



Mai  
2020

# VALORISATION DE DECHETS VERTS LIGNEUX : PROCEDES DE PRETRAITEMENT ET TESTS DE TRANSFORMATION THERMOCHIMIQUE

## VALOCHIPS

### Synthèse

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



## REMERCIEMENTS

Le consortium de ce projet ADEME remercie le comité de pilotage composé de :  
Alice FAUTRAD (ADEME)

Il souhaite également remercier l'ensemble des partenaires ayant participé à ce projet :

Aurélié BRUNET (BRALEY)  
Mylène LAURENS (BRALEY)  
Jean Michel COMMANDRE (CIRAD)  
Anthony BENOIST (CIRAD)  
Redouan SAIAH (GREEN RESEARCH)  
Oussama ZAKI (GREEN RESEARCH)  
LUCIA GIMENEZ (LLT)  
Vincent NAUDY (RAGT ENERGIE)  
Matthieu CAMPARGUE (RAGT ENERGIE)  
Cloé CARRIERE (RAGT ENERGIE)

## CITATION DE CE RAPPORT

Jean-Michel COMMANDRE, Anthony BENOIST, Redouan SAIAH, Cloé CARRIERE, Vincent NAUDY. 2020. VALOCHIPS – VALOrisation de déCHets verts lIgneux : Procédés de prétraitement et testS de transformation thermochimique. 281

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1703C0045

Étude réalisée par Aurélié BRUNET (BRALEY), Mylène LAURENS (BRALEY), Jean Michel COMMANDRE (CIRAD), Anthony BENOIST (CIRAD), Redouan SAIAH (GREEN RESEARCH), Oussama ZAKI (GREEN RESEARCH), Lucia GIMENEZ (LLT), Cloé CARRIERE (RAGT ENERGIE), Vincent NAUDY (RAGT ENERGIE), Matthieu CAMPARGUE (RAGT ENERGIE) pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : RAGT ENERGIE

Appel à projet de recherche : GRAINE (édition 2016)

Coordination technique - ADEME : FAUTRAD Alice

Direction/Service : Forêt Alimentation Bioéconomie



# SOMMAIRE

1	Introduction .....	5
2	Contexte & Objectifs de l'étude .....	5
3	Méthodologie générale .....	6
4	LOT 2 : « Etude des flux matière » .....	7
4.1	Objectif & Organisation du lot 2 .....	7
4.2	Méthodologie du lot .....	7
4.3	Résultats du lot 2 .....	8
4.3.1	Etude de la provenance .....	8
4.3.2	Etude de la saisonnalité .....	9
4.4	Conclusions sur le lot 2 .....	10
5	LOT 3 : « Procédé de Broyage/Stockage/Criblage » .....	10
5.1	Objectif & Organisation du lot 3 .....	10
5.2	Méthodologie du lot 3 .....	10
5.3	Résultats du lot 3 .....	15
5.3.1	Etude du tri en amont .....	15
5.3.2	Etude de l'étape de broyage .....	15
5.3.3	Etude de l'étape de maturation .....	16
5.3.4	Etude de l'étape de criblage .....	17
5.3.5	Etude du bilan matière .....	18
5.4	Conclusions sur le lot 3 .....	18
6	LOT 4 : « Procédé de Dépollution » .....	19
6.1	Objectif & Organisation du lot 4 .....	19
6.2	Méthodologie du lot 4 .....	19
6.3	Résultats du lot 4 .....	19
6.4	Conclusions sur le lot 4 .....	20
7	LOT 5 : « Validation en procédés de combustion » .....	22
7.1	Objectif & Organisation du lot 5 .....	22
7.2	Essais en combustion à échelle laboratoire .....	23
7.3	Méthodologie des essais en combustion sur chaudière à grille, à échelle pilote .....	24
7.3.1	Méthodologie des essais .....	24
7.3.2	Résultats des essais .....	26
7.3.3	Conclusions des essais .....	27
8	LOT 6 : « Analyses environnementale et réglementaire » .....	27
8.1	Objectif & Organisation du lot 6 .....	27
8.2	L'Analyse du Cycle de Vie (tâche 6.1 et 6.2) .....	27
8.3	Etude réglementaire (tâche 6.3) .....	28
8.3.1	Méthodologie de l'étude réglementaire .....	28
8.3.2	Résultats de l'étude réglementaire .....	29
8.3.3	Conclusions de l'étude réglementaire .....	29
9	Etude technico-économique (tâches 3.4 et 4.3) .....	31
10	Conclusion .....	34

Index des tableaux et figures.....	36
Sigles et acronymes .....	37

## 1 Introduction

Le programme VALOCHIPS a consisté à chercher un nouveau procédé de séparation de la matière ligneuse des déchets verts, pour une valorisation énergétique en combustion. Ce procédé avait pour but l'obtention de plaquettes ligneuses conformes à la norme ISO 17225 – 4 (norme sur les plaquettes de bois non industrielles) ou 17225-9 (norme sur les plaquettes de bois industrielles).

## 2 Contexte & Objectifs de l'étude

Actuellement, plus de 90% de la valorisation énergétique du bois s'opère par combustion. Ce moyen de conversion thermochimique a acquis une grande maturité technologique au fil des ans pour le traitement du bois mais des développements pour le traitement de la biomasse cellulosique restent encore à faire. Les travaux du programme VALOCHIPS, s'inscrivent dans une démarche de valorisation et de prétraitement des déchets verts en extrayant leur fraction ligneuse en tant que ressource énergétique. Les déchets verts sont des déchets végétaux résultant de l'entretien des espaces publics et privés, souvent collectés par le biais de déchetteries. Ce gisement représente près de 4 millions de tonnes par an au niveau national. Des indésirables (pierres, métaux, plastiques) peuvent être présents dans la matière ce qui entraîne une usure prématurée des systèmes de traitement ainsi que des problèmes de combustion.

Afin de mener à bien cette étude, 5 partenaires se sont engagés auprès de l'ADEME : Green Research, le CIRAD, BRALEY, Leroux et Lotz Technologie et RAGT Energie.

La présente étude a pour objectif de définir une nouvelle solution de valorisation des déchets verts pouvant être adaptée facilement à tous les territoires. Cette solution de valorisation devra comprendre un procédé de prétraitement permettant :

- De séparer la majorité des contaminants,
- D'extraire une matière ligneuse de qualité
- D'assurer une matière stable et homogène dans le temps



Figure 1 : Tas de déchets verts non préparés



Figure 2 : Broyeurs de l'entreprise BRALEY

### 3 Méthodologie générale

Le programme VALOCHIPS s'est articulé autour de six lots. Le premier d'entre eux permettait le management du programme dans son intégralité. Ensuite, le lot 2 « Etude des flux matières » a permis de sélectionner un gisement de déchets verts. Le lot 3 a permis la définition d'un procédé de prétraitement comportant des étapes de broyage, maturation et criblage en adéquation avec le gisement de déchets verts. Le lot 4 quant à lui a permis d'observer la pertinence d'une ligne de dépollution dans le procédé. Enfin, les lots 5 et 6 ont permis de valider ce procédé et la matière produite : le lot 5 a permis la validation de la matière lors d'essais en combustion et le lot 6 a permis de valider son utilisation en étudiant son impact sur l'environnement et son respecter des valeurs limites d'émissions réglementaires. La méthodologie générale de l'étude est présentée plus en détail par le synoptique suivant.

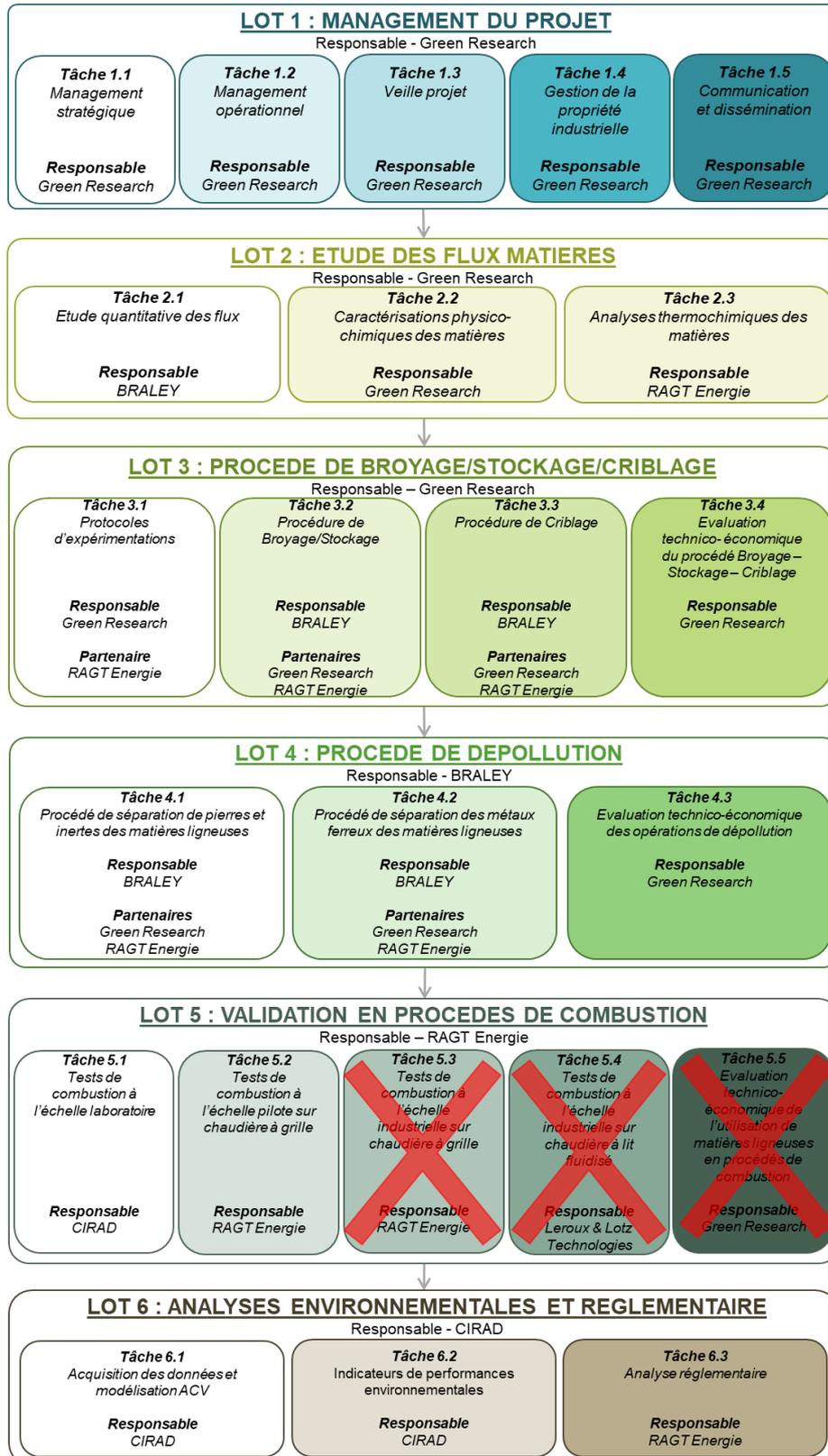


Figure 3 - Synoptique présentant la méthodologie générale de l'étude

À la suite de la réunion téléphonique du 18/02/2020, 2 tâches du lot 5 ont été supprimées (tâches 5.3, combustion sur chaudière biomasse à grilles mobiles de 1 à 10 MW et 5.4, combustion sur chaudière à lit fluidisée de 2MW de la plateforme INNOV'Energy de LLT). En effet, il était initialement prévu de tester la fraction ligneuse des déchets verts préparée et dépolluée sur ces installations industrielles. Cependant, la mise en route de la nouvelle ligne de dépollution a connu des difficultés liées à l'installation de tapis de convoyeur ignifugés (les tapis, plus épais que les précédents, ont entraîné une surchauffe des moteurs sous-dimensionnés). Il a donc été impossible de traiter et de fournir les quantités de biocombustibles nécessaires.

## 4 LOT 2 : « Etude des flux matière »

### 4.1 Objectif & Organisation du lot 2

Le lot 2 du programme de recherche VALOCHIPS a eu pour objectif de caractériser les déchets verts utilisés dans le cadre de l'étude.

Pour cela, ce lot a comporté trois tâches différentes. La tâche 2.1 est une tâche de caractérisation des déchets verts durant laquelle le gisement est trié et séparé en fraction (branchages, tailles de haies, fines, ...) Les tâches 2.2 et 2.3 permettent de caractériser l'ensemble des échantillons étudiés sur le plan physico-chimique et thermochimique. Pour cela, les analyses présentées dans le tableau suivant ont été réalisées.

Tableau 1 : Analyses thermochimiques et chimiques réalisées par RAGT Energie

Analyse Thermochimique des échantillons des lots de production			
Catégorie	Type d'analyse	Unités	Méthode analytique
Conformité NF EN ISO 17225	Humidité à réception	%M	NF EN 14774-1 et NF EN 14774-2 Séchage à l'air à 105°C jusqu'à poids constant
	Teneur en cendres à 550°C	%MS	NF EN 14775 et ISO 18122
	Pouvoir Calorifique PCS sur brut, PCS sur sec, PCI sur brut, PCI sur sec	kWh.kg <sup>-1</sup>	NF EN 14918 ou ISO 18125 Combustion dans calorimètre Mesure de la quantité de chaleur dégagée
	Teneur en azote	%MS	NF EN ISO 16948
	Teneur en soufre	%MS	NF EN ISO 16994
	Teneur en chlore	%MS	NF EN ISO 16994

Ce lot est ainsi une étude de typologie, de saisonnalité et de provenance réalisée sur un total de 10 échantillons.

### 4.2 Méthodologie du lot

Pour permettre la sélection du gisement de déchets verts optimal, la méthodologie présentée dans le synoptique de la page suivante a été appliquée. A chaque période (Printemps, Été, Hiver), 3 gisements ont été étudiés (professionnel, urbain, rural). Un quatrième gisement a été étudié au Printemps mais n'a pas été retenu pour les saisons suivantes en raison de l'hypothèse faite initialement dans ce projet selon laquelle la fermentation ayant eu lieu durant le compostage aurait pollué les fractions ligneuses.

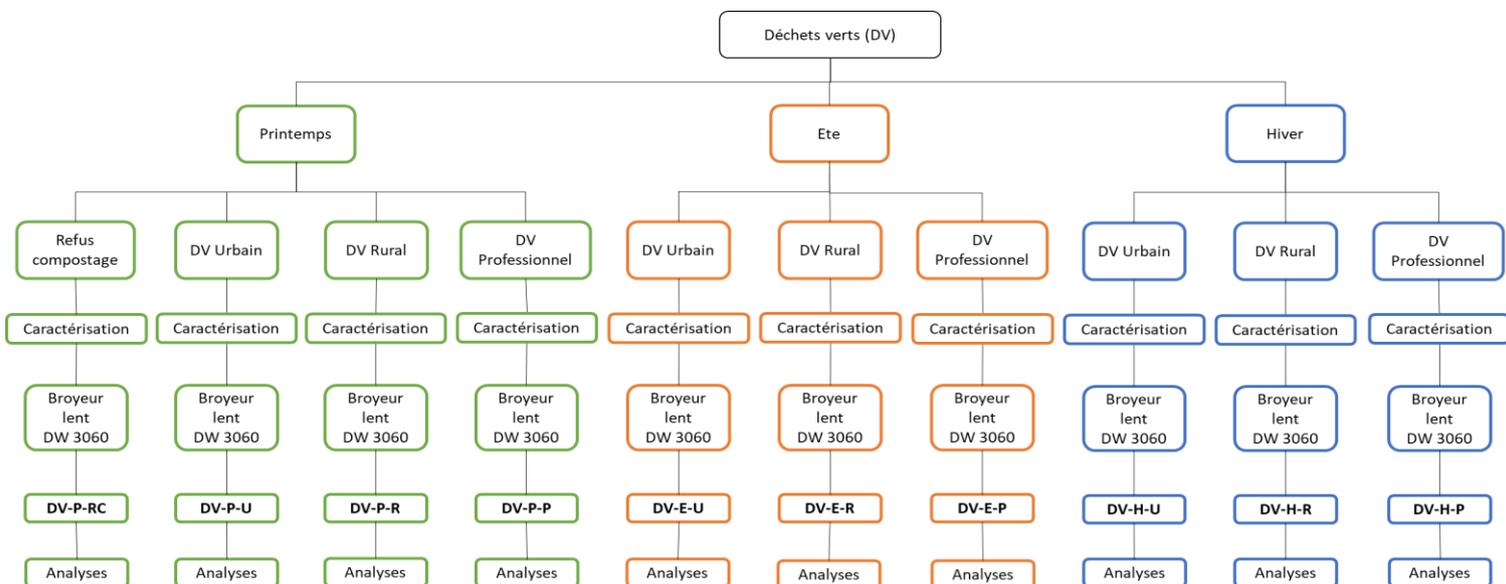


Figure 4 - Synoptique du lot 2

### 4.3 Résultats du lot 2

#### 4.3.1 Etude de la provenance

Les résultats moyens des analyses thermochimiques réalisées sont présentés ci-dessous.

