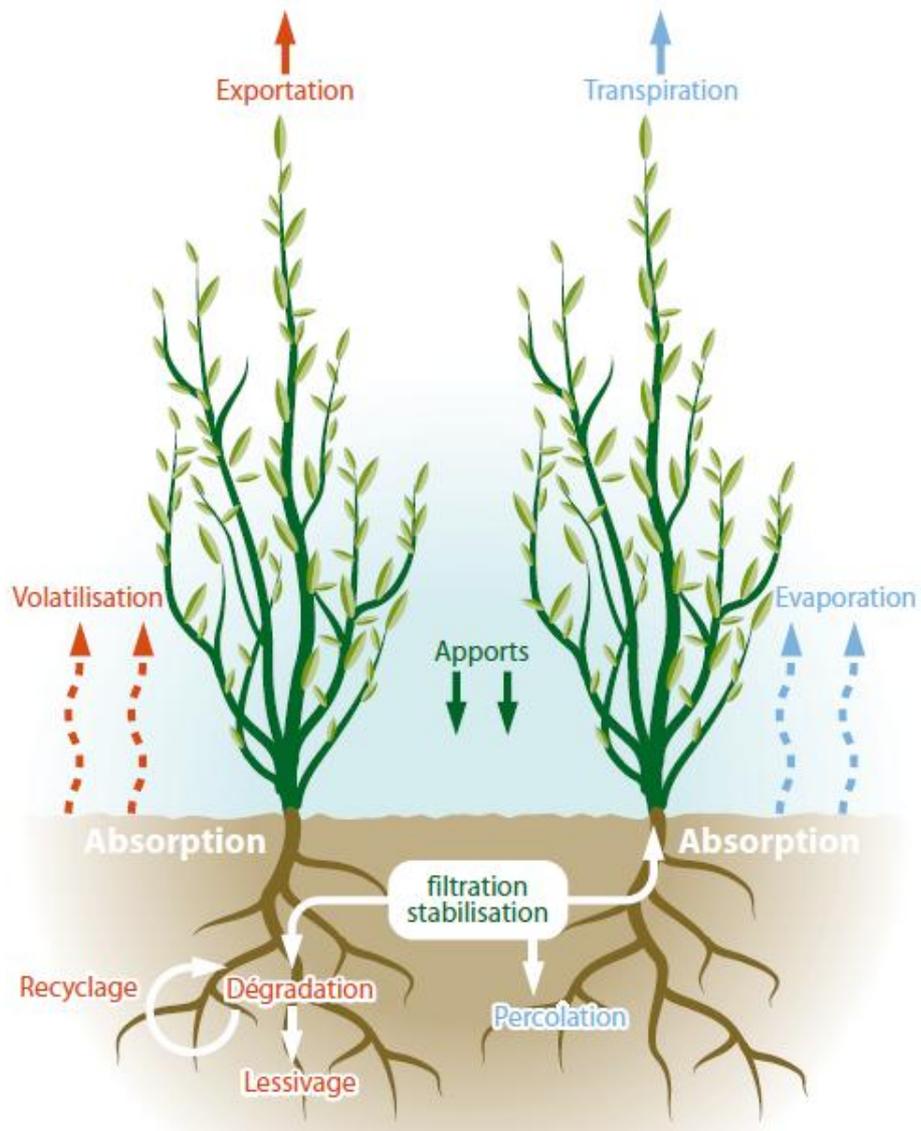
## Annexe V : Itinéraire technique des plantation de TCR de saule.

Source : AILE, 2007.

Période	Cas d'une parcelle cultivée	Cas d'une prairie
Année avant la plantation		<b>Arrêt de toute fertilisation</b> pour limiter la pousse de l'herbe
Automne	<b>Broyage du couvert</b> (cover crop, cultivateur)	<b>Broyage de la prairie ou surpâturage</b> pour appauvrir les réserves de la plante et bloquer sa croissance
Février - Mars	<b>Désherbage mécanique ou à l'aide d'un herbicide total</b> en fonction de l'état de la parcelle (passé cultural) et des contraintes du milieu (présence de cours d'eau)	
Mars	<b>Amendement calcaire si nécessaire</b>	
Fin mars	<b>Labour</b> – profondeur 30 à 40 cm Enfouir au maximum les graines présentes dans la couche superficielle du sol	
Fin mars	<b>Application d'anti-taupin</b> pour les anciennes prairies	
Début avril – mi avril	<b>Travail superficiel du sol</b> pour aménager le lit de semence Hersage (2 à 3 passages) : réaliser quelques faux-semis pour faire germer les graines d'adventices	
Mi avril	<b>Plantation</b> à l'aide d'une planteuse adaptée et de boutures spécifiques Application d'antigerminatif (si possible)	
Après la plantation	Désherbage de rattrapage si nécessaire Elimination des chardons Entretien des tournières et bords de champs	

Annexe VI : Schéma fonctionnel des processus d'épuration se déroulant à l'échelle de la plante

Source: Aile, 2007.



## Tora

**Breeding number:** SW910007

**Sex:** Female

**Pedigree:**

Variety	Parents	Grandparents
Tora	L79069	Unknown
	<i>S. schwerinii</i>	Unknown
	Orm	L78195 <i>S. viminalis</i>
		L78101 <i>S. viminalis</i>

**Breeder:** Svalöf-Weibull AB

**Release date:** 1996

*Tora* originates from a cross between a Siberian basket willow and a Swedish variety called Orm. The variety has long shoots but less number of stems than other varieties. From the Swedish variety perspective *Tora* is considered the most sustainable high yielding variety in various climatic conditions with the exception of very warm climates. *Tora* is almost free from leaf rust attack from gall midges and other insects damaging the shoot tips are less common.



### Description

**Leaves:** Dark green, glossy leaves; lance shaped, 20-22 cm long and 2-2.5 cm wide; greyish green undersides, wavy margins with no teeth. Leaf stalk 2 cm long, swollen at the base. Relatively low leaf area index of (1.26)



**Stems:** Slightly wavy (a feature that it inherits from a variety Orm). Unequal size stems –some are thick whilst others are thinner. Dark olive at the tip grading to light olive at base. Less downy at tips than *Resolution*. White buds.

### Similarity to other varieties

The variety *Tora* and its sibling Bjorn have been used extensively in plant breeding programmes in both Sweden and the UK. *Tora* is the female parent of *Tordis* and *Torhild*. Björn is the male parent of *Sven* and *Olof* and grandparent of *Resolution*.

### Possible partners in mixed clonal plantations

*Olof* or *Resolution* or *Sven*

*Endeavour* or *Inger*

*Gudrun*

*Beagle* or *Jorr*

*Terra Nova*

### Yield results

*Tora* has produced consistently high yields in all regions. From all trials planted in the UK and Ireland *Tora* has an overall mean yield of 11.05 odt/ha/yr. From 49 results it has ranked first in seven trials and second 19 times. It also has produced higher than average yields in altitude trials in Wales and exposure trials on Orkney. *Tora* has an exceptional record against the other currently available varieties. Although, it has been out yielded in the first rotation on many occasions it typically yields higher in its second rotation. For overall combined yield across all sites and years it is most closely matched by *Resolution* (97%), *Sven* (96%), *Endeavour* (93%) and *Tordis* (93%).

