Design Project



Valorisation des matériaux issus de l'entretien des milieux naturels de la Grande Cariçaie



Faucheuse Elbotel à l'œuvre dans la Grande Cariçaie. Source :www.grande-caricaie.ch

Auteurs: Robin Hobkirk et Clément Levasseur, étudiants SIE Ma2

Encadrant externe : Michel Baudraz, directeur du Bureau exécutif de l'Association de la Grande Cariçaie

Encadrant EPFL: Professeur Marc Soutter, LASIG

Table des matières

1	Con	texte, problématique et objectif de l'étude	4
	1.1	Localisation du site d'étude	4
	1.2	Problématique	5
2	Cara	actéristiques des divers matériaux issus de l'entretien de la Grande Cariçaie	6
	2.1	Paille issue de la fauche des prairies humides	6
	2.2	Matériau issu du décapage	7
	2.3	Bois	7
3	Filiè	eres de valorisation actuelles des matériaux issus de la gestion de la grande Cariçaie	8
	3.1	Paille issue de la fauche des prairies humides	8
	3.2	Matériau issu du décapage	8
	3.3	Bois	8
4	Filiè	eres alternatives: identification d'alternatives pour les matériaux d'entretien	10
	4.1	Paille issue de la fauche des prairies humides	10
	4.1.	1 Combustion	10
	4.1.	2 Méthanisation	12
	4.1.	3 Pâturage direct	13
	4.1.	4 Fourrage pour bétail	13
	4.1.	5 Litière pour bétail	13
	4.1.	6 Isolation	14
	4.1.	7 Compostage	14
	4.1.	8 Usages divers	14
	4.2	Matière issue du décapage	15
	4.2.	1 Méthanisation	15
	4.2.	2 Compostage	15
	4.3	Bois	15
	13	1 Bois d'œuvre	15

Design Project : Valorisation des matériaux issus de l'entretien des milieux naturels de la Grande Cariçaie. Robin Hobkirk et Clément Levasseur

	4.3.2	Copeaux de bois pour festivals	15
	4.4 Po	ossibles combinaisons de matériaux	16
	4.4.1	Paille et matière décapée pour la fabrication de terreau de la Grande Cariçaie	16
	4.4.2	Pellets mixtes paille/bois	16
5	Synthè	ese	18
6	Recom	nmandations	20
	6.1 Fi	lières actuelles à conserver	20
	6.1.1	Epandage de la matière issue du décapage	20
	6.1.2	Fabrication de plaquettes forestières	20
	6.2.1	Combustion directe	21
	6.2.2	Pelletisation de la paille mélangée à du bois	21
7	Remer	ciements	22
8	Bibliog	graphie	23
An	nexes		26

1 Contexte, problématique et objectif de l'étude

1.1 Localisation du site d'étude

La Grande Cariçaie (abrégée GC dans ce texte) est un site marécageux s'étendant de manière discontinue sur toute la rive sud du lac de Neuchâtel. C'est un site d'importance nationale pour la faune et la flore qui est inscrit comme site Ramsar, décrivant le rôle primordial de cette zone pour les oiseaux migrateurs [1].

La correction des eaux du Jura, au 19^{ème} siècle, a abaissé de plusieurs mètres le niveau du Lac de Neuchâtel. Cela a libéré une large frange littorale des eaux. La plus grande partie de l'écotone ainsi créé a été classé protégée à partir de 1982, puis classé en réserve naturelle en 2001 et 2002. La Grande Cariçaie comprend 9 zones ou réserves naturelles totalisant environ 3'000 ha. Parmi celles-ci, il y a 7 réserves qui sont concernées par les règlements vaudois et fribourgeois des réserves naturelles de 2001 et 2002. Elles font partie, depuis la création de l'Association de la Grande Cariçaie en 2010, du périmètre de gestion de cette association et sont gérées par son Bureau exécutif. Ce sont les réserves naturelles des Grèves de Cheseaux, de la Baie d'Yvonand, de Cheyres, de Chevroux et des Grèves de la Corbière, de Chevroux et des Grèves d'Ostende, des Grèves de la Motte et de Cudrefin.

Avec ses 1'280 ha de hauts-fonds lacustres, ses 720 ha de marais et ses 850 ha de forêts, la Grande Cariçaie constitue le plus grand ensemble marécageux lacustre de Suisse. Elle abrite les 20% des basmarais d'importance nationale inventoriés sur le plateau suisse et les 40% de ceux des cantons de Vaud et Fribourg réunis. Elle abrite environ 800 espèces végétales et 10'000 espèces animales, soit le quart de la flore et de la faune suisse, dont beaucoup d'espèces classées comme prioritaires, c'est-à-dire des espèces menacées pour lesquelles la Suisse a une responsabilité particulière en matière de conservation.

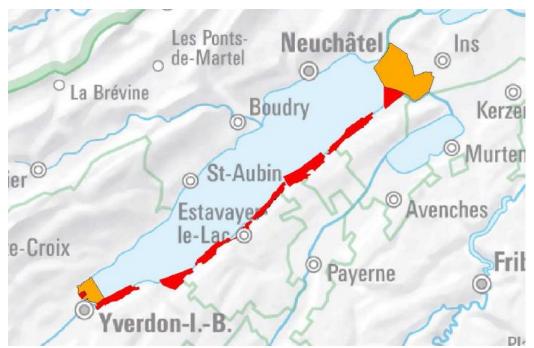


Figure 1. En rouge : périmètres gérés actuellement par l'Association. En orange : Périmètres OROEM attenants. Source: Plan de gestion 2012-2013 de la Grande Cariçaie

La carte ci-dessus présente le périmètre de gestion actuel de l'Association de la grande Cariçaie (en rouge). Il s'agit du périmètre couvert par la convention programme Grande Cariçaie, c'est-à-dire dans lequel l'Association peut financer des travaux d'entretien. Le périmètre en orange correspond aux zones qui pourront, selon les statuts de l'Association, rejoindre le périmètre de gestion en 2016 lors de la révision de la convention programme.

1.2 Problématique

Dans un milieu ne connaissant pas d'intervention de l'homme, les cours d'eau changent de lit régulièrement, et les lacs connaissent des variations de leur niveau pouvant être relativement importantes. Cette dynamique hydrologique naturelle crée de nouvelles zones humides. En contrepartie, les zones humides déjà établies sont sujettes à un mécanisme nommé atterrissement, par lequel les plantes aquatiques se formant dans les marais créent, en se décomposant, une couche de matière organique toujours plus importante, ce qui contribue à rehausser le niveau du fond du marais et à conduire à son asséchement. En vue d'empêcher l'atterrissement de ce site protégé, et pour contrecarrer la faible amplitude actuelle du lac de Neuchâtel, la Grande Cariçaie est entretenue chaque année depuis 1982 par le biais de divers travaux. Ces travaux ont pour but de favoriser les marais et les forêts alluviales, biotopes les plus riches en espèces.

Les travaux d'entretien ont pour conséquence que des matériaux doivent être extraits et évacués hors du marais. Les moyens mis en œuvre sont les suivants :

- Le fauchage, qui est pratiqué avec une faucheuse spéciale (faucheuse Elbotel) ou avec un équipement agricole standard. Le choix des engins et le rythme de fauche dépendent du niveau d'inondation moyen des parcelles fauchées. La matière végétale est toujours évacuée hors du marais;
- Le décapage dans les roselières atterries, qui est pratiqué avec une pelle mécanique sur chenille charge. L'opération consiste à prélever la partie supérieure du sol, puis à laisser évoluer le plan d'eau ainsi obtenu jusqu'à sa fermeture par la roselière (le temps moyen de fermeture est estimé à 30 ans). Les matériaux décapés sont évacués hors du marais ;
- Les travaux forestiers, s'effectuant par le biais de différentes techniques pour limiter l'expansion de la forêt sur les marais, de façon à favoriser au maximum les espèces animales et végétales des marais ouverts. Ce travail est en grande partie effectué par les corporations forestières de l'Etat (les bucherons qui travaillent pour le canton).