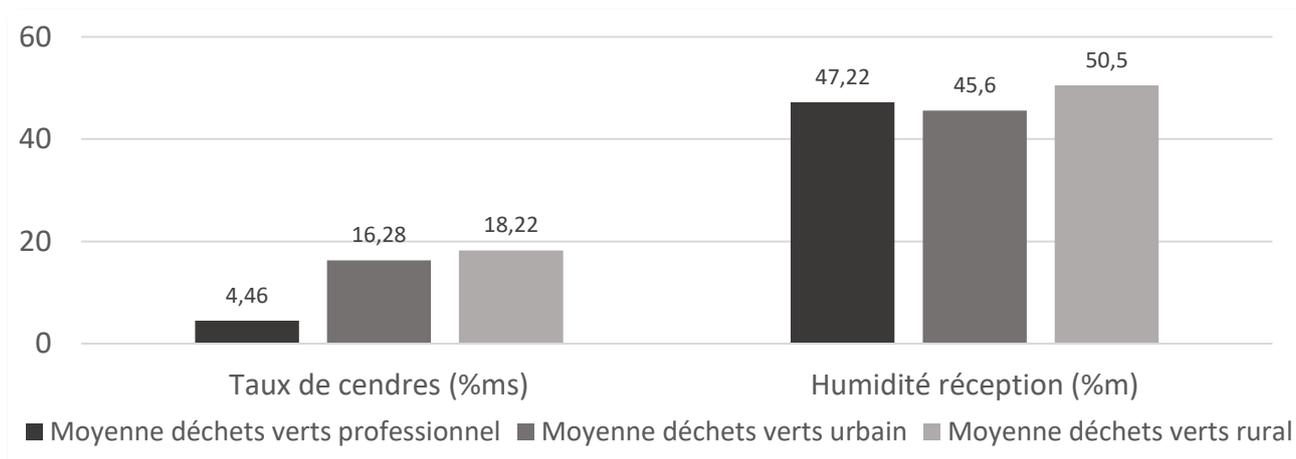


Figure 5 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étude de provenance

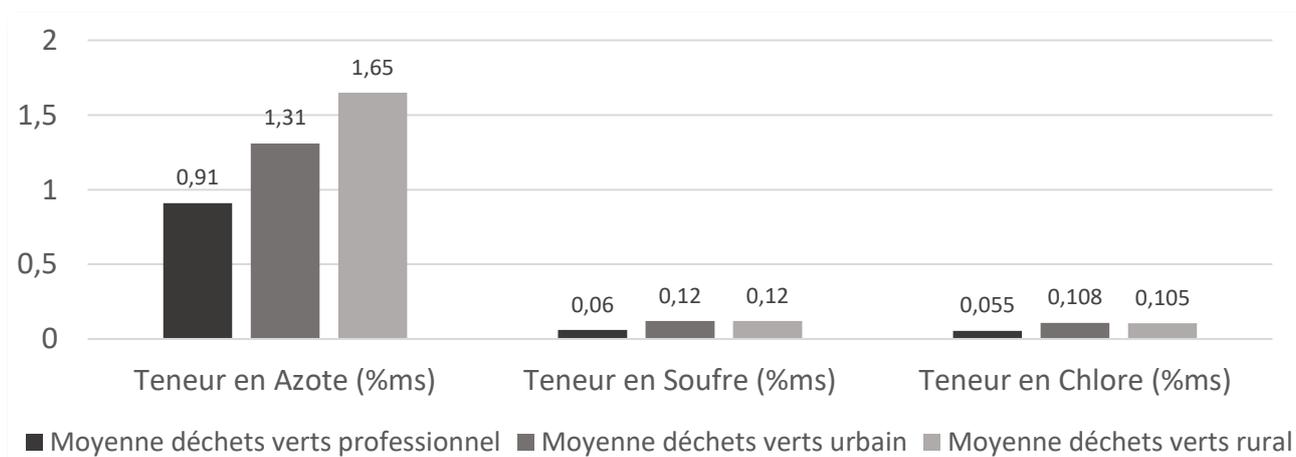


Figure 6 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étude de provenance

Concernant la provenance, il a été observé, grâce aux résultats ci-dessus, que le gisement professionnel semblait être le plus intéressant dans cette étude. En effet, il semble produire des échantillons avec des teneurs plus faibles.

Cependant, peu d'échantillons étudiés ont semblé être conformes aux normes étudiées (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) dont les seuils sont présentés ci-dessous.

Tableau 2 : Récapitulatif des seuils des normes étudiées dans le cadre de VALOCHIPS

	Taux de cendres anhydre	Teneur en humidité à réception	Teneur en Azote	Teneur en Soufre	Teneur en Chlore
Unités	%m	%ms	%ms	%ms	%ms
NF EN ISO 17225-4 A1	≤ 25%	≤ 1,0%	SO	SO	SO
NF EN ISO 17225-4 A2	≤ 35%	≤ 1,5%	SO	SO	SO
NF EN ISO 17225-4 B1	Valeur à mentionner	≤ 3,0%	≤ 1,0	≤ 0,1	≤ 0,05
NF EN ISO 17225-9 I1	≤ 45%	≤ 3,0%	≤0,5	≤0,05	≤0,05
NF EN ISO 17225-9 I2	≤ 50%	≤ 5,0%	≤1	≤0,1	≤0,05
NF EN ISO 17225-9 I3	≤ 55%	≤ 6,0%	≤1	≤0,1	≤0,1
NF EN ISO 17225-9 I4	≤ 60%	≤ 7,0%	≤1,5	≤0,1	≤0,1

### 4.3.2 Etude de la saisonnalité

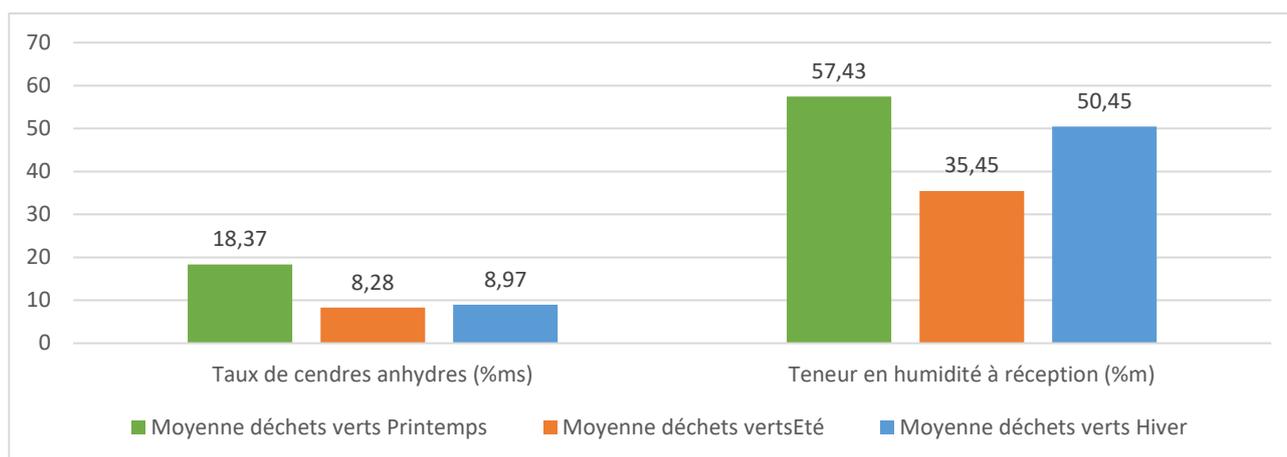


Figure 7 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étude de provenance

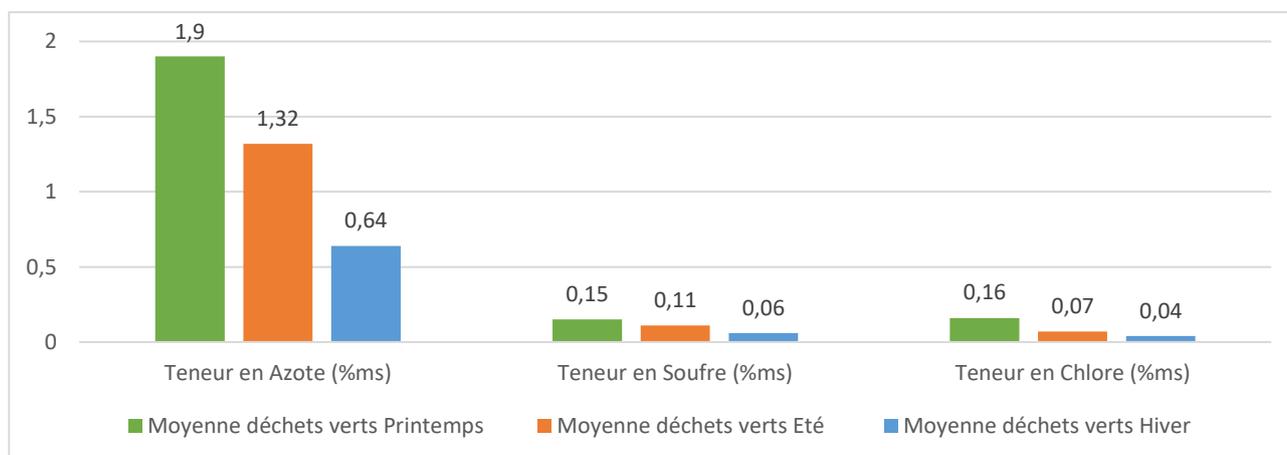


Figure 8 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étude de provenance

Concernant la saisonnalité, il a été observé, grâce aux résultats ci-dessus, que le gisement hivernal semblait être le plus intéressant dans cette étude. En effet, il semble produire des échantillons avec des teneurs plus faibles. En effet, la présence plus faible de feuille et de tontes à cette période de l'année semble favoriser des

taux de cendres et teneurs en Azote plus faibles. Néanmoins, le gisement étudié reste intéressant pour les mêmes raisons.

Cependant, la majorité des échantillons ont semblé ne pas être conformes aux normes étudiées (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) dont les seuils sont présentés dans le Tableau 2 (page 9).

#### 4.4 Conclusions sur le lot 2

Pour conclure sur le lot 2, l'étude de provenance a démontré que le gisement professionnel semblait présenter de meilleurs résultats. Cette observation pourrait s'expliquer par le fait qu'un tri sur les déchets verts est opéré par les professionnels pendant leurs chantiers. De plus, l'étude de saisonnalité a montré que le gisement hivernal semblait être celui présentant les teneurs les plus faibles. Néanmoins, le gisement étudié reste intéressant pour les mêmes raisons.

Cependant, la grande majorité des échantillons étudiés durant cette étape de caractérisation et de sélection des gisements ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) dont les seuils sont présentés dans le Tableau 2 (page 9). Un prétraitement de la matière est donc indispensable afin d'améliorer la qualité thermo-chimique par l'extraction des fractions ligneuses.

## 5 LOT 3 : « Procédé de Broyage/Stockage/Criblage »

### 5.1 Objectif & Organisation du lot 3

L'objectif du lot 3 du programme de recherche VALOCHIPS est de définir le procédé de prétraitement en adéquation avec la matière étudiée. En effet, ce lot doit permettre la sélection d'un procédé améliorant la qualité de la matière brute par une succession d'étape : broyage, maturation, criblage. Pour cela, le lot est composé de quatre tâches. La tâche 3.1 a permis d'établir les protocoles d'expérimentation. Les tâches 3.2 et 3.3 ont permis respectivement de déterminer les procédures d'essais de broyage, maturation et criblage. Ces procédures permettent de sélectionner les technologies de broyage et de criblage ainsi que le temps de maturation les plus efficaces. La tâche 3.4 est une étude technico-économique de l'ensemble du procédé de broyage/stockage/criblage.

### 5.2 Méthodologie du lot 3

Pour ce lot, les échantillons ont été prélevés sur deux périodes : Juillet 2018 et Février 2019 et les essais menés pour les tâches 3.2 et 3.3 ont été séparés en trois tests permettant de comparer les associations de technologies de broyage et de criblage. Une étude complémentaire a été menée sur l'impact d'un tri en amont du procédé permettant d'obtenir un gisement entrant avec au moins 30% de fraction ligneuse.

Dans ce lot, ont donc été étudiés :

- Deux technologies de broyage : un broyage rapide représenté par les broyeurs Doppstadt AK530 (grille déchets verts 350mm) et AK635 (grille bois 150mm) et un broyage lent représenté par un broyeur METSO 4000 (sans grille)
- Quatre temps de maturation : 0 jour, 5 jours, 10 jours et 30 jours
- Deux technologies de criblage : un criblage étoile avec un crible KOMPTECH Multistar L3 et un criblage trommel avec un crible Doppstadt SM518.

Les deux broyeurs rapides sont des broyeurs à fléaux permettant de broyer différentes matières à l'aide de grilles allant de 30 à 400mm pour le AK530 et de 30 à 280 mm pour le AK635. Ces broyeurs ont un débit théorique élevé et un système d'alimentation robuste les destinant au traitement des déchets. Leur masse d'inertie importante, leur rotor de broyage et leurs fléaux remplaçables les rendent fiables et pratiques. Leurs caractéristiques sont présentées plus en détail dans le tableau de la page suivante.

Tableau 3 : Caractéristiques des broyeurs rapides

	<b>DOPPSTADT AK635</b>	<b>DOPPSTADT AK530</b>
Poids total (kg)	<b>32 000</b>	<b>25 000</b>
Entrainement	Moteur diesel	Moteur Diesel
Puissance (kW)	480	390 (à 2000 tours/min)
Couple max. (Nm)	1 300	1 300
Largeur de rotor (mm)	1 690	1 700
Diamètre de rotor (mm)	1 100	1 200
Longueur de convoyeur (mm)	7 000	6 150
Largeur de convoyeur (mm)	1 500	1 500
Vitesse de la bande (m/s)	225	225
Nombre de marteaux/dents	36	36
Grille utilisée (mm)	Bois (150mm)	Déchets verts (350mm)
Débit théorique (tonnes/h)	<i>Variable selon la matière, la granulométrie et le mode de chargement</i>	<i>Variable selon la matière, la granulométrie et le mode de chargement</i>



Figure 9 : Broyeurs rapides DOPPSTADT AK 530 et AK 635

Le broyeur lent METSO 4000M&J PreShred un broyeur lent à couteaux doté d'une table de coupe ouverte. Ce type de broyeur est utilisé sans grille puisque la granulométrie des particules en sortie du broyeur est liée au nombre de couteaux et contre-couteaux présents dans l'appareil. Ainsi, moins il y a de couteaux, plus la taille des particules sera élevée. Le broyeur METSO 4000 M&J est disponible en 8, 9, 10 ou 12 couteaux. Dans le cadre de l'étude, seul le broyeur à 8 couteaux a été étudié et ses caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Caractéristiques du broyeur lent METSO M&J PreShred 4000M

<b>Broyeur</b>	
Poids total (kg)	<b>35 000</b>
Entrainement	Moteur Diesel
Puissance (kW)	2 x 160
Couple (Nm)	6 700
Débit théorique (tonnes/h)	<i>Variable selon la matière, la granulométrie et le mode de chargement</i>
Nombre d'arbres	2
Largeur (mm)	2 420
Diamètre (mm)	1 273
Vitesse (tours/min)	16 – 41
Nombre de couteaux par arbre	8
Grille standard	Pas de grille



Figure 10 : Broyeur lent METSO M&J PreShred 4000M

Le crible KOMPTECH Multistar L3 est un crible permettant de réaliser un criblage étoile, une des solutions les plus performantes dans le prétraitement des déchets verts. Cette technologie de crible, est équipée de plusieurs arbres eux-mêmes dotés d'étoiles en caoutchouc qui transportent la matière horizontalement. L'écart entre les doigts de ces étoiles est variable ce qui permet de séparer les différentes fractions. Les particules ne pouvant pas traverser les premières étoiles composent donc la fraction grossière et celle passant au travers de toutes les étoiles y compris celles avec le plus petit espacement entre les doigts composent la fraction fine.

