



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# VALOCHIPS

Valorisation de déchets verts ligneux : procédés de prétraitement et tests de transformation thermochimique

# Sommaire

## 1. Contexte

- Les déchets verts en France
- Généralités
- Organisation générale
- Le procédé de prétraitement
- Les problématiques

## 2. LOT 2

- Objectif & Méthodologie
- Résultats

## 3. LOT 3

- Objectif & Méthodologie
- Résultats

## 4. LOT 4

- Objectif & Méthodologie
- Résultats

## 5. LOT 5

- Essais à échelle laboratoire
- Essais à échelle pilote

## 6. LOT 6

- Etude ACV
- Etude réglementaire

## 7. Etude technico-économique

- Scénario 1
- Scénario 2
- Comparaison des scénarii

## 8. Conclusion générale

# 1. Contexte

# Les déchets verts en France

## Qu'est-ce que les déchets verts ?

Hétérogène

Pollué

Statut déchets



## Pourquoi est-il intéressant de les valoriser ?

Prix d'achat négatif

Gros volume

Prix de revente

## Quel est le positionnement des acteurs sur ce sujet ?

- Gros volume, pas cher et valorisable
- Filière en cours de structuration

Est-ce que l'extraction du bois énergie du gisement de déchets verts est rentable ?

# Généralités



Financé par l'ADEME

ADEME



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



Fait partie de l'appel à projet **GRAINE de 2016 (3<sup>ème</sup> édition)**

= Programme de Recherche financé par l'ADEME  
→ 3<sup>ème</sup> édition



Programme de recherche VALOCHIPS

= VALOrisation de déCHets verts ligneux : Procédé de prétraitement et testS de transformation thermochimique



5 partenaires :



# Organisation générale

LOT 1

## MANAGEMENT DU PROJET

*S'assurer du bon déroulement du projet selon l'annexe technique et le synoptique*

Objectif du lot : piloter, suivre et animer le projet de manière à ce qu'il suive le programme présenté dans l'annexe technique

LOT 2

## CARACTÉRISATION DES GISEMENTS

*Etude quantitative des flux, analyses physiques et thermochimiques des matières*

Objectif du lot : sélectionner la matière la plus intéressante thermochimiquement pour une valorisation en combustion

LOT 3

## PROCÉDÉ BROYAGE/STOCKAGE/CRIBLAGE

*Définition du procédé Broyage/Stockage/Criblage et réalisation d'un protocole*

Objectif du lot : définir le procédé en adéquation avec le gisement de déchets verts français

LOT 4

## PROCÉDÉ DE DÉPOLLUTION

*Définition du procédé de dépollution (inertes & métaux) et réalisation d'un protocole*

Objectif du lot : mettre en avant la pertinence d'une opération de dépollution sur un procédé de prétraitement des déchets verts

LOT 5

## ESSAIS EN COMBUSTION

*Essais en combustion à différentes échelles  
→ Sélection conditions opératoires optimales*

Objectif du lot : valider le procédé de prétraitement sélectionné et la matière produite en procédé de combustion

LOT 6

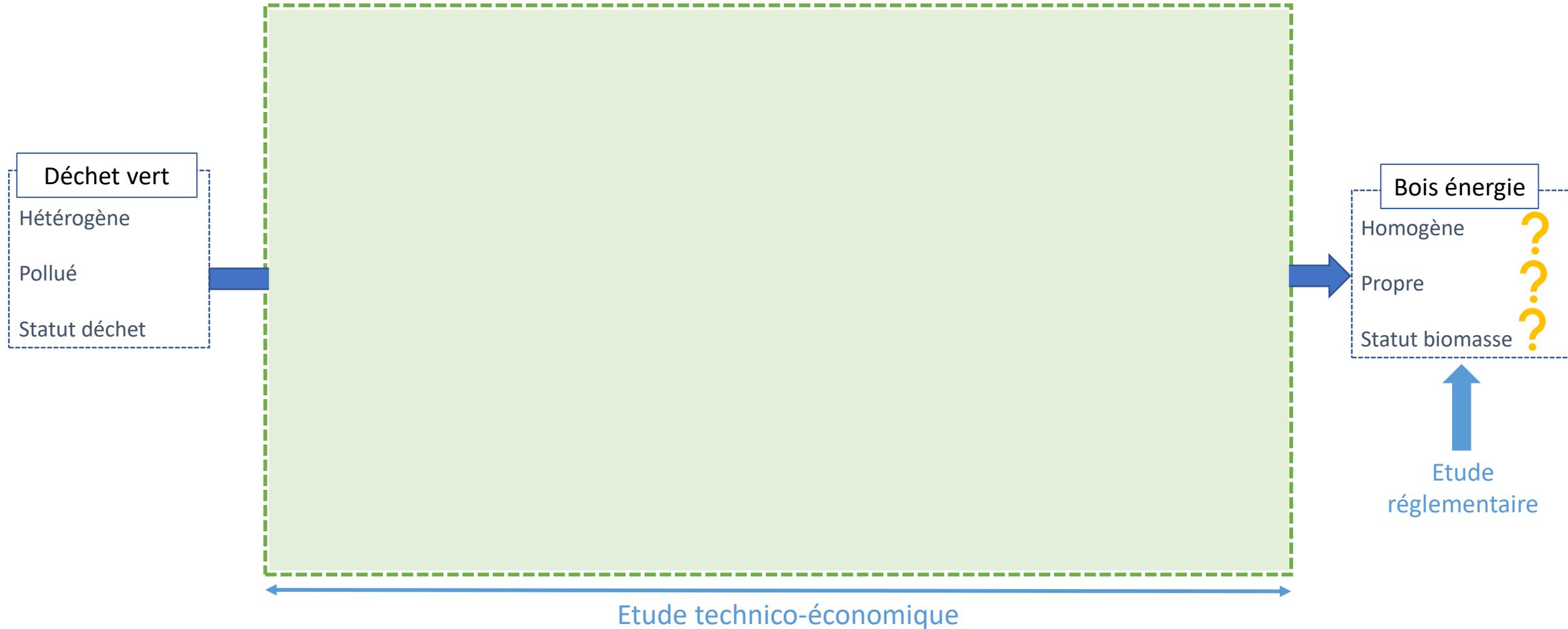
## ANALYSES ENVIRONNEMENTALES & RÉGLEMENTAIRES

*Détermination des ACV, étude environnementale et étude réglementaire (ICPE 2771 et 2910)*

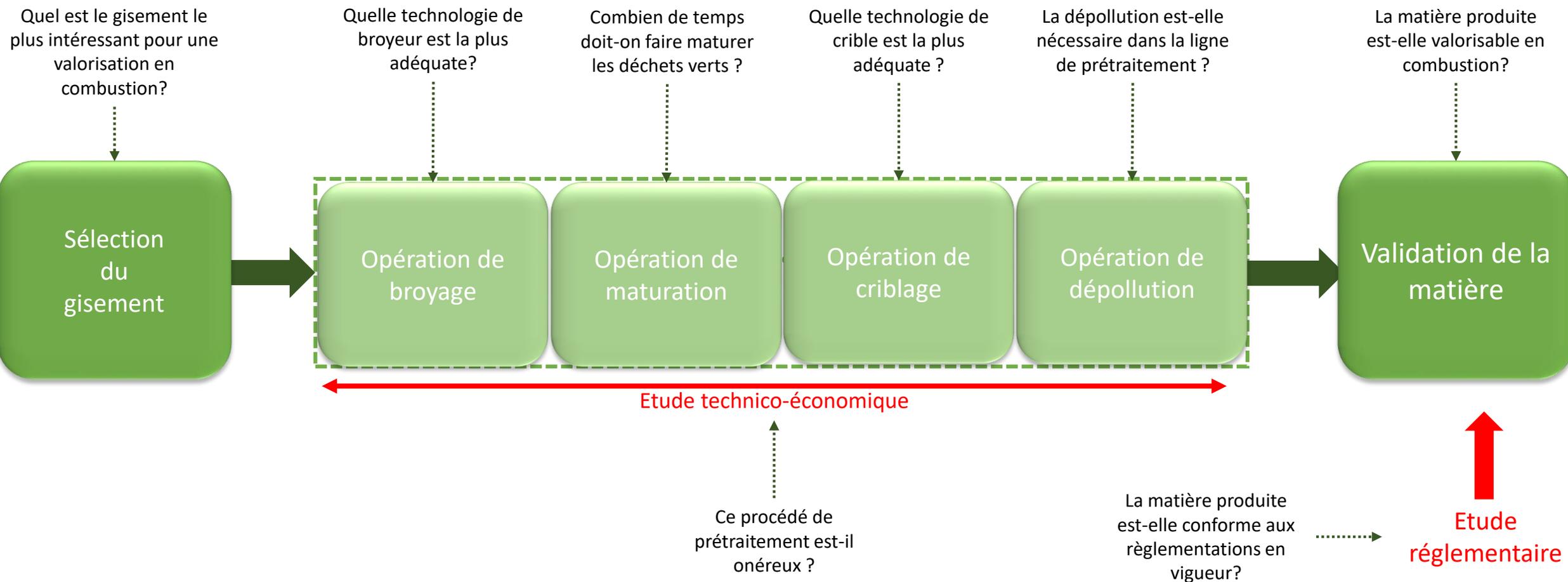
Objectif du lot : étudier l'impact du procédé sur l'environnement

# Le procédé de prétraitement

## PROCEDE DE PRETRAITEMENT



# Les problématiques



## 2. LOT 2

# Sélection du gisement

## Objectif du lot :

Sélectionner le gisement avec la meilleure qualité thermochimique

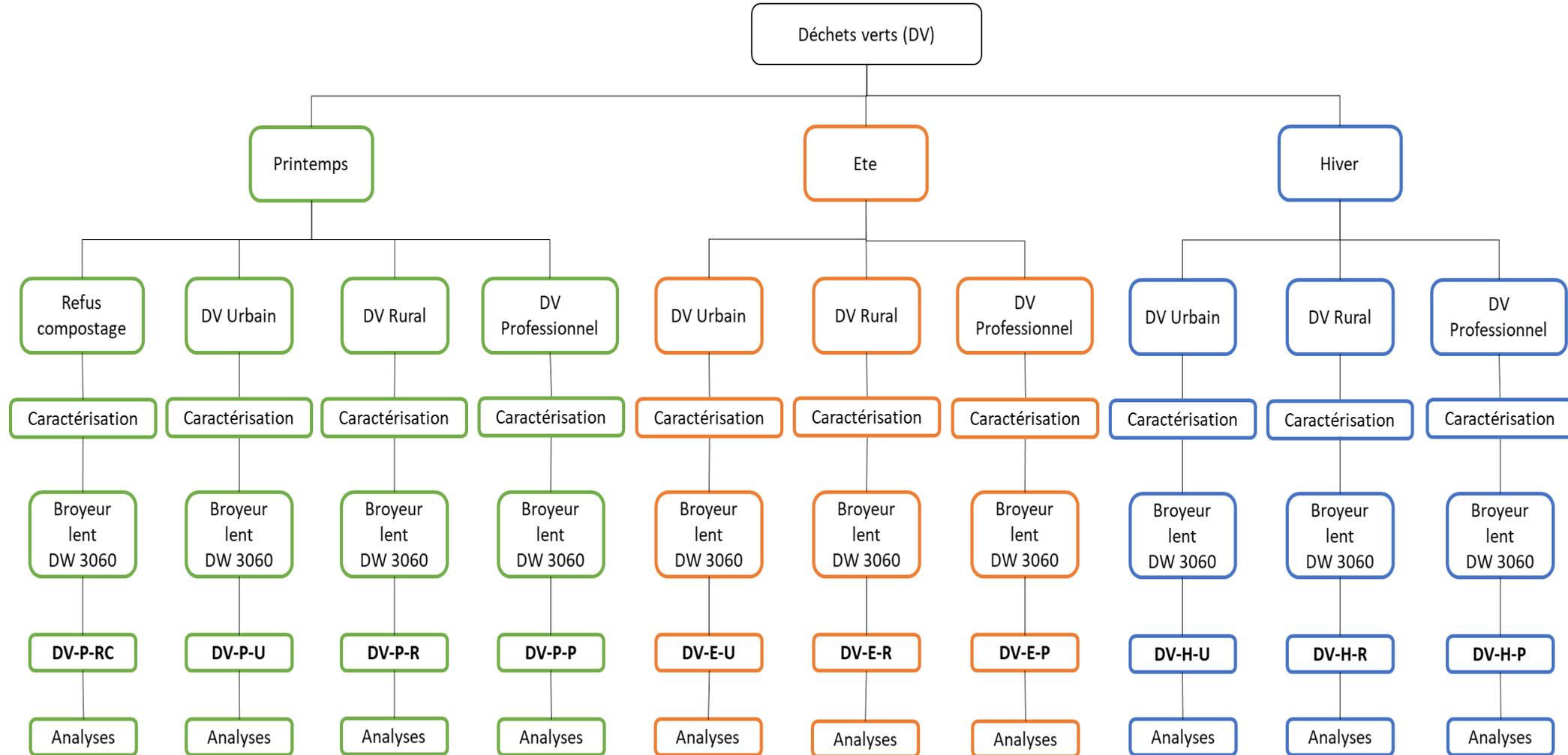
→ Etude de deux leviers : la **saisonnalité** et la **provenance**

