



Valorisation de résidus d'herbe par voie sèche

Jean-François LARGEAU, Mohand TAZEROUT
IMT Atlantique GEPEA UMR 6144
Département Systèmes Energétiques & Environnement.
4, rue Alfred Kastler, BP 20722, 44307 NANTES Cedex 3, France
jean-francois.largeau@icam.fr
mohand.tazerout@imt-atlantique.fr

1. Résumé:

Ces travaux ont pour objectifs d'étudier la valorisation par voie sèche de résidus de tonte (herbe issues de l'activité d'espace vert en France avec un taux d'humidité de 60% à 80%). L'objectif est d'aboutir un résidu stable donc avec un taux d'humidité acceptable de 20% et mis en forme. Cette étude s'intéresse au conditionnement propice à une dégradation rapide en fonction de différents paramètres et deux formes de granulats : des palets (\varnothing 60mm) et des granulés (\varnothing 6mm). Un processus de broyage-compression et séchage est proposé. L'analyse de la composition et du potentiel énergétique a été également entreprise (PCI de 4,6kWh/kg, taux de cendre de 7%). Une pré-étude de la dégradation thermique DCS et ATG est fournie (montrant une dégradation située entre 200°C et 550°C). Ces travaux seront complétés par une étude de la diffusion massique et du séchage ainsi que par des analyses complémentaires sur la cinétique de dégradation (modèle cinétique) et par la composition des gaz de pyrolyse pour la conférence. Une version à jour de ce document sera transférée au préalable.

2. Introduction et contexte

Cette étude s'intéresse à la valorisation énergétique des déchets verts et plus particulièrement de l'herbe de tonte (gazon). Dans toute une partie notamment de l'Europe, les espaces verts des collectivités ainsi que les jardins des particuliers sont des gisements importants d'herbes de tonte. Généralement, ce résidu est utilisé pour faire du compost (amendement pour le sol) ou reste sur place dans le cas du mulching. Ainsi, il n'est que rarement valoriser d'un point de vue énergétique.

Ce projet a pris naissance d'un besoin d'une structure qui réalise des travaux d'entretien des espaces verts et qui doit payer l'évacuation de chaque tonne d'herbe. L'inconvénient de ce résidu pour la filière de valorisation par voie sèche est qu'il contient entre 60%H et 80%H de sa masse en d'eau : il possède donc une forte activité en eau qui entraîne une dégradation par fermentation très rapide (quelques jours). Des travaux existent sur la valorisation de plante ou d'herbe mais ils s'intéressent aux herbes médicinales issues de procédés de l'industrie pharmaceutique ([1][2][3][4]) de l'Asie de l'Est. Le fait d'utiliser des essences Européennes directement prélevées (sans transformation) implique d'étudier la chaîne complète de valorisation.

Ainsi, les objectifs de cette étude sont d'une part de vérifier la pertinence d'une valorisation énergétique par voie sèche mais également d'apporter des éléments de réponse sur les processus à mettre en œuvre. Il s'agit donc d'abord d'étudier la brique « stockage d'énergie » (herbes-énergie) en stabilisant le résidu via l'augmentation sa siccité et en le conditionnant pour qu'il possède des caractéristiques géométriques compatibles avec des procédés de valorisation

L'étape suivante sera d'étudier la cinétique de dégradation du résidu stabilisé afin de la valoriser par pyrolyse ou gazéification pour obtenir un gaz combustible voir du char. Le gaz de synthèse sera utilisé dans un groupe électrogène à gaz pauvre pour fournir de l'énergie électrique.

3. Valorisation et objectifs

L'objectif premier est donc de stabiliser le résidu en diminuant le taux d'humidité et en le conditionnement dans une forme précise en lien avec les procédés de valorisation. Le but est de le rendre compatible soit avec des

moyens de chauffage conventionnels (palet pour les cheminées/poêles, granulé pour les poêles à granulé), soit avec des procédés plus innovant (moins conventionnels) comme un pyrolyseur ou un gazogène. La forme de palet est également intéressante dans le cas où l'on cherche à produire des filtres à base de char.