L'objet de cette étude est de déterminer les meilleures alternatives de valorisation de ces matériaux et de vérifier si les filières actuelles gagneraient à être repensées ou optimisées.

2 Caractéristiques des divers matériaux issus de l'entretien de la Grande Cariçaie

Trois types de matériaux sont évacués de la Grande Cariçaie lors de travaux d'entretien, selon le milieu et le type de travaux effectués. Ces matériaux sont de la paille des marais, du bois et de la terre décapée.

2.1 Paille issue de la fauche des prairies humides

La paille des marais est constituée principalement de laîches (Carex), choins (Schoenus), marisques (Cladium mariscus) et de roseaux (phragmites) en proportions variables. Chaque année, 140 ha de prairie humide sont fauchés, dont 80 ha par des agriculteurs de la région et 60 ha par la faucheuse Elbotel [2]. La paille fauchée par Eltel est compactée en balles rondes de 140 à 160 cm de diamètre avec une largeur standard de 120 cm [3]. Une balle entière a un volume approximatif de 2.1 m³. Sur l'ensemble de la réserve, cela représente environ 10'600 m³ de paille par année, avec une production annuelle de 5'000 balles produites par la faucheuse Elbotel et les agriculteurs.

Les caractéristiques de la paille de la GC comparé à d'autres types de paille [1] sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Analyse chimique:

	Azote total	Phosphore P205	Potasse K20	Calcium Ca	Magnésium Mg	Mat. org. (MO)
Paille marais	6.0	0.9	3.4	3.9	0.6	800
Paille céréales	6.0	2.0	11.0	2.0	0.8	800
Compost marais	16.0	2.3	4.8	16.9	4.0	582

Chiffres moyens en kg / tonne de matière sèche

Figure 2 : Caractéristiques chimiques de la paille issue de la GC. Source: www.grande-caricaie.ch

Il y a lieu de constater que la paille des marais de la Grande Cariçaie est généralement plus pauvre en éléments nutritifs que la paille de céréales : pour une teneur en azote égale, elle contient deux fois moins de phosphore et trois fois et demi moins de potasse que de la paille de céréales. Elle est par contre plus riche en calcium.

Le but de la fauche étant avant tout de conserver un maximum de biodiversité sur l'ensemble de la réserve, la période pendant laquelle celle-ci est effectuée est cruciale, notamment pour éviter de déranger les oiseaux pendant la nidification ou la reproduction. Cela a pour conséquence une période de fauche, par les agriculteurs de la région, s'étalant du 15 août au 30 septembre pour les terrains les plus secs, et de la mi-octobre au mois de février pour les terrains plus inondés entretenus par la faucheuse Elbotel. Il en résulte un matériau récolté dans un état sénescent, et gorgé d'humidité.

2.2 Matériau issu du décapage

Il est composé d'environ 50 % de matière organique et de 50% de matières inorganiques du sol (sable, limons et argiles) [4]. C'est un matériau riche en éléments nutritifs nécessaires aux cultures (azote, phosphore, potassium, magnésium), bien que ceux-ci se trouvent en proportions déséquilibrées. Les concentrations moyennes en métaux lourds sont toutes inférieures aux normes ORRChim ainsi qu'aux normes en vigueur pour l'utilisation dans l'agriculture biologique. La production annuelle de matière décapée est au minimum de 1'200 m³, avec une grande variabilité selon les années, et une moyenne à 3'600 m³.

2.3 Bois

Constitué, pour la plupart, de bois jeune issu de diverses espèces d'arbres et arbustes, de bois tendres et durs. La quantité annuelle de bois prélevé est variable mais est estimée entre 1000 et 1500m³ par année. Les espèces relevées à l'œil nu sur le terrain sont les suivantes: peupliers, bouleaux, hêtres, aulnes, pins sylvestres, pins noirs d'Autriche et frênes (liste non exhaustive).

3 Filières de valorisation actuelles des matériaux issus de la gestion de la grande Cariçaie

3.1 Paille issue de la fauche des prairies humides

L'association de la grande Cariçaie a conclu un contrat avec la compagnie Eltel SA basée à Cronay (VD). Elle a développé, entre autres, des machines à faible impact au sol utilisées pour le fauchage des marais de la GC. Eltel s'occupe de la fauche de 60 ha de la réserve, de la mise en balles et de l'évacuation de ces balles de paille. La plus grande partie de la paille est évacuée au dépôt de l'entreprise à Cronay, où elle est broyée et compostée pendant une durée de un à deux ans. Elle est ensuite épandue sur le domaine agricole du responsable de l'entreprise. Une partie est également laissée au bord de la réserve en libre-service, ou est livrée par Eltel aux frais du client.

Certaines parcelles, à hauteur de 80 ha/an, sont directement fauchées par des agriculteurs de la région qui récupèrent la paille qu'ils peuvent utiliser de différentes manières : compostage, paillage des pieds de vignes ou des fraisiers, litière pour le bétail, etc. Dans le cadre de ce travail, bien que le volume de paille que nous prenons pour les calculs soit souvent celui qui englobe également ces 80 ha, nous ne nous intéresserons pas à la paille issue de ces parcelles. Nous partant du principe que l'utilisation qu'en font les agriculteurs est une excellente filière de valorisation en soi.

Une très petite partie de la zone marécageuse (réserve de Cudrefin) est aussi broutée par des vaches écossaises (Highland cow) qui appartiennent à un privé externe à l'association.

3.2 Matériau issu du décapage

Comme pour la paille, c'est l'entreprise Eltel qui s'occupe du décapage. La totalité de cette matière est récupérée par les agriculteurs locaux et utilisée pour l'épandage de leurs champs comme apport nutritif au sol [2]. D'après le rapport rédigé par sol-conseil sur ce matériau [4], un amendement de 80 m³ par hectare tous les trois ans, nécessaire pour atteindre la dose conseillée de 6 tonnes de matière organique/ha/3 ans, fournit 112 unités d'azote total, 14 unités de phosphates, 16 unités de potasse, 664 unités de calcium et 48 unités de magnésium. Il y a lieu de constater que cette matière constitue un amendement déséquilibré, très chargé en azote et en calcium mais assez pauvre en phosphates et en potasse. Il est donc recommandé de ne pas l'utiliser seul, mais en mélange avec d'autres matériaux. Il est néanmoins utilisable comme matériau d'épandage sur la plupart des sols, de préférence sur ceux à tendance lourde (plus de 30 % d'argile) et ayant une teneur basse en matière organique. Beaucoup de sols du Canton de Vaud répondent en outre à ces caractéristiques.

3.3 Bois

Généralement, la coupe du bois est effectuée par les corporations forestières de l'Etat. Il arrive cependant que des entreprises privées s'en occupent. Lorsque les forestiers du canton n'ont pas le temps de le faire, Agribois Sàrl, basée à Avenches, effectue le travail. Le bois est évacué et valorisé de différentes manières selon sa nature. Il est rare que le bois soit d'assez bonne qualité pour servir de bois d'ouvrage. La plupart du temps, le bois est évacué par l'entreprise Agribois. Un contact téléphonique avec l'entreprise a relevé qu'ils s'occupent d'une partie de la découpe et que le bois est ensuite transformé en plaquettes de chauffe qu'ils revendent directement à des centrales de chauffage à distance. Les chaudières qui sont connues comme étant alimentées par le bois de la GC

sont [2]: la salle sportive l'Amarante à Estavayer-le-lac, la Centrale de chauffe de Domdidier, et la centrale Thermoréseau à Avenches.