	Période printanière	Période estivale	Période hivernale
Gisement urbain	1	1	1
Gisement rural	1	1	1
Gisement professionnel	1	1	1
Refus de criblage	1	/	/
<b>TOTAL</b>	10 bennes à caractériser		

→ Qualification de la matière sur 6 paramètres thermochimiques



# Méthodologie des essais



# Etude des provenances

## Légende :

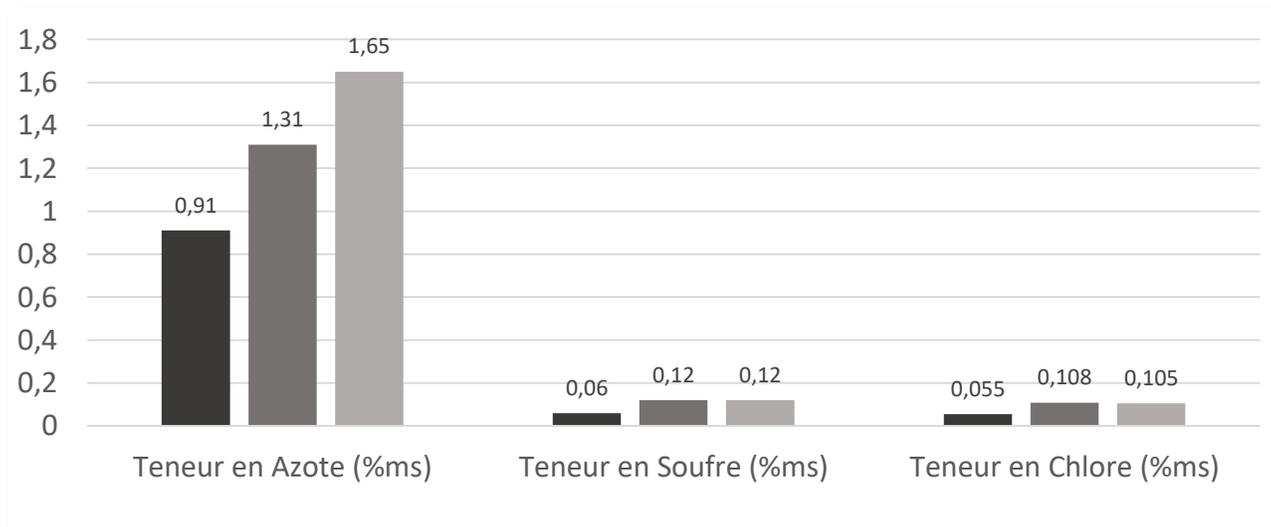
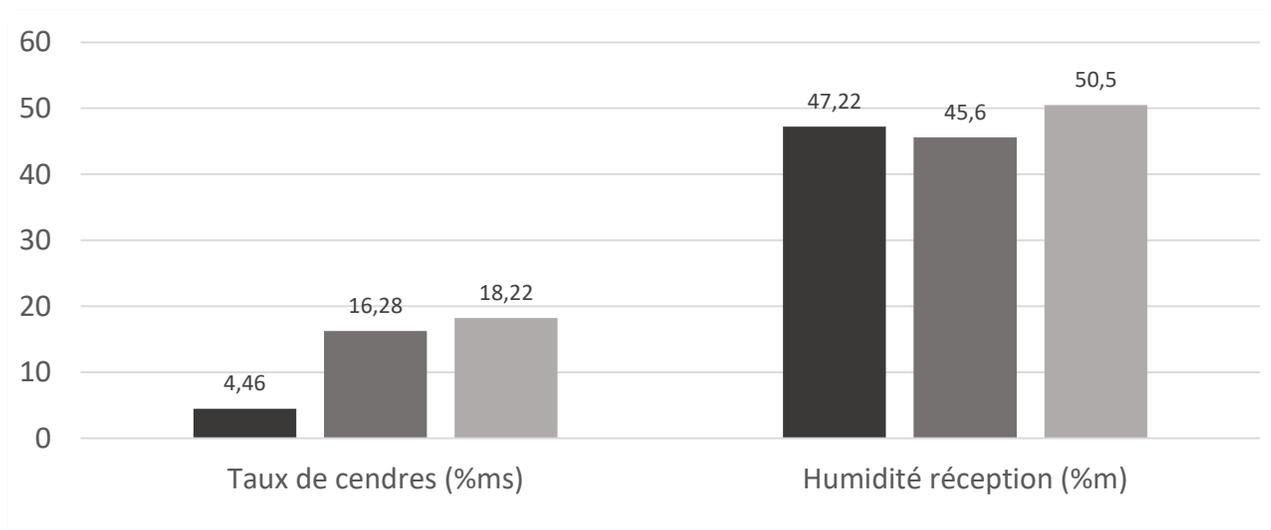
- Moyenne déchets verts professionnel
- Moyenne déchets verts urbain
- Moyenne déchets verts rural

## Constats :

- Le gisement professionnel présente des teneurs plus faibles que les deux autres provenances

## Ordre préférentiel :

**Gisement professionnel > Gisement urbain > Gisement rural**



# Etude de saisonnalité

## Légende :

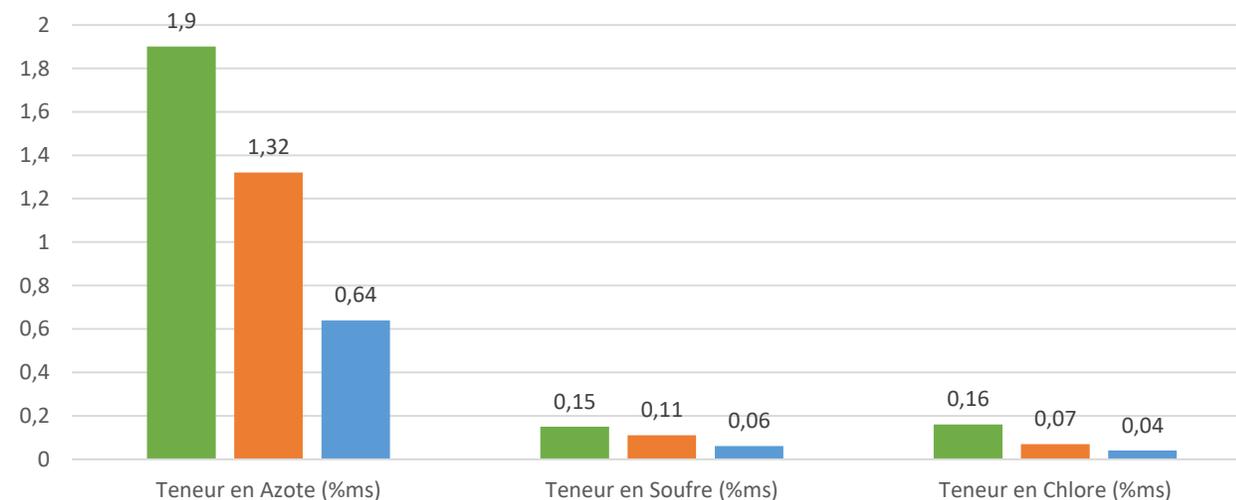
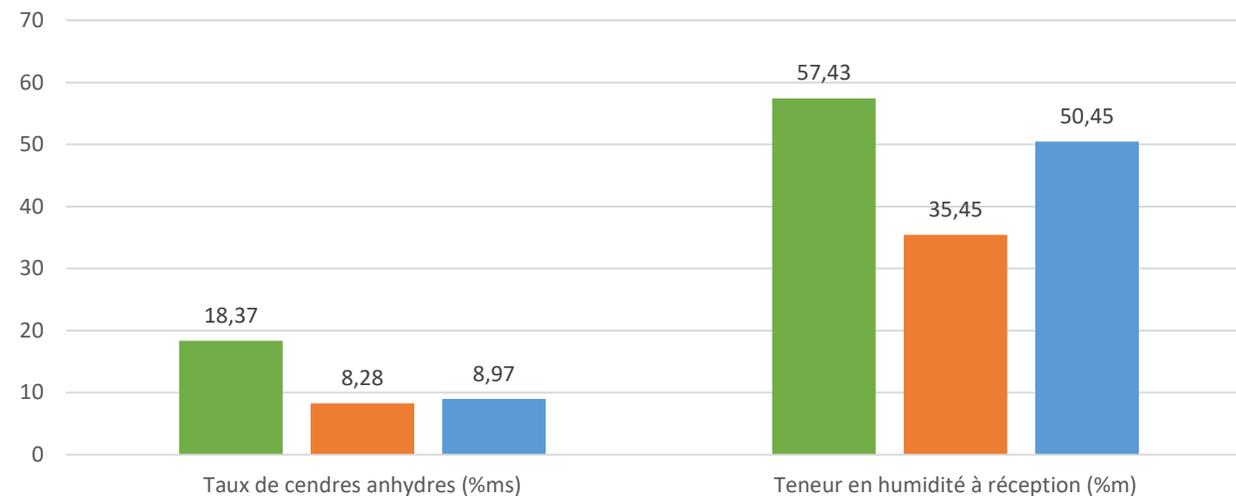
- Moyenne déchets verts Printemps
- Moyenne déchets verts Été
- Moyenne déchets verts Hiver

## Constats :

- Le gisement hivernal présente des teneurs plus faibles que les deux autres provenances
- Le gisement estival reste intéressant pour les mêmes raisons