Pour permettre une stabilisation du produit dans le temps, une diminution de l'activité en eau a_w (Water Activity) est primordiale dans notre étude. a_w est le rapport entre la pression de vapeur mesurée au-dessus du produit et la pression de vapeur saturante ambiante. Cette activité caractérise la mobilité de l'eau dans le produit (sorption/désorption) mais également la possibilité de croissance des micro-organismes qui vont détériorer le résidu [5]. Ainsi, les bactéries se développent pour $a_w > 0,7 - 0,9$; et les moisissures pour $a_w > 0,65$. Ainsi la littérature s'accorde sur une valeur a_w de 0,5 qui permettrait de garantir la stabilité du produit (et non sa stérilité). La difficulté consiste à relier a_w au taux d'humidité %H du produit qui dépend de la température et des propriétés du matériau caractérisant les phénomènes de sorption/désorption.

Pour une valorisation par voie sèche, l'objectif est d'atteindre un taux d'humidité %H ($\%H = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse totale}} \times 100$) inférieur à 20%.

L'objectif $a_w < 0.5$ peut être atteint par l'évaporation de l'eau libre contenue à la surface (évaporation de l'eau libre) ainsi que de l'eau faiblement liée présente en proximité des surfaces du résidu. Pour cela, le résidu sera broyé afin de faciliter la migration de la phase liquide et déshydraté par compression mécanique puis par évaporation.

Le coefficient de diffusion massique est également un coefficient intéressant à étudier afin de caractériser la cinétique de déshydratation d'un produit par la faculté de migration de la phase liquide dans la matrice solide. Différents travaux proposent des méthodes basées sur des résidus variés tels des résidus de fruit de la passion [6], de production d'huile d'olive [7] ou de biomasse [8]. Une analyse est en cours afin de déterminer le coefficient de diffusivité massique des granulés d'herbe et ainsi comparer ces résultats avec ceux de [8] et optimiser le procédé de séchage.

Les techniques utilisées doivent permettre d'obtenir une valorisation économiquement intéressante et la déshydratation par voie thermique sera donc proscrite. Une tentative d'ajout de papier en vue de diminuer le taux d'humidité global est présentée.

De fait, le procédé retenu consiste à broyer le résidu afin d'améliorer la mobilité de la phase liquide, puis de le mettre en forme par compression afin d'obtenir une déshydratation mécanique avant une dernière phase séchage.

Dans la suite, les équipements, le protocole expérimental ainsi que les résultats sont commentés.

4. Equipements d'analyse

Les mesures de masse sont effectuées avec une balance de précision ($d=0.01g$) RADWAG WTB2000. La dessiccation des échantillons est obtenue à l'aide d'une étuve Memmert en maintenant une température de 70°C pendant 24h.

Un four à calciner Nabertherm HT0816 permet d'obtenir les taux de cendre après calcination à 800°C pendant 5h. Les analyses thermogravimétriques (ATG) sont conduites avec dispositif SETSYS Evolution 16/18 de marque SETARAM. Les analyses présentées sont réalisées 20-800°C à 10°C/min, sous gaz interne N₂ à 20ml/min. Les analyses DSC utilisent le système Pyris600 de marque Perkins Elmer, sous gaz interne N₂. Ces analyses sont réalisées jusqu'à 400°C à 10°C/min.

5. Méthodologie et procédure expérimentale

Les herbes sont d'abord broyées, puis compactées et enfin séchées, le processus de conditionnement peut être schématisé comme ci-dessous :



Figure 1: processus de valorisation (stockage)

5.1 Prélèvement

Les résidus de tonte utilisés dans cette étude proviennent de jardin de particuliers (Figure 2). Ainsi, le gisement est composé d'un mélange d'espèces communément présentes en France. Ces espèces sont principalement le Ray-Grass Anglais, le Fétuque Rouge et le Pâturin des Prés.

Dans les 24h qui suivent le prélèvement (la tonte), les résidus sont broyés et/ou stockés en chambre froide (4°C) afin de limiter les dégradations par fermentation.