Un calcul effectué à partir des factures des forestiers cantonaux par Mikael Cantin, employé par l'association de la Grande Cariçaie, permet d'estimer le volume de bois annuel sortant de la réserve à une valeur comprise entre 1'000 et 1'500 m³. En considérant une masse volumique moyenne de 700 kg/m³ [24], cela représente 875 tonnes de bois par année. L'argent issu de la vente de ces plaquettes est ensuite déduit de la facture que doit régler l'Association de la Grande Cariçaie pour l'entretien de ses espaces. Toutefois, les revenus issus de la vente de ce bois permettent en général de couvrir au mieux la moitié du coût des travaux d'entretien.

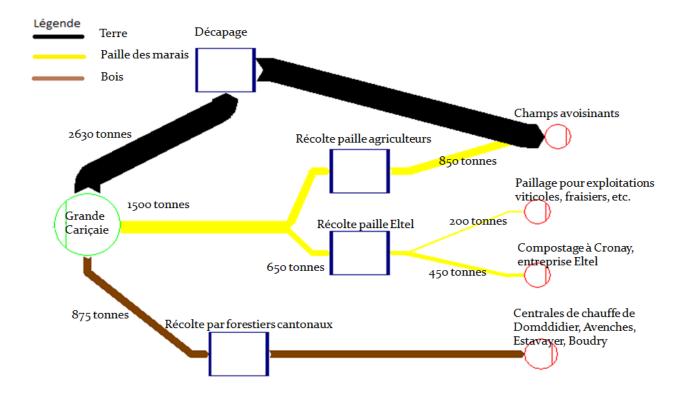


Figure 3 : Diagramme de Sankey représentant les flux de matière sortant annuellement de la réserve en l'état actuel (2014)

4 Filières alternatives: identification d'alternatives pour les matériaux d'entretien

4.1 Paille issue de la fauche des prairies humides

Ce matériau offre un éventail de filières de valorisation varié. Ces filières vont du matériau d'isolation ou de construction à la méthanisation, en passant par le compostage, la combustion, le paillage, l'utilisation comme fourrage pour le bétail et la création de pellets.

4.1.1 Combustion

Calcul de l'énergie productible par la combustion de la paille des marais et comparaison à d'autres types de combustibles

D'après un document dans lesquel la paille des marais de la GC a été étudiée [5], Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) moyen pour une paille bien sèche est de 15'500 kJ/kg ou 4.3 kWh/kg, valeur similaire au PCI de la paille de blé. Cette valeur est comparable à celle trouvée dans la littérature de 1979 [6]. Les mesures faites en 1982 pour étudier la faisabilité de chauffer le château de Champ-Pittet à la paille indiquent qu'une botte de 0.18 m³ pèse 17 kg, ce qui donne une masse volumique d'environ 94 kg/m³, bien inférieure aux 141,5 kg/m³ d'une botte de 300 kg humide [2]. La valeur de 94 kg/m³ sera gardée pour les calculs énergétiques. La masse de paille « sèche » produite par année s'élève ainsi à 996,4 tonnes de paille.

Energie potentiellement productible par la combustion de la paille des marais :

Chaque année, 996'400*15'500=1,5*10¹⁰kJ/an, ce qui équivaut à 4'290'055 kWh/an qui peuvent être libérés par la combustion des 5000 balles de paille récoltées par la faucheuse Elbotel. Ceci se traduit par une puissance d'environ 480 kW en continu sur l'année.

Dans l'étude canadienne intitulée « Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales [7] », des chercheurs québécois étudient la possibilité d'utiliser de la paille de blé, ainsi que de maïs, dans des chaudières pour produire de la chaleur à distance. Ils obtiennent un rendement thermique de 40.8% pour un chauffage à la paille de maïs bien sèche. En employant, de manière assez arbitraire, cette valeur de 40.8 % pour la combustion thermique de la paille des marais, nous obtenons une puissance de 480*0.408= 195.84 kW. En admettant que la totalité de cette paille est brûlée, il est donc possible, d'après ces calculs rudimentaires, d'alimenter en continu une chaudière d'une puissance de 195 kW avec les 5000 balles de paille produites chaque année. Il est à noter que ce rendement est très bas comparé aux rendements fournis par les différents fabricants de chaudières à paille, qui varient plutôt entre 60% et 80% (voir Annexe 1 : divers modèles de chaudières à paille).

<u>Chaudières à paille</u>: Plusieurs entreprises produisent des chaudières à biomasse. Elles vendent, entre autres, des chaudières capables de brûler des balles cylindriques de paille des mêmes dimensions que celles prélevées dans la Grande Cariçaie. La liste des fabricants est longue et certains d'entre eux ont déjà été mentionnés dans le document sur le chauffage du château de Champ-Pittet [5]. Une brève liste, plus actuelle, est également disponible en annexe (voir Annexe 1 : divers modèles de chaudières à paille).

Comparaison au mazout : Le prix du mazout a fluctué entre 95 et 115 CHF/100 L entre 2012 et 2014 (la valeur de 110 CHF/100 L sera prise pour les calculs [8]). Le PCI du mazout est de 10 kWh/L, soit 11.9 kWh/kg [9]. Il faudrait donc 4'290'055/10 = 429 m3 de mazout/an pour obtenir la même énergie que celle dégagée par la combustion des 5'000 balles de paille.

Comparaison aux plaquettes de bois: Le PCI des plaquettes de bois est compris entre 3.5 et 5 KWh/kg, pour des plaquettes forestières ayant une humidité de 30 et, respectivement, 5% [10]. Il faudrait donc 4'290'055/5 = 858'011 kg de plaquettes de bois pour arriver à l'énergie calculée (l'énergie grise consommée dans la production de plaquettes de bois s'élève à 2,3% de l'énergie totale dégagée par la combustion de plaquettes [11], cette énergie n'est pas prise en compte dans ces calculs). Le rendement des chaudières à plaquettes dépasse souvent les 90% [12].

	PCI (Pouvoir Calorifique inférieur)	Quantité nécessaire pour libérer la même énergie que la combustion de toute la paille des marais, soit 4'290'055 kWh/an.	Prix (au cours actuel des marchés hors frais de transport). [CHF]	CO ₂ ou Equivalent CO ₂ produit	Quantité nécessaire moyenne sur un an pour le chauffage d'un habitant lausannois (1 kW) [13]
Paille des marais	4.3 [kWh/kg]	996'400 [kg]	0	Pas de valeur (neutre en CO ₂)	837.2 [kg]
Mazout	10 [kWh/L]	429'000 [L]	710'417	2.67 [kg/L]	360 [L]
Plaquettes de bois	3,5 à 5 [kWh/kg]	858'011 à 1'225'730 [kg]	175'900 à 251'280	900 [kg/m³] (neutre en CO₂)	720 à 1028.6 [kg]

Les calculs dans ce tableau ne prennent pas en compte les rendements des chaudières

Problèmes éventuels liés à la combustion directe

Pour les chaudières à paille, il est nécessaire de mener des tests d'émission avant de savoir si une telle chaudière peut être installée, en tout cas en zone urbaine. Les chaudières de grande dimension doivent être équipées de filtres pour que les émissions n'atteignent jamais des valeurs problématiques, mais cela n'est pas le cas pour les chaudières de moins de 70 kW. Certains fabricants fournissent des valeurs indicatives d'émission pour la paille de céréales, il n'est cependant pas ici question de blé mais d'hélophytes. D'éventuelles études détaillées relatives à la mise en place de tels systèmes devront donc prendre en compte la pollution atmosphérique générée et son impact sur la santé humaine.

Un échange par courriel avec le Groupe E a été établi afin de déterminer si la paille de la GC pouvait être valorisée par combustion directe des balles dans des centrales de chauffe au bois. Cette entreprise, dont le siège est à Granges-Paccot (FR), fournit en énergie une partie de la population dans les cantons de Fribourg, Neuchâtel, Vaud et Berne et s'occupe notamment d'installations de chaudières à bois plaquettes. Leur réponse est la suivante : « l'apport en balles rondes n'est pas prévue dans nos installations, la combustion de la paille pose problème à nos chaudières, nous ne sommes pas en mesure de faire des tests pour diverses raisons ».