	N & S Ireland		W of England & Wales		E of England		Overall	
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>
No of trials	9	7	13	10	9	1	31	18
<b>Tora</b>	10.90	12.44	11.23	13.14	9.10	11.95	<b>10.52</b>	<b>12.80</b>
Trial results vs all other available varieties (W-L-D)	31-15-4		67-43-4*		24-16-2		122-74-10	

\*Includes altitude trials in Wales

### Typical Yield Parameters (first rotation)

First year height after cutback:	4 m
Mean number of shoots per stool:	3-6
Mean stem diameter at 1m:	1.6 cm

### Climate conditions in which it has high/low productivity

Medium tolerance to frost.

### Susceptibility/resistance to diseases and pests

- Resistant to leaf rust.
- Low -medium level of shoot tip damage caused by gall midges and lepidopterans.
- Moderate susceptibility to leaf beetles.
- Less preferred by browsing mammals.

### Quality aspects e.g. strike rate of cuttings, growing form

95% strike rate from 20cm cuttings (706/742).

### Fuel details

Avg. dry matter content:	44% (129 samples)
Bulk density:	171 kg/m <sup>3</sup>
Lignin content:	21.3%
Calorific value:	16.8 MJ/kg
Ash content:	1.5%

### Suitability for self supply

*Tora* has a higher moisture content at harvest than most other varieties. This means it is particularly bulky when freshly cut and will be more difficult to dry. It has an average bulk density but has a low calorific value. As a result more chip will be required to produce the same heat output.

## Tordis

Breeding number: SW960299

Sex: Female

Pedigree:

Variety	Parents	Grandparents	Great Grandparents
Tordis	Tora	L79069	Unknown
		<i>S. schwerinii</i>	Unknown
		Orm	L78195 <i>S. viminalis</i> L78101 <i>S. viminalis</i>
	Ulv	Rot7	Unknown
		<i>S. viminalis</i>	Unknown
		L81102 <i>S. viminalis</i>	Unknown Unknown

Breeder: Svalöf-Weibull AB

Release date: 2000

*Tordis* is a cross between the varieties *Tora* and *Ulv*. *Tordis* has a high yield and has not shown much damage from leaf rust. *Tordis* seems to be one of the best varieties both for cutting production and in productivity of biomass.



	N & S Ireland		W of England & Wales		E of England		Overall	
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>
<b>No of trials</b>	4	1	4	4	3	1	11	6
<b>Tordis</b>	13.15	9.30	10.59	13.42	7.74	9.69	10.74	12.11
<b>Tora</b>	12.41	11.70	10.65	14.19	7.28	11.95	10.37	13.40
<b>% of Tora</b>	106%	79%	99%	95%	106%	81%	104%	90%
<b>Trial results vs Tora (W- L-D)</b>	2-3-0		4-4-0		2-1-1		8-8-1	

#### Susceptibility/resistance to diseases and pests

- Very low incidence of leaf rust.
- Medium level of shoot tip damage caused by gall midges and lepidopterans.
- Moderate susceptibility to leaf beetles.

#### Quality aspects e.g. strike rate of cuttings, growing form

99% strike rate from 20cm cuttings (357/360).

#### Fuel details

Avg. dry matter content:	45% (24 samples)
Bulk density:	138 kg/m <sup>3</sup>
Lignin content:	20.6%
Calorific value:	17.7 MJ/kg
Ash content:	No information

#### Suitability for self supply

*Tordis* has a significantly lower bulk density than any of the other varieties tested. This means that the wood chip would take up a much greater storage space. It has a slightly higher dry matter than *Tora* and an above average calorific value.

## Inger

Breeding number: SW950506

Sex: Female

Pedigree:

Variety	Parents	Grandparents	Great Grandparents
<i>Inger</i>	SW911066 <i>S. triandra</i>	Unknown	Unknown
		Unknown	Unknown
	<i>Jorr</i>	L820332	L78198 <i>S. viminalis</i>
		L 81102 <i>S. viminalis</i>	L81092 <i>S. viminalis</i>
			Unknown
			Unknown

Breeder: Svalöf-Weibull AB

Release date: 2001

*Inger* was produced from a cross between a willow collected from Siberia and the Swedish variety *Jorr*. The variety is more tolerant to dry conditions than other varieties. *Inger* is a good complement in mixed plantations as *Inger* has a different gene background than many other varieties. It has been observed that *Inger* is sensitive to Bank Vole damage.



### Description

**Leaves:** Lance shaped, undersides, wavy margins with no teeth. *Inger* retains its leaves later into the year (similar to *Tordis*).

**Stems:** Grey-green and covered with fine hairs. Has side shoots but these tend to fall off during the growing season.

### Similarity to other varieties

*Inger's* male parent is the variety *Jorr*. It is therefore a half sib of *Endeavour*. In the genotype L81102, *Inger* also shares a common grandparent with the varieties *Beagle* and *Tordis*. The only other variety with *S. triandra* in its background is *Terra Nova*.

### Possible partners in mixed clonal plantations

*Olof* or *Resolution* or *Sven*

*Tora* or *Tordis* or *Torhild*

*Endeavour*

*Gudrun*

*Beagle*

*Terra Nova*

### Yield results and comparison to industry standard (*Tora*)

From all trials planted in the UK and Ireland *Inger* has an overall mean yield of 9.38 odt/ha/yr. In most trials its performance has been middle ranking although it ranked second at one trial in Ireland.

In moist lowland areas in Wales and Northern Ireland it performs quite well against *Tora* but was lower yielding in altitude trials. In all UK trials containing *Inger* and *Tora* it has an average performance of 82% of the yield of *Tora*.

	N & S Ireland		W of England & Wales		E of England		Overall	
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>
No of trials	1	0	2	2	0	0	3	2
<i>Inger</i>	14.60	/	9.37	12.59	/	/	11.11	12.59
<i>Tora</i>	12.80	/	10.03	14.45	/	/	10.95	14.45
% of <i>Tora</i>	114%	/	93%	87%	/	/	101%	87%
Trial results vs <i>Tora</i> (W- L-D)	1-0-0		1-3-0		0-0-0		2-3-0	

### Typical Yield Parameters (first rotation)

First year height after cutback: 4.2 m

Number of shoots per stool: 4-8

Mean stem diameter at 1m: 1.6 cm

### Climate conditions in which it has high/low productivity

Although this variety has not been tested in the drier soils of the east of England it is believed that this variety performs well in such conditions.

### Susceptibility/resistance to diseases and pests

- Low incidence of leaf rust.
- Medium level of shoot tip damage caused by gall midges and lepidopterans.
- Moderate susceptibility to leaf beetles.

### Quality aspects e.g. strike rate of cuttings, growing form

98% strike rate from 20cm cuttings (201/206).

### Fuel details

Avg. dry matter content:	47% (17 samples)
Bulk density:	176 kg/m <sup>3</sup>
Lignin content:	17%
Calorific value:	16.6 MJ/kg
Ash content:	1.47-1.63%

### Suitability for self supply

*Inger* has above average figures for dry matter content and bulk density so could be suitable for wood chip production. However, this variety has a low calorific value (5% lower than the average and 11% lower than *Endeavour*) so a greater quantity of wood chip would be required to provide the same heat output.