## Ordre préférentiel :

**Gisement hivernal > Gisement estival > Gisement printanier**



# 3. LOT 3

# Objectif du lot

**Définir un procédé de prétraitement en adéquation avec le gisement de déchets verts**

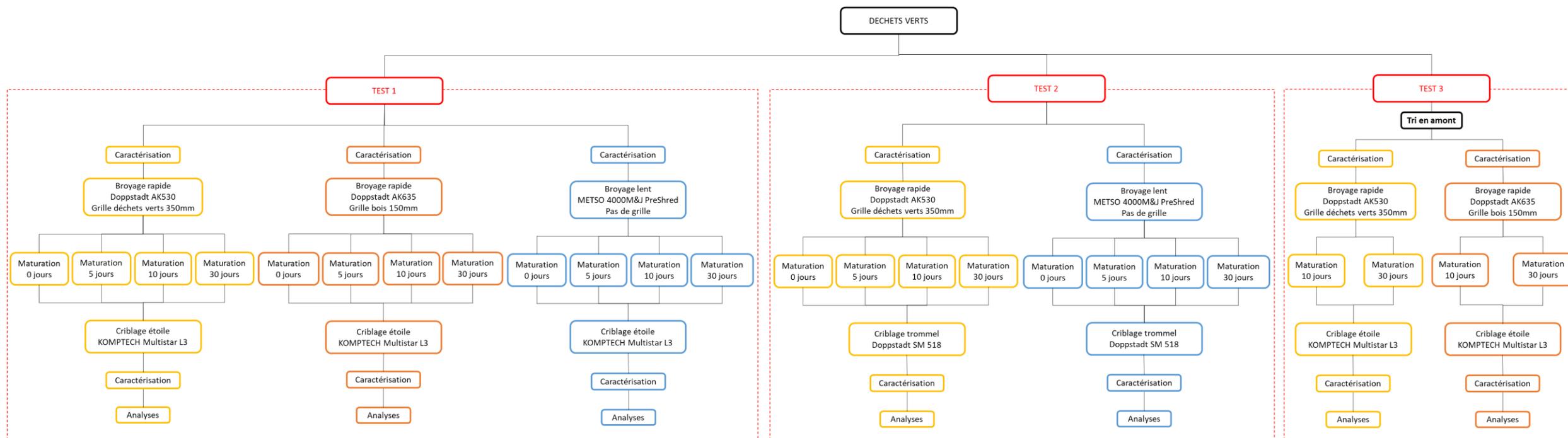
Sélectionner une technologie de broyage

Sélectionner une technologie de criblage

**+** étude du tri en amont

Sélectionner un temps de maturation

# Méthodologie des essais



# Etude du tri en amont

## Légende :

- Branchages D>6cm
- Branchages 3<D<6cm
- Branchages D<3cm
- Brindilles
- Fines = Tontes + Feuilles
- Inertes
- Plastiques
- Ferrailles

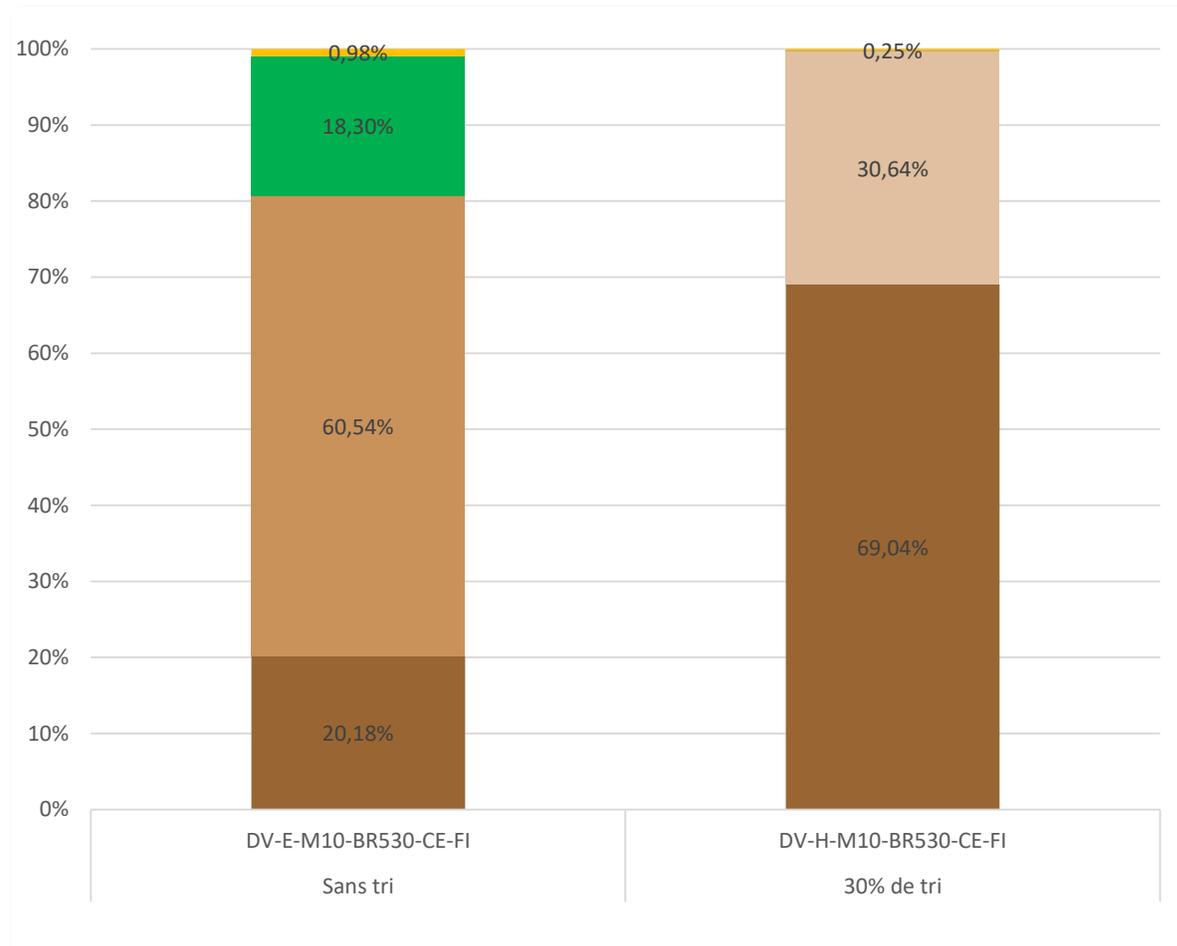
### ATTENTION

*L'étude du tri en amont présentée n'a été réalisée qu'à partir des résultats obtenus pour les échantillons ayant subi le même prétraitement (broyage rapide, 10 jours de maturation, criblage étoile)*

## Constats :

- Présence de fraction d'intérêt (branchages et tailles de haies de diamètre inférieur et supérieur à 6cm) en quantité plus importante dans l'échantillon obtenu en sortie du procédé

➔ **Le tri en amont permettant d'obtenir 30% de fractions ligneuses en amont du procédé est bénéfique**



# L'opération de broyage

→ Comparaison de 2 technologies : **broyage rapide** et **broyage lent**

## ATTENTION

*Initialement le broyeur AK635 n'était pas inclus dans l'étude. Il a été ajouté à la demande de l'entreprise BRALEY puis a servi d'étalon à la suite d'une opération de maintenance sur le AK530 qui a modifié la granulométrie des particules*

Doppstadt AK530



**Broyeur rapide**

Fléaux

Grille déchets verts 350mm

100 – 150 m<sup>3</sup>/h

Doppstadt AK635



**Broyeur rapide**

Fléaux

Grille bois 150mm

120 – 170 m<sup>3</sup>/h

METSO M&J PreShred 4000 M



**Broyeur lent**

Couteaux

Pas de grille

~ 100 m<sup>3</sup>/h

# Résultats - Broyage

## Légende :

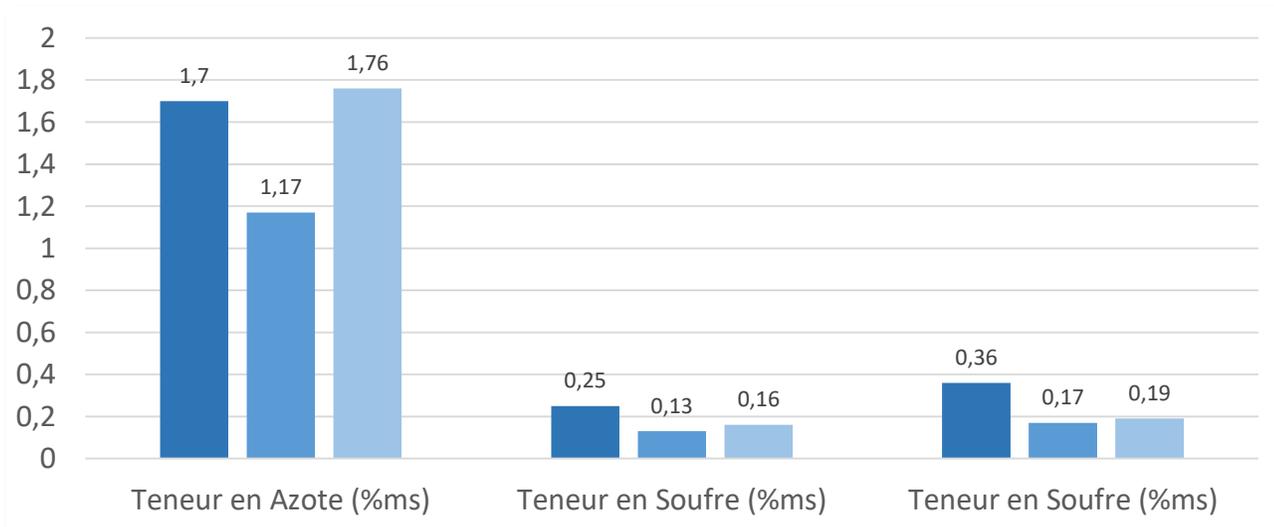
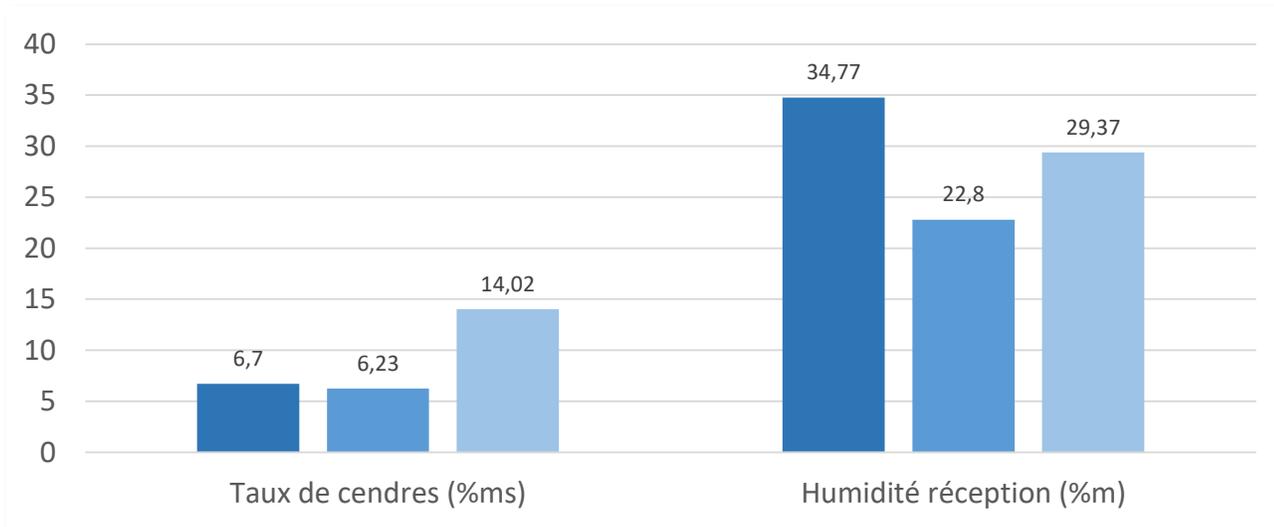
- Moyenne Déchets Verts L3 - AK530 Grille 350mm
- Moyenne Déchets Verts L3 -AK635 Grille 150mm
- Moyenne Déchets Verts L3 - METSO Pas de grille