Figure 2 : échantillon d'herbe de tonte

5.2 Broyage

Le broyage a pour but de permettre d'augmenter la diffusion massique de la phase liquide et ainsi de contribuer à la déshydratation du résidu mais aussi d'obtenir une pâte apte à être mise en forme pour les procédés de valorisation.

Le broyeur utilisé est un broyeur à crible faisant varier la « granulométrie » du broyat en utilisant différents cribles : chaque crible possède une quinzaine de trous de diamètre 5mm, 8mm, 10mm et 12mm (Figure 3).



Figure 3: exemple de crible du broyeur

5.3 Compactage-mise en forme

La phase de compactage permet de réaliser la première étape de déshydratation du résidu, par voie mécanique. Elle permet également de donner la forme du résidu, d'augmenter sa compacité donc sa résistance en lien avec son utilisation future.

Ainsi, deux conditionnements ont été étudiés :

- des palets de Ø 60mm par pressage (type filtre-presse) à différentes pressions (5-15 bars) (Figure 4: exemple de galets d'herbe)



Figure 4: exemple de galets d'herbe

- des granulés de Ø6mm avec une machine à granulé conçue à cet effet. Celle-ci à un fonctionnement classique d'un moulin avec une matrice sur laquelle tourne deux galets. La vitesse de rotation est réglable ainsi que l'entrefer entre la matrice et les galets (donc le taux de compactage) (Figure 5).



Figure 5: presse à granulé et exemple de granulés d'herbe

La forme de palet correspond à une utilisation de la biomasse dans un insert à bois, cheminée de chauffage ou gazogène à lit fixe. Les granulés quant à eux, sont propices à une utilisation dans les poêles/chaudières à granulé, gazogène à lit fixe ou pyrolyseur.

Cette étape permet d'obtenir un séchage purement mécanique ne permet d'augmenter la siccité des produits traités que jusqu'à 30-35% maximum (boue par filtre presse) [9][10]. De fait, le séchage mécanique doit être complété par un apport d'énergie thermique soit en amont [10] ou en séchage post pressage. Concernant l'optimisation du séchage d'un produit poreux, le problème est que chaque produit nécessite une optimisation différentes (exemple pour les lignites [11]).

5.4 Déshydratation

La dernière étape de conditionnement consiste à finaliser le séchage des palets et granulé. Les galet ont été posés sur des grilles et séché soit à l'air ambiant soit en enceinte ventilée (Figure 6) avec un point froid pour condenser l'humidité. L'objectif est de ne pas utiliser de source chaude. Les échantillons ont ensuite été placés en étuve et les taux d'humidité ont été obtenus par mesurage de la masse avant /après séchage.

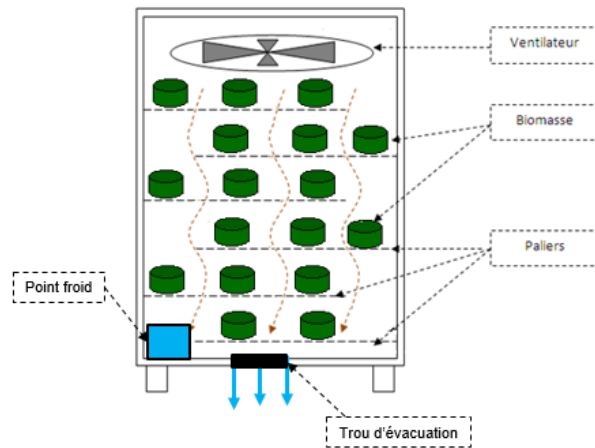


Figure 6: enceinte de déshydratation

5.5 Paramètres de conditionnement testés

Le tableau suivant résume les différents paramètres testés dans cette étude.