Annexe VIII : Questionnaire à destination des producteurs.

Nom Prénom

**1. Quelle est votre surface plantée en saule (ha) ou votre linéaire en m? \***

**2. Quels sont vos schémas de plantation ?**

- 2 doubles rangs en bande
- 1 double rang en bande
- Plein champs en double rang

**3. Si vous êtes satisfait des premières plantations, quelle surface de saule seriez-vous prêt à cultiver sur votre exploitation dans les 5 ans?**

- <0.5 ha
- 0.5 ha
- 1 ha
- 2 ha
- >2 ha
- aucun

**4. A quel débouché destinez-vous vos saules?**

- Chaufferie personnelle
- Chaufferie industrielle (fournisseur de chaleur)
- Bois Raméal Fragmenté (BRF)
- Autre :

**5. Quelle est la forme du produit que vous souhaitez à l'issue de la récolte? \***

- Copeaux de bois
- Tiges entières

**6. Quelles sont les caractéristiques les plus importantes à prendre en compte dans le choix de la machine de récolte, selon vous? (plusieurs réponses possibles)**

- Diamètre de tige récoltable par la machine (cm)
- Coût de récolte (€/ha)
- Compaction du sol
- Taille des copeaux produits par la machine
- Consommation de carburant
- Prise en main
- Vitesse de récolte (h/ha)
- Puissance nécessaire à la mise en marche (chevaux)

7. Quels seraient les 2 types de machine de récolte les plus appropriés pour les bandes de saules selon vous? (La récolte au Biobaler et à l'ensileuse n'est pas étudiée dans ce questionnaire) \*

- Broyeur embarqué tracté à l'arrière d'un tracteur
- Broyeur embarqué porté à l'avant d'un tracteur
- Récolteuse de tiges entières tractée

8. Quelles qualités doit posséder la machine selon votre opinion d'utilisateur?



9. Quels problèmes à la récolte, identifiés sur d'autres cultures, souhaiteriez vous éviter?



10. Quel type de tracteur en terme de puissance moteur, pourriez vous mettre à disposition pour la récolte des saules? (plusieurs réponses possibles) \*

- 100-120 Cv
- 120-140 Cv
- 140-170 Cv
- 170-190 Cv
- 190-250 Cv
- >250 Cv

11. Quel temps de récolte pourriez-vous accorder à la récolte d'un hectare de saule?

- 2 à 3 h
- 1/2 journée
- 1 jour
- 2 jours

12. Quel moyen de stockage lors de la récolte serait le plus approprié selon vous?

- Une benne tractée directement par le système de récolte
- Un roulement de bennes attelées à des tracteurs indépendants
- Un stockage en bord de parcelle

13. Quelles sont les possibilités de stockage du bois dont vous disposez dans votre exploitation?

- Hangar en bois récent
- Hangar métallique
- Grange
- Aire de stockage bétonnée à l'air libre
- aire de stockage stabilisée
- silos à plaquettes
- Autre :

**14. Et si vous avez des infrastructures de stockage, quelle est environ la surface disponible en m2 ?**

**15. Dans le cas d'une valorisation en chaufferie industrielle, quel type d'infrastructures de stockage serait le plus adapté pour rassembler le bois avant le transport en chaufferie? \***

- Plate-forme de stockage agricole
- Plate-forme de stockage de bois (forestier)
- Plate-forme de déchets verts
- Plate-forme de déchets bois

**16. Pourriez vous créer ou mettre à disposition dans votre exploitation une plate-forme agricole pour le rassemblement du bois issu de TTCR?**

**17. Quels problèmes avez vous rencontré, depuis que vous avez planté du saule?**



## Méthode de calcul du coût d'utilisation prévisionnel d'un matériel agricole

Christian Savary – Loïc DEVEYER – Septembre 2013

Cette méthode permet d'établir rapidement **le coût moyen** d'utilisation d'un matériel agricole. Il est ainsi possible d'établir des comparaisons avec différentes formules d'équipements.

Le résultat obtenu ne correspond pas au calcul comptable : L'amortissement est plus faible, les frais financiers et l'assurance sont intégrés au coût. En fait, cette méthode "BCMA\*" permet d'obtenir un résultat plus proche de la réalité.



### LES CHARGES FIXES

Elles comprennent l'amortissement, les intérêts, l'assurance (pour les automoteurs) et les frais de logement.

#### AMORTISSEMENT MOYEN ANNUEL

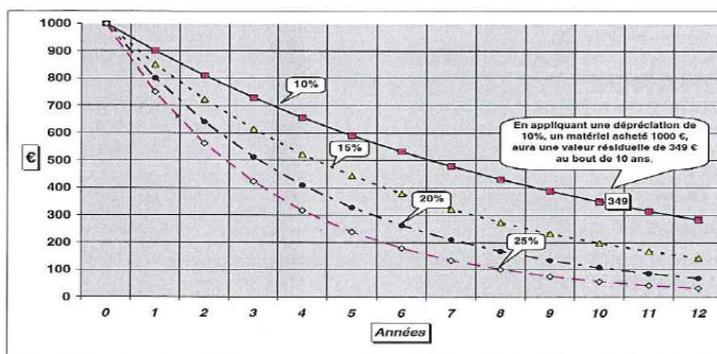
Contrairement à l'amortissement comptable, on considère que le matériel conserve une valeur résiduelle à la fin de la période d'amortissement.

Par conséquent :

$$\text{Amortissement moyen annuel} = \frac{\text{Valeur d'achat} - \text{valeur résiduelle}}{\text{nombre d'années}}$$

La valeur résiduelle est déterminée en appliquant un taux de dépréciation : 10 à 25 % selon la durée et l'intensité d'utilisation du matériel. Pour les tracteurs neufs, 3 niveaux de dépréciation se rapprochant de la décote moyenne du marché, sont proposées : 9%, 11% et 12%

#### VALEUR RESIDUELLE selon Taux de dépréciation (Base 1 000 €)



"Coûts d'utilisation prévisionnel d'un matériel" est consultable sur les sites web des Chambres d'agriculture de Normandie :

[www.manche.chambagri.fr](http://www.manche.chambagri.fr)

[www.orne-agri.com](http://www.orne-agri.com)

[www.webagri14.com](http://www.webagri14.com)

[www.agri-eure.com](http://www.agri-eure.com)

[www.seine-maritime.chambagri.fr](http://www.seine-maritime.chambagri.fr)



\*BCMA : Bureau de Coordination du Machinisme Agricole

Ex : Tracteur de 110 ch ISO, 4 roues motrices, acheté 58 000 € HT et réalisant 600 h/an (amortissement sur 10 ans avec un taux de dépréciation de 10 %)

$$\text{Valeur résiduelle} = 58\,000 (1 - 0,1)^{10} = \text{environ } 20\,240 \text{ €}$$

$$\text{Amortissement} = \frac{58\,000 - 20\,240}{10} = 3\,775 \text{ €/an}$$

La durée d'amortissement (5 à 15 ans) doit être choisie de façon à correspondre à la durée présumée d'utilisation du matériel sur l'exploitation, sans toutefois être trop optimiste. Le taux de dépréciation est d'autant plus élevé que la durée d'amortissement est courte, et que l'utilisation de matériel est intensive.