## Constats :

- Pas de tendance concernant les teneur en humidité à réception, en Soufre et en Chlore
- Les teneurs en cendres et en Azote des échantillons obtenus avec un broyeur rapide sont plus faibles

## Ordre préférentiel :

**Broyage rapide > Broyage lent**



# L'opération de Maturation

→ Comparaison de 4 temps de maturation

0 jour

5 jours

10 jours

30 jours

Rôle de la maturation :

Sécher la matière pour favoriser la séparation des particules fines et les fractions ligneuses



# Résultats - Maturation

## Légende :

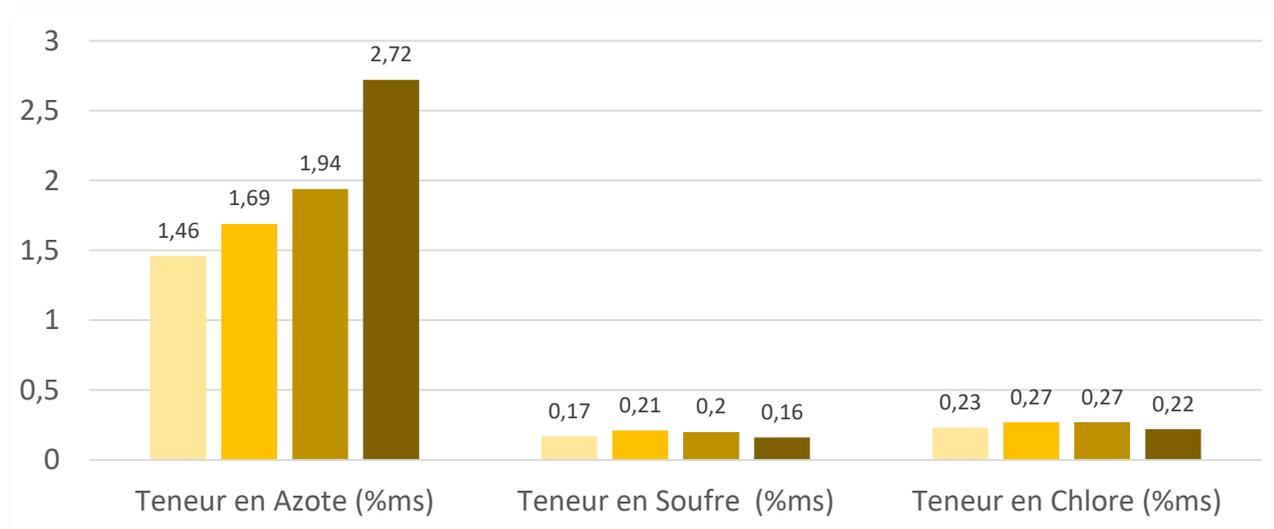
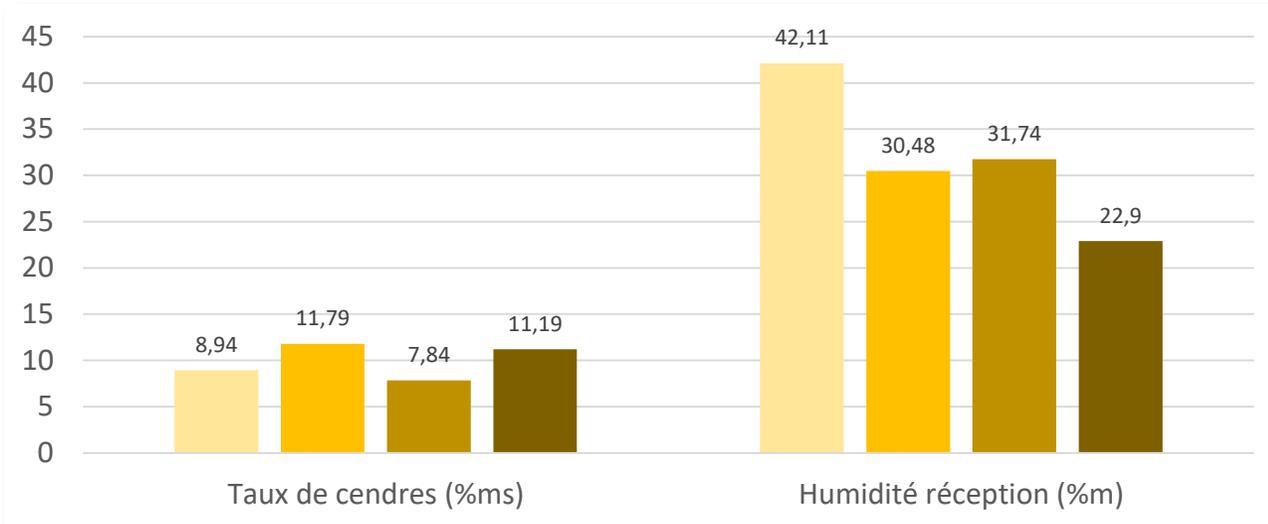
- Moyenne 0 jour
- Moyenne 5 jours
- Moyenne 10 jours
- Moyenne 30 jours

## Constats :

- Aucune tendance n'est constatée concernant les teneurs en cendres, en Soufre et en Chlore
- La teneur en Azote augmente avec l'augmentation du temps de maturation
- La teneur en humidité à réception diminue avec l'augmentation du temps de maturation
- Un temps de maturation inférieur à 10 jours n'est pas envisageable pour un site de traitement des déchets verts

## Ordre préférentiel :

**10 jours > 30 jours**



# L'opération de Criblage

→ Comparaison de 2 technologies : **crible étoile** et **crible trommel**

## Komptech Multistar L3



**Crible étoile**

Crible rapide

Etoiles

120 à 180 m<sup>3</sup>/h

## Doppstadt SM 518



**Crible trommel**

Crible lent

Tamis

~ 150 m<sup>3</sup>/h

# Résultats - Criblage

## Légende :

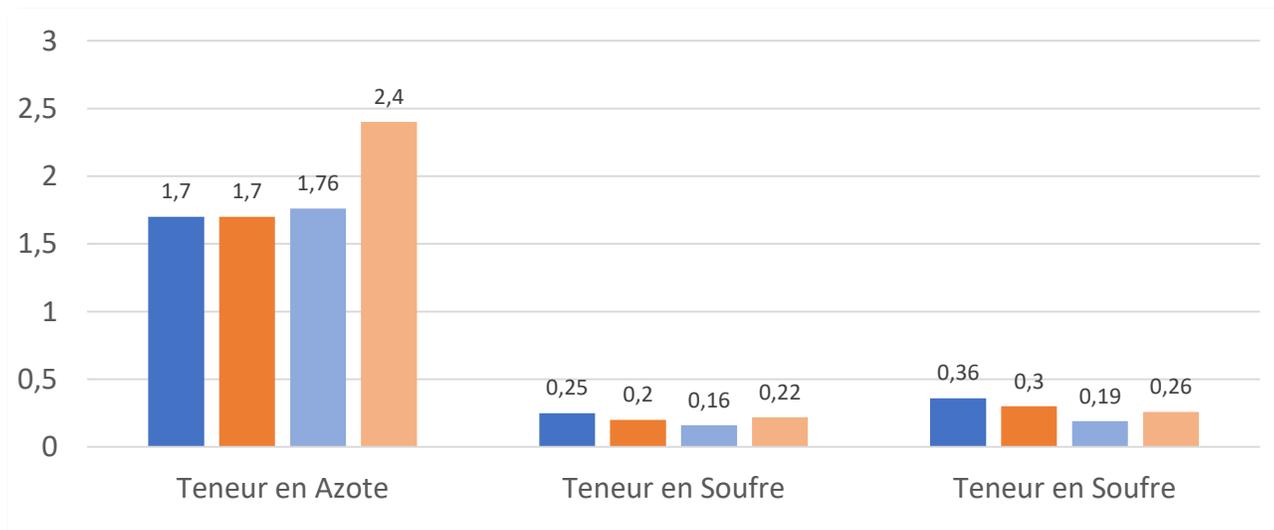
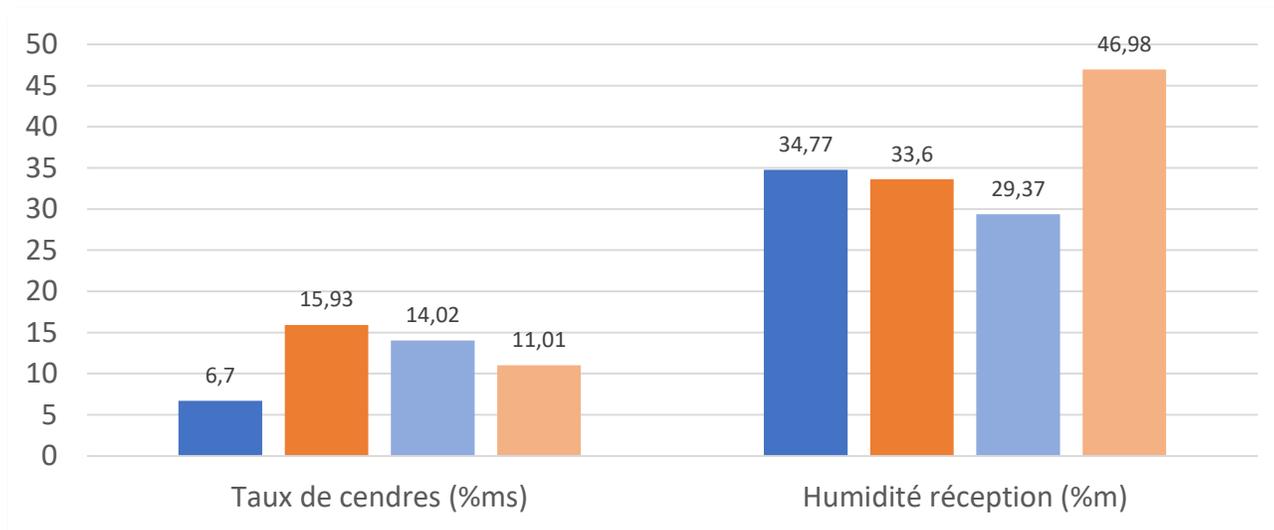
- Moyenne Déchets L3 - AK530 Grille 350mm
- Moyenne Déchets TROMMEL - AK530 Grille 530mm
- Moyenne Déchets Verts L3 - METSO
- Moyenne Déchets Verts TROMMEL - METSO

## Constats :

- Aucune tendance concernant les teneurs en humidité à réception, en Soufre et en Chlore
- Les teneurs en cendres et en Azote sont plus faibles pour les échantillons issus du crible étoile