Si le but est de brûler la paille dans les chaudières existantes, notamment les chaudières à bois, les problèmes que la paille en balle peut occasionner sont les suivants :

- La combustion d'herbacés implique un taux de cendres important, qu'il faut ensuite évacuer et mettre en décharge. Elle produit aussi des mâchefers qui encrassent les chaudières (voir chapitre 4.4.2 Pellets mixtes paille/bois).
- Les bottes de paille nécessitent un entrepôt pour le séchage et le stockage. Cet espace de stockage va devoir obligatoirement être placé hors du périmètre de la réserve, car il n'est pas acceptable de construire un hangar sur cette zone, et l'association de la Grande Cariçaie n'a pas d'infrastructure existante appropriée [2].
- Ces chaudières ne sont pas équipées pour le chargement de bottes entières, à moins d'avoir recours au préalable à un broyage des bottes, ce qui nécessite de l'équipement supplémentaire et rallonge le processus.

4.1.2 Méthanisation

En Lettonie, des chercheurs de l'université de Jelgava ont étudié la faisabilité de produire du biogaz à partir de roseaux [14]. Leurs conclusions sont les suivantes : le rendement optimal pour la méthanisation est obtenu si le roseau est récolté en période estivale et passé à la broyeuse avec un diamètre de 2 mm. Cependant, l'effet du broyage sur l'amélioration du rendement atteint un plateau à partir de 7 mm. Le rendement méthanique des roseaux récoltés en hiver vaut environ deux tiers du rendement estival. Toutefois, les professionnels du secteur ne semblent pas très enthousiastes à l'idée d'utiliser de la paille de marais dans leurs installations. C'est un matériau certes transformable en gaz mais avec un rendement plutôt médiocre. Un calcul comparatif grossier entre l'énergie obtenue par méthanisation et par combustion a été effectué. Les résultats sont les suivants :

	Rendement méthanique du roseau récolté en été [m³- CH4/kgMOS]	% Masse organique sèche [%]	PCI du méthane [MJ/kg]	Masse volumique du méthane [kg/m³]	Pouvoir calorifique Inférieure (PCI) [MJ/kg- paille]
Méthanisation et combustion du biogaz issu de la paille des marais	0.24	90	50	0.72	7.74
Combustion de la paille des marais	-	-	-	-	15,5

La combustion directe de la paille des marais est donc deux fois plus intéressante, énergétiquement, que la méthanisation, en se basant sur le rendement méthanique du roseau. Les énergies de transport, broyage, et, pour l'installation de méthanisation, du chauffage en période hivernale, ne sont ici pas prises en compte. Du point de vue financier, la prise en charge des matériaux entrant dans le processus de méthanisation coûte 118 CHF/tonne [15]. Cela n'est pas financièrement intéressant, car l'Association de la Grande Cariçaie paierait pour se débarrasser du matériau, sans toucher une part des bénéfices de la vente du biogaz.

4.1.3 Pâturage direct

L'entreprise Ecoparcelle (voir Annexe 2 : contacts) basée à Romanens offre un service de tonte écologique. Cela consiste à insérer des moutons d'Ouessant, race adaptée aussi bien aux terrains humides qu'aux terrains en pente, sur des parcelles clôturées. Il serait imaginable d'ajouter quelques-uns de ces moutons au cheptel de Highland Cows déjà présent. Il va de soi que l'introduction de troupeaux dans une réserve comme la Grande Cariçaie doit être faite de manière contrôlée afin de limiter l'impact de ceux-ci sur la biodiversité. Un autre deisgn project actuellement réalisé par des collègues de l'EPFL (Valérie Gagnaux et Vincent Carel) tente d'évaluer l'impact de la présence de moutons d'Ouessant sur les sols. Il pourrait être intéressant de suivre les résultats de cette étude.

Le pâturage pourrait avoir un effet bénéfique sur la biologie des prairies mésophiles humides, des pseudoroselières embroussaillées et des prairies de la série infra-aquatique [16]. Il est par contre déconseillé dans le cas des groupements de petites laîches et de molinie. L'Association mène aujourd'hui un suivi biologique pour évaluer l'impact de ce type d'entretien sur la faune et la flore, pour déterminer si la pâture pourrait être étendue à d'autres surfaces. Les vaches piétinent le bord des mares lorsqu'elles y stationnent, ce qui a pour conséquence de lutter contre l'atterrissement.

4.1.4 Fourrage pour bétail

D'après la littérature [17], la laîche, la marisque et le choin constituent un fourrage de piètre qualité. Les tiges de roseaux adultes sont, quant à elles, totalement indigestes. Anciennement, la « paille des marais » n'était utilisée pour nourrir le bétail qu'en période de disette, à défaut d'autre ressource pour passer l'hiver, et le bétail n'avait tendance à accepter ce type de nourriture que si la faim l'y obligeait. Il est donc peu probable que des agriculteurs acceptent de valoriser cette paille des marais sous forme de fourrage vue la disponibilité actuelle en céréales et fourrage de bonne qualité. Pourtant, d'après Michel Baudraz, des gestionnaires de milieux humides français enrubannent la paille dans du plastique, la mettent de côté quelques temps, et l'utilisent par la suite comme fourrage. Il serait intéressant d'essayer de développer cette filière. Des discussions ont été menées avec Catherine Brassaud (voir Annexe 2 : contacts), gestionnaire du projet écoparcelles, afin de déterminer s'ils sont susceptibles de consommer de la paille des marais pendant les quatre mois d'hiver passés en bergerie. Elle se dit prête à tenter l'expérience. Des échanges de courriel ont déjà eu lieu entre l'Association de la Grande Cariçaie et elle, mais il en est ressorti que ses besoins en fourrage étaient faibles, au maximum de 5 tonnes, soit 0,7 % de la masse totale de paille récoltée par la faucheuse Elbotel.

4.1.5 Litière pour bétail

D'après une étude sur l'utilisation de la végétation des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel, rédigée en 1979 [6], la litière représente une bonne filière de valorisation pour la paille. Cependant, il

semble qu'il y ait peu de demande chez les éleveurs de la région. La vente de cette paille des marais auprès de coopératives paysannes à des prix très concurrentiels pourrait toutefois être intéressante.

4.1.6 Isolation

La paille est un matériau intéressant du point de vue de l'isolation. D'après le document « la construction en bottes de paille [18]», une ossature bois porteuse avec remplissage de paille de 35 cm aurait les mêmes performances d'isolation que 16 cm de polystyrène expansé ou de laine de roche. Ce type d'isolation a déjà été intégré au label Minergie (Minergie et Minergie-P), mais la demande de la part des architectes n'est actuellement pas très importante pour ce matériau. De plus, un soin particulier doit être porté au séchage de la paille des marais pour éviter toute moisissure à l'intérieur des murs.

4.1.7 Compostage

D'après l'étude sur l'utilisation de la végétation des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel rédigée en 1979 [6], le rapport C/N de la paille des marais, avec une valeur moyenne de 50, est trop élevé pour un compostage efficace. Cette paille doit donc être compensée en azote. Son pH est également trop faible, mais il peut être neutralisé par un amendement basique. La paille des marais peut nécessiter un broyage, du fait de la structure rigide des plantes la constituant, afin de faciliter l'action des micro-organismes dans le processus de décomposition. Des tests effectués en 1979 [6] ont montré que cette paille, si elle est compostée seule, est difficilement décomposable et que le processus requiert beaucoup de travail afin d'arriver à un résultat satisfaisant.