### INTERET SUR CAPITAL OU FRAIS FINANCIERS

On retient un taux d'intérêt moyen correspondant aux possibilités de placement ou d'emprunt : **3 % pour 2013.**

Pour simplifier la formule, retenir que ce taux est appliqué à la valeur moyenne du matériel :

$$\text{Ex : Intérêts} = \frac{58\,000 + 20\,240}{2} \times 3\% = 1\,175 \text{ €/an}$$

Dans le cas d'une acquisition avec des taux d'intérêts "spécifiques" (prêt bonifié, ...), il est toujours possible d'adapter le calcul.

### FRAIS DIVERS

**Assurance** : Elle concerne uniquement les automoteurs. Elle est basée sur **0,7 %** de la valeur d'achat. Ce coefficient est à retenir pour les tracteurs et les chargeurs télescopiques uniquement.

$$\text{Assurance} : 58\,000 \times 0,7\% = 406 \text{ €}$$

**Logement** : Indirectement, l'achat de matériel entraîne des frais de logement ; le matériel ne reste pas dehors toute l'année. Retenir **0,5 %** de la valeur d'achat.

$$\text{Logement} : 58\,000 \times 0,5\% = 290 \text{ €}$$

$$\text{TOTAL CHARGES FIXES} = 5\,646 \text{ €/an}$$

### LES CHARGES VARIABLES

"Elles sont liées à l'utilisation du matériel. Elles sont calculées à "l'unité travaillée" (hectares, heures, voyages, balles ...)

**CARBURANT** : consommation moyenne horaire sur l'année (tableau page 4)

• **Consommation** : elle est liée à la puissance du moteur. Il faut environ **0,22 l** de GNR pour fournir 1 cheval pendant 1 heure (c'est la **consommation spécifique** ou **CS**).

• **Taux d'utilisation (TU)** : un tracteur est très rarement utilisé à pleine puissance (100 %). Le taux moyen d'utilisation annuel varie de 20 à 80 % selon les matériels et les travaux :

<b>A retenir :</b>	Tracteur peu sollicité	20 à 25 %
	Tracteur polyculture/élevage	30 à 35 %
	Tracteur plaine, CUMA ou ETA	40 à 50 %
	Ensemble Automotrice	70 à 80 %

**Charge carburant = Puissance (ch) x CS x TU x Prix/l Hors Taxe** (\* récupération T.V.A.)

$$\text{Carburant} : 110 \text{ ch} \times 0,22 \text{ l} \times 35\% \times 0,78 \text{ €/l} \approx 6,6 \text{ €/h}$$

La charge « Carburant » peut aussi être estimée en fonction du travail réalisé : C'est plus juste pour des travaux en entraide. Par exemple, pour le labour, si la consommation est de 15 l/h, compter : 15 X 0,78 €, soit 11,70 €/h.

### ENTRETIEN/REPARATION

Ce poste comprend les pièces, la main-d'oeuvre, les lubrifiants, les pneumatiques ... Des barèmes existent pour les différents types de matériels (Chambres d'agriculture, BCMA, CUMA...) : voir en page 4.

Exemple : Tracteur 110 Ch prévoir **4 €/h**

Un calcul plus précis est toujours possible avec l'aide de votre Conseiller machinisme.

### CHARGES DIVERSES

Certains matériels fonctionnent en utilisant des approvisionnements divers, comme par exemple **de la ficelle ou du filet pour une presse**, il faut éventuellement en tenir compte.

$$\text{Ex : TOTAL CHARGES VARIABLES} = 6,6 + 4 \text{ soit } 10,6 \text{ €/h}$$

### COUT PREVISIONNEL

Il dépend de l'utilisation annuelle : nombre d'heures, d'hectares, de balles ... Il peut être calculé à l'année ou à l'unité (heure, hectare, balle, voyage...)

$$\text{Exemple : Pour } 600 \text{ h/an}$$

$$\text{CP} = \frac{5\,646}{600} + 10,6 \text{ €/h} = 20 \text{ €/h, ou environ } 12\,000 \text{ €/an}$$

Soit 13,4 €/h  
ou 8 040 €/an  
(hors GNR)

Une fois les calculs réalisés, il est possible de faire des comparaisons avec d'autres formules d'équipements. (Entraide, copropriété, CUMA -> voir tableau en page 4, ETA, location...). Bien évidemment, il est possible d'affiner en fonction de la situation particulière de chaque exploitation (aspects comptables notamment). Il ne faut pas oublier ensuite, de peser les avantages et les inconvénients des différentes possibilités et de mesurer les conséquences de l'investissement notamment au niveau de la disponibilité en main-d'oeuvre, de l'organisation des chantiers ...

### CALCUL RAPIDE

Pour calculer rapidement les charges fixes annuelles, multiplier la valeur d'achat par l'un des coefficients suivants : (La colonne « Automoteur » intègre les frais d'assurance)

Durée d'amortissement (les plus courantes)	Taux de dépréciation	COEFFICIENTS		Remarque
		Automoteur	Autres	
5 ans	25 %	18,5 %	17,8 %	Pour l'achat d'un tracteur neuf, vous vous approchez de la décote du marché (7000 H) en utilisant : - 8 ans/12% pour 900 H/an - 10 ans/11% pour 700 H/an - 14 ans/9% pour 500 H/an  Pour un achat d'occasion, utiliser les durées de 5 à 7 ans
	20 %	16,65 %	15,95 %	
7 ans	20 %	14,20 %	13,50 %	
	15 %	12,85 %	12,15 %	
8 ans	15 %	12,10 %	11,40 %	
	12 %	11,20 %	10,50 %	
10 ans	15 %	10,80 %	10,10 %	
	11 %	10,00 %	9,00 %	
12 ans	10 %	9,70 %	9,00 %	
	10 %	9,30 %	8,30 %	
14 ans	9 %	8,20 %		
	10 %	8,10 %	7,40 %	

En utilisant le tableau "Frais de fonctionnement" de la page suivante, vous obtiendrez très rapidement le coût moyen du matériel souhaité.

**Exemple** : Benne 13 tonnes achetée 19 400 € HT, amortie sur 12 ans avec une dépréciation de 10 %, utilisée 200 heures par an

$$\text{Charges fixes} = 19\,400 \text{ €} \times 8,30\% = 1\,610 \text{ €/an.}$$

$$\text{Prix de revient} = (1\,610 \text{ €/200 h}) + 1,3 \text{ € (entretien), soit } 9,3 \text{ €/h}$$

**Coût de chantier** : Avec un tracteur de 110 Ch (20 €/h), le transport reviendra à : 20 + 9,3 soit environ 29,3 €/h hors main-d'oeuvre.