## Ordre préférentiel :

**Crible étoile > Crible trommel**



# Bilan matière

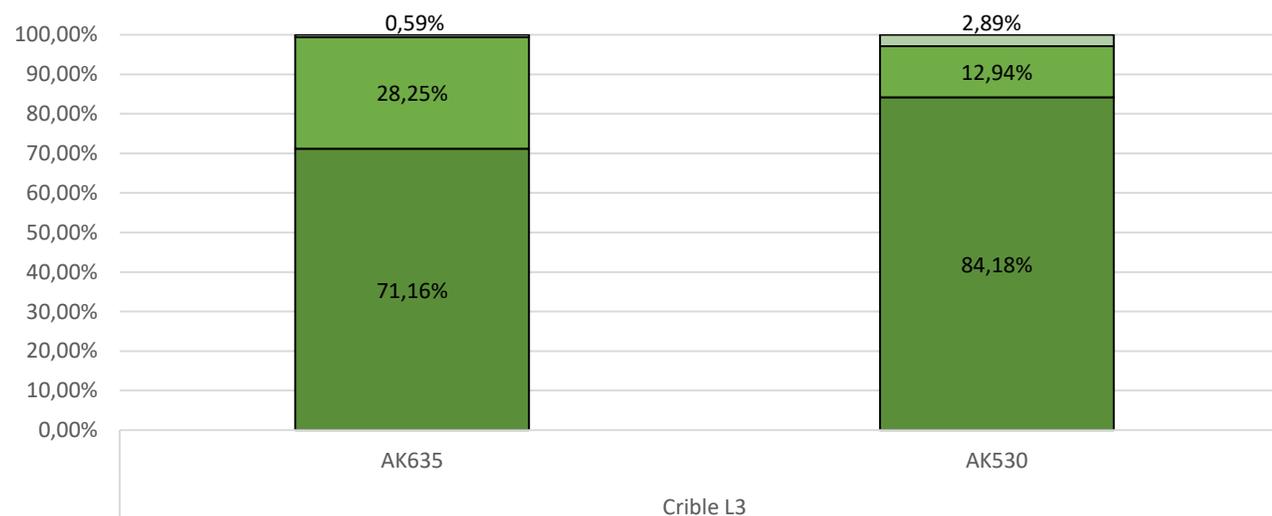
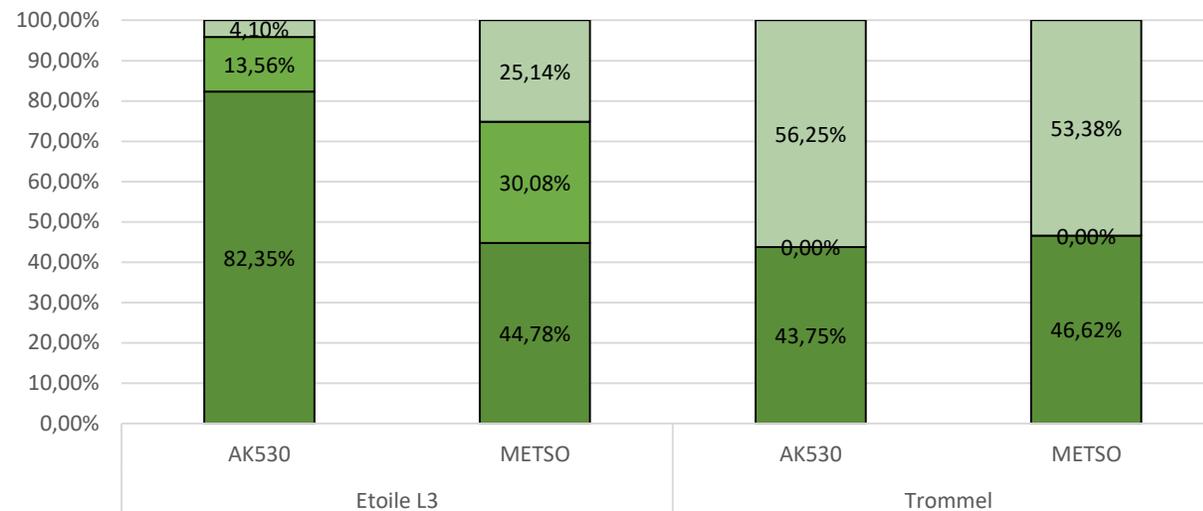
## Légende :

- Fraction fine
- Fraction intermédiaire
- Fraction grossière

## Constats :

- Concernant les comparaisons broyeur lent / broyeur rapide, il semble que les fractions à valoriser soit les fractions intermédiaires et grossières issues du broyeur rapide (AK530). Ce constat s'appuie sur les comparaisons des analyses thermochimiques.

- Concernant les comparaisons entre les broyeurs rapides, il semble que le broyeur AK635 (grille bois 150mm) permette d'extraire plus de fraction intermédiaire que le AK530 (grille déchets verts 350mm)

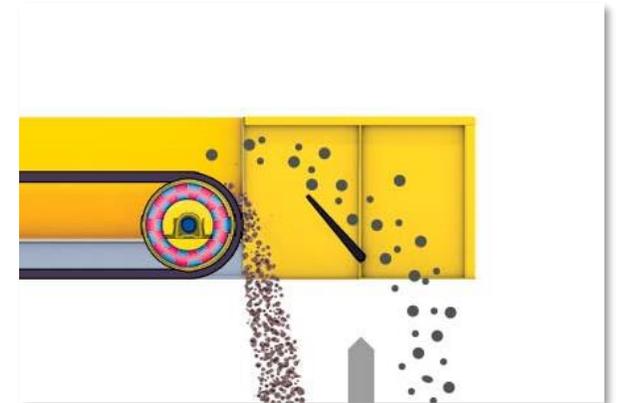


# 4. LOT 4

# L'opération de dépollution

## Objectif du lot :

Prouver la pertinence d'une ligne de dépollution dans un procédé de prétraitement des déchets verts



Trieur aéraulique

Trieur cyclonique

Overband

Trieur à courant de Foucault

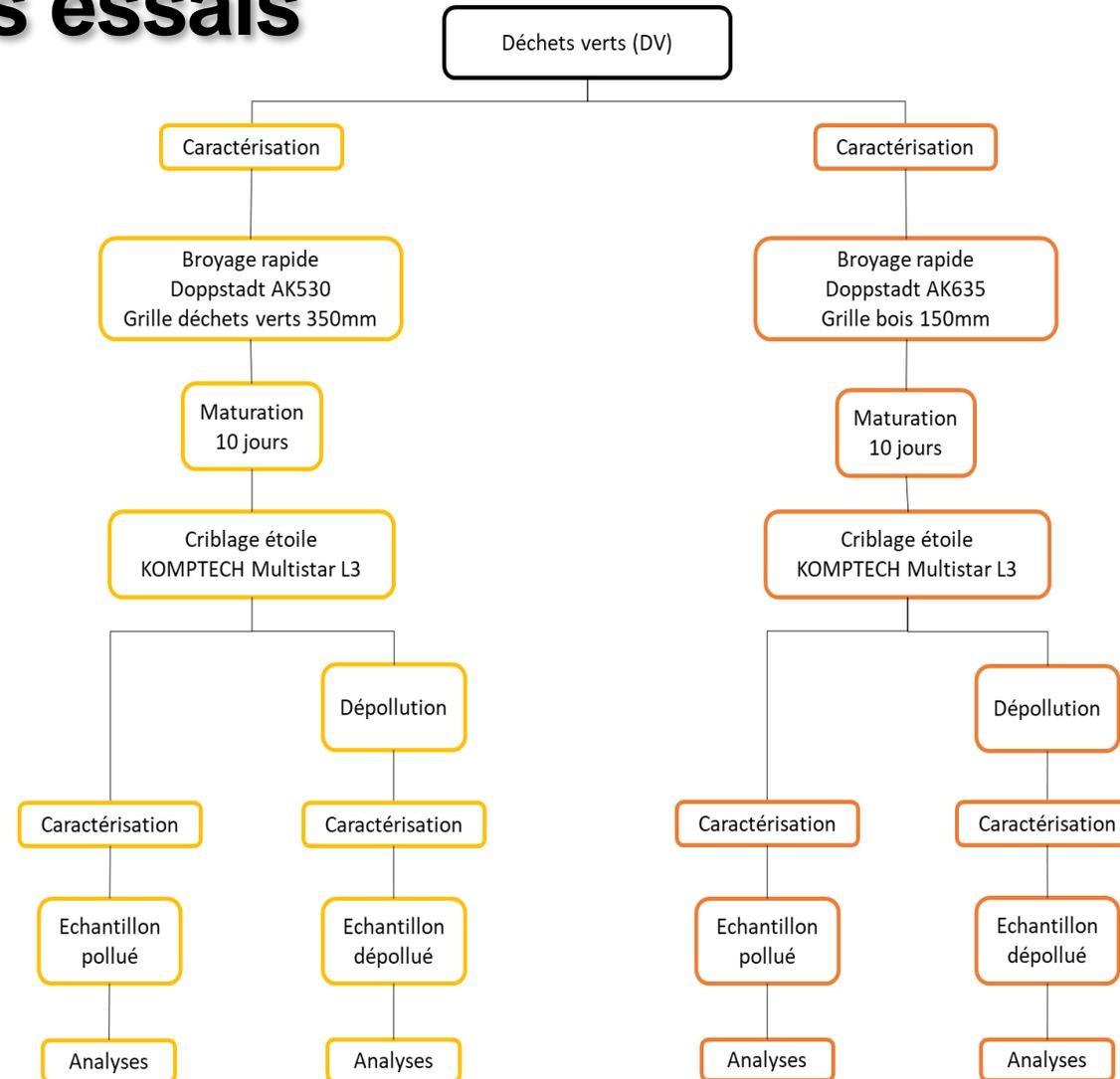
Séparation des inerts lourds

Séparation des indésirables légers

Séparation des métaux ferreux

Séparation des métaux non ferreux

# Méthodologie des essais



# Résultats - Dépollution

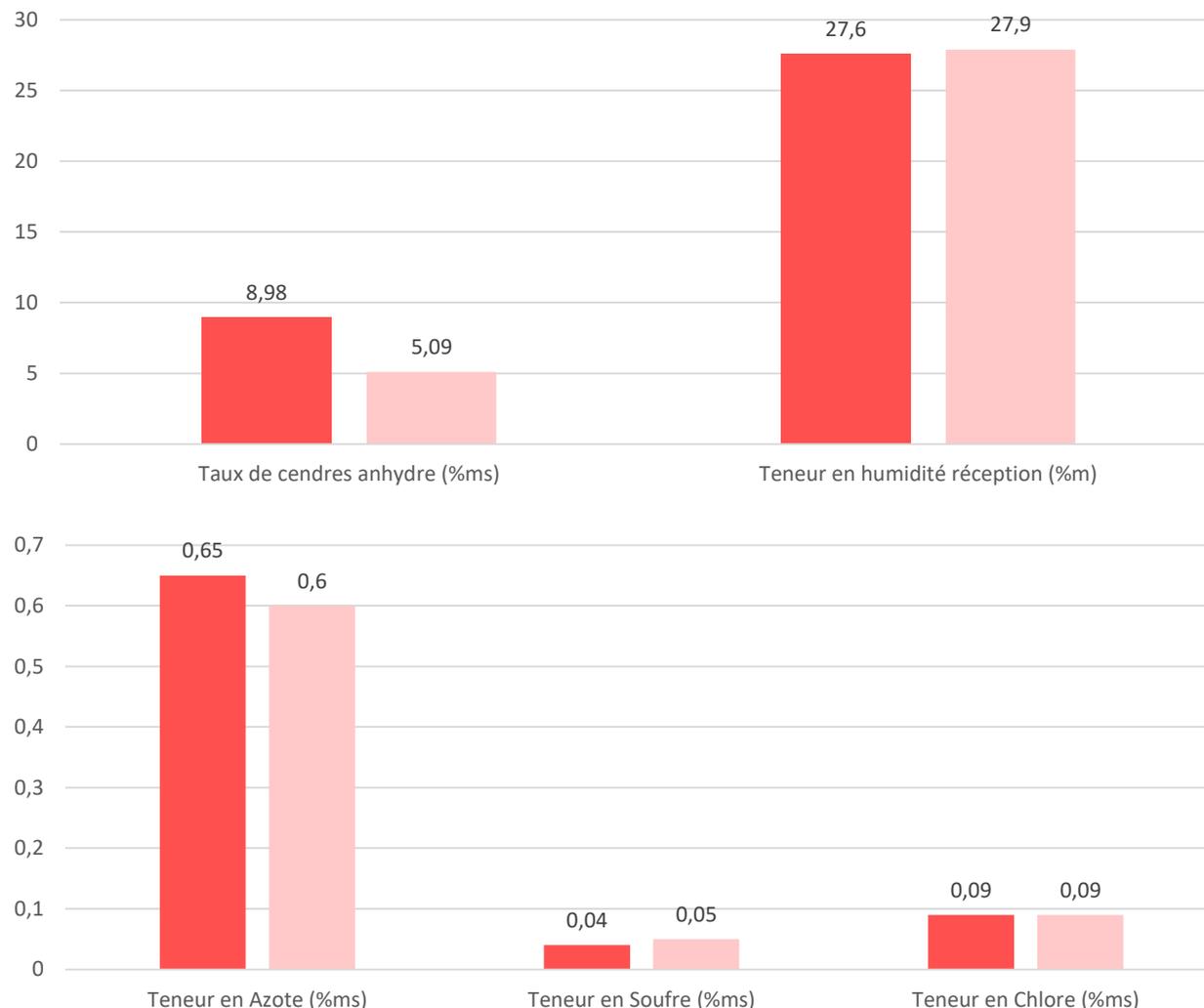
## Légende :