La modification de la vitesse de rotation des étoiles permet de gérer la taille des particules des fractions de sortie. En effet, en seulement quelques secondes, le réglage avec le convertisseur de fréquence, offre la possibilité de changer de granulométrie.



Figure 11 : Schéma de fonctionnement du crible étoile KOMPTECH Multistar L3



Figure 12 : Crible étoile KOMPTECH Multistar L3

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques de ce crible.

Tableau 5 : Caractéristiques du crible étoile KOMPTECH Multistar L3

Poids total (kg)		19 000
Entrainement		Moteur diesel
Puissance (kV/A)		75
Débit théorique (tonnes/h)		<i>Variable selon la matière, la granulométrie et le mode de chargement</i>
Granulométrie	Fraction fine	0 – 25 mm
	Fraction intermédiaire	25 – 60 mm
	Fraction grossière	> 60 mm

Le crible trommel, aussi appelé crible à tambour ou crible rotatif, permet de séparer par taille les déchets.

Le Cribleur DOPPSTADT SM 518 permet de cribler plusieurs types de matières avec des granulométries différentes. Il possède un système de changement rapide de l'insert de crible, avec une large trémie de chargement 5 m<sup>3</sup> et un contrôle électronique de la charge, pour obtenir des résultats performants de criblage et de hauts débits.

Le cribleur DOPPSTADT SM 518 se prête aussi bien au criblage de compost et de terres, comme au criblage de gravats légers, de bois, de biomasse, de sable et de gravier. Le tableau ci-dessous présente ces principales caractéristiques. A l'inverse du crible étoile, il est nécessaire de changer l'insert de crible (grille) afin de modifier les granulométries des fractions grossières et fines.

Tableau 6 : Caractéristiques du crible trommel DOPPSTADT SM 518

Poids total (kg)		17 000
Entrainement		Moteur diesel
Puissance (Kw)		55
Débit théorique (tonnes)		
Vitesse de rotation (Nm)		Max. 300
Diamètre de maille (mm)		100
Type de maille		Ronde
Aire de criblage (m <sup>2</sup> )		22,5
Vitesse de rotation du tambour (min <sup>-1</sup> )		0 - 21
Granulométrie (mm)	Fraction fine	0 - 100
	Fraction grossière	>100
Débit théorique (tonnes/h)		<i>Variable selon la matière, la granulométrie et le mode de chargement</i>

Le plan d'essai (avec les 3 TEST) est détaillée dans le synoptique ci-dessous.

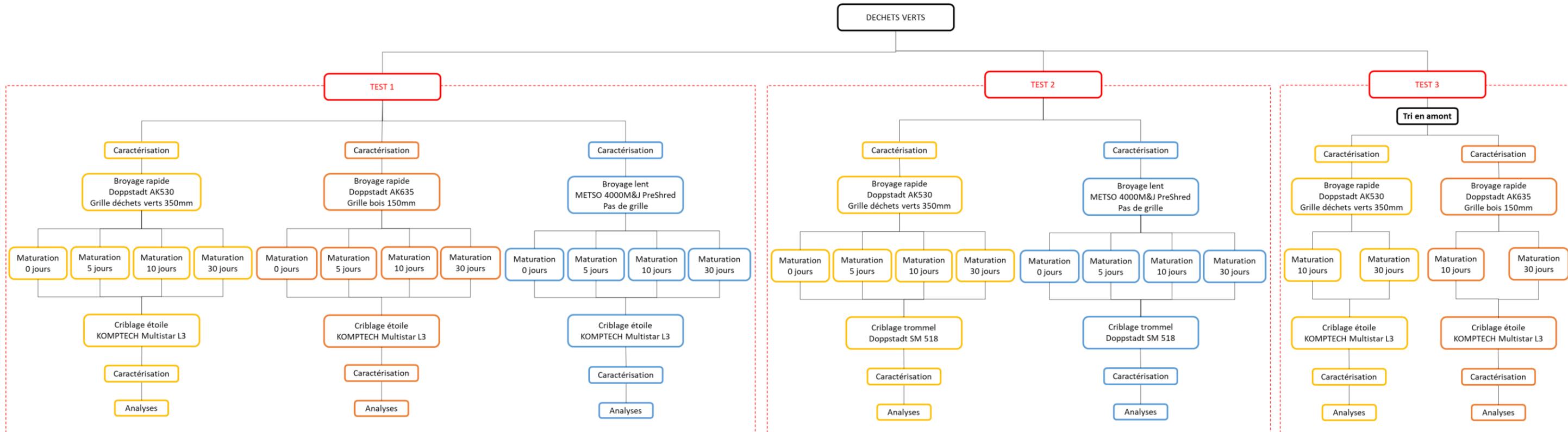


Figure 13 : Synoptique des essais réalisés pour le LOT 3

### 5.3 Résultats du lot 3

#### 5.3.1 Etude du tri en amont

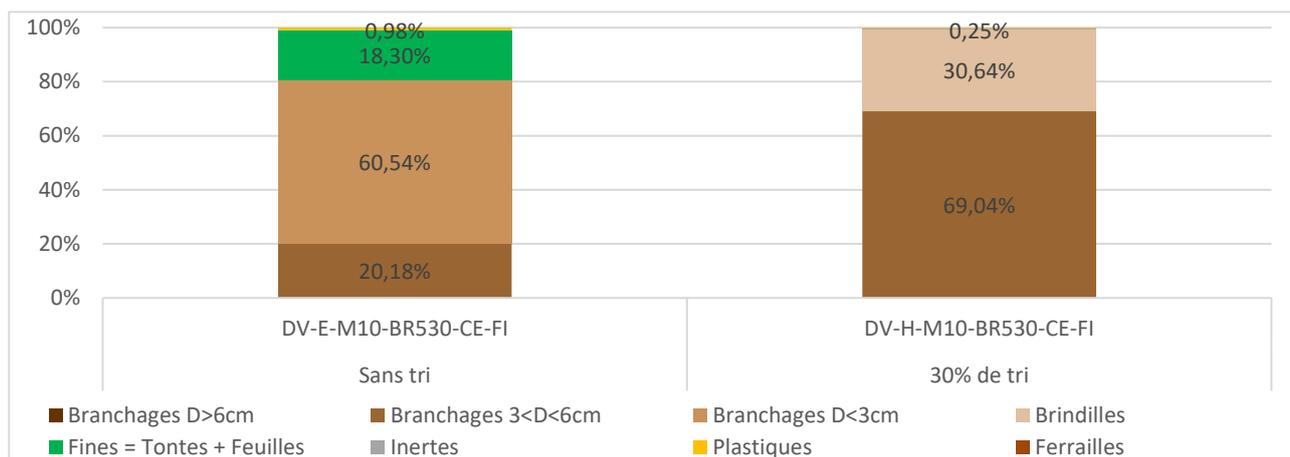


Figure 14 - Résultats de l'étude du tri en amont

Concernant le tri en amont, son étude a été faite via la comparaison de deux échantillons ayant subi le même prétraitement (broyage rapide avec le broyeur AK530, 10 jours de maturation, criblage étoile). Suite à la caractérisation de ces échantillons, il a été possible d'observer qu'un tri en amont du procédé permettant de retenir au moins 30% de bois dans l'échantillon était bénéfique quant à la teneur en fractions d'intérêt (branchages de diamètre inférieur et supérieur à 6 cm, taille de haies de diamètre inférieur et supérieur à 6 cm) dans la matière en sortie du procédé de prétraitement.

#### 5.3.2 Etude de l'étape de broyage

Afin d'étudier l'étape de broyage, seules les associations avec le crible étoile ont été comparées pour mettre en avant l'impact des broyeurs. Pour cette comparaison, seuls les résultats obtenus pour le TEST 1 et TEST 2 ont été utilisés. En effet, le TEST 3 présente un tri en amont à 30% pouvant influencer les résultats. Les différents tests sont présentés sur la Figure 13 (page 14).

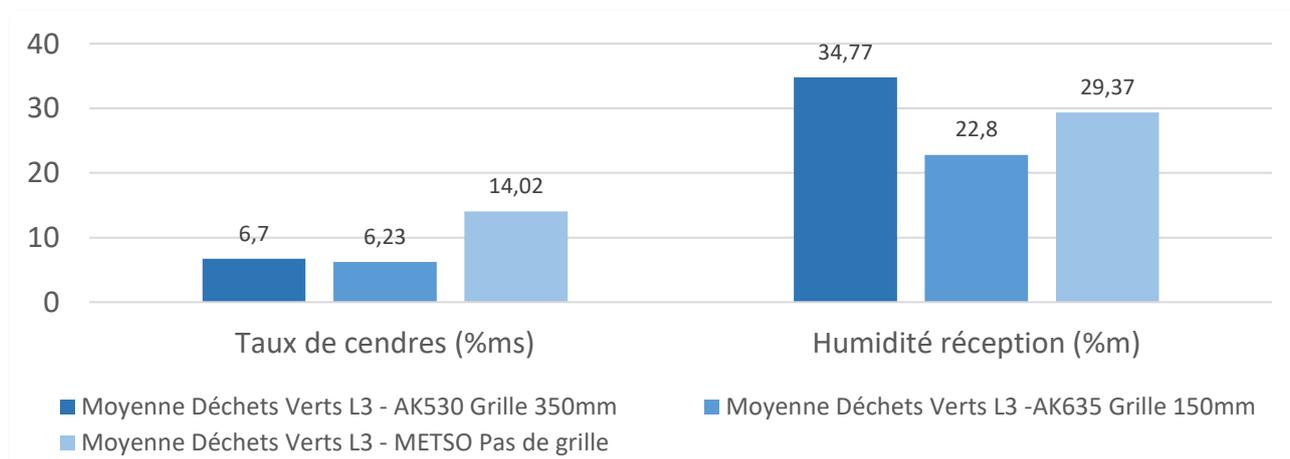


Figure 15 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de broyage

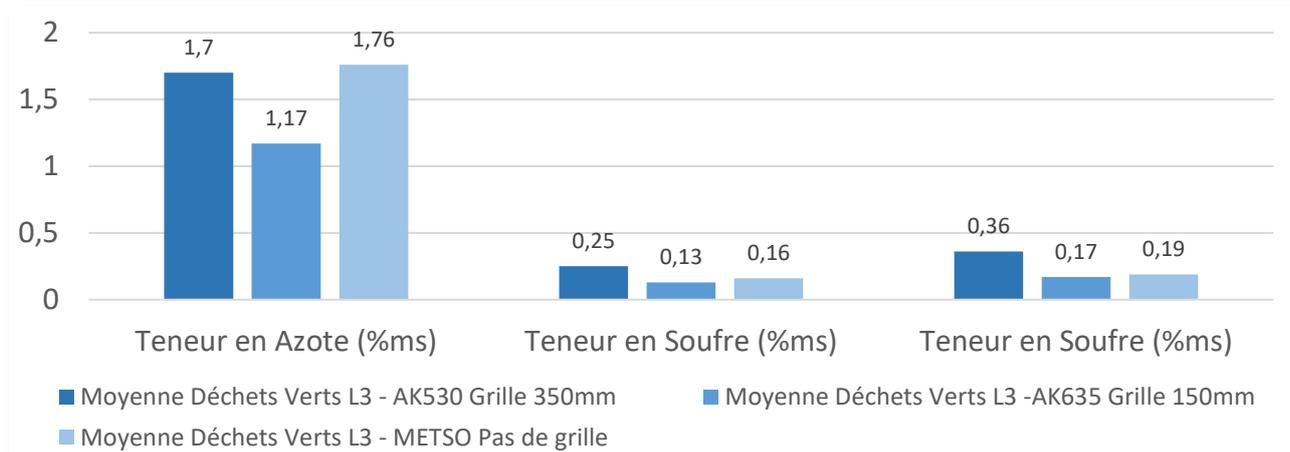


Figure 16 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de broyage

Concernant l'étape de broyage, il a été constaté qu'aucune tendance ne semblait se dessiner vis-à-vis des teneurs en humidité à réception, en Soufre et en Chlore. Cependant, les teneurs en cendres et en Azote, semblent montrer qu'un broyage rapide est préférable à un broyage lent puisqu'il favorise des teneurs plus faibles.

Néanmoins, la grande majorité des échantillons étudiés durant cette étape ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) et ce, peu importe le prétraitement subi. Les seuils des normes étudiées sont renseignés dans le Tableau 1 (page 7).

### 5.3.3 Etude de l'étape de maturation

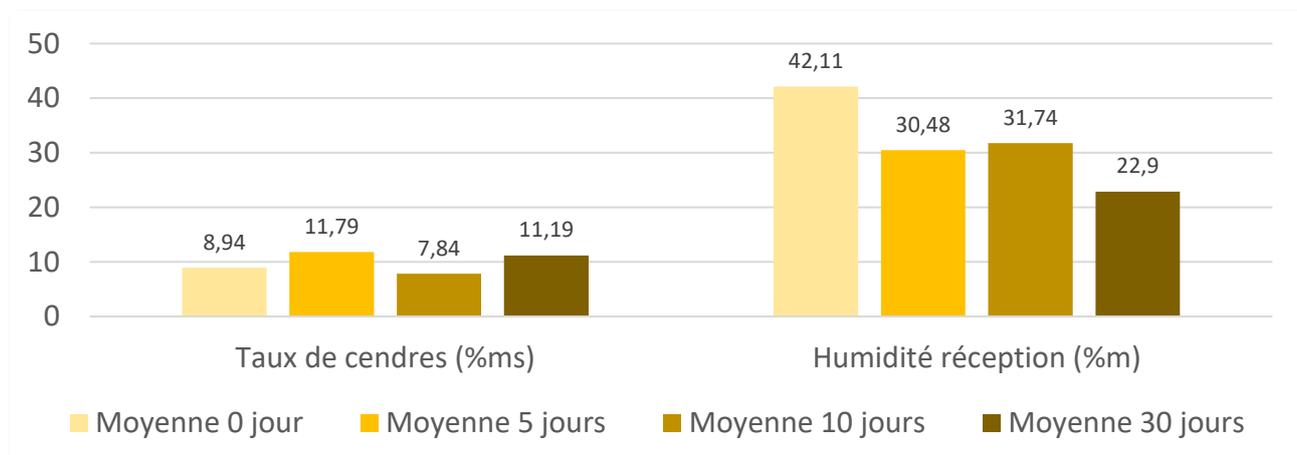


Figure 17 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de maturation

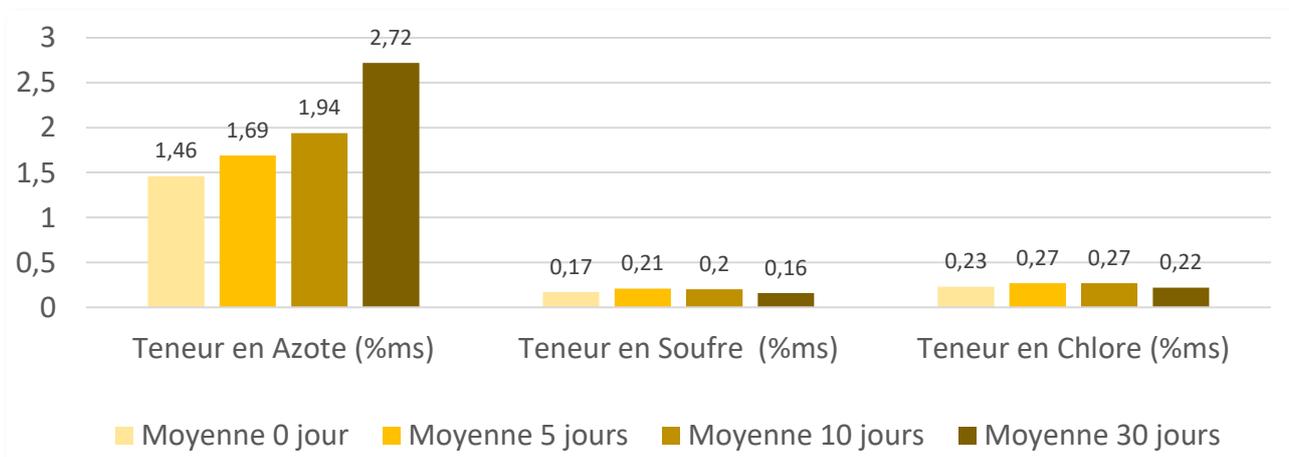


Figure 18 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de maturation

Concernant l'étape de maturation, aucune tendance n'a pu être constatée vis-à-vis des teneurs en cendres, en Soufre et en Chlore. Cependant, les teneurs en Azote, semblent augmenter avec la durée de la maturation et la teneur en humidité à réception diminue avec l'augmentation du temps de maturation.