**FRAIS DE FONCTIONNEMENT (en €) : Entretien, GNR... (Source BCMA, Chambres d'Agriculture)**

**Tracteurs 2 roues motrices**

Type (ch)	Entretien par H	GNR/h
36-45	1,1	1,7
46-55	1,3	2,1
56-65	1,5	2,6
66-75	1,6	3,0
76-85	1,6	3,4
86-95	1,7	4,6
96-105	1,8	5,1

**Tracteurs 4 roues motrices**

Type (ch)	par H	GNR/h
56-65	1,7	3,1
66-75	1,9	3,6
76-85	3,0	4,1
86-95	3,3	4,6
96-105	3,5	5,1
106-115	4,0	6,6
116-125	4,2	7,2
126-135	4,3	7,8
136-155	4,9	10,3
156-175	5,6	11,7
176-200	6,4	13,0

**Automoteurs**

Type	par H	Carb/h
Quad	3,9	5,5
Ensileuse 6rgs	24/ha	24/ha
Moiss-bat 3m	28/ha	
Moiss-bat 4m	21/ha	15/ha
Moiss-bat 5m	20/ha	
Mini-chargeur	3,5	3,4
Télescopique	4,2	7,2

**Outils de travail du sol**

Type	Entretien par Ha
Décompacteur	3 à 9
Charrue	4 à 10
Cultipacker	0,2
Cultivateur	1 à 3
Déchaumeur	2 à 6
Cultivateur rotatif	4 à 6
Cover-crop	2
Vibroculteur	1 à 2
Herse rotative	3 à 5
Tasse-avant	0,3
Rouleau repliable	0,6

**Semis-Ferti-Traitement**

Type	par Ha
Semoir céréales	1 à 2
Semoir maïs	2 à 3
Semis direct	2 à 4
Planteuse	2,5 à 5
Distributeur engrais	0,4
Épandeur fumier	0,7 à 1,4/voy
Tonne à lisier	1 à 2/voy
Enfouisseur	0,5 à 2/voy
Broyeur à lisier	5,8/H
Pulvérisateur porté	0,6 à 1
Pulvérisateur traîné	1,2 à 1,8
Bineuse	1
Étrille	1
Houe rotative	1,2
Débroussailluse	7,6/H
Girobroyeur	2 à 3,7
Ebouseuse	1,3
Butteuse	1,7

**Matériels de récolte**

Type	Entretien par Ha
Faucheuse rotative	2,8
Conditionneuse	5,2
Faneuse	1,5
Andaineur	1,5
Round-baller (3)	0,5/balle
Enrubanneuse (3)	0,25/balle
Ensileuse coupe-directe	2,6
Autochargeuse	2 à 4,4
Presse Hte-Densité	0,7/balle
Presse Moy-Densité	0,15 balle

**Manutention-Transport**

Type	par H
Fourche tracteur	0,8 à 1,1
Remorque >14t	1,5
Remorque 10-14t	1,3
Remorque 6-8t	0,7
Plateau	1,2
Bétaillère	0,6

**Elevage**

Type	par H
Désileuse/Godet	0,7
Désileuse Pailleuse	1,7 à 2,4
Désileuse Mélangeuse	1,4 à 2,4
Génératrice	0,2
Bétonneuse	0,2
Nettoyeur HP	1,1
Machine à traire	140/poste
Décrochages	35/poste
Compteurs	90/poste

- (1): Pour les tracteurs et les automoteurs, l'entretien comprend les pneumatiques, les frais de réparation et l'entretien courant  
 (2): Consommation moyenne horaire = 0,22 L/ch/h X taux d'utilisation (25 à 70% selon matériel) X prix du GNR (0,78 euro/l)  
 (3): Ficelle: 0,33/0,44/0,49 €/balle pour 120/160/180 - Filet: 0,46/0,73/0,82 €/balle - Film étirable: 2,5 à 3€/balle

**PRIX DE REVIENT DES MATERIELS EN CUMA (€) - Source CUMA Ouest**

Matériel	Prix de revient
Andaineur (€/ha)	
- simple	10,1
- double	13,2
Balayeuse (€/adhérent)	90
Benne >15t (€/an)	3235
Big baller (€/balle)	3,1*
Bincuse 6 rgs (€/ha)	12,7
Broyeur latéral (€/H)	21
Broyeur 3m (€/H)	12,5
Chargeur télescopique (€/h)	22,5*
Charrue (€/ha)	
- portée 5 corps	21,6
- semi-portée	19,8
Cover-crop >28 diques (€/ha)	11,7
Débroussailluse (€/H)	27,7
Déchaumeur (€/ha)	
- disques indépendants	12,9
- dents/disques	9,6

Matériel	Prix de revient
Enrubanneuse(€/b)	1,79*
Ensileuse (€/H)	
- 4-500ch, neuve	202
- >500 ch, neuve	232
Epandeur (€/voyage)	
- 11 à 15t	7,9
- plus de 15t	8,6
Faneuse >5m (€/ha)	12
Faucheuse cond (€/ha)	20
Herse rotative (€/ha)	
- 3m	14,3
- 4m et plus	13,8
Herse "Etrille" (€/ha)	6,2
Moissonneuse (€/H)	
- 5 secoueurs	120*
- 6 secoueurs	168*
Pulvérisateur (€/ha)	
- porté	8,5

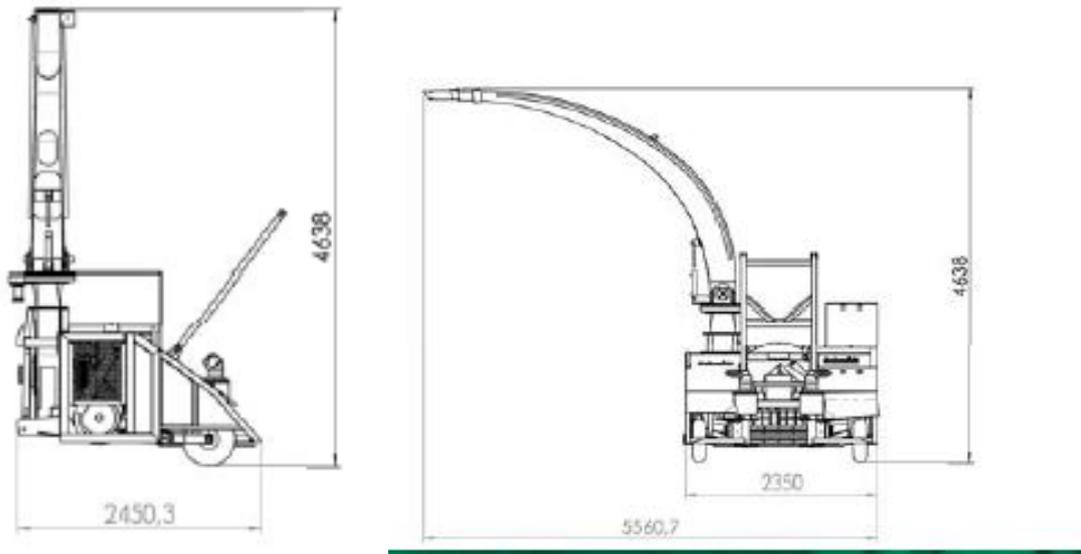
Matériel	Prix de revient
- traîné	7,4
Rouleau >6m (€/ha)	4,4
Round baller CV (€/bal)	2,2*
Semoir (€/Ha)	
- céréales 3m	8,2
- céréales 4m et +	11,4
- maïs 4 rangs	13,6
- maïs 6 rangs	15,5
- semis direct	22,3
Tonne lisier (€/voyage)	
- 10/13000 l	5,7
- 14/16000 l	9,5
- plus de 16000	11
Tracteur (€/H)	
- 110/149 ch	18,5*
- 150/179 ch	21,5*
- 180 ch et plus	23,1*