- Moyenne déchets verts non-dépollués
- Moyenne déchets verts dépollués

## Constats :

- Aucune tendance concernant les teneurs en humidité à réception, en Soufre et en Chlore
- Les teneurs en cendres et en Azote sont plus faibles pour les échantillons dépollués en comparaison avec les échantillons pollués

**La dépollution est nécessaire pour envisager une valorisation en combustion de la fraction ligneuse extraite des déchets verts**



# 5. LOT 5

# Essai en combustion à échelle laboratoire

Objectif : Déterminer les rendements en produits obtenus après combustion des déchets verts

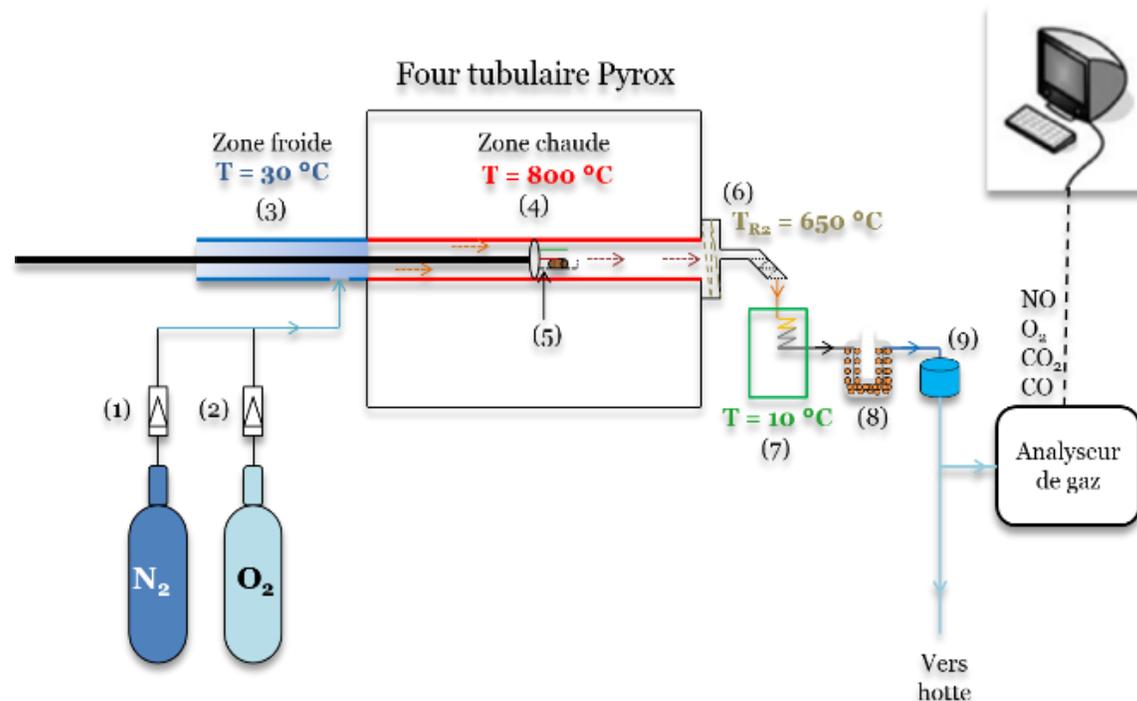
## Constats :

- Concentrations en  $O_2$ , CO et NO montrent des évolutions similaires pour tous les échantillons avec des intensités dépendantes des masses et de la nature du déchets

- La composition des déchets verts qui diffère en fonction de la saisonnalité a une influence significative sur les gaz produits : il y a plus de CO et moins de NO sur les déchets hivernaux

- Le prétraitement (broyeur lent / rapide, 0 / 5 / 10 / 30 jours de maturation, crible étoile / trommel) n'a pas d'influence sur les gaz produits

- Les analyses GC-MS ne détectent aucune espèce organique détectable dans les produits



# Essais en combustion à échelle pilote

## Objectif :

Valider le procédé de prétraitement sélectionné et la matière produite en combustion

### **ATTENTION**

*Les émissions gazeuses mesurées lors de ces essais sont celles qui sont comparées avec les VLE des ICPE 2910 (combustion biomasse) et 2771 (incinération de déchets non dangereux) dans le lot 6*



# Résultats – Essais en combustion échelle pilote

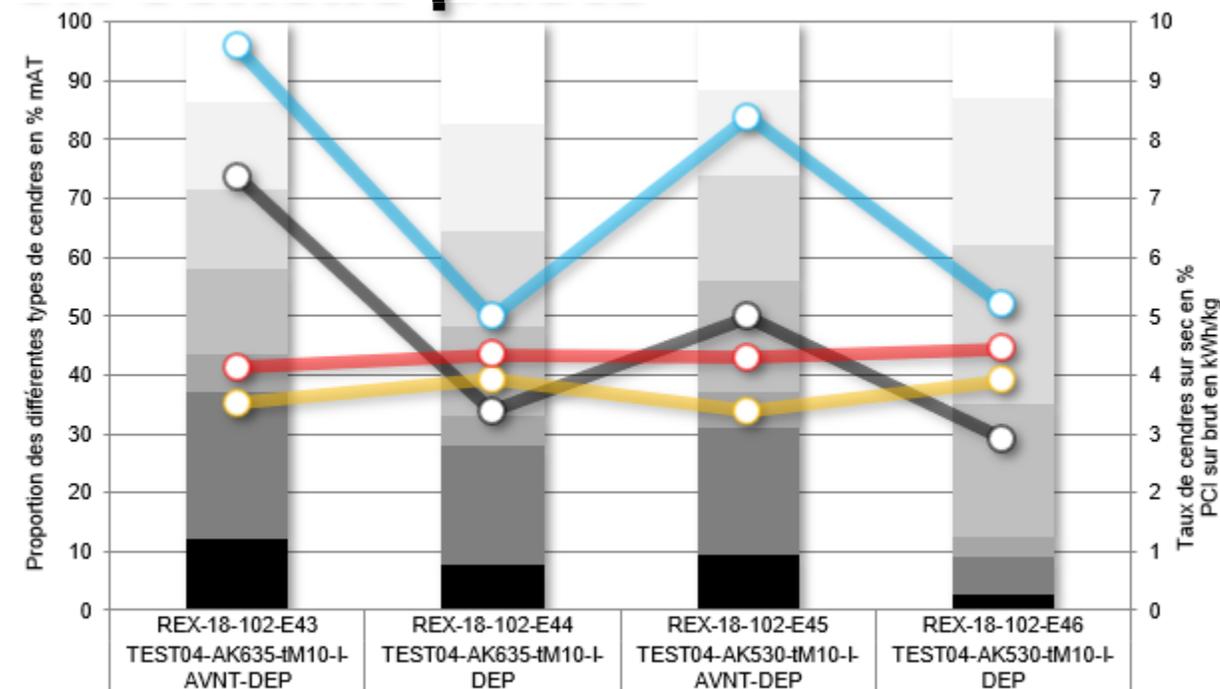
## Légende :

Proportion fraction FA0
Proportion fraction FA0,2
Proportion fraction FA0,5
Proportion fraction FA1
Proportion fraction FA2
Proportion fraction FA3,15
Proportion fraction F8
Taux de cendres sur sec chaudière
Taux de cendres sur sec laboratoire
Quantité d'énergie dégagée par la matière sur brut
PCI sur brut laboratoire

## Constats :

- Les mâchefers (cendres de granulométrie supérieure à 8mm) sont plus présents dans les échantillons avant dépollution qui présentent plus d'inertes (cailloux, graviers, ...) que les échantillons après dépollution.

- Les échantillons issus du broyeur AK530 semblent produire moins de mâchefers que ceux issus du broyeur AK635.



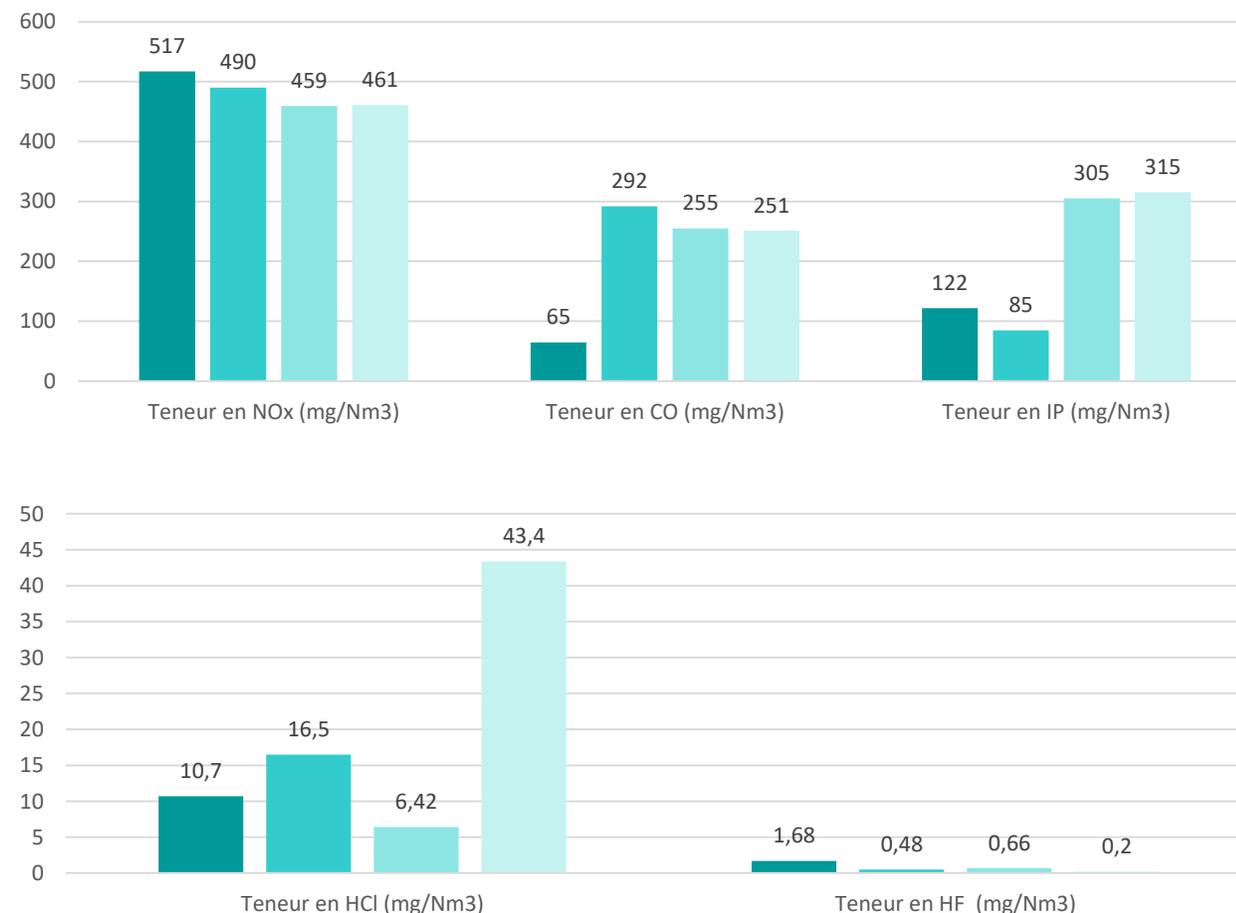
# Résultats – Essais en combustion échelle pilote

## Légende :

- DV-H-BR635-M10-CE-FI-AD
- DV-H-BR635-M10-CE-FI-D
- DV-H-BR530-M10-CE-FI-AD
- DV-H-BR530-M10-CE-FI-D

## Constats :

- Aucune tendance observée concernant les teneurs en CO, NOx, poussières et en HCl.
- Les teneurs en poussières semblent très élevées, il faudra donc envisager la mise en place d'un filtre.
- Les teneurs en CO sont très élevées, une combustion multi-étagée pourrait permettre de diminuer cette teneur.
- Les teneurs en HCl comportent une anomalie : la teneur mesurée pour l'échantillon DV-H-BR530-M10-CE-FI-D est trop élevée suite à une erreur de consigne lors d'un prélèvement.