Néanmoins, la grande majorité des échantillons étudiés durant cette étape ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) et ce, peu importe la durée de maturation étudiée. Les seuils des normes étudiées sont renseignés dans le Tableau 1 (page 7).

### 5.3.4 Etude de l'étape de criblage

Les comparaisons ont été réalisées à partir des résultats obtenus pour les associations avec le broyeur AK530 ou le broyeur METSO couplés avec chacun des deux cribles. Pour chacune des associations étudiées, aucun tri en amont n'a été réalisé.

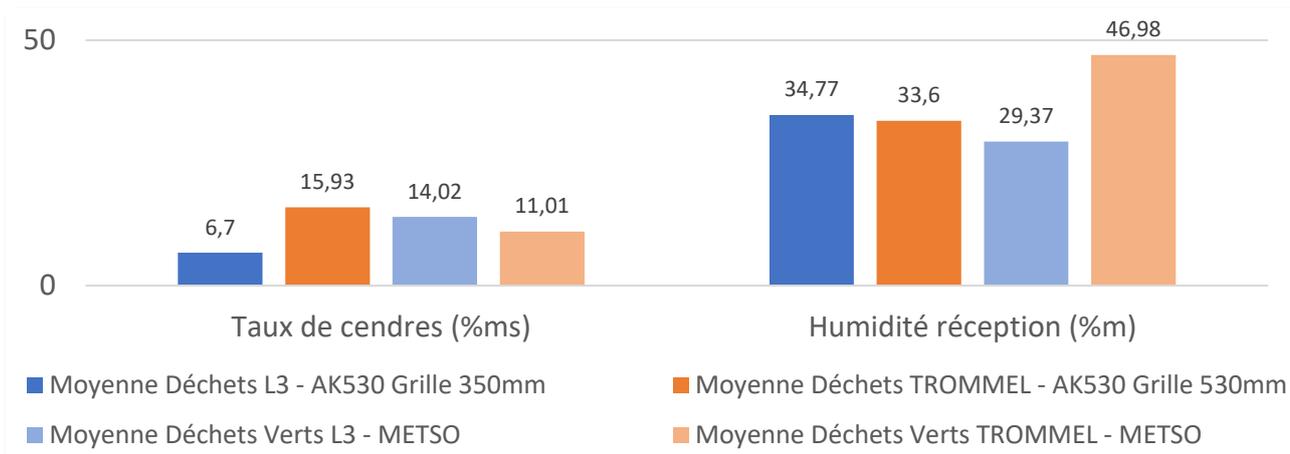


Figure 19 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de criblage

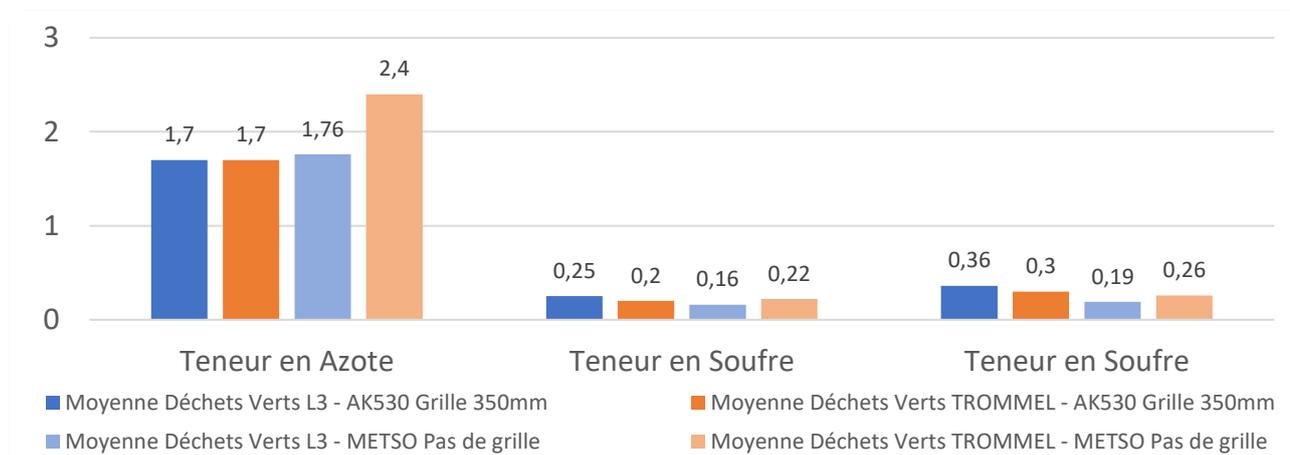


Figure 20 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de criblage

Concernant l'étape de criblage, aucune tendance n'a pu être constatée vis-à-vis des teneurs en humidité à réception, en Soufre et en Chlore. Cependant, les teneurs en cendres et en Azote, permettent de constater que les associations où le crible étoile est présent, semblent produire, globalement, des teneurs plus faibles et seraient donc préférables. Néanmoins, l'association broyeur lent – crible trommel, semble également en capacité d'améliorer la qualité des déchets verts même si ce procédé est moins performant. Par conséquent, il apparaîtrait donc que le crible étoile soit plus efficace en association avec un broyeur rapide et que le crible trommel soit plus efficace avec le broyeur lent.

Enfin, la grande majorité des échantillons étudiés durant cette étape ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) et ce, peu importe le prétraitement subi. Les seuils des normes étudiées sont renseignés dans le Tableau 1 (page 7).

### 5.3.5 Etude du bilan matière

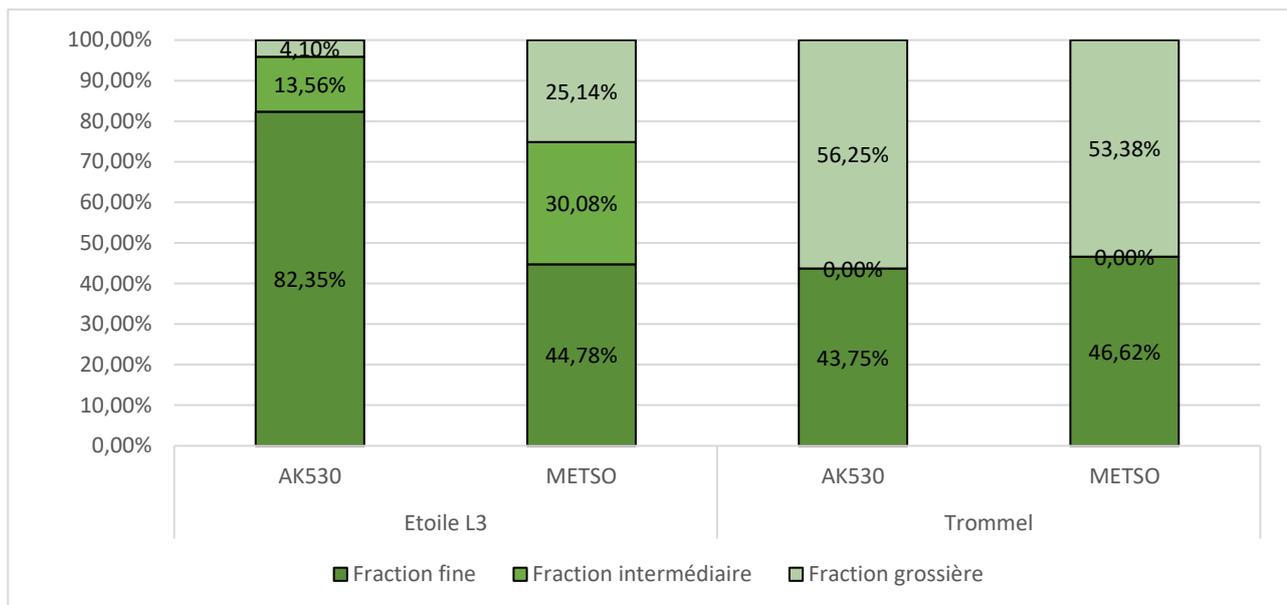


Figure 21 - Résultats du bilan matière réalisé en sortie des cribles pour les tests 1 et 2.

Concernant le bilan matière en sortie et considérant les observations faites précédemment pour les étapes du prétraitement, il semble que les fractions du crible à valoriser dans cette étude soient les fractions intermédiaires et grossières issue du procédé suivant : broyeur rapide (AK530), 10 jours de maturation, criblage étoile (L3). La fraction valorisable en sortie de ce procédé, représente donc que 17,66% du gisement total.

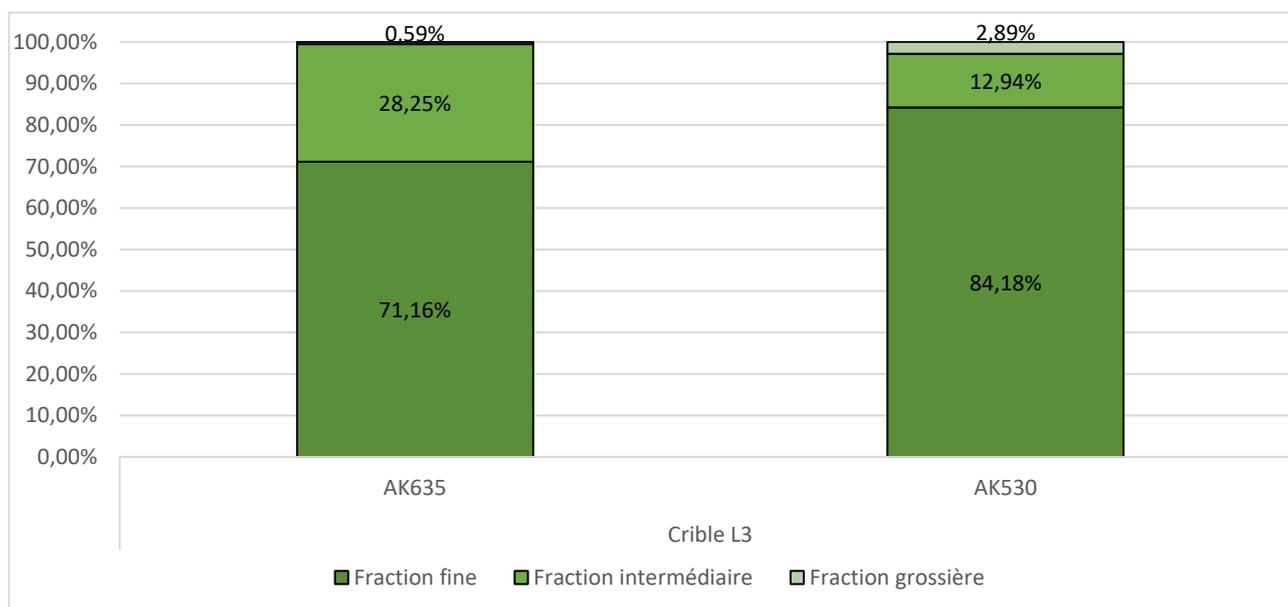


Figure 22 : Résultats du bilan matière réalisé sortie du crible pour le test 3.

A l'issue du procédé de prétraitement sélectionné pour le TEST 3, il a été possible de comparer les deux broyeurs rapides entre eux. Ainsi, on remarque que le broyeur rapide AK530 semble produire plus de fines que le broyeur AK635. La principale différence entre ces broyeurs se situe au niveau de la taille des grilles utilisées. Le broyeur AK530 possède une grille de 350 mm (grille Déchets Verts) et le AK635 possède une grille de 150 mm (Grille bois). Une grille plus petite permettrait ainsi d'obtenir une proportion de fractions intermédiaires et grossières plus importante.

### 5.4 Conclusions sur le lot 3

Pour conclure sur le lot 3, il semble donc qu'un procédé de prétraitement optimal se dessine. Ce procédé optimal semble être celui mettant en place un tri à 30%, un broyage rapide, suivi de 10 jours de maturation et d'un criblage étoile. Ce procédé permet finalement, d'envisager la valorisation d'environ 15%-20% du gisement total.

Cependant, la grande majorité des échantillons étudiés durant cette étape ne semble pas être conforme aux normes en vigueur (NF EN ISO 17225-4 (A1, A2, B1, B2) et NF EN ISO 17225-9 (I1, I2, I3, I4)) et ce, peu importe le prétraitement subi. La valorisation de la matière en combustion ne semble donc pas être envisageable sous ces conditions.

## 6 LOT 4 : « Procédé de Dépollution »

### 6.1 Objectif & Organisation du lot 4

L'objectif du lot 4 du programme de recherche VALOCHIPS est de démontrer la pertinence d'une ligne de dépollution dans le procédé de prétraitement. En effet, la dépollution doit permettre d'améliorer la qualité de la matière en enlevant les polluants qu'elle contient (inertes, plastiques, métaux, ...).

Pour cela, ce lot est composé de trois tâches. La tâche 4.1 a permis l'étude du procédé de séparation des pierres et des inertes. La tâche 4.2 a permis quant à elle d'étudier le procédé de séparation des métaux (ferreux et non ferreux). Enfin, la tâche 4.3 a constitué une approche technico-économique du procédé de dépollution.

### 6.2 Méthodologie du lot 4

Pour ce lot, les échantillons ont été prélevés en Février 2020. Pour comparer les lots avant et après dépollution, un seul test a été effectué. Pour ce test, le procédé de prétraitement sélectionné grâce au lot 3 ont été utilisés. A la suite du prétraitement, une moitié des lots était conservée pour servir de comparaison avant la dépollution et la seconde était dépolluée pour constater l'effet de la dépollution. Cette méthodologie est présentée dans le logigramme suivant.

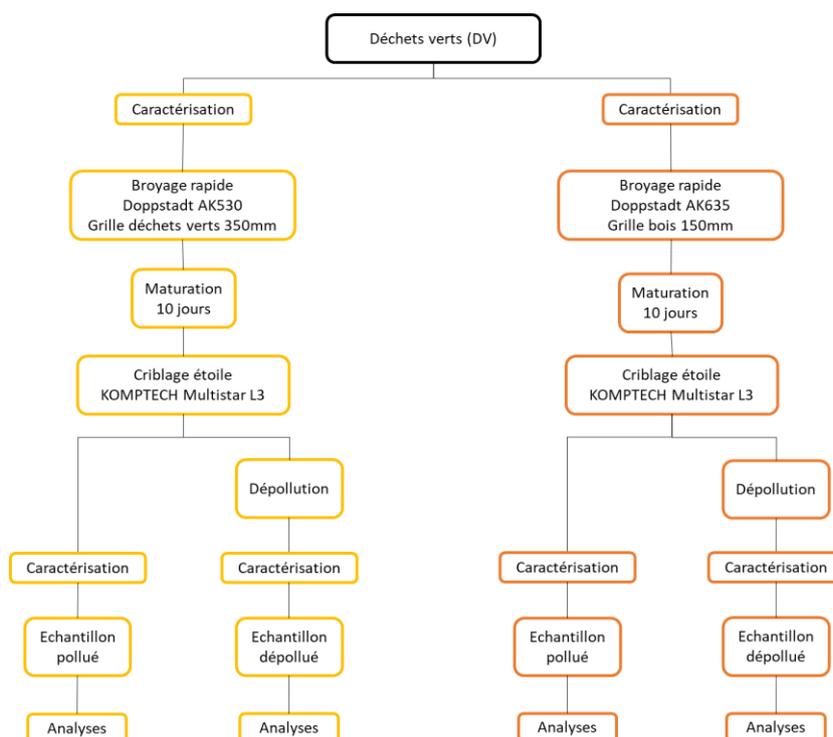


Figure 23 - Synoptique des échantillons du lot 4

### 6.3 Résultats du lot 4

Pour étudier les résultats obtenus grâce au lot 4, les moyennes sur les échantillons pollués et dépollués ont été calculées et comparées entre elles.