\*hors carburant  
hors ficelle, filet ou film

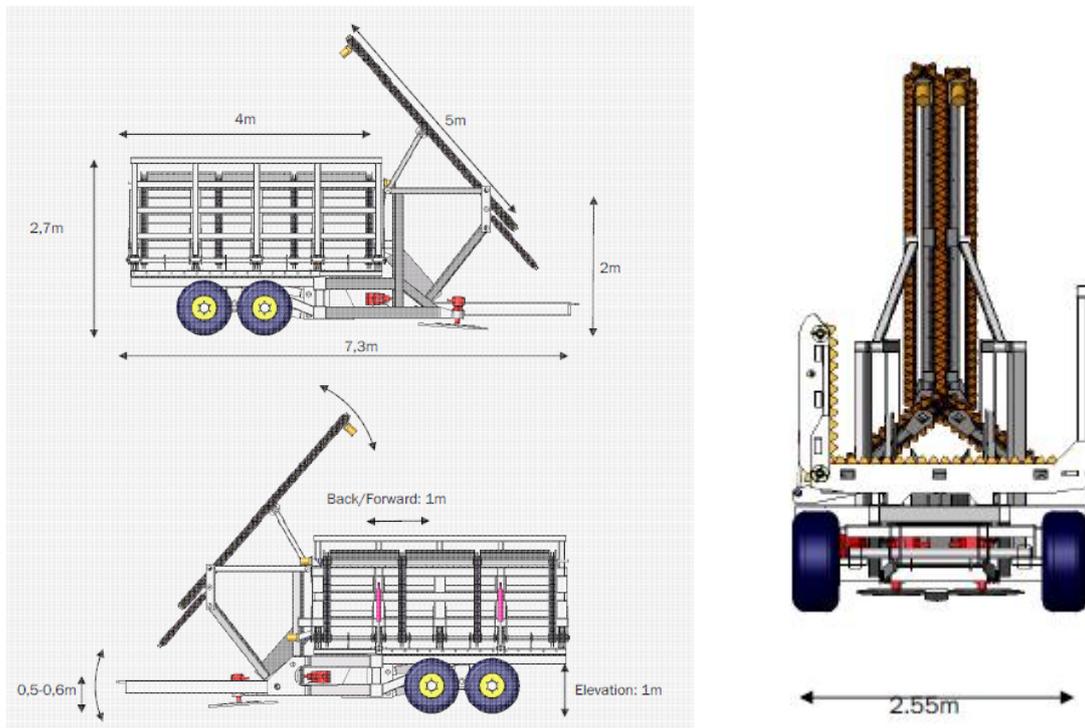
Données extraites du "Guide des prix de revient des CUMA - Edition 2013". Ce document de 62 pages, réalisé à partir des données de la comptabilité analytiques des CUMA de l'Ouest, détaille les données de 48 catégories de matériels. Le guide peut-être commandé auprès de la FCBN ou à la FRCUMA Ouest.

Annexe X : Vues en coupe du GMHT 140 et de la Stemster MK III

Source : [www.jenz.de](http://www.jenz.de); [www.nordicbiomass.dk](http://www.nordicbiomass.dk).

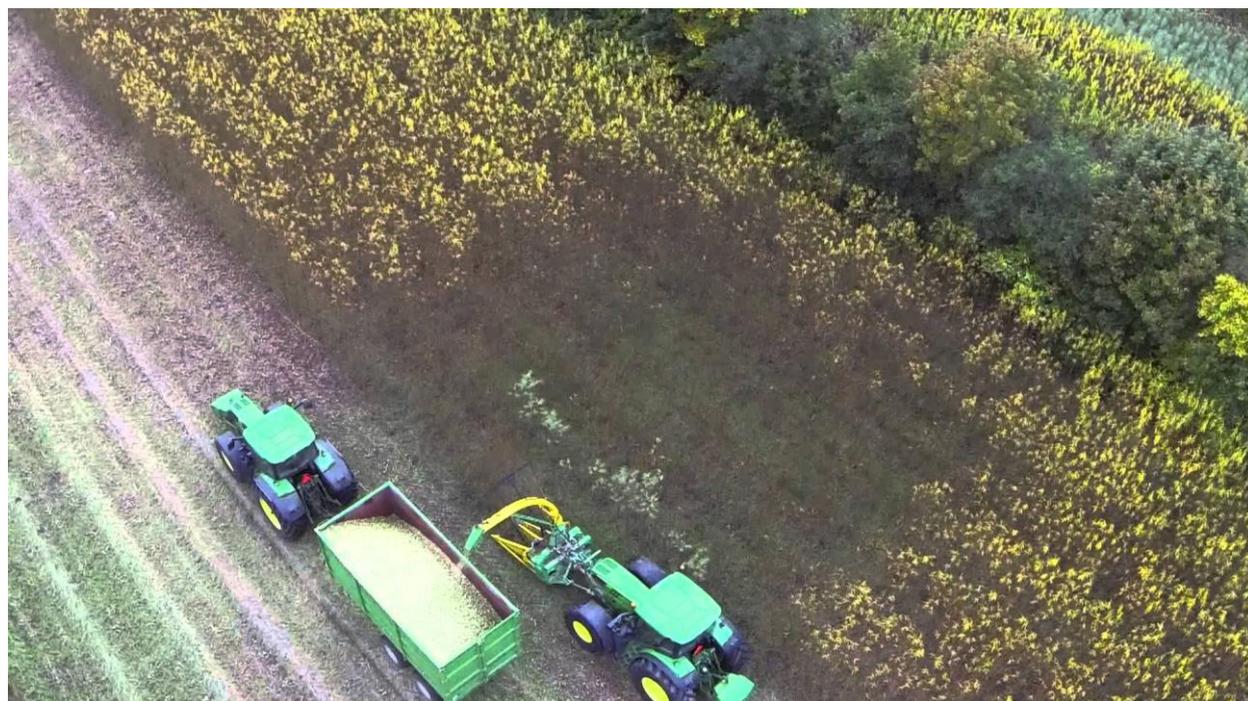


TECHNICAL OUTLINE



Annexe XI : Photographies supplémentaires du broyeur JF Harvester en fonctionnement.

*Source : [www.nyvraa.dk](http://www.nyvraa.dk)*



Annexe XII : Prix de la plaquette forestière pour le deuxième trimestre 2015 (hors coût de transport).

Source : [www.fnbois.com](http://www.fnbois.com).