Une solution élégante pour diminuer le C/N de la paille des marais et d'en diminuer le pH est de la mélanger au matériau de décapage, avec un C/N de 19.7 et riche en minéraux alcalins [4] (voir Annexe 3 : tableau détaillé de la composition des décapages, des composts et des digestats). D'après Luc Germanier, administrateur délégué chez Germanier Ecorecyclage SA basée à Lavigny VD, ce mélange de matériaux se prête très bien au compostage. Par le passé, des tests de fabrication de terreau à partir du mélange paille/matière décapée faits par l'entreprise Eltel SA ont été concluants. Cette filière a été discutée en détail dans le chapitre 4.4.1 « Paille et matière décapée pour la fabrication de terreau de la Grande Cariçaie ».

4.1.8 Usages divers

Plusieurs artisans seraient susceptibles d'utiliser du roseau ou de la paille des marais. Il semblerait qu'un certain M. Bonny tresse le roseau, comme cela était largement pratiqué autrefois sur les rives du lac de Neuchâtel [6]. La maison Stroba à Kempttahl fabrique également, encore à ce jour, des nattes de roseau. Un artisan produisant des abat-jours de lampe à partir de roseau a également pris contact directement avec l'Association de la Grande Cariçaie. Toutefois, les volumes concernés par de telles activités sont minimes par rapport au volume total des matériaux disponibles.

Une partie plus importante de la paille pourrait être valorisée dans certains festivals utilisant des toilettes sèches. Il serait intéressant de se renseigner auprès de l'organisation des festivals environnants (Rock oz'Arènes, Festi'Neuch, etc.).

4.2 Matière issue du décapage

4.2.1 Méthanisation

Après discussion avec des gens du métier [15], il semblerait que les 50 % de matière minérale qui composent cette terre de décapage [4] soient une source de problèmes potentiels pour les digesteurs. Ce procédé ne présente pas de réel intérêt pour valoriser ce matériau.

4.2.2 Compostage

Ce matériau ne présente aucun problème pour le compostage. Cependant, comme il est expliqué dans le chapitre 3.2 « Matériau issu du décapage », cette matière constitue un amendement déséquilibré, très chargé en azote et en calcium mais assez pauvre en phosphates et en potasse. Il est donc envisageable de le faire prendre en charge par une entreprise de compostage pour améliorer sa qualité fertilisante pour le sol en le mélangeant à d'autres déchets organiques. Par contre, il ne semble pas que cette solution soit judicieuse dans ce cas. En effet, le matériau peut être simplement épandu dans les champs, ce qui apporte des nutriments au sol sans les coûts et l'énergie liés au transport et à la prise en charge par une entreprise externe.

4.3 Bois

Étant donné que le bois issu de l'entretien de la Grande Cariçaie est essentiellement du bois tendre, il est de valeur commerciale moindre. Les hêtres et chênes des forêts de pente ainsi que les aulnes et les frênes des forêts alluviales pourraient être valorisés dans le domaine de la menuiserie ou de la construction, mais les objectifs en termes de gestion forestière visent à la conservation de ces deux milieux, le premier assurant la stabilité du terrain et le deuxième abritant de nombreuses espèces rares.

4.3.1 Bois d'œuvre

Dans le cas ou des frênes d'un diamètre suffisant étaient coupés, il serait possible de contacter l'entreprise Neue Holzbau AG à Lungern (voir Annexe 2 : contacts), qui utilise des pièces en lamellécollé de cette essence pour construire des bâtiments.

4.3.2 Copeaux de bois pour festivals

Cette option est une alternative aux plaquettes de bois de chauffe. Elle n'a cependant pas été explorée en détail, vu qu'elle est moins intéressante au niveau énergétique. Un échange de courriel avec Tiffany Collaud de l'Administration Constructions du Paléo Festival de Nyon a précisé que pour ce festival -le plus important en suisse romande-, les copeaux sont fournis par « l'Association intercommunale pour l'exploitation d'un Couvert régional à Plaquettes et bois énergie situé sur la commune de Trélex », dans les environs directs du festival. Les copeaux nécessitent donc moins de transport que s'ils provenaient de la GC. Il pourrait cependant être intéressant de se renseigner sur les besoins en copeaux de festivals plus proches de la réserve, comme Rock Oz'Arènes ou Festi'Neuch, ainsi que sur les prix d'achats standards du produit.

4.4 Possibles combinaisons de matériaux

4.4.1 Paille et matière décapée pour la fabrication de terreau de la Grande Cariçaie

L'entreprise Eltel, en partenariat avec l'association de la Grande Cariçaie, a mené des expériences de création d'un terreau issu d'un mélange de paille des marais avec de la matière issue du décapage. Le terreau obtenu est de bonne qualité et la filière de valorisation est facile à mettre en œuvre, d'un point de vue purement technique. Malheureusement, les contraintes logistiques et économiques ont fait que cela n'était pas viable. M. Luc Germanier, administrateur délégué chez Germanier Ecorecyclage SA basée à Lavigny VD, a donné un prix indicatif de 6 à 7 CHF/sac de 40 litres, uniquement pour l'ensachage et le graphisme. Cela va sans dire qu'il est impossible d'être compétitif à ce prix, alors que les terreaux d'entrée de gamme coûtent 3,50 CHF/sac de 40 litres en jardinerie.

Suite à une discussion avec Raphaël Bapst [15], gestionnaire du site de méthanisation d'Axpo-Kompogas à Chavornay, il semble en effet très difficile de créer une filière de terreau Suisse. Le marché est déjà saturé ; il est inondé par des produits étrangers vendus au moins deux fois moins cher que les produits helvétiques. Actuellement, de grandes quantités de terreau suisse qui pourraient être revendues en vrac auprès des paysagistes pour 50 CHF/m³ finissent dans l'agriculture, où elles sont revendues entre 2 et 4 CHF/ m³ [15]. D'après l'expérience de Raphaël Bapst, qui a travaillé à la compostière d'Avenches et sur un projet de terreau à base de Miscanthus à Soleure, il semble illusoire, dans le contexte actuel, de vouloir écouler du terreau suisse sans passer par Ricoter. La prise en charge des matériaux à la compostière d'Avenches coûte 90 CHF/tonne, hors frais de transport [15], ce qui représenterait un déficit net à la charge de l'Association.

D'après Sandrine Tolivia, Directrice adjointe d'Eltel SA, le terreau coûte 40 CHF/m³ au départ de Donneloye [26].

4.4.2 Pellets mixtes paille/bois

Beaucoup de chaudières individuelles actuellement installées fonctionnent aux pellets de bois. La possibilité de créer des pellets avec la paille de la GC pour alimenter ces chaudières a donc été explorée.

Lors d'un entretien avec M. Julien Ropp, ingénieur et collaborateur scientifique pour le laboratoire SIB - Systèmes Industriels de Bioénergie- de l'HES-SO Yverdon [19] (voir Annexe 2 : contacts), il a été mis en évidence que la paille doit être mélangée à du bois en vue d'une utilisation dans une chaudière à pellets classique car la combustion d'herbacés produit des mâchefers qui encrassent et saturent les chambres de combustion des chaudières. D'autre part, le taux de cendre est généralement très élevé (11 à 15%) [19]; ces cendres doivent ensuite partir en décharge à la charge de l'exploitant. Il est possible de réduire significativement la contribution de ces phénomènes en mélangeant les herbacés avec des ligneux pour créer des pellets [19].

L'avantage de la mise en pellets se situe essentiellement dans le gain de place lors de la distribution et la vente aux particuliers. Sous cette forme, la paille est en outre supportée par plus de chaudières que le matériau brut. Dans le cas du bois, il est également possible de faire subir une torréfaction à la matière, procédé permettant de diminuer encore d'avantage le volume et d'avoir un matériau hydrophobe, tout en augmentant le PCI/kg de la matière. Toutefois, l'intérêt de ce procédé avec les herbacés est limité [19].

Le laboratoire de M. Ropp est disponible pour procéder à d'éventuels tests concernant la pelletisation de la paille de la GC. Les paramètres qui peuvent être testés sont : le taux de cendre, le PCI, le taux de mélange préférentiel avec du bois (l'essence du bois étant peu importante, la proportion bois/paille est beaucoup plus déterminante). Une étude énergétique complète prenant en compte tous les procédés entrant dans la démarche de pelletisation peut être menée.