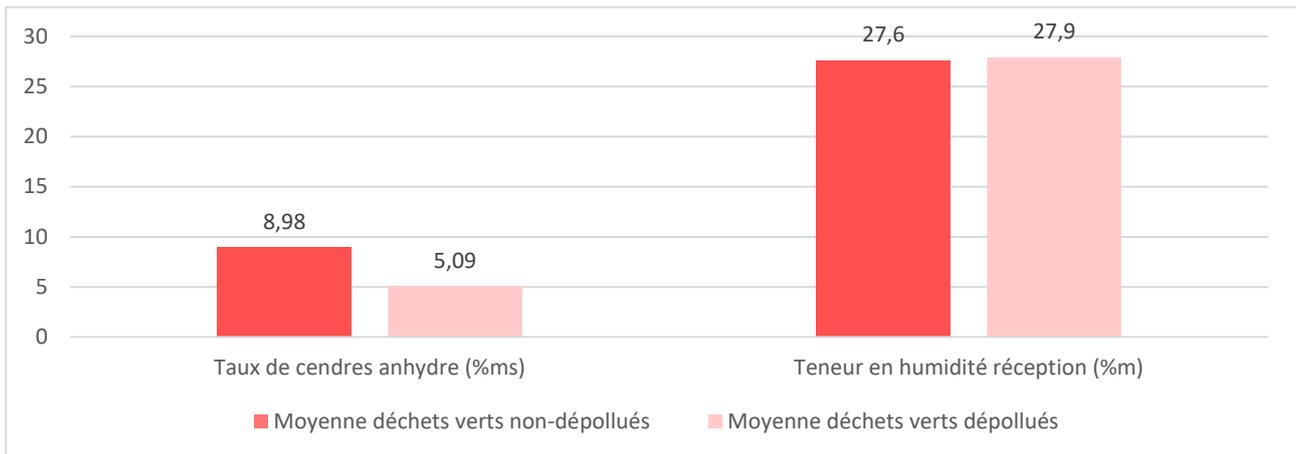


Figure 24 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de dépollution

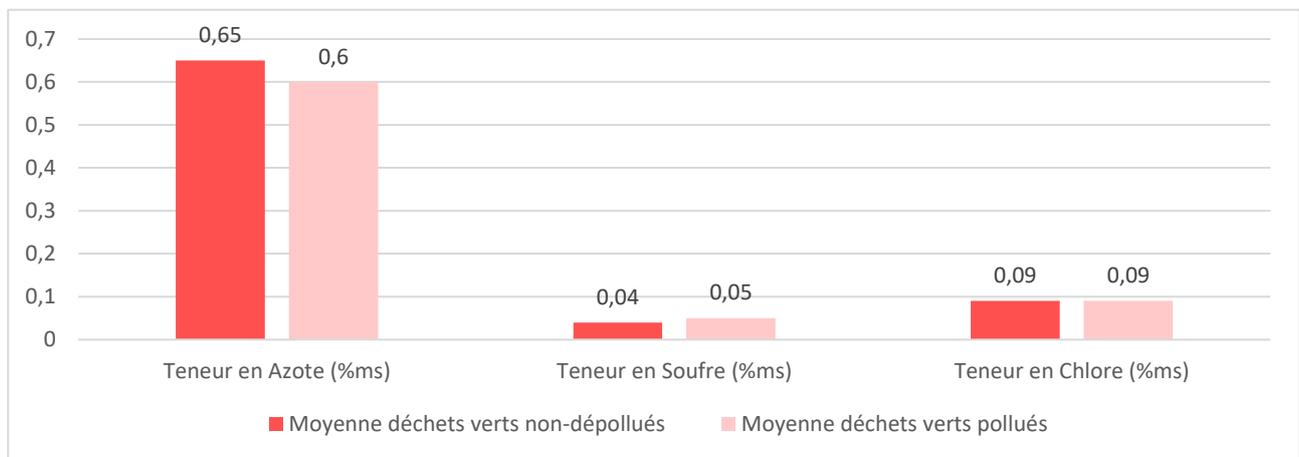


Figure 25 – Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de dépollution

Tableau 7 – Bilan matière en sortie de Dépollution

	AK635	AK530
<b>Bois</b>	75,62%	70,22%
<b>Fines (feuilles, tontes)</b>	22,43%	21,22%
<b>Inertes</b>	1,94%	8,27%
<b>Métaux ferreux</b>	0,01%	0,22%
<b>Métaux non-ferreux</b>	0,00%	0,07%

Concernant les résultats obtenus grâce au lot 4, on remarque que la dépollution semble fortement impacter les teneurs en cendres. En effet, les teneurs en cendres des échantillons dépollués sont plus faibles de près de 50% que celles des échantillons pollués. Cependant, la dépollution ne semble pas avoir d'effet remarquable sur les teneurs en humidité, en Azote, Soufre et Chlore.

Grâce au bilan matière, on remarque que le bois et les fractions ligneuses représentent environ 70% de la fraction dépolluée, c'est-à-dire de la fraction intermédiaire récupérée en sortie du crible.

Enfin, il est apparu que la dépollution permettait de produire des échantillons qui paraissent être conformes au moins aux seuils des normes NF EN ISO 17225-9 I3 et I4.

#### 6.4 Conclusions sur le lot 4

Pour conclure sur le lot 4, il semble que la ligne de dépollution utilisée soit en adéquation avec la matière traitée. En effet, elle permet d'améliorer la matière du point de vue de la teneur en cendres. On remarque

également que la dépollution permet de séparer près de 70% de matière ligneuse, contenue initialement dans la fraction intermédiaire issue du crible étoile.

Pour finir, la dépollution semble également permettre d'envisager la valorisation en combustion de la matière dépolluée puisque les seuils des normes NF EN ISO 17225-9 I3 et I4 sont à minima respectés. Les seuils des normes étudiées sont renseignés dans le Tableau 1 (page 7).

## 7 LOT 5 : « Validation en procédés de combustion »

### 7.1 Objectif & Organisation du lot 5

L'objectif du lot 5 du programme de recherche VALOCHIPS est de valider l'utilisation des déchets verts en procédés de combustion. En effet, même si les analyses physiques et thermochimiques donnent une idée de la réaction de la matière durant la combustion, les essais en combustion restent la manière la plus sûre de constater son comportement en conditions réelles.

Pour cela, ce lot était initialement composé de 5 tâches permettant l'étude de la matière dans deux procédés différents (chaudière à grille et à lit fluidisé) et à des échelles différentes (échelle laboratoire, pilote et industrielle). Cependant, à la suite de la réunion téléphonique du 18/02/2020, 2 tâches du lot 5 ont été supprimées (tâches 5.3, combustion sur chaudière à grilles mobiles biomasse de 1 à 10 MW et 5.4, combustion sur chaudière à lit fluidisée de 2MW de la plateforme INNOV'Energy de LLT). En effet, la mise en route de la nouvelle ligne de dépollution a connu des difficultés liées à l'installation de tapis de convoyeur ignifugés (les tapis, plus épais que les précédents, ont entraîné une surchauffe des moteurs sous-dimensionnés). Il a donc été impossible de traiter et de fournir les quantités de biocombustibles nécessaires pour la réalisation des essais à échelle industrielle.

De ce fait, le lot 5 est maintenant composé de deux tâches. La tâche 5.1 a permis d'étudier le comportement de la matière à l'échelle laboratoire. La tâche 5.2 a permis, quant à elle, d'étudier la matière dans une chaudière à grille à échelle pilote.

Pour les essais, les échantillons ont été prélevés en Février 2020 et sont identiques aux échantillons étudiés dans le lot 4 (Dépollution). En effet, les essais ont été menés sur les échantillons avant et après dépollution obtenus. La méthodologie retenue est présentée dans le synoptique ci-dessous.

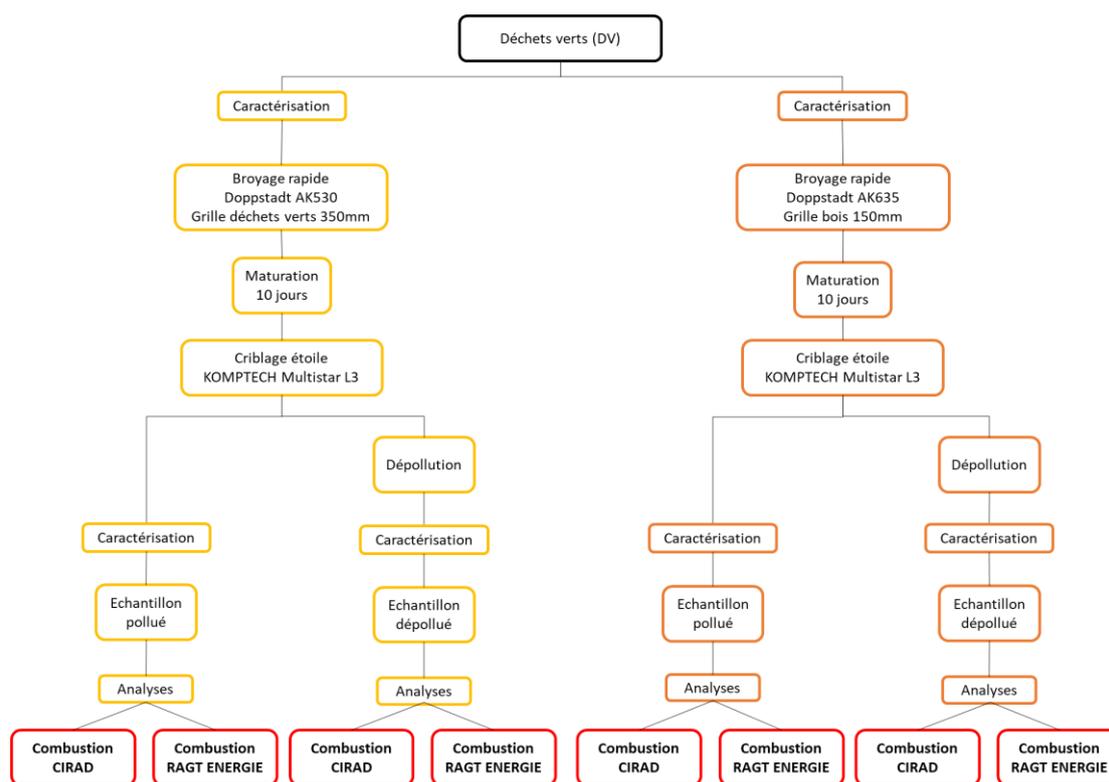


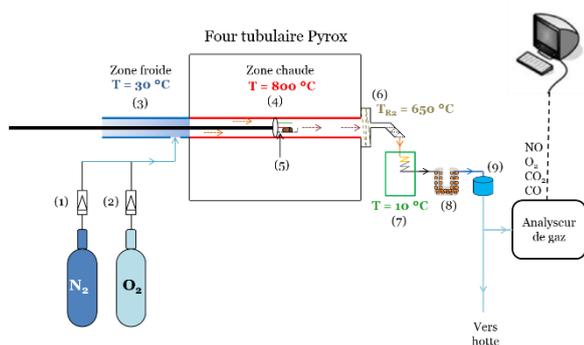
Figure 26 - Synoptique des échantillons étudiés en combustion dans le cadre de la tâche 5.2

En complément, le laboratoire CIRAD a réalisé les mêmes essais sur les échantillons issus du lot 3 (procédé de broyage, maturation, criblage).

## 7.2 Essais en combustion à échelle laboratoire

L'objectif de ces tests est de déterminer les rendements en produits obtenus après combustion de déchets verts échantillonnés dans deux saisons distinctes (été et hiver), broyés par deux types de broyeurs (broyeur lent et broyeur rapide), et criblés dans deux types de crible (crible étoile ou crible trommel) après différentes durées de maturation (0, 5, 10 ou 30 jours).

Les essais de combustion réalisés au CIRAD ont été menés dans un réacteur de laboratoire. Il s'agit d'un four tubulaire horizontal chauffé électriquement dans lequel les essais de combustions sont menés en batch, avec introduction du combustible à un moment donné dans le four préchauffé, et balayage par un débit de gaz d'alimentation (mélange de 19,7% de O<sub>2</sub> dans N<sub>2</sub>) constant. Les gaz incondensables sont analysés en continu, tandis que les espèces condensables sont récupérées par condensation dans des échangeurs et analysées à posteriori en laboratoire.



Les résultats de concentrations en O<sub>2</sub>, CO et NO obtenus durant ces essais montrent que les évolutions des concentrations de gaz sont similaires pour tous les déchets verts, avec des intensités dépendantes des masses et de la nature des biomasses. La concentration en O<sub>2</sub> chute très rapidement après introduction de l'échantillon dans le réacteur lors du dégagement et de l'oxydation rapide des matières volatiles. La teneur en O<sub>2</sub> augmente ensuite rapidement, puis évolue très lentement pour atteindre la concentration du gaz introduit dans le réacteur. Cette étape de réaction lente est liée à

l'oxydation du résidu carboné dont la cinétique est plus faible que celle de l'oxydation des matières volatiles.

Pour les gaz dont les concentrations sont plus faibles (CO et NO), on observe une production très importante de CO et NO sur un temps très court, suivie d'une chute de la concentration aux temps plus longs.

Plusieurs tris des résultats ont été effectués afin d'interpréter l'effet des modes de préparation des déchets verts sur les gaz produits. En prenant en compte les incertitudes sur les résultats obtenus, il apparaît de manière synthétique que :

- La composition différente des déchets verts en fonction de la saison Eté/Hiver a une influence significative sur les gaz produits, avec plus de CO et moins de NO produits par les déchets verts d'hiver que par les déchets verts d'été ;
- Le type de broyeur (lent/rapide), la durée de maturation (0, 5, 10 ou 30j), le choix du crible (étoile ou trommel), ou la fraction sélectionnée (grossière ou intermédiaire) n'ont pas d'influence significative sur le CO et NO produits durant la combustion.

En ce qui concerne les espèces condensables récupérées, les analyses par GC-MS indiquent qu'aucune espèce organique détectable n'est présente dans les produits obtenus ; ce résultat montre que les matières volatiles produites durant la phase de dévolatilisation sont totalement converties sous des formes gazeuses incondensables lors de la combustion. En ce qui concerne les teneurs en eau des fumées de combustion, le type de broyeur, le temps de maturation, le type de crible ou la fraction échantillonnée ne montrent pas d'influence significative.

## 7.3 Méthodologie des essais en combustion sur chaudière à grille, à échelle pilote

### 7.3.1 Méthodologie des essais

Les essais de combustion ont été réalisés sur une chaudière pilote à foyer mobile (grilles mobiles) afin d'avoir une représentativité optimale des conditions de combustion par rapport à une chaudière de grosse puissance.

Le schéma ci-dessous présente le synoptique du banc de combustion qui a été utilisé.

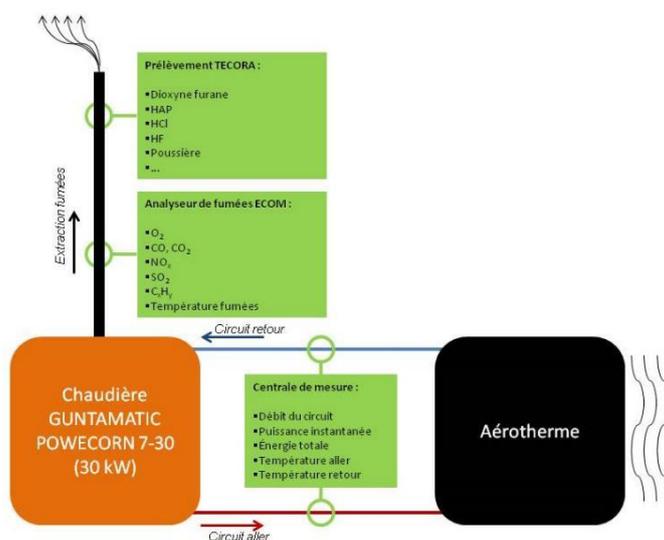


Figure 27 : Banc de combustion à foyer mobile

Le banc de combustion à foyer mobile est équipé d'un système de dessilleur rotatif permettant le passage en combustion de matières brutes broyées avec une granulométrie maximale de 35 mm et une humidité maximale de 35 %.

Le tableau ci-dessous présente les mesures et analyses qui ont été réalisés lors des essais en banc de combustion.