Prix et indices nationaux 2015-T2 (prix du 1er au 5 juillet 2015)	Prix 2014-T2 €	Prix 2015-T1 €	Prix 2015-T2 €	Indices	Variation 2015-T2 2015-T1	Variation 2015-T2 2014-T2
<b>Produits élaborés</b>						
				Base 100 : janv 2012	E40	
<b>Plaquette forestière</b>						
Plaquettes provenant de bois forestiers, vendus en toutes longueurs, puis broyés sur la coupe ou sur une plateforme de broyage						
Petite granulométrie, humidité <30% tonne	81,4	80,2	<b>78,4</b>	102,8	-2,2%	-3,7%
PCI retenu (3,70) Mwh	22,00	21,68	21,19			
Moyenne granulométrie, humidité 30-40% tonne	56,8	56,1	<b>56,8</b>	100,8	1,2%	-0,1%
PCI retenu (3,10) Mwh	18,33	18,09	18,31			
Granulométrie grossière, humidité >40% tonne	49,5	50,9	<b>51,8</b>	118,3	1,7%	4,6%
PCI retenu (2,55) Mwh	19,42	19,96	20,31			

**Annexe XIII : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de bennes**

<b>Année</b>	<b>moyenne</b>	<b>somme</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
surface plantée (ha)	80	320	20	30	40	50	60	60	60
surface récoltée (ha/an)	18	71	1	3	6	11	13	16	21
volume récolté (t MB/an)	980	3919	55	166	331	607	718	883	1159
temps de trajet min	29	115	20	20	15	15	15	15	15
heures de trajet/ha	4	15	3	3	2	2	2	2	2
total heure de trajet	36	145	3	8	12	22	26	32	42
heure de récolte sur plein champs/ha	6	23	3	3	3	3	3	3	3
total heure	58	233	3	10	20	36	43	52	69
heure de récolte sur parcelle/ha	9	34	5	5	5	5	5	5	5
dont heures de coupe/ha	4	17	2	2	2	2	2	2	2
total heures de récolte	87	346	5	15	29	54	63	78	102
total heures de coupe	44	175	2	7	15	27	32	40	52
Utilisation de la fenêtre de récolte %	18	73	1	3	6	11	13	16	21
<b>Coûts de récolte</b>									
<b>Charges variables</b>									
<b>Consommation de carburant</b>									
coût de carburant tracteur récolte (€HT/h)	40	159	23	23	23	23	23	23	23
total carburant sur parcelle (€HT/an)	1972	7886	111	333	666	1222	1444	1777	2332
<b>lubrifiant et huile</b>									
coût de lubrifiant (€HT/h)	8	32	5	5	5	5	5	5	5
total lubrifiant (€HT/an)	394	1577	22	67	133	244	289	355	466
<b>Personnel</b>									
coût conducteur (€HT/h)	47	189	27	27	27	27	27	27	27
total main d'œuvre tracteur récolte (€HT/an)	2337	9348	132	395	790	1448	1712	2107	2765
	0	0							
coût d'utilisation tracteur récolte (€HT/h) (hors MO et carburant )	36	143	20	20	20	20	20	20	20
total (€HT/an)	1766	7063	99	298	597	1094	1293	1592	2089
<b>Entretien courant</b>									

machine de récolte (€HT/h)	11	42	6	6	6	6	6	6	6
total (€HT/an)	519	2077	29	88	176	322	380	468	614
<b>Gros entretien et renouvellement (outils de coupe)</b>									
machine de récolte (€HT/h)	14	57	8	8	8	8	8	8	8
total GER (€HT/an)	354	1416	20	60	120	219	259	319	419
	0	0							
<b>total charges variables (€HT/an)</b>	7342	29368	414	1241	2482	4550	5377	6618	8686
<b>Charges fixes</b>									
<b>Amortissement machine</b>									
annuité	6441	19324	3865	3865	3865	3865	3865		
intérêt	541	1624	531	431	328	222	113		
remboursement sur capital	5900	17700	3334	3434	3537	3643	3752		
amortissement comptable	4425	17700	2529	2529	2529	2529	2529	2529	2529
Remisage									
machine (€HT/an)	107	429	61	61	61	61	61	61	61
Assurance									
machine (€HT/an)	1033	4130	590	590	590	590	590	590	590
<b>Total des charges fixes (€HT/an)</b>	5971	23883	3711	3611	3508	3402	3292	3180	3180
<b>total des charges de récolte (€HT/an)</b>	13313	53251	4124	4852	5990	7952	8670	9798	11866
<b>coût de récolte €/h</b>	477	1909	846	332	205	148	137	126	116
<b>Coûts logistiques</b>									
<b>coût de déplacement machine entre deux bandes</b>									
coût d'utilisation tracteur récolte (€HT/h) (hors MO et carburant)	36	143	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
total (€HT/an)	738	2951	54	163	245	449	530	653	857
coût de carburant tracteur de récolte sur route (€HT/h)	23	91	13	13	13	13	13	13	13
total carburant sur route (€HT/an)	471	1883	35	104	156	286	338	416	547
coût conducteur (€HT/h)	47	189	27	27	27	27	27	27	27
total main d'œuvre tracteur récolte (€HT/an)	977	3906	72	216	324	594	702	864	1134
total des charges de déplacement €/an	2185	8740	161	483	725	1329	1571	1933	2537

coût de déplacement €/h	106	423	60	60	60	60	60	60	60
coût de collecte roulement de benne €/t MB	7	27	4	4	4	4	4	4	4
total (€HT/an)	3812	15248	215	644	1289	2362	2792	3436	4510
coût de transport parcelle/benne tout compris €/t MB	16	62	9	9	9	9	9	9	9
total (€HT/an)	8702	34807	490	1471	2941	5393	6373	7844	10295
coût de transport chaufferie camion benne €/t MB (30 km)	16	63	9	9	9	9	9	9	9
total (€HT/an)	8809	35235	496	1489	2978	5459	6452	7940	10422
<b>total coûts logistiques (€HT/an)</b>	21322	85290	1201	3604	7208	13214	15616	19220	25227
<b>coût de fermage €/ha/récolte</b>	877	3507	501	501	501	501	501	501	501
<b>total (€HT/an)</b>	8893	35571	501	1503	3006	5511	6513	8016	10521
<b>coût de plantation (€HT/an)</b>	3656	14624	124	373	746	1367	1616	4889	5510
<b>Total des charges (€HT/an)</b>	49369	197476	6112	10815	17674	29373	33986	43856	55661
coût de récolte (€HT/ha)	2558	10233	4286	1778	1119	844	788	733	686
coût revient (€HT/ha)	5835	23339	6112	3605	2946	2670	2614	2741	2651
coût revient (€HT/t MB)	106	423	111	65	53	48	47	50	48
coût revient (€HT/t MS)	211	846	221	131	107	97	95	99	96
coût revient (€HT/Mwh)	51	205	53,7	31,7	25,9	23,5	23,0	24,1	23,3
<b>coûts moyen sur la période (pondérés)</b>									
coût de récolte moyen (€HT/ha)	<b>873</b>								
coût de revient moyen (€HT/ha)	<b>2781</b>								
coût de revient moyen (€HT/t MB)	<b>50</b>								
coût de revient moyen (€HT/t MS)	<b>101</b>								
coût de revient moyen (€HT/MWh)	<b>24,5</b>								