Dans le but de trouver un partenaire industriel capable de produire de grandes quantités de ces pellets, l'entreprise BestPellet Wärme SA à Düdingen, dans le canton de Fribourg, a été contactée. D'après eux, le processus de transformation de cette paille en pellets est tout à fait faisable et a fait ses preuves par le passé, mais ils n'ont actuellement pas la capacité de les produire. M. Ropp nous a également conseillé de rentrer en contact avec le comptoir agricole d'Orbe, qui produit des pellets.

5 Synthèse 1

Le tableau qui ce trouve sur la page suivante est une récapitulation qui évalue chaque filière de valorisation sur la base de plusieurs critères, dans le but de montrer quelles filières seraient les plus intéressantes. La dernière colonne « intérêt de cette filière » agrège les résultats. Les critères évalués sont :

- Le « prix de vente pour l'AGC » définit l'argent que l'Association peut gagner ou perdre par la vente ou, respectivement, la prise en charge par une entreprise externe du matériau. Le prix ne prend pas en compte les prix d'entretien (fauchage, décapage, travaux forestiers et pâturage direct).
- Le « potentiel énergétique » définit l'énergie qui peut être valorisée par les filières de combustion.
- L'« intérêt pour la fertilité des sols » définit la valeur fertilisante du matériau pour la filière en question.
- La « quantité actuellement valorisable » définit la quantité de matière pouvant être mise en valeur pour chaque filière dans le contexte économique actuel.
- La « faisabilité technique et économique » définit la faisabilité dans l'état actuel des choses. Ce critère est susceptible d'évoluer au cours du temps.
- La « demande actuelle » définit la demande du marché actuelle pour le produit. Ce critère est susceptible d'évoluer au cours du temps

Prix de la paille et du foin, source [20] / Prix bois, source [25] / la note de faisabilité technique et économique inclut la qualité du produit final

Matériau	Filière	Filière actuellement	Prix de vente pour l'AGC	Potentiel énergétique	Intérêt pour la fertilité	Quantité actuellement	Faisabilité technique et	Demande	Intérêt de cette
Materiau	rillere	utilisée	[CHF/t]	[MWh/t-MS]	des sols	valorisable [t/an]	économique	actuelle	filière
	Combustion directe	non	50-100	4,3		300 (MS)	+	-	++
'	Méthanisation	non	-118	2,15	+/-	450	+/-	+	-
	Fourrage	peu	150-200	0	+/-	100	+/-	-	+/-
'	Litière	peu	60-80	0	-	200	+	-	+
D. W.	Isolation	non	60-80	0		10	+	-	-
Paille	Compostage en installation	non	-90	0	++	450	+	+/-	+/-
	Compostage en bord de champ	oui	0	0	-	1300	++	-	-
	Pâturage direct	peu	0	0	-	inconnu	+	-	-
	Paillage des cultures	oui	0	0	+/-	200	++	+/-	++
	Artisanat	non	60-80	0		Marginale	++	-	-
Matériau de	Méthanisation	non	-118	<2	+/-	2600	-	+/-	
décapage	Epandage	oui	0	0	+/- à ++	2600	+	+/-	+
	Compostage	non	-90	0	++	2600	+	+/-	-
	Bois d'œuvre	non	180	0		Marginale	+	+/-	-
Bois	Copeaux	non	140	0	-	875	+		+/-
	Plaquettes	oui	140	5		875	++	+	++
Paille/décapage	Terreau	non	0	0	++	3000	+/-	-	+/-
Paille/bois	Pellets	non	80-120	4,4		2000	?	+/-	++

6 Recommandations

Au cours de cette étude, de nombreuses filières de valorisation des matériaux issus de l'entretien de la Grande Cariçaie ont été explorées et étudiées. Il apparait que des alternatives aux filières en place existent mais sont, pour la plupart, peu intéressantes, soit du point de vue financier, soit du point de vue énergétique, soit pour d'autres raisons.

6.1 Filières actuelles à conserver

La grande partie des filières actuelles, c'est-à-dire l'épandage de la matière décapée, la création de plaquettes de chauffage à partir de bois ainsi que le paillage et la récolte directe par les agriculteurs pour la paille sont donc bonnes. En effet, bien qu'elles ne permettent pas de générer de bénéfices, elles engendrent des coûts minimes, restent simples au niveau logistique et permettent de se débarrasser des matériaux tout en les mettant en valeur.

6.1.1 Epandage de la matière issue du décapage

Cette alternative permet l'exploitation des propriétés fertilisantes de cette matière sans devoir le transporter sur de grandes distances, sans processus de traitement et sans besoins de stockage prolongé. Les conseils pour l'épandage fournis dans le document de Sol-Conseil [4] sont bien entendu à prendre en compte.

Avantages

Par rapport au compostage, cette filière permet de réaliser des économies (transport et prise en charge par l'installation de compostage) et en énergie (transport). La faible densité du matériau et sa richesse en matière organique permettent d'améliorer la structure de la plupart des sols lourds.

Inconvénients

Sans maturation et épandu pur, le matériau n'est pas utilisé au mieux de son potentiel fertilisant. Un mélange avec des amendements riches en phosphates, potasses et magnésium permettrait d'y remédier.

6.1.2 Fabrication de plaquettes forestières

Il est conseillé de conserver la filière actuelle de valorisation du bois qui consiste en la fabrication de plaquettes pour le chauffage à distance. Le système en place fonctionne bien et de manière simple, avec une seule compagnie s'occupant de la collecte, de la transformation en plaquettes et de la revente du bois (et souvent aussi de la coupe). Le bois issu de l'entretien de la réserve, qui n'est en général pas d'une qualité suffisante pour d'autres usages, est valorisé d'une manière énergétiquement favorable.

Dans le cas où des pellets mixtes à base de paille des marais de la GC et de bois voyaient le jour, l'incorporation ou non de ce bois dans le processus devra être discuté. Cela n'est pas une nécessité absolue, vue l'offre relativement abondante de bois local à faible prix pouvant être mis en pellets.

6.2 Alternatives intéressantes

Malgré cela, cette étude a relevé quelques nouvelles filières qu'il vaudrait la peine d'étudier plus en détail. Elles pourraient permettre d'optimiser le potentiel des différents matériaux. Il serait notamment intéressant de se pencher sur l'idée de la combustion directe de la paille à la place du compostage fait par Eltel. En effet, la paille seule ne produit pas un compost de bonne qualité et nécessite un broyage préalable, ce qui consomme de l'énergie au lieu d'en fournir, comme le ferait la combustion.

6.2.1 Combustion directe

Il est recommandé d'explorer la filière de la combustion de la partie de la paille n'étant pas utilisée pour le paillage des cultures, soit par combustion directe des balles dans une chaudière conçue à cet effet, soit après mise en pellets dans des chaudières à pellets standards.

Pour la combustion des balles, il serait judicieux d'explorer en profondeur les différentes alternatives de chaudières et d'effectuer, si possible, des analyses d'émissions gazeuses et des tests de rendement dans une chaudière déjà en service. Cela peut néanmoins représenter un travail fastidieux et coûteux. Le fabricant peut éventuellement, dans ce cas, fournir des chiffres et accompagner l'association dans cette démarche.