Tableau 8 : Descriptif des essais en combustion sur chaudière à foyer mobile

Combustion des lots		
Catégorie	Élément mesuré	Descriptif de la mesure
PACK BASE COMBUSTION	Mesure en continu des émissions atmosphériques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesures par cellules électro-chimiques</li> <li>- Acquisition des données pendant 1 heure de prélèvement</li> <li>- Éléments mesurés : CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO</li> <li>- Analyse du Rendement de combustion selon la méthode de Siegert</li> <li>- Emissions de polluants exprimées en mg/Nm<sup>3</sup> et ramenées à un pourcentage d'oxygène de référence</li> </ul>
	Détermination du rendement énergétique global	Mesure par comptage de calories
	Caractérisation des cendres générées	<ul style="list-style-type: none"> <li>Récupération des cendres "Foyer »</li> <li>- Classification des cendres par rapport à leur granulométrie</li> <li>- Détermination de la proportion de mâchefer</li> </ul>

En complément, RAGT Energie a réalisé des prélèvements réglementaires des fumées grâce à un système d'aspiration iso cinétique schématisé par la figure de la page suivante. Il est important de signaler que ces prélèvements n'étaient pas prévus dans la convention initiale du projet et ont été décidé par le consortium à l'unanimité lors de la réunion du 13 Juin 2019.

Afin de pouvoir réaliser l'intégralité des ces mesures lors des essais en combustion, il a été nécessaire de maintenir, pendant au moins 12 heures, la combustion en régime stabilisé. C'est la raison pour laquelle un échantillon de 195 kg « équivalent MS » à minima a été demandé. Le tableau ci-dessous détaille ces analyses complémentaires.

Tableau 9 : Descriptif des prélèvements iso cinétiques lors des essais en combustion

	Elément mesuré	Descriptif de la mesure	Durée du prélèvement
<b>Pack Base Prélèvements iso-cinétiques</b>	<b>Humidité des fumées</b>	Selon la méthode NF EN 14790	30 minutes
	<b>Vitesse et débit des fumées</b>	Par tube de Pitot selon ISO 10780	Durée de l'essai
	<b>O<sub>2</sub></b>	Cellule électrochimique	Durée de l'essai
<b>Polluants</b>	<b>Préparation du prélèvement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place de la ligne de prélèvement isocinétique</li> <li>- Préparation des solvants et réactifs</li> <li>- Mesure la vitesse des fumées</li> <li>- Mesure de l'humidité des gaz de combustion</li> <li>- Réglage de l'isocinétisme</li> </ul>	1 heure
	<b>Prélèvement des poussières fines</b>	- Prélèvement isocinétique des poussières fines (IP) dans les fumées de combustion <i>selon EN 13284-1</i>	1 heure
	<b>Prélèvement des métaux lourds</b>	- Prélèvement isocinétique de 15 métaux lourds (+Hg) gazeux et particulaires dans les fumées de combustion <i>selon EN 14385 et EN 13211</i>	1 heure
	<b>Prélèvement HCl</b>	- Prélèvement isocinétique de l'acide chlorhydrique (HCl) gazeux dans les fumées de combustion <i>selon EN 1911</i>	1 heure
	<b>Prélèvement HF</b>	- Prélèvement isocinétique de l'acide fluorhydrique (HF) gazeux et particulaires dans les fumées de combustion <i>selon XP X 43-304 - traitement par fusion alcaline</i>	1 heure
	<b>Prélèvement SO<sub>2</sub></b>	- Prélèvement des oxydes de soufre (SO <sub>2</sub> ) gazeux dans les fumées de combustion <i>selon EN 14791</i>	1 heure
	<b>Prélèvement NH<sub>3</sub></b>	- Prélèvement de l'ammoniac (NH <sub>3</sub> ) gazeux dans les fumées de combustion <i>selon NF X43-303</i>	1 heure

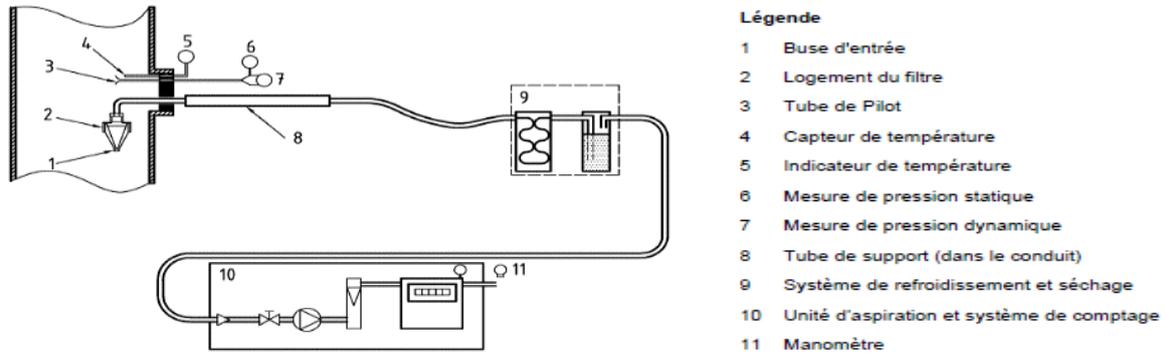
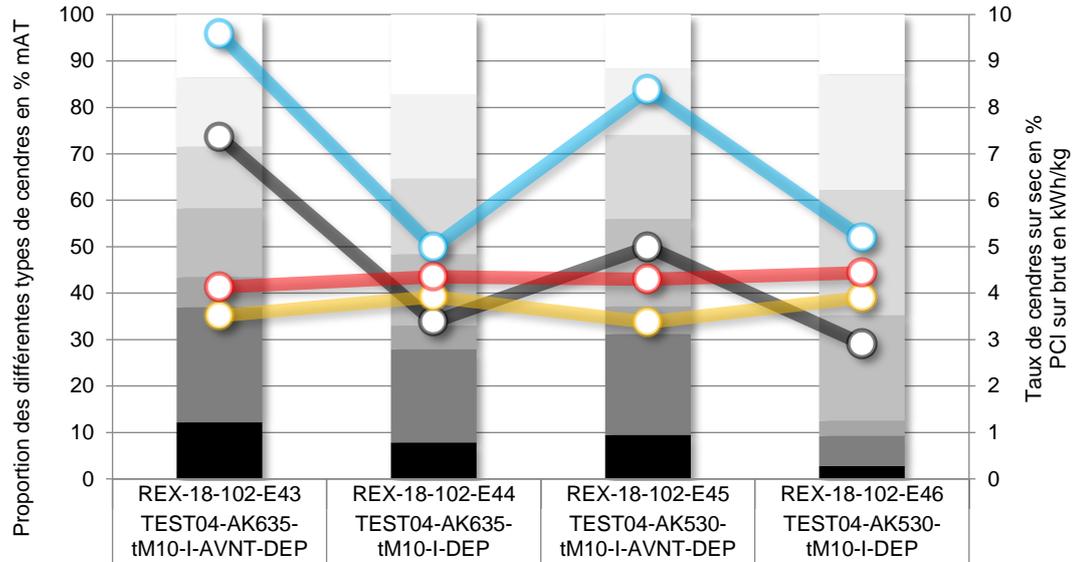


Figure 28 : Schéma du préleveur iso cinétique

### 7.3.2 Résultats des essais



	REX-18-102-E43 TEST04-AK635- tM10-I-AVNT-DEP	REX-18-102-E44 TEST04-AK635- tM10-I-DEP	REX-18-102-E45 TEST04-AK530- tM10-I-AVNT-DEP	REX-18-102-E46 TEST04-AK530- tM10-I-DEP
Proportion fraction FA0	13,63	17,16	11,55	12,97
Proportion fraction FA0,2	14,85	18,23	14,42	24,79
Proportion fraction FA0,5	13,30	16,29	18,05	27,03
Proportion fraction FA1	14,75	15,28	18,81	22,72
Proportion fraction FA2	6,43	5,10	5,96	3,23
Proportion fraction FA3,15	24,87	20,08	21,71	6,50
Proportion fraction F8	12,15	7,86	9,50	2,76
Taux de cendres sur sec chaudière	7,36	3,38	4,99	2,91
Taux de cendres sur sec laboratoire	9,58	4,99	8,38	5,19
Quantité d'énergie dégagée par la matière sur brut	3,52	3,92	3,37	3,91
PCI sur brut laboratoire	4,13	4,35	4,30	4,44

Figure 29 - Répartition granulométrique des cendres

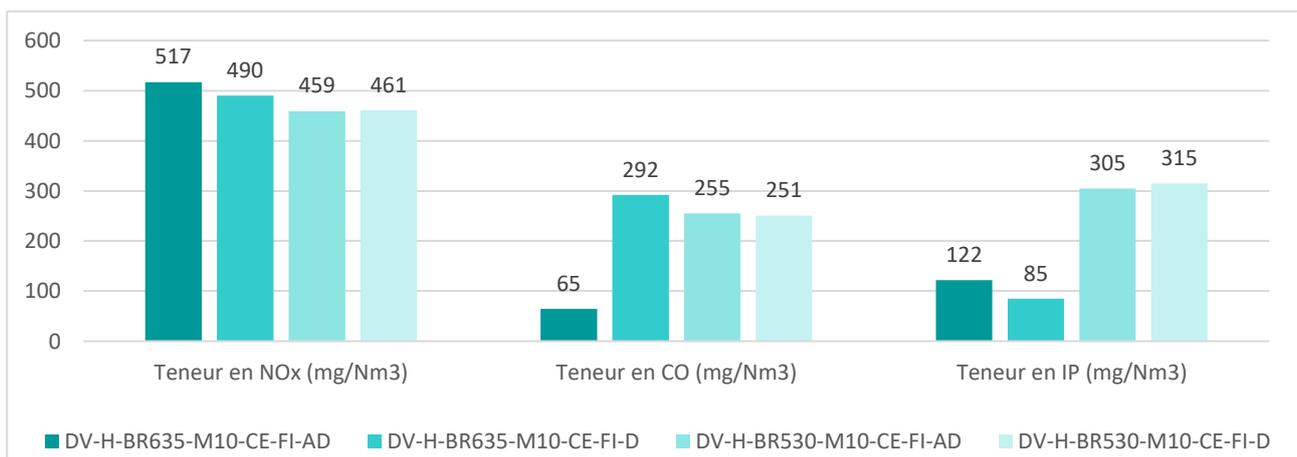


Figure 30 - Teneur en NOx, CO et poussières des fumées

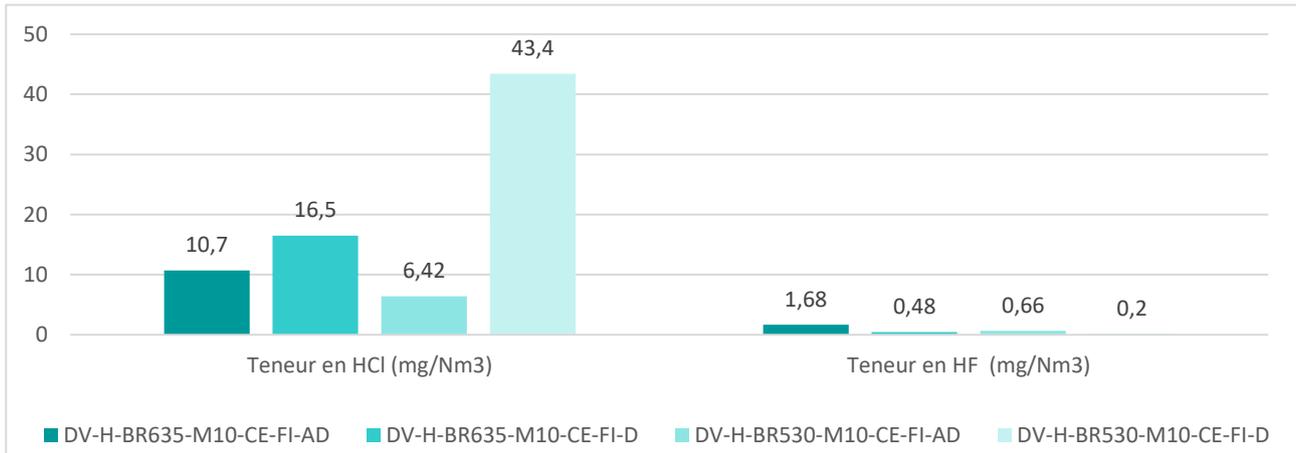


Figure 31 - Teneurs en HCl et HF des fumées

### 7.3.3 Conclusions des essais

Concernant la répartition granulométrique des cendres, il est possible de constater que les cendres de granulométrie supérieure à 8 mm, autrement dit les mâchefers, sont plus présents dans les échantillons avant dépollution. Ce constat peut également être fait concernant les broyeurs : il semble que les échantillons issus du broyeur AK530 (brille déchets verts 350 mm) comportent moins de mâchefers que ceux issus du broyeur AK635 (grille bois 150 mm).

Concernant les teneurs en NOx, en CO, poussières et en HCl, il ne semble pas avoir de tendance particulière liée à la dépollution ou aux broyeurs. Cependant, il est possible de remarquer que :

- Les teneurs en poussières sont très élevées, il faudra donc prendre en compte la mise en place d'un filtre si la valorisation en combustion est envisagée
- Les teneurs en CO sont très élevées, une combustion étagée devrait permettre une diminution de la teneur
- Les teneurs en HCl comportent une anomalie. En effet, l'échantillon DV-H-BR530-M10-CE-FI-D possède une teneur beaucoup plus élevée due à une erreur de consigne lors du prélèvement.

## 8 LOT 6 : « Analyses environnementale et réglementaire »

### 8.1 Objectif & Organisation du lot 6

L'objectif du lot 6 du programme de recherche VALOCHIPS est d'étudier l'impact du procédé de prétraitement des déchets verts sur l'environnement.

Pour cela, deux études distinctes ont été menées : une ACV a été réalisée par le CIRAD et une étude réglementaire comparant les émissions gazeuses produites lors de la combustion aux VLE de deux ICPE, réalisée par RAGT Energie.

### 8.2 L'Analyse du Cycle de Vie (tâche 6.1 et 6.2)

Les tâches 6.1 et 6.2 du projet VALOCHIPS correspondent à la réalisation de l'étude d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) des solutions de valorisation des déchets verts ligneux proposées dans le cadre du projet. Cette étude d'ACV a eu pour ambition de répondre à deux objectifs principaux :

- Quel est l'intérêt environnemental de la valorisation des déchets verts ligneux telle que proposée dans le cadre du projet, par rapport à la gestion actuelle des déchets verts ?
- Parmi les solutions de valorisation considérées dans le cadre du projet, quelles sont celles qui présentent les meilleures performances environnementales potentielles ?

Sur le plan méthodologique, l'étude a été réalisée en accord avec les préconisations européennes de l'ILCD, qui servent de base aux empreintes environnementales de produits (ou *Product Environmental Footprints*, PEF).

L'analyse a pris en compte l'ensemble des étapes du traitement des déchets, du broyage des déchets réceptionnés à la valorisation des différentes fractions qui en sont issues, en incluant à la fois la situation potentielle après implémentation des solutions VALOCHIPS et la situation actuelle sans valorisation énergétique des déchets. Les données utilisées sont issues essentiellement des données produites par le projet, à l'exception de la description de la maturation des déchets verts, et des produits substitués par la valorisation des déchets.

Concernant le premier objectif formulé ci-dessus, les résultats obtenus montrent que l'intérêt environnemental de la valorisation énergétique des déchets verts dépend fortement des enjeux environnementaux considérés : s'il y a effectivement bénéfice environnemental concernant le changement climatique et l'utilisation de ressources énergétiques, la valorisation énergétique accroît les impacts de la filière sur les impacts plus régionaux ou locaux, tels que la pollution de l'air liée à l'émission de particules.

Pour certains enjeux environnementaux tels que la toxicité humaine non-cancérogène, l'analyse des résultats s'est confrontée à des limites dans les méthodes et connaissances disponibles, liées à la prise en compte de l'impact des éléments minéraux. En effet, la forme chimique de ces éléments varie selon le type de valorisation des déchets, comme compost ou comme combustible, ce qui peut avoir des implications très différentes en termes d'impacts environnementaux. Mais cet aspect est aujourd'hui peu considéré dans les méthodes d'évaluation des impacts disponibles en ACV.