	Variables	Paramètres à contrôler
Broyage	Granulométrie du crible Ø5,8,10,12mm	Quantité d'eau extraite Efficacité du compactage
Compactage palet	Pression de compactage 6-15bars	Tenue des échantillons Taux d'humidité
	Temps de compactage 0-15min	
	Taux d'humidité initial 50-80% H	
	Ajout de papier 2%,5%	
Compactage granulé	Vitesse de rotation Entrefer	Temps de séchage Taux d'humidité finale Résistance mécanique (compactage)
Séchage	Convection naturelle ou mécanique	Temps de séchage Taux d'humidité finale

5.7 Procédés de valorisation

La valorisation énergétique des résidus conditionnés pourra être étudiée par avec les systèmes présents au laboratoire. Ainsi, les granulés obtenus seront étudiés en pyrolyse et en pyro-gazéification (Figure 7). Les palets quant à eux seront étudiés en pyro-gazéification.

Le pyrolyseur est chauffé électriquement et permet de faire des essais jusqu'à 900°C. Le pyro-gazogène à lit fixe est de type co-courant pour une puissance de près de 100kW (variable selon le résidu).



Figure 7: pyrolyseur (à gauche) et pyro-gazogène (à droite)

Les essais de valorisation sont en cours et seront présentés lors de la conférence.

La suite de ce document présente les résultats obtenus. Les propriétés du résidu sont d'abord présentées, puis les résultats sur le conditionnement et enfin les premiers essais de valorisation énergétique.

6 Résultats et discussions

6.1 Caractéristiques générales du résidu

Les analyses CHNS des échantillons ont montrées la composition massique moyenne suivante sur produit sec : C 74wt%, H 6,6wt%, N 0,40wt%, S 1,5wt% et donc 17,5wt% d'O.

Ces analyses montrent un taux de carbone élevés en comparaison avec la littérature où le pourcentage de carbone est entre 40wt% et 50wt% environ mais sur des résidus issus de processus et non d'une matière brute et sur des espèces différentes (résidus industriels de plantes pharmaceutiques chinoise [1][2][3][4]). A noter la présence de soufre qui peut provenir de traitements chimiques du gazon lui-même ou d'une pollution (traitements chimiques des champs cultivés, pluies) (présent dans les travaux de [4] S 5.6wt%).

Le taux d'humidité initial des résidus étudiés est compris entre 60wt% et 80wt%. La variation provient essentiellement des variations climatiques/météorologiques.

6.2 Conditionnement : influence du broyage

L'étape broyage est utile à l'augmentation de la mobilité de l'eau mais aussi pour la mise en forme du résidu. Sans broyage, impossible d'obtenir des palets (Figure 8), d'une part il n'y a pas de stabilité géométrique, d'autre part, aucune déshydratation mécanique n'est possible.

Par contre, un broyage trop fin (crible de 5mm) ne permet plus d'avoir une résistance mécanique suffisante pour conserver une forme après compactage et pose des problèmes de migration des matières solides dans la phase liquide lors du compactage (crible 5 et 8mm).



Figure 8 : Essais de mise en forme de palet : à droite sans broyage, à gauche avec broyage préalable

Evidemment, plus le diamètre de crible est petit plus le broyage nécessite d'énergie mécanique à contrario, si le broyage est trop grossier, la perte mobilité en eau diminue (baisse de 5% H pour le crible de diamètre 12mm). Ainsi, le diamètre de crible de 10mm a été considéré comme proposant le meilleur compromis et conservé pour la suite des essais.

6.3 Compactage-déshydratation mécanique

Effet de la pression

Afin de tester la déshydratation mécanique, des échantillons de 50g de résidus obtenus après broyage avec le crible de Ø10mm sont compactés avec des pressions variant entre 6 et 15bars. L'effort de compactage est maintenu pendant 5 min.

Les résultats sont présentés sur la Figure 9. Dès une pression de compression de 6bars, un gain de siccité de 20% est obtenu pour atteindre près de 28% à 14bars. On retrouve ainsi les performances des filtre-presses de la littérature [9][10] avec un système prototype. Des essais à plus hautes pressions n'ont pas pu être réalisés, les jeux d'ajustement du prototype ne sont pas compatibles avec de telles pressions.