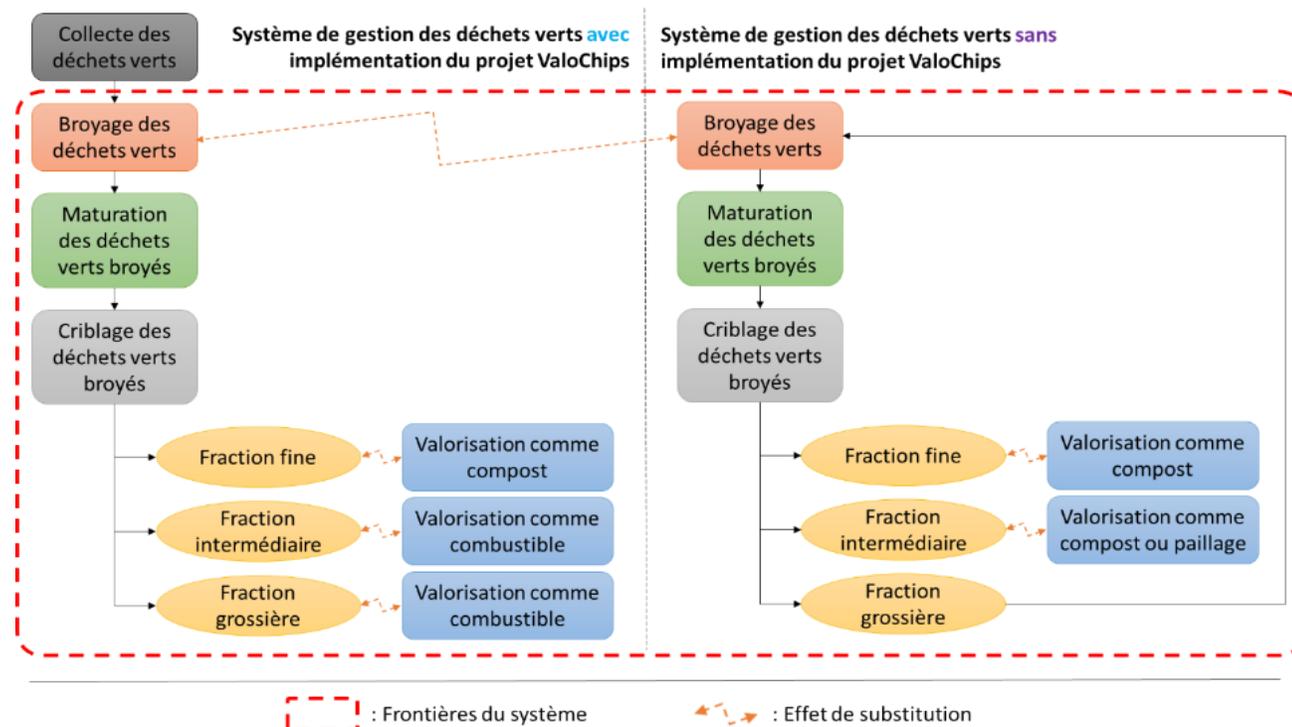
# 6. LOT 6

# Objectif - Etude ACV

## Objectifs :

Répondre aux problématiques suivantes :

- Quel est l'intérêt environnemental de la valorisation des déchets verts ligneux proposée dans VALOCHIPS, par rapport à la gestion actuelle des déchets verts ?
- Parmi les solutions de valorisation considérées dans VALOCHIPS, quelles sont celles présentant les meilleures performances environnementales potentielles ?

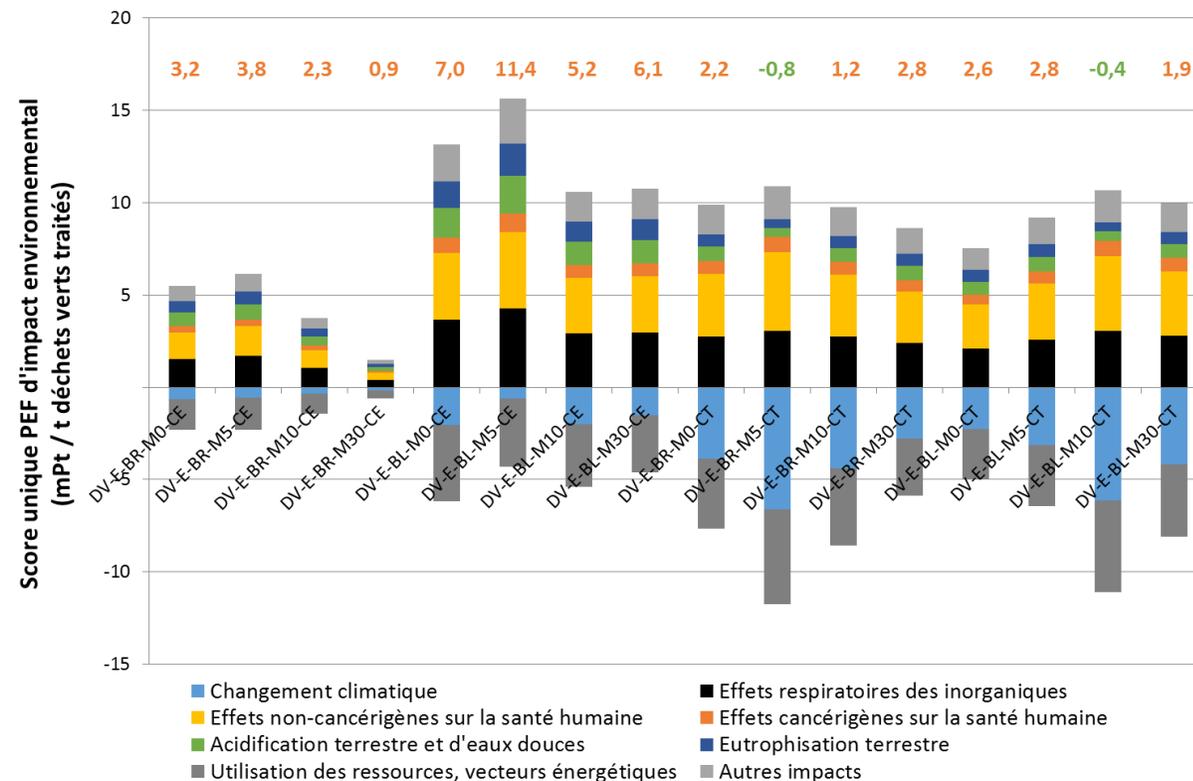


*Système étudié dans le cadre de VALOCHIPS*

# Intérêt environnemental

## Constats :

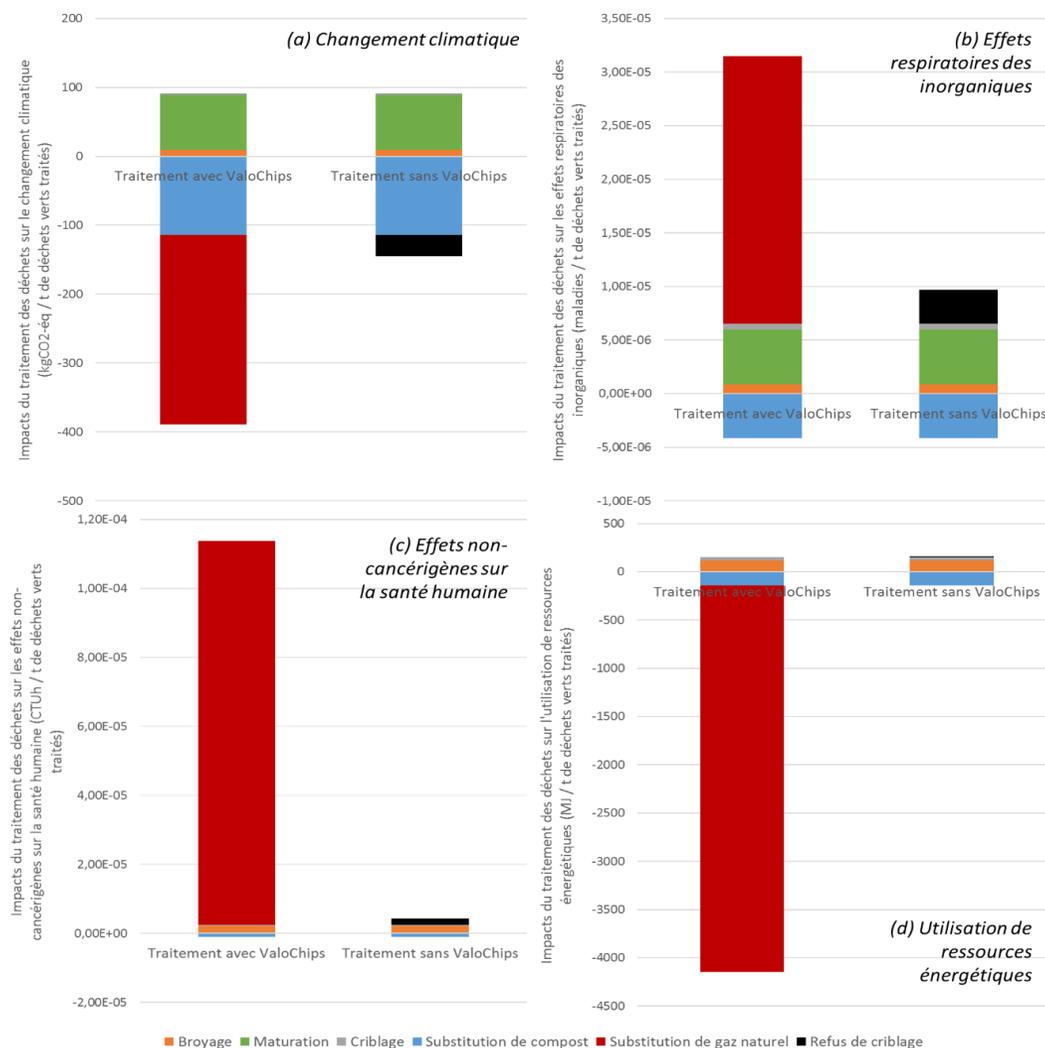
- L'intérêt environnemental de la valorisation énergétique dépend fortement des enjeux environnementaux considérés : il y a une bénéfice concernant le changement climatique et l'utilisation des ressources énergétiques. La valorisation énergétique accroît les impacts sur la filière (impacts locaux sur la pollution de l'air,...)
- Pour la toxicité humaine non-cancérogène, l'analyse des résultats s'est confrontée aux limites des méthodes et connaissances disponibles liées à la prise en compte de l'impact des éléments minéraux



# Performances environnementales

## Constats :

- Compte tenu des incertitudes sur les données collectées, il n'a pas été possible de hiérarchiser les scénarios.
- L'intérêt environnemental des scénarios semble dépendre fortement de la proportion de fraction ligneuse obtenue à l'issue du criblage : une proportion minimale de 60 % semblerait se dégager, mais cette valeur reste à confirmer.
- 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 car il présente de plus grandes proportions de fraction grossière mais les résultats obtenus ne permettent pas de définir si un des deux types de cribles est plus intéressant que l'autre.
- Dans le cas des traitements de déchets par crible étoile, les résultats obtenus montrent que l'intérêt d'une valorisation énergétique de la fraction intermédiaire est limité, lorsque celle-ci est déjà valorisée comme compost; ceci n'est pas vrai lorsque la fraction intermédiaire est valorisée en paillage.