Concernant le second objectif, compte tenu des incertitudes dans les données collectées, il n'a pas été possible de hiérarchiser clairement les scénarios étudiés. Néanmoins, quelques grandes tendances ont pu être mises en valeur :

- L'intérêt environnemental des scénarios semble dépendre fortement de la proportion de fraction ligneuse obtenue à l'issue du criblage. A partir des résultats de cette étude, une proportion minimale de 60 % semblerait se dégager, mais cette valeur serait à confirmer par des études plus approfondies.
- En lien avec le point précédent, la mise en place d'une valorisation énergétique serait plus intéressante dans le cas d'un criblage par crible trommel que dans celui par crible étoile, du fait des plus grandes proportions de fraction grossière. Néanmoins, les résultats obtenus ne permettent pas de définir si un des deux types de cribles est plus intéressant que l'autre de façon générale.
- Dans le cas des traitements de déchets par crible étoile, les résultats obtenus ont permis de montrer que l'intérêt d'une valorisation énergétique de la fraction intermédiaire est limité, lorsque celle-ci est déjà valorisée comme compost. Néanmoins, ceci n'est pas vrai lorsque la fraction intermédiaire est valorisée en paillage. Il semble donc que, dans le cas du crible étoile, la valorisation en compost, lorsque celle-ci est déjà réalisée sur la fraction intermédiaire reste préférable à la valorisation en combustion proposée par VALOCHIPS. Cette seconde valorisation pourrait alors être réalisée que partiellement sur la fraction grossière du crible étoile mais ce résultat reste à nuancer par le fait que se limiter à la fraction grossière peut réduire très fortement le potentiel de biomasse à valoriser. (cf section 3.5.1.2.3).

Enfin, en termes de perspectives, au-delà des enjeux de recherche évoqués précédemment, relatifs à l'impact des éléments minéraux présents dans les déchets verts selon le type de valorisation, il serait intéressant d'approfondir les résultats de cette étude en se concentrant sur les gisements hivernaux de déchets verts. En effet, ceux-ci présentent *a priori* des taux de branchages et donc, potentiellement, de fraction grossière, plus importants que les gisements estivaux qui ont pu être considérés, ce qui, d'après les éléments précédents, pourraient améliorer l'intérêt environnemental d'une valorisation énergétique des déchets verts.

### **8.3 Etude réglementaire (tâche 6.3)**

#### **8.3.1 Méthodologie de l'étude réglementaire**

Pour cette tâche, seules les émissions mesurées lors des essais en combustion à échelle pilote ont été analysées. En effet, cette tâche a permis de comparer ces émissions gazeuses avec les VLE des ICPE 2910 (permettant la combustion sous statut biomasse) et 2771 (permettant la combustion sous le statut déchet non-dangereux). Lors de cette tâche, deux seuils ont été étudiés pour l'ICPE 2771. Pour cette réglementation, il est nécessaire de préciser la publication du BREF Incinération de 2019 visant à modifier les VLE de l'ICPE

2771 dans les prochaines années. La tâche 6.3 présente donc une comparaison aux seuils de l'ICPE 2771 actuelle (régie par l'arrêté du 20 Septembre 2002) ainsi qu'aux seuils du BREF incinération 2019.

### 8.3.2 Résultats de l'étude réglementaire

Tableau 10 - Résultats de l'étude réglementaire (ramenés à 6% d'O<sub>2</sub>)

	Moyenne des déchets verts pollués	Moyennes des déchets verts dépollués	VLE ICPE 2910 A Déclaration	VLE ICPE 2910 B Enregistrement	VLE ICPE 2910 A&B Autorisation	VLE MTD ICPE 2771 Autorisation (VLE ramenées à 6% d'O <sub>2</sub> par calcul)	VLE ICPE 2771 Autorisation (VLE ramenées à 6% d'O <sub>2</sub> par calcul)
<b>NOx</b>	488,2	475,6	525		400 (P<50MW)	180	300
<b>CO</b>	159,7	271,4	250		200 (P<100MW)	75	75
<b>SO<sub>2</sub></b>	89,5	73,1	225		200 (P<300MW)	45	75
<b>HCl</b>	8,6	29,9	-	30	10	9	15
<b>HF</b>	1,2	0,3	-	25	5	1,5	1,5
<b>Poussières</b>	213,5	199,9	50	-	30	7,5	15
<b>NH<sub>3</sub></b>	2,3	1,9	-	-	5	15	45
<b>Pb</b>	0,3	0,2	-	1	1	-	-
<b>Cd</b>	0,005	0,006	-	0,05	0,5	-	-
<b>Hg</b>	0,001	0,002	-	0,05	0,05	0,03	0,075
<b>TI</b>	0,004	0,0021	-	0,05	0,05	-	-
<b>Cd + Hg + TI</b>	0,007	0,007	-	0,1	0,1	-	-
<b>As + Se + Te</b>	0,14	0,08	-	1	1	-	-
<b>Métaux lourds</b>	9,0	4,9	-	-	20 (P<50MW)	-	-
<b>Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu +</b>	0,77	0,52	-	-	-	0,45	0,75
<b>Cd + TI</b>	0,009	0,008	-	-	-	0,03	0,03

Le code couleur présenté ci-dessus a été établi de la manière suivante : vert pour une valeur conforme à tous les seuils y compris au seuil le plus restrictif, orange pour une valeur conforme à au moins un des seuils étudiés et rouge pour une valeur conforme à aucun des seuils étudiés.

Concernant l'étude réglementaire, il semble que les échantillons soient plus majoritairement conformes à l'ICPE 2910 A Déclaration ou B Enregistrement qu'à l'ICPE 2910 A&B Autorisation et l'ICPE 2771 Autorisation (MTD et arrêté du 20 Septembre 2002). Cependant, deux verrous restent à soulever : les teneurs en poussières et les teneurs en CO (très dépendantes des conditions de combustion). Il faut donc prévoir la mise en place de filtre et de système permettant l'abattement de ces deux paramètres.

Enfin, il semble que l'ICPE 2771 Autorisation (MTD et arrêté du 20 Septembre 2002) soit beaucoup trop restrictive concernant ce gisement et nécessite, dans le cas où le statut déchets serait préféré, de fort aménagements (abattement de toutes les émissions gazeuses, abattement des poussières, ...). Cependant, il est nécessaire de rappeler que les installations classées en ICPE 2771 disposent déjà, par leur conception, de ces technologies de traitement des fumées.

### 8.3.3 Conclusions de l'étude réglementaire

Pour conclure quant aux ICPE, il a été possible d'observer que les teneurs étudiées respectaient plus majoritairement les VLE de l'ICPE 2910 A Déclaration et B Enregistrement que les VLE de l'ICPE 2910 A&B Autorisation à condition d'être systématiquement dépollués. Pour envisager la valorisation en combustion sous ce statut, des filtres devront être installés pour retenir les poussières. Concernant les émissions de CO, nous avons pu remarquer que les teneurs étaient légèrement supérieures aux seuils réglementaires. Cette différence peut être atténuée en réglant la chaudière de manière plus adaptée. En effet la réalisation de seulement 4 essais, n'a pas permis l'établissement d'un réglage optimal de la chaudière. Il est également important de remarquer que la combustion dans une chaudière de petite puissance est différente d'une combustion réalisée dans une chaudière de plus forte puissance. Ces dernières permettent une combustion étagée ce qui permet d'émettre moins de CO. Il est important de garder à l'esprit que ces conclusions ne sont basées que sur l'exploitation de données pour quatre échantillons.

Concernant les VLE de l'ICPE 2771 (arrêté du 20 Septembre 2002) et de la BREF 2019, elles ne sont que rarement respectées par les échantillons. Il semble donc difficile de brûler la fraction ligneuse des déchets verts sous un statut déchets sans systèmes de traitement des fumées (filtres à manches, déniox, injection de

réactif, ...). Cependant, il est nécessaire de rappeler que toutes les installations existantes ICPE 2771 disposent déjà de ces technologies qui les rendent, de fait, compatibles. Enfin, les VLE de la BREF 2019 semblent être les futures VLE de l'ICPE 2771, après sa révision courant 2020 ce qui aura pour conséquence de rendre le suivi et l'abattement des émissions gazeuses plus contraignants.

## 9 Etude technico-économique (tâches 3.4 et 4.3)

L'étude technico-économique réalisée dans ce rapport a été faite en parallèle du lot 3 (procédé de broyage, maturation, criblage) et du lot 4 (dépollution). Pour cela, les données ont été estimées à partir des retours d'expérience et des données de l'entreprise BRALEY. Dans un premier temps, l'étude n'a été réalisée que pour un procédé de prétraitement visant à produire uniquement du bois énergie à partir la fraction ligneuse extraite des déchets verts. Elle a également été basée sur l'hypothèse selon laquelle, 27 500 tonnes de déchets verts entrent à 55% d'humidité dans le procédé. Lors de l'étape de maturation, les déchets verts séchent et leur teneur en humidité diminue jusqu'à 40%. Cette perte d'humidité engendre une perte de masse de sorte que, la masse de déchets verts représente 20 000 tonnes en sortie de maturation.

Connaissant les données pour un fonctionnement en andain (800 tonnes), similaire à celui de BRALEY et connaissant les volumes nécessaires, il nous a été possible de déterminer les temps et les coûts engendrés par chaque étape du procédé.

De plus, deux scénarios ont été établis quant à l'étape de tri en amont qui favorise la présence de fraction ligneuse dans le gisement entrant dans le procédé. Le premier scénario consiste à réaliser le tri sur une aire réservée à cet effet, pendant 15 minutes pour un volume de 30 m<sup>3</sup>. Le second scénario quant à lui, prévoit que l'étape de tri est réalisée en parallèle du broyage pendant une durée de 5 minutes pour 30 m<sup>3</sup>.

Concernant les coûts RH, ils ont été estimés en supposant que le salaire annuel chargé d'un opérateur était de 50 000 EUR/an et que l'opérateur nécessitait un encadrement à 20%, par un encadrant rémunéré 80 000 EUR/an. Ainsi, un opérateur travaillant sur cette ligne engendre un coût annuel 66 000 EUR/an.

Tableau 11 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 1

Scénario n°1																			
Opération	ENTREE			COÛTS RH OPERATOIRE		COÛTS MAINTENANCE				COÛT D'INVESTISSEMENT			COÛT ENERGETIQUE				SORTIE		
	Tonnage entrant	Débit	Nombre d'heure / an	Coût RH à l'heure	Coût RH à l'année	Coûts consommables à la tonne	Coûts consommables à l'année	Coût RH	Total	Investissement global	Durée Amortissement	Amortissement annuel	Consommation horaire	Coût unitaire	Coût énergétique à l'heure	Coût énergétique à l'année	Coût total annuel	Tonnage sortie de matière valorisable	Coût total à la tonne produite
-	tonnes/an	tonne/h	h / an	€/h	€/an	€ HT/tonne	€ HT/an	€/an	€/an	€ HT	Années	€ HT /an	L/h ou kW/h	€ HT /Lou € HT/kWh	€ HT/h	€ HT/an	€ HT/an	tonne/an	€ HT/tonne
Tri en amont	27 500		69		2 808	0,00	0	281	281	200 000	10	20 000	11	0,83	9	628	23 717	4 200	5,6
Broyage	27 500	19,99	1 376	40,82	56 163	0,50	13 750	5 616	19 366	430 000	10	43 000	60	0,83	50	68 525	187 054		44,5
Maturation	27 500		22,93		936	0,00	0	94	94	0	10	0	11	0,83	9	209	1 239		0,3
Criblage	20 000	33,33	600		24 492	0,50	10 000	2 449	12 449	480 000	10	48 000	15	0,83	12	7 471	92 412		22,0
Dépollution	20 000	30,00	667		27 211	0,50	10 000	2 721	12 721	2 500 000	10	250 000	56	0,12	7	4 480	294 412		70,1
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>2 734</b>		-	<b>111 611</b>	-	<b>33 750</b>	<b>11 161</b>	<b>44 911</b>	<b>3 610 000</b>	-	<b>361 000</b>	-	-	<b>87</b>	<b>238 527</b>	<b>756 049</b>	-

Tableau 12 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 2

Scénario n°2																			
Opération	ENTREE			COÛTS RH OPERATOIRE		COÛTS MAINTENANCE				COÛT D'INVESTISSEMENT			COÛT ENERGETIQUE				SORTIE		
	Tonnage entrant	Débit	Nombre d'heure / an	Coût RH à l'heure	Coût RH à l'année	Coûts consommables à la tonne	Coûts consommables à l'année	Coût RH	Total	Investissement global	Durée amortissement	Amortissement annuel	Consommation horaire	Coût unitaire	Coût énergétique à l'heure	Coût énergétique à l'année	Coût total annuel	Tonnage sortie de matière valorisable	Coût total à la tonne produite
-	tonnes/an	tonne/h	h / an	€/h	€/an	€ HT/tonne	€ HT/an	€/an	€/an	€ HT	Années	€ HT/an	L/h ou kW/h	€ HT/L ou € HT/kW	€ HT/h	€ HT/an	€ HT/an	tonne/an	€ HT/tonne
Tri en amont	27 500		23		936	0,00	0	94	94	200 000	10	20 000	11	0,830	9	209	21 239	4 200	5,1
Broyage	27 500	19,99	1 376	40,82	56 163	0,50	13 750	5 616	19 366	430 000	10	43 000	60	0,830	50	68 525	187 054		44,5
Maturation	27 500		23		936	0,00	0	94	94	0	10	0	11	0,830	9	209	1 239		0,3
Criblage	20 000	33,33	600		24 492	0,50	10 000	2 449	12 449	480 000	10	48 000	15	0,830	12	7 471	92 412		22,0
Dépollution	20 000	30,00	667		27 211	0,50	10 000	2 721	12 721	2 500 000	10	250 000	56	0,12	7	4 480	294 412		70,1
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>2 689</b>		-	<b>109 739</b>	-	<b>33 750</b>	<b>10 974</b>	<b>44 724</b>	<b>3 610 000</b>	-	<b>361 000</b>	-	-	<b>87</b>	<b>234 526</b>	<b>749 988</b>	-

Pour conclure sur l'étude technico-économique, il a été possible de constater que les hypothèses faites sur le tri n'étaient pas pertinentes. En effet, les coûts totaux annuels sont égaux à 756 049 EUR HT/an pour le scénario 1 (15 minutes de tri sur une aire réservée) et de 749 988 EUR HT/an pour le scénario 2 (5 minutes de tri en parallèle du broyage). Ces hypothèses n'engendrent ainsi qu'une variation de 0,80%.

De plus, il a été possible de remarquer que l'opération demandant le plus de dépenses annuelles (tout coûts compris) est la dépollution. Cependant, le coût d'investissement de la ligne influe fortement sur le coût final : l'investissement a été estimé à partir de la ligne de dépollution de l'entreprise BRALEY, qui comporte deux trieurs optiques qui ne sont pas nécessaires dans le cas de notre prétraitement et qui engendrent donc un coût supplémentaire. Il est donc possible que le prix de la ligne de dépollution spécifique pour les déchets verts soit largement inférieur à celui énoncé.

Le broyage et le criblage sont les autres opérations qui engendrent des dépenses importantes.

L'amortissement des machines représente la catégorie la plus impactante sur le coût global. Cette étude maximisant les coûts, il est possible que certaines des machines puissent être déjà présentes sur site. Dans ce cas, les coûts d'investissement seront revus à la baisse, au même titre que la ligne de dépollution adaptée au déchets verts (sans triage optique).

Afin de pouvoir comparer le coût de production de plaquettes de fraction ligneuse de déchets verts avec les combustibles déjà présents sur le marché, nous avons utilisé l'enquête sur les prix des combustibles bois pour le chauffage industriel et collectif en 2019-2020 (ADEME, 2019). Les prix sont donnés en € HT/MWh (livré). En considérant un coût de revient (hors livraison) de 142 EUR HT/tonne pour la fraction ligneuse de déchets verts (scénario 2) et un PCI moyen de 3,43 MWh/tonne, cela porte le coût de la matière à 41,4 EUR HT/MWh

Le tableau ci-dessous compare ce montant avec les prix moyens de l'enquête des combustibles bois livrés pour les collectivités et l'industrie.

Tableau 13 : Comparaison des prix des combustibles

	Ecorces	Broyats de recyclage	Plaquettes forestières	Fraction ligneuse de déchets verts dépolluée
Prix moyen (en € HT/MWh)	17	20	25	41,4

Nous pouvons remarquer que le coût de revient de la fraction ligneuse de déchets verts est d'ores et déjà trop élevé par rapport au prix du marché. Afin de positionner cette matière, il faudrait que son prix de vente soit inférieur à celui des plaquettes forestières car sa qualité en combustion est moins bonne. Un prix cible intéressant pourrait être de 18 EUR HT/MWh mais cela reviendrait à vendre à perte en considérant, comme c'est le cas dans cette étude technico-économique, que la ligne de prétraitement est uniquement dédiée à la production de bois énergie.