L'idéal serait de signer un contrat avec le propriétaire d'une entreprise ou d'un groupement de résidences locaux, en phase de conception ou de rénovation, pour lui vendre la paille à faible prix, de sorte à ce qu'il économise de l'argent par kWh par rapport à l'achat d'une autre matière première, telle que le bois ou le mazout. Il serait par exemple envisageable, moyennant un peu de lobbying de la part de l'Association de la Grande Cariçaie auprès du groupe E, de la laiterie d'Estavayer ou du service de l'urbanisme d'Yverdon, de lancer des projets pilotes de chauffage industriel à la paille. Une possibilité serait par exemple d'installer une chaudière à paille pour le futur quartier gare-Lac d'Yverdon, dont le plan directeur vient d'être rédigé. Suite à un échange téléphonique avec M. John Aubert, responsable de l'urbanisme pour la ville d'Yverdon-les-Bains (voir Annexe 2 : contacts), il est ressorti que rien n'était encore prévu du point de vue du chauffage pour ce nouveau quartier, et que toute proposition était la bienvenue. Ce quartier devrait accueillir 3800 habitants, et d'après les calculs se trouvant dans le chapitre 4.1.1 « Combustion », il serait possible de fournir assez d'énergie, pertes comprises, pour pourvoir aux besoins en chauffage d'environ 200 personnes, si la totalité des 5000 balles issues de l'entretien de la GC étaient valorisées de la sorte (53 habitants en utilisant la paille qui termine actuellement à Cronay).

6.2.2 Pelletisation de la paille mélangée à du bois

En ce qui concerne la transformation en pellets, la première étape serait de mandater le laboratoire SIB de l'HES-SO Yverdon (voir Annexe 2 : contacts) pour effectuer les tests nécessaires. Il faut trouver une entreprise de la région (voir Annexe 2 : contacts) ayant la capacité de fabriquer ces pellets, en prenant garde aux prix de transport et de conception. Il s'agit ensuite de chercher des bâtiments équipés d'une chaudière à pellets, et de formuler un contrat de vente avec leurs propriétaires avant la fabrication de pellets en masse. Il faut avoir à l'esprit que de tels pellets, d'après la norme européenne des granulés de bois [27], seront forcément classés en « catégorie B », du fait de leur taux de cendres élevé et qu'ils ne sont pas constitués uniquement de bois. Cela implique qu'il n'est pas possible pour un privé de les brûler dans une chaudière individuelle, la classe B étant réservée à un usage dans des installations industrielles.

Avantages par rapport aux autres filières explorées

Par rapport à la méthanisation et au compostage qui ne se prêtent que moyennement à la paille et qui engendrent, de surcroit, des frais de prise en charge, la combustion permet d'écouler ce matériau de manière rapide tout en le valorisant sur le plan énergétique et en engendrant un bénéfice.

Inconvénients

Ces filières nécessitent un investissement pour l'association au niveau des tests à effectuer en laboratoire pour la combustion directe et pour la fabrication et la combustion de pellets. Il n'existe pas en Suisse, à l'heure actuelle, de centrale de chauffe qui puisse être alimentée directement par des balles de pailles. Un travail de design et de conception est donc à réaliser au préalable. Toutefois, des installations thermiques à base de paille de grande ampleur ont vu le jour récemment en Allemagne et en France, comme celle du Val de Vesle (Champagne-Ardenne), qui, avec sa puissance de 2800 kW, fournit de l'énergie pour 30'000 m² de serres [21]. En France, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie) soutient ce type de projets, et il devrait être possible de demander un soutien de l'OFEN pour lancer un projet du même genre.

6.3 Alternatives qui pourraient devenir intéressantes dans le futur

D'autres filières pourraient devenir avantageuses si le marché venait à changer. Par exemple, la fabrication de terreau à partir d'un mélange de paille et de matière décapée.

La fabrication d'un terreau certifié Grande Cariçaie, composé d'un mélange de paille et de matériau de décapage, est une excellente filière de valorisation du point de vue écologique et a fait ses preuves au niveau de la faisabilité technique. Cependant, le fait que le marché du terreau local soit déjà saturé [15], du fait de la concurrence exercée par les terreaux à moindre prix provenant de l'étranger, ne laisse d'autre choix que de se tourner vers la filière de valorisation déjà en place, à savoir l'épandage dans les champs avoisinants.

Il est conseillé de garder en réserve la possibilité de fabriquer du terreau au cas où le marché venait à évoluer, par exemple en cas d'interdiction totale de l'utilisation de tourbe des pays baltes, de façon à ce que la demande en terreaux suisses augmente. D'après M. Bapst [15], la viabilité économique d'une filière peut être évalue dans les trois à cinq ans suivant le lancement de celle-ci.

7 Remerciements

Nous aimerions remercier M.Michel Baudraz pour sa disponibilité et la patience dont il a fait preuve tout au long du projet. Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans le temps qu'il a consacré à répondre à nos questions.

Nous aimerions remercier le Professeur Marc Soutter pour son encadrement et ses conseils, qui nous ont mis sur la bonne voie pour l'exécution de ce travail.

Nous aimerions également remercier tous les professionnels du secteur avec qui nous avons pu avoir des contacts pour leurs savoir-faire, leur collaboration et leurs conseils qui nous ont permis de rédiger ce rapport. Merci en particulier à Mme Sandrine Tolivia, M. Julien Ropp, M.Raphael Bapst et M. Luc Germanier.

8 Bibliographie

- [1] Site internet officiel de la Grande Cariçaie: http://www.grande-caricaie.ch/spip/spip.php?rubrique4
- [2] Information donnée par M. Michel Baudraz, directeur du bureau exécutif de l'association de la Grande Cariçaie, lors des entretiens du 19 février, 11 Mars et 2 Avril 2014 et lors d'échanges de courriels entre février et mai 2014.
- [3] Site internet officiel de la Grande Cariçaie : http://www.grande-caricaie.ch/spip/spip.php?rubrique169
- [4] Valorisation agricole des matières organiques issues des décapages de la Grande Cariçaie », laboratoire et bureau d'études au service de l'agronomie et de la protection de l'environnement, Sol-Conseil SA, 7 février 2014
- [5] Perspectives de chauffage du Château de Champ-Pittet avec la paille des marais, Ligue Suisse Pour la Protection de la Nature (LSPN), Essertines juin 1982.
- [6] « l'utilisation de la végétation des marais de la rive sud du lac de Neuchâtel » rédigée en 1979
- [7] Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales
- [8] D'après des valeurs de « IPC, prix moyens mensuels pour 100 l de mazout pour des quantités types» de 2000 à 2014. De l'OFS (office fédérale de la statistique) : http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/05/02/blank/key/durchschnittspreise.html
- [9] D'après « Comparaison des prix moyenne par mois pour l'énergie de chauffage » de l'Union Pétrolière http://www.erdoel-vereinigung.ch/fr/heizenmitoel/peise/preisvergleichmonatsmittel.aspx
- [10] REFERENTIEL COMBUSTIBLE BOIS ENERGIE: LES PLAQUETTES FORESTIERES DEFINITION ET EXIGENCES (annexe 14), 25 avril 2008, Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par FCBA, Coordination technique: Elisabeth Le Net Pôle Economie, Energie et Prospective
- [11] Pouvoir calorifique des plaquettes et granulés de bois /Énergie grise, Energie-bois suisse, 21.04.2006 : http://www.energie-

bois.ch/fileadmin/user resources/publications/403energieinhalt graueEnergie DFI.pdf

Site internet de la Mission régionale bois énergie Provence-Alpes-Côte d'Azur : http://www.ofme.org/bois-energie/combustible.php