**Annexe XIV : CEP pour le JF Harvester associé à une chaîne logistique de plateforme.**

<b>Année</b>	<b>moyenne</b>	<b>somme</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
surface plantée (ha)	46	320	20	30	40	50	60	60	60
surface récoltée (ha/an)	10	71	1	3	6	11	13	16	21
volume récolté (t MB/an)	560	3919	55	166	331	607	718	883	1159
temps de trajet (min)	16	115	20	20	15	15	15	15	15
heures de trajet/ha	2	15	2,7	2,7	2	2	2	2	2
total heure de trajet	21	145	2,7	8	12	22	26	32	42
heure de récolte sur parcelle/ha	5	34	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
dont heures de coupe/ha	2	17	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
total heures de récolte	49	346	4,9	14,6	29,3	53,6	63,4	78,0	102,4
total heures de coupe	25	175	2,5	7,4	14,8	27,2	32,1	39,5	51,9
utilisation de la fenêtre de récolte %	10	73	1,1	3,3	6,1	11,2	13,2	16,3	21,4
<b>Coûts de récolte</b>									
<b>Charges variables</b>									
<b>Consommation de carburant</b>									
coût de carburant tracteur récolte (€HT/h)	23	159	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8
total carburant sur parcelle (€HT/an)	1127	7886	111	333	666	1222	1444	1777	2332
<b>lubrifiant et huile</b>									
coût de lubrifiant (€HT/h)	5	32	5	5	5	5	5	5	5
total lubrifiant (€HT/an)	225	1577	22	67	133	244	289	355	466
<b>Personnel</b>									
coût conducteur (€HT/h)	27	189	27	27	27	27	27	27	27
total main d'œuvre tracteur récolte (€HT/an)	1335	9348	132	395	790	1448	1712	2107	2765
coût d'utilisation tracteur récolte (€HT/h) (hors MO et carburant)	20	143	20	20	20	20	20	20	20
total (€HT/an)	1009	7063	99	298	597	1094	1293	1592	2089
<b>Entretien courant</b>									
machine de récolte (€HT/h)	6	42	6	6	6	6	6	6	6
total (€HT/an)	297	2077	29	88	176	322	380	468	614
<b>Gros entretien et renouvellement (outils de coupe)</b>									

machine de récolte (€HT/h)	8	57	8	8	8	8	8	8	8
total GER (€HT/an)	202	1416	20	60	120	219	259	319	419
<b>total charges variables (€HT/an)</b>	4195	29368	414	1241	2482	4550	5377	6618	8686
<b>Charges fixes</b>									
<b>Amortissement machine</b>									
annuité	3865	19324	3865	3865	3865	3865	3865		
intérêt	325	1624	531	431	328	222	113		
remboursement sur capital	3540	17700	3334	3434	3537	3643	3752		
amortissement comptable	2529	17700	2529	2529	2529	2529	2529	2529	2529
<b>Remisage</b>									
machine (€HT/an)	61	429	61	61	61	61	61	61	61
<b>Assurance</b>									
machine (€HT/an)	590	4130	590	590	590	590	590	590	590
<b>total des charges fixes (€HT/an)</b>	3412	23883	3711	3611	3508	3402	3292	3180	3180
<b>total des charges de récolte €/an</b>	7607	53251	4124	4852	5990	7952	8670	9798	11866
<b>coût de récolte €/h</b>	273	1909	846	332	205	148	137	126	116
<b>Coûts logistiques</b>									
<b>Déplacement entre bandes</b>									
coût d'utilisation tracteur récolte (€HT/h) (hors MO et carburant )	20	143	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
total (€HT/an)	422	2951	54	163	245	449	530	653	857
coût de carburant tracteur de récolte sur route (€HT/h)	13	91	13	13	13	13	13	13	13
total carburant sur route (€HT/an)	269	1883	35	104	156	286	338	416	547
coût conducteur (€HT/h)	27	189	27	27	27	27	27	27	27
total main d'œuvre tracteur récolte (€HT/an)	558	3906	72	216	324	594	702	864	1134
total des charges de déplacement €/an	1249	8740	161	483	725	1329	1571	1933	2537
coût de déplacement €/h	60	423	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4
coût de collecte roulement de benne €/t MB	4	27	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
total (€HT/an)	2178	15248	215	644	1289	2362	2792	3436	4510
coût de transport parcelle/benne tout compris €/t MB	11	80	11	11	11	11	11	11	11

total (€HT/an)	6397	44776	631	1892	3784	6937	8198	10090	13243
coût de gestion plateforme €/t MB	1		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
total (€HT/an)	498	3484	49	147	294	540	638	785	1030
coût de séchage€/t MB	2	14	2	2	2	2	2	2	2
total (€HT/an)	1120	7838	110	331	662	1214	1435	1766	2318
		0							
perte de 5 % de matière MB	2	14	2	2	2	2	2	2	2
total (€HT/an)	1120	7838	110	331	662	1214	1435	1766	2318
coût de chargeur €/t MB	1	6	1	1	1	1	1	1	1
total (€HT/an)	498	3484	49	147	294	540	638	785	1030
coût de transport chaufferie FMA €/t MB (30 km)	8	54	8	8	8	8	8	8	8
total (€HT/an)	4355	30483	429	1288	2576	4723	5581	6869	9016
<b>total coûts logistiques (€HT/an)</b>	16173	113213	1656	4781	9562	17530	20718	25499	33467
<b>coût de fermage €/ha/récolte</b>	501	3507	501	501	501	501	501	501	501
<b>total (€HT/an)</b>	5082	35571	501	1503	3006	5511	6513	8016	10521
<b>coût de plantation (€HT/an)</b>	2089	14624	124	373	746	1367	1616	4889	5510
<b>total des charges (€HT/an)</b>	32200	225399	6567	11992	20028	33689	39087	50134	63901
coût de récolte (€HT/ha)	1462	10233	4286	1778	1119	844	788	733	686
coût revient (€HT/ha)	3735	26148	6567	3997	3338	3063	3007	3133	3043
coût revient (€HT/t MB)	68	474	119	72	60	55	54	57	55
coût revient (€HT/t MS)	135	947	238	145	121	111	109	114	110
coût revient (€HT/Mwh)	29	203	51	31	26	24	23	24	24
<b>coûts moyen sur la période (pondérés)</b>									
coût de récolte moyen (€HT/ha)	<b>873</b>								
coût de revient moyen (€HT/ha)	<b>3174</b>								
coût de revient moyen (€HT/t MB)	<b>57</b>								
coût de revient moyen (€HT/t MS)	<b>115</b>								
coût de revient moyen (€HT/MWh)	<b>24,7</b>								





## FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE AgroParisTech

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-	<b>TRAVAUX D'ÉLÈVES</b>
<b>TITRE :</b> Evaluation technico-économique de nouveaux itinéraires de récolte pour le développement d'une filière de bois énergie issu de taillis à très courte rotation de saule en Seine-Maritime	<b>Mots clés :</b> Taillis à très courte rotation de saule, bandes lignocellulosiques, bois énergie, biomasse, modes de récolte, circuits logistiques, simulation micro économique
<b>AUTEUR(S) :</b> Corentin Blanchard	<b>Promotion :</b> Promotion 2010 ESA Angers
<b>Caractéristiques :</b> 59 pages ; 65 figures ; 15 annexes ; 3 cartes ; 1 bibliographie.	

<b>CADRE DU TRAVAIL</b>		
<b>ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT :</b> Cabinet d'étude CEDEN Nom du responsable : Dominique Plumail Fonction : Directeur de CEDEN		
Nom du correspondant AgroParisTech : Philippe Durand		
Option <input type="checkbox"/> D. d'approfondissement RFF <input type="checkbox"/> CEI <input type="checkbox"/>	Stage 2A <input type="checkbox"/> Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/> Date de remise : le 15/10/2015	Autre <input type="checkbox"/>

<b>SUITE À DONNER (réservé à la Direction des études)</b>  <input type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au    /    /    , puis diffusable
---