Afin d'atteindre ce prix cible, il est nécessaire que la ligne de production serve également à d'autres activités (compostage par exemple), comme cela est, généralement, le cas dans les plateformes. Egalement l'investissement compté pour la chaîne de dépollution, comprend le coût des deux trieurs optiques ainsi d'un courant de Foucault qui ne sont pas nécessaires pour le traitement des déchets verts. Le coût d'une ligne de dépollution spécifique aux déchets verts pourrait être estimé à 350 000 EUR HT au lieu de 2 500 000 EUR HT. Cette estimation se base sur le coût de deux trieurs aérauliques NIHOT SDI 800 (un pour les fractions légères et un autre pour les fractions lourdes) ainsi qu'un overband. La tableau de la page suivante présente une simulation avec ces hypothèses d'investissement.

Tableau 14 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 2 avec optimisation de l'investissement

### Scénario n°2 avec optimisation de l'investissement

Opération	ENTREE			COÛTS RH OPERATOIRE		COÛTS MAINTENANCE				COÛT D'INVESTISSEMENT				COÛT ENERGETIQUE				SORTIE		
	Tonnage entrant	Débit	Nombre d'heure / an	Coût RH à l'heure	Coût RH à l'année	Coûts consommables à la tonne	Coûts consommables à l'année	Coût RH	Total	Investissement global	% Utilisation	Durée amortissement	Amortissement annuel	Consommation horaire	Coût unitaire	Coût énergétique à l'heure	Coût énergétique à l'année	Coût total annuel	Tonnage sortie de matière valorisable	Coût total à la tonne produite
-	tonnes/an	tonne/h	h / an	€/h	€/an	€ HT/tonne	€ HT/an	€/an	€/an	€ HT	%	Années	€ HT/an	L/h ou kW/h	€ HT/L ou € HT/kW	€ HT/h	€ HT/an	€ HT/an	tonne/an	€ HT/tonne
Tri en amont	27 500		23	40,82	936	0,00	0	94	94	200 000	40%	10	8 000	11	0,830	9	209	9 239	4 200	2,2
Broyage	27 500	19,99	1 376		56 163	0,50	13 750	5 616	19 366	430 000	40%	10	17 200	60	0,830	50	68 525	161 254		38,4
Maturation	27 500		23		936	0,00	0	94	94	0	40%	10	0	11	0,830	9	209	1 239		0,3
Criblage	20 000	33,33	600		24 492	0,50	10 000	2 449	12 449	480 000	40%	10	19 200	15	0,830	12	7 471	63 612		15,1
Dépollution	20 000	30,00	667		27 211	0,50	10 000	2 721	12 721	350 000	40%	10	14 000	56	0,12	7	4 480	58 412		13,9
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>2 689</b>	-	<b>109 739</b>	-	<b>33 750</b>	<b>10 974</b>	<b>44 724</b>	<b>1 460 000</b>	<b>40%</b>	-	<b>58 400</b>	-	-	<b>87</b>	<b>234 526</b>	<b>447 388</b>		<b>69,9</b>

En optimisant l'investissement, le coût de revient à la tonne de la fraction ligneuse de déchets verts est de 70 EUR HT. En prenant un PCI de 3,34 MWh/tonne, le prix de l'énergie est de 20,4 EUR HT/MWh. Le prix cible est proche mais il est nécessaire de rappeler que ce prix est le coût de revient sur lequel l'opérateur devra appliquer une marge ainsi que des frais de livraison. Enfin, nous n'avons pas pris dans ces scénarii le coût d'entrée des déchets verts qui représente, en réalité, une recette pour les exploitants puisque la matière entre dans le process avec une valeur négative. C'est principalement ce montant-là qui assurera ou non la rentabilité de l'opération.

## 10 Conclusion

Le programme de recherche VALOCHIPS dans son intégralité et au travers des différents lots qui le composent, avait pour objectif de répondre à la problématique actuelle des déchets verts : comment valoriser cette matière hétérogène présente en grande quantité en France ?

Pour cela, cette étude a permis de conclure quant à la préférence d'un gisement de déchets verts en particulier selon sa provenance et sa saisonnalité, de définir un procédé en adéquation avec le gisement sélectionné, de montrer la pertinence d'une ligne de dépollution dans le procédé et de valider ce procédé en combustion. Enfin, il a également permis de conclure quant à l'impact du procédé sur l'environnement au travers d'une étude ACV et d'une étude réglementaire. Toutes les conclusions et tous les constats établis sont présentés ci-dessous.

Par l'intermédiaire du LOT 2, il a été possible de sélectionner les gisements les plus appropriés à la valorisation énergétique de la fraction ligneuse des déchets verts. Pour cela, leurs caractéristiques thermochimiques et physiques ont été comparées selon leur saisonnalité et leur provenance. Ainsi, il est apparu que les gisements hivernaux et estivaux semblaient être de meilleure qualité. Concernant les provenances, les gisements professionnels semblent se détacher particulièrement.

Le LOT 3 quant à lui a permis de définir le procédé de prétraitement (étapes de broyage, maturation, criblage) le plus en adéquation avec le gisement de déchets verts. Pour cela, des associations broyeur – cribles ont été étudiés ainsi que plusieurs temps de maturation (0, 5, 10 et 30 jours). Les technologies de broyeurs, au nombre de deux, étaient représentées par un broyeur Doppstadt AK530 (avec une grille déchets verts de 350mm) et un broyeur Doppstadt AK635 (avec une grille bois de 150mm) pour le broyage rapide et un broyeur METSO (utilisé sans grille) pour le broyage lent. Deux technologies de criblage ont été également étudiées : un criblage étoile réalisé avec le crible Komptech Multistar L3 et un criblage trommel réalisé avec le crible Doppstadt SM518. A la suite de ce lot, deux procédés se sont particulièrement détachés de par la qualité thermochimique des échantillons produits. Le premier procédé comporte un broyage rapide, un temps de maturation de 10 jours et un criblage étoile. Ce premier procédé comporte les meilleurs résultats mais un procédé comportant un broyage lent, un temps de maturation de 10 jours et un criblage trommel a également la capacité d'améliorer la qualité thermochimique de la matière. De plus, ce lot a permis d'étudier l'intérêt d'un tri en amont de la matière visant à augmenter la quantité de fraction ligneuse dans le gisement et donc d'augmenter la qualité du gisement.

Le LOT 4 a mis en avant la pertinence d'une ligne de dépollution sur un procédé de prétraitement des déchets. La comparaison des déchets verts avant et après dépollution a ainsi permis de remarquer que la dépollution impactait fortement les taux de cendres en anhydres, rendant envisageable la valorisation énergétique de la matière.

Le LOT 5 a permis la validation du procédé sélectionné (broyage rapide, maturation de 10 jours et criblage étoile) et des matières produites en combustion. La validation n'a pu être réalisée qu'à échelle pilote puisque les quantités nécessaires à échelle industrielle n'ont pu être fournies. Néanmoins, les essais à échelle pilote ont permis de remarquer que la valorisation en combustion de la fraction ligneuse des déchets semblait envisageable à conditions d'abaisser les teneurs en monoxyde de carbone (par la réalisation d'une combustion multi-étagée par exemple) et en poussières (à l'aide d'un filtre) dans les fumées.

Le LOT 6 a permis l'étude de l'impact du procédé sur l'environnement et de valider les essais en combustion réalisés dans le LOT 5 en comparant les émissions gazeuses aux VLE des ICPE 2910 et 2771. Une étude ACV a d'abord été réalisée. Elle a permis de remarquer que l'intérêt environnemental semble dépendre fortement de la proportion de fraction ligneuse obtenue à l'issue du criblage. Il semble également qu'une proportion minimale de 60 % se dégage, mais cette valeur reste à confirmer par des études plus approfondies. De plus, la mise en place d'une valorisation énergétique serait plus intéressante dans le cas d'un criblage par crible trommel que dans celui par crible étoile : de plus grandes proportions de fraction grossière sont présentes. Néanmoins, les résultats ne permettent pas de définir si un des deux cribles est plus intéressant que l'autre de façon générale. Dans le cas des traitements de déchets par crible étoile, les résultats obtenus ont montré que l'intérêt d'une valorisation énergétique de la fraction intermédiaire est limité, lorsque celle-ci est déjà valorisée comme compost ce qui n'est pas vérifié lors de la valorisation en paillage. Il semble donc que, dans le cas du crible étoile, la valorisation en compost, lorsque celle-ci est déjà réalisée sur la fraction intermédiaire reste préférable, au niveau environnemental, à la valorisation en combustion proposée par VALOCHIPS. Cette seconde valorisation pourrait alors être réalisée que partiellement sur la fraction grossière du crible étoile mais ce résultat reste à nuancer par le fait que se limiter à la fraction grossière peut réduire très fortement le potentiel de biomasse à valoriser. (cf section 3.5.1.2.3).

L'étude réglementaire a permis d'observer que les émissions étudiées respectaient plus majoritairement les VLE de l'ICPE 2910 A Déclaration et B Enregistrement que les VLE de l'ICPE 2910 A&B Autorisation à condition d'être systématiquement dépollués. Pour envisager la valorisation en combustion sous ce statut, des filtres (multi-cyclones, électrostatiques ou à manches) devront être installés pour retenir les poussières. Concernant les émissions de CO, nous avons pu remarquer que les teneurs étaient légèrement supérieures aux seuils réglementaires. Cette différence peut être atténuée en réglant la chaudière de manière plus adaptée. En effet la réalisation de seulement 4 essais, n'a pas permis l'établissement d'un réglage optimal de la chaudière. Il est également important de préciser que la combustion dans une chaudière de petite puissance est différente d'une combustion réalisée dans une chaudière de plus forte puissance. Ces dernières permettent une combustion étagée ce qui permet d'émettre moins de CO.

Concernant les VLE de l'ICPE 2771 (arrêté du 20 Septembre 2002) et de la BREF 2019, elles ne sont que rarement respectées par les échantillons. Il semble donc difficile de brûler la fraction ligneuse des déchets verts sous un statut déchets sans systèmes de traitement des fumées (filtres à manches, dénox, injection de réactifs, ...). Cependant, il est nécessaire de rappeler que toutes les installations existantes ICPE 2771 disposent déjà de ces technologies qui les rendent, de fait, compatibles mais qui représentent uniquement une voie d'élimination. Enfin, les VLE de la BREF 2019 semblent être les futures VLE de l'ICPE 2771, après sa révision courant 2020 ce qui aura pour conséquence de rendre le suivi et l'abattement des émissions gazeuses plus contraignants.

L'étude technico-économique du procédé de prétraitement, menée en parallèle des lots 3 et 4 a permis de simuler l'ensemble des coûts générés par le procédé de prétraitement (broyage rapide, maturation, criblage étoile, dépollution). Pour ces simulations, deux scénarios ont été étudiés. Le premier scénario comportait une étape de tri en amont, réalisée sur aire réservée pendant une durée de 15 minutes par benne dépotée alors que le second scénario simulait un procédé avec un étape de tri réalisée en parallèle du broyage pendant une durée de 5 minutes par benne. Cette étude a permis de remarquer que l'hypothèse sélectionnée n'influe que peu sur le coût total (0,80% de variation). Elle a également permis de remarquer que l'étape du procédé engageant le plus de frais est la dépollution puisque son coût d'investissement a été estimé à partir de la ligne de dépollution de l'entreprise BRALEY, comportant deux trieurs optiques supplémentaires (leur coût n'ayant pas pu être estimé, ils sont compris dans le coût total d'investissement de la ligne de dépollution). Les étapes de broyage et de criblage ont également un fort impact sur le coût total annuel. Ainsi, en considérant que l'étude technico-économique a été réalisée pour un procédé de prétraitement uniquement destiné à produire du bois énergie à partir des déchets verts, le coût de traitement à la tonne de biocombustible est d'environ 142 EUR HT/tonne produite ce qui représente un coût final de l'énergie de 41 EUR HT/MWh. En comparaison des autres combustibles présents sur le marché, un prix cible pour cette matière devrait se situer autour de 18 EUR HT/MWh. Afin d'atteindre ce prix, il est nécessaire que l'unité de traitement soit dimensionnée au plus juste (notamment pour la dépollution) et que les machines puissent servir à d'autres activités (compostage par exemple). En prenant ces hypothèses, le coût de traitement à la tonne est d'environ 70 EUR HT ce qui représente 20 EUR HT/MWh. Afin que les exploitants puissent inclure des frais logistiques et marger sur la vente du combustible, il sera nécessaire d'avoir une valeur d'entrée de la matière négative dans le process qui rendra ce pré-traitement rentable ou pas.

## Index des tableaux et figures

Figure 1 : Tas de déchets verts non préparés	5
Figure 2 : Broyeurs de l'entreprise BRALEY	5
Figure 3 - Synoptique présentant la méthodologie générale de l'étude	7
Figure 4 - Synoptique du lot 2	8
Figure 5 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étude de provenance	8
Figure 6 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étude de provenance	8
Figure 7 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étude de provenance	9
Figure 8 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étude de provenance	9
Figure 9 : Broyeurs rapides DOPPSTADT AK 530 et AK 635	11
Figure 10 : Broyeur lent METSO M&J PreShred 4000M	12
Figure 11 : Schéma de fonctionnement du crible étoile KOMPTECH Multistar L3	12
Figure 12 : Crible étoile KOMPTECH Multistar L3	12
Figure 13 : Synoptique des essais réalisés pour le LOT 3	14
Figure 14 - Résultats de l'étude du tri en amont	15
Figure 15 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de broyage	15
Figure 16 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de broyage	16
Figure 17 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de maturation	16
Figure 18 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de maturation	16
Figure 19 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de criblage	17
Figure 20 - Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de criblage	17
Figure 21 - Résultats du bilan matière réalisé en sortie des cribles pour les tests 1 et 2.	18
Figure 22 : Résultats du bilan matière réalisé sortie du crible pour le test 3.	18
Figure 23 - Synoptique des échantillons du lot 4	19
Figure 24 - Résultats des analyses de teneurs en cendres et en humidité de l'étape de dépollution	20
Figure 25 – Résultats des analyses de teneurs en Azote, Soufre et Chlore de l'étape de dépollution	20
Figure 26 - Synoptique des échantillons étudiés en combustion dans le cadre de la tâche 5.2	22
Figure 27 : Banc de combustion à foyer mobile	24
Figure 28 : Schéma du préleveur iso cinétique	26
Figure 29 - Répartition granulométrique des cendres	26
Figure 30 - Teneur en NOx, CO et poussières des fumées	27
Figure 31 - Teneurs en HCl et HF des fumées	27

Tableau 1 : Analyses thermochimiques et chimiques réalisées par RAGT Energie	7
Tableau 2 : Récapitulatif des seuils des normes étudiées dans le cadre de VALOCHIPS	9
Tableau 3 : Caractéristiques des broyeurs rapides	11
Tableau 4 : Caractéristiques du broyeur lent METSO M&J PreShred 4000M	11
Tableau 5 : Caractéristiques du crible étoile KOMPTECH Multistar L3	13
Tableau 6 : Caractéristiques du crible trommel DOPPSTADT SM 518	13
Tableau 7 – Bilan matière en sortie de Dépollution	20
Tableau 8 : Descriptif des essais en combustion sur chaudière à foyer mobile	24
Tableau 9 : Descriptif des prélèvements iso cinétiques lors des essais en combustion	25
Tableau 10 - Résultats de l'étude réglementaire (ramenés à 6% d'O <sub>2</sub> )	29
Tableau 11 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 1	31
Tableau 12 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 2	31
Tableau 13 : Comparaison des prix des combustibles	32
Tableau 14 : Résultats de l'étude technico-économique du scénario 2 avec optimisation de l'investissement	33

## Sigles et acronymes

<b>ACV</b>	Analyse de Cycle de Vie
<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
<b>ICPE</b>	Installation Classée Pour l'Environnement
<b>LCA</b>	Life Cycle Analysis
<b>MTD</b>	Meilleure Technologie Disponible
<b>RH</b>	Ressource(s) Humaine(s)
<b>VLE</b>	Valeurs Limites d'Emissions

## L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

### LES COLLECTIONS DE L'ADEME



#### ILS L'ONT FAIT

*L'ADEME catalyseur* : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



#### EXPERTISES

*L'ADEME expert* : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous un regard.



#### FAITS ET CHIFFRES

*L'ADEME référent* : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



#### CLÉS POUR AGIR

*L'ADEME facilitateur* : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation



#### HORIZONS

*L'ADEME tournée vers l'avenir* : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.