Exemple d'analyse comparative faite sur un échantillon

# Etude réglementaire

## Légende :

**Vert** : conforme à toutes les VLE

**Orange** : conforme à au moins une VLE

**Rouge** : conforme à aucune VLE

## Constats :

- Les échantillons sont plus souvent conformes aux 2910 A Déclaration et ICPE 2910 B Enregistrement qu'aux ICPE 2910 A&B Autorisation et 2771 Autorisation

- Il est nécessaire d'abaisser les teneurs en poussière et en CO des fumées

**D'après ces résultats, il est possible d'envisager la valorisation en combustion sous les ICPE 2910 A Déclaration ou 2910 B Enregistrement à conditions d'abaisser la teneur en CO et en poussières dans les fumées**

	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)
NOx	488,2	475,6		525	400 (P<50MW)	180	300
CO	159,7	271,4		250	200 (P<100MW)	75	75
SO <sub>2</sub>	89,5	73,1		225	200 (P<300MW)	45	75
HCl	8,6	29,9	-	30	10	9	15
HF	1,2	0,3	-	25	5	1,5	1,5
Poussières	213,5	199,9	50	-	30	7,5	15
NH <sub>3</sub>	2,3	1,9	-	-	5	15	45
Pb	0,3	0,2	-	1	1	-	-
Cd	0,005	0,006	-	0,05	0,5	-	-
Hg	0,001	0,002	-	0,05	0,05	0,03	0,075
TI	0,004	0,0021	-	0,05	0,05	-	-
Cd + Hg + TI	0,007	0,007		0,1	0,1	-	-
As + Se + Te	0,14	0,08		1	1	-	-
Métaux lourds	9,0	4,9	-	-	20 (P<50MW)	-	-
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu +	0,77	0,52	-	-	-	0,45	0,75
Cd + TI	0,009	0,008	-	-	-	0,03	0,03

# 7. Etude technico-économique

# Scénario 1

## Hypothèses :

- L'étape de tri en amont est réalisée sur une aire réservée en amont du procédé. Ce tri est estimé à 15 minutes pour une benne de 30 m<sup>3</sup>.

- Le procédé de prétraitement étudié n'est **dédié qu'à la production de bois énergie** à partir des fractions ligneuses des déchets verts (si ce n'est pas le cas un coefficient doit être appliqué)

- Le procédé de prétraitement est dimensionné pour traiter un volume entrant de 27 500 tonnes de déchets verts à 55% d'humidité qui sèchent lors de l'étape de maturation pour atteindre une humidité de 40%. Cette perte d'humidité engendre une perte de masse : le tonnage total après maturation est donc estimé à 20 000 tonnes.

- Les coûts RH sont estimés à partir d'un coût annuel chargé pour un opérateur de 50 000 EUR/an. L'encadrement pour un opérateur est estimé à 20% et l'encadrant est rémunéré 80 000 EUR/an. Ainsi, **le coût RH chargé est 66 000 EUR/an** pour un opérateur.

- Les temps d'opération annuels permettant la détermination des coûts, ont été estimés à partir de données fournies par l'entreprise BRALEY qui fonctionne en andain (un andain équivaut à 800 tonnes). Les temps par andain ont donc été extrapolés pour le volume traité par la ligne.

Coûts	
Coûts RH opératoires (EUR/an)	111 611
Coûts de maintenance (EUR/an)	44 911
Coûts d'investissement (EUR HT/an)	361 000
Coût énergétique (EUR HT/an)	238 527
<b>Coût global (EUR HT/an)</b>	<b>756 049</b>
<b>Coût à la tonne (EUR HT/an)</b>	<b>142,6</b>

# Scénario 2

## Hypothèses :

- L'étape de tri en amont est réalisée en parallèle de l'étape de broyage. Ce tri dure 5 minutes pour 30 m<sup>3</sup>.

- Le procédé de prétraitement étudié n'est **dédié qu'à la production de bois énergie** à partir des fractions ligneuses des déchets verts (si ce n'est pas le cas un coefficient doit être appliqué)

- Le procédé de prétraitement est dimensionné pour traiter un volume entrant de 27 500 tonnes de déchets verts à 55% d'humidité qui sèchent lors de l'étape de maturation pour atteindre une humidité de 40%. Cette perte d'humidité engendre une perte de masse : le tonnage total après maturation est donc estimé à 20 000 tonnes.

- Les coûts RH sont estimés à partir d'un coût annuel chargé pour un opérateur de 50 000 EUR/an. L'encadrement pour un opérateur est estimé à 20% et l'encadrant est rémunéré 80 000 EUR/an. Ainsi, **le coût RH chargé est 66 000 EUR/an** pour un opérateur.

- Les temps d'opération annuels permettant la détermination des coûts, ont été estimés à partir de données fournies par l'entreprise BRALEY qui fonctionne en andain (un andain équivaut à 800 tonnes). Les temps par andain ont donc été extrapolés pour le volume traité par la ligne.

Coûts	
Coûts RH opératoires (EUR/an)	109 739
Coûts de maintenance (EUR/an)	44 724
Coûts d'investissement (EUR/an)	361 000
Coût énergétique (EUR/an)	234 526
<b>Coût global (EUR/an)</b>	<b>749 988</b>
<b>Coût à la tonne (EUR/an)</b>	<b>142,0</b>

# Comparaison des scénarii

## Constats :

- Les hypothèses faites sur le tri ne sont pas pertinentes : elles n'engendrent qu'une variation de 0,80% sur le coût global annuel du procédé de prétraitement
- Les coûts les plus élevés sont ceux liés aux ressources humaines et à l'investissement
- Le prix de l'énergie sans optimisation de l'investissement n'est pas compétitif avec les autres combustibles présents sur le marché.

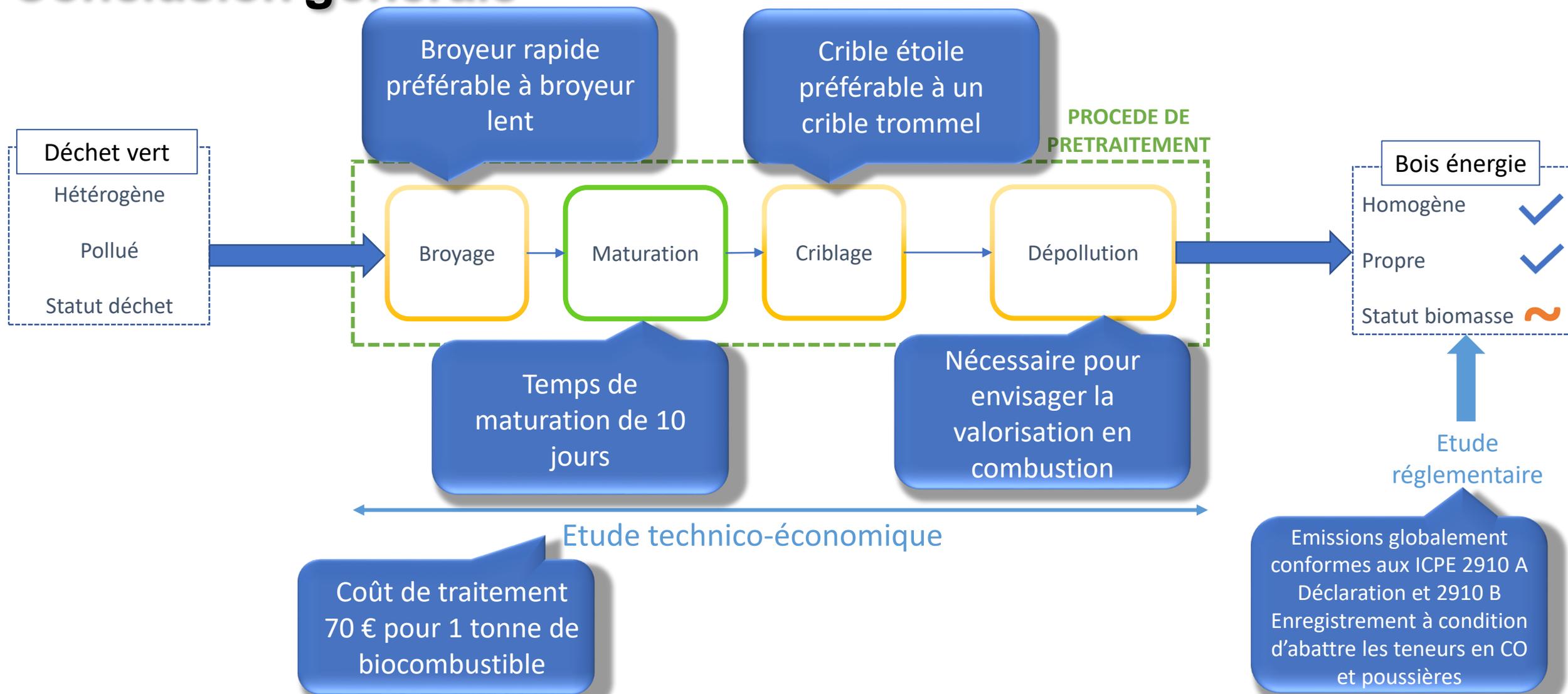
	Ecorces	Broyat recyclage	Plaquettes Forestières
Prix moyen (€ HT/MWh livré)	17	20	25

- Un prix cible serait de 18 € HT/MWh
- La rentabilité dépend du prix d'entrée de la matière dans la procédé (valeur négative)

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2 avec optimisation investissement
Coûts RH opératoires (EUR/an)	111 611	109 739	109 739
Coûts de maintenance (EUR/an)	44 911	44 724	44 724
Coûts d'investissement (EUR HT/an)	361 000	361 000	58 400
Coût énergétique (EUR HT/an)	238 527	234 526	234 526
<b>Coût global (EUR HT/an)</b>	<b>756 049</b>	<b>749 988</b>	<b>447 388</b>
<b>Coût à la tonne (EUR HT/an)</b>	<b>142,6</b>	<b>142,0</b>	<b>69,9</b>
PCI (MWh/tonne)	<b>3,43</b>	<b>3,43</b>	<b>3,43</b>
Prix énergie (€ HT/MWh)	<b>41,6</b>	<b>41,4</b>	<b>20,4</b>

# 8. Conclusion

# Conclusion générale



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 :

Aurélie 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)