Triage et classification du bois énergie, Energie-bois suisse, janvier 2006 : http://www.energie-

bois.ch/uploads/tx ttproducts/datasheet/407klassierenEnergieholzF.pdf

- [12]Exemple de « Chaudières à plaquettes et à granulés KWB Powerfire 150 kW », KWB Kraft und Wärme aus Biomasse GmbH, 2006 : http://www.energie-service.ch/PDF/KWBPowerfire.pdf
- [13]Etude de la consommation d'énergie pour le chauffage sur la ville de Lausanne, *Les objectifs du projet « société à 2000W » sont-ils accessibles?,* Anouk André, Berthoud Coralie, Burckel Alice, Heraïef Alexis, EPFL 2008: http://cdh.epfl.ch/files/content/sites/cdh/files/shared/shs/ecopo interD chauffage.pdf
- [14] Biogas Production Potential from Reeds, Vilis Dubrovskis & Valters Kazulis, Latvia University of Agriculture Jelgava, 2012
- [15]Information fournie par M. Raphael Bapst, responsable du service de la clientèle romande d'Axpo Kompogaz, lors d'un entretien le 8 Mai 2014
- [16]Plan de Gestion 2012-2023 de la Grande Cariçaie, fiches 8.2 « Gestion et conservation des milieux et des espèces », Association de la Grande Cariçaie, 2014.
- [17] « Journal des sciences militaires des armees de terre et de mer, publie avec l ... Guillaume de Vauldoncourt Google Books ». 2014. Consulté le 17 mars.
- [18]La construction en botte de paille étude de faisabilité, Stéphane Fuchs, l'Atelier Bureau d'architectes SA, Mars 2009
- [19]Information obtenu de M. Julien Ropp, ingénieur et collaborateur scientifique pour le laboratoire SIB Systèmes Industriels de Bioénergie- de l'HES-SO Yverdon, lors d'un entretien le 1^{er} Mai 2014.
- [20]Synthèse Prix de la paille : Site internet de l'Union suisse des paysans, article : Les prix de la paille et du foin sont stables, *Commentaire du marché du 5 juillet 2013 dans le journal Agri :* http://www.sbv-usp.ch/fr/prix-marches/commentaires-du-marche/archive-2013/050713-prix-de-la-paille-et-du-foin/
- [21] Chauffage de serres à la paille de céréales dans une exploitation agricole au Val-de-Vesle, ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie), 2012
- [22]'Big Straw Boiler' Straw bale boiler 200/500/950 kW Straw Boiler, Topling biomass Boilers: http://www.toplingbiomassboilers.co.uk/biomass-heating-systems/big-straw-boiler/
- [23] BWE Biomass Biomass solutions for a world of Energy, Burmeister & Wain Energy A/S: http://www.bwe.dk/download/comp_brochures_pdf/bwe_biomass.pdf
- [24] Pour bois moyen avec taux d'humidité moyen : https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse volumique#Bois

[25]MARCHÉ SUISSE DU BOIS DE FEU ET DU BOIS D'ÉNERGIE - Prix 2013/2014, publiées par les associations Economie forestière Suisse, Entrepreneurs forestiers Suisse, Industrie du bois Suisse, Energie-bois Suisse et la Communauté d'intérêt des producteurs professionnels de bois-énergie, 2013 :

http://www.wvs.ch/fileadmin/user_upload/Holzmarkt/Preisempfehlungen/Energieholz preise/LF1113 mdb boisenergie.pdf

[26]Information fournie par Mme Sandrine Tolivia, directrice d'Eltel SA, d'un échange de courriel débuté le 17 mars 2014.

[27]Norme européenne des granulés de bois (EN 14961-2), ENplus : http://www.enplus-pellets.ch/fr/consommateurs/avantages-de-enplus.html

Annexes

Annexe 1 : divers modèles de chaudières à paille

L'entreprise danoise *Passat Energi A/S* construit des chaudières à paille de différentes puissances (des petites d'une puissance de 25 à 75 kW comme le modèle « Passat straw combustion boiler FK-HO » à des plus grandes atteignant des puissances jusqu'à 600 kW en alimentation continue comme le « HOU600 »). Une entreprise anglaise nommée Topling [22] en produit qui atteignent des puissances allant jusqu'à 950 kW. Au niveau du rendement de ces installations, les entreprises prônent différentes valeurs (Topling avance le chiffre de 83%). L'entreprise Alcon produit aussi des chaudières à paille de puissances variant entre 35 et 750 kW.

De très grandes installations alimentées à la paille existent également. La compagnie danoise Burmeister & Wain Energy A/S prévoit notamment de construire une centrale de 50MJ/s [23] (50'000 kW) en Allemagne pour alimenter une génératrice à vapeur et la ville de Emlichheim, ce qui démontre qu'il est possible de mettre en place cette technologie aussi en milieu urbain.

Annexe 2: contacts

- M. John Aubert (jau@ybl.ch +41244236248) responsable de l'urbanisme pour la ville d'Yverdon-les-Bains
- M. Julien Ropp (<u>julien.ropp@heig-vd.ch</u>, +41 24 55 773 91), collaborateur scientifique aux Systèmes Industriels de Bioénergie, HEIG-VD
- Catherine Brassaud (<u>brassaud@bluewin.ch</u>, +41 79 735 54 31), directrice du projet EcoParcelles
- BestPellets (+41 79 275 63 80), entreprise fabricant des pellets
- Comptoir agricole d'Orbe (<u>infos@cuendetfreres.ch</u>)
- Luc Germanier (<u>luc.germanier@ecorecyclage.ch</u>, +41 79 679 77 71), administrateur délégué chez Germanier Ecorecyclage SA
- Raphael Bapst (<u>raphael.bapst@axpo.com</u>, +41 79 935 61 12), responsable du service de la clientèle romande chez Axpo-Kompogas
- Neue Holzbau AG, Lungern, entreprise fabriquant des bâtiments en bois de frêne. Contact via formulaire de contact (http://www.neueholzbau.ch/en/kontakt)

Annexe 3 : tableau détaillé de la composition des décapages, des composts et des digestats

Annexe : tableau détaillé de la composition des décapages, des composts et des digestats

Elément	Unités	Teneurs moyennes des décapages	Teneurs min. des décapages *	Teneurs max. des décapages	Teneurs moyennes des composts**	Teneurs moyennes des digestats solides**	Limites ORRChim	Limites OAB****
Matière sèche	%	21.0	6.3	41.1				
Poids spécifique	kg MF/m ³	731.4	559.0	1082.0				
Densité apparente	kg MS/m ³	156.6	45.0	384.0		-		
Matière organique	% de MS	43.4	19.0	87.5		D/		
	kg/m ³	77.4	19.0	104.2	133.0	133.0		
Azote total	% de MS	14.9	4.8	42.0	17 - 12	1 10	1	
	kg/m ³	1.4	< 0,1	2.7	4.0	3.5		
Azote ammoniacal	% de MS	0.8	0.2	2.2	1	100	1	
	kg/m³	0.1	0.0	0.2	0.1	0.7		
Azote disponible calculé	% de MS	4.4	1.3	11.9		A		
	kg/m ³	0.4	0.0	0.8	- Control	All		
Phosphates P ₂ O ₈	% de MS	3.3	0.9	16.4	700	1007		
	kg/m ³	0.3	0.0	1.9	1.7	1.7	46	
Potasse K₂O	% de MS	1.8	0.8	4.8				
	kg/m ³	0.2	0.0	0.4	3.6	2.8		
Calcium	% de MS	56.6	11.3	155.7	1			
	kg/m ³	8.3	0.0	49.5	22.8	25.5		
Magnésium	% de MS	4.5	1.3	6,4	W			
	kg/m ³	0.6	0.0	2.2	2.1	1.5		
Rapport carbone-azote	C/N	19.7	4.2	25.6	-			
рН	H ₂ O	7.5	6.9	8.1				
Salinite	micro_S	371.6	174.0	539.0				
Cadmium	ppm	0.4	0.2	1.1			1	0.7
Nickel	ppm	17.2	7.6	34.4			30	25
Chrome	ppm	19.1	5.9	30.2				70
Cuivre	ppm	26.8	6.6	102.8			100	70
Plomb	ppm	30.0	12.6	107.6			120	45
Zinc	ppm	144.2	41.2	628.0			400	200
*données basées sur l'anat **selon directives Suisse 20 ***Ordonnance fédérale su ***Ordonnance du DEFR su	yses de 22 010 de la bra r la réductio	échantillons m anche sur la qu n des risques l	esurés par Sol ualité du compo	-Conseil entre	2008 et 2013 tat		400	2

Figure 4 : source: Rapport sol-conseil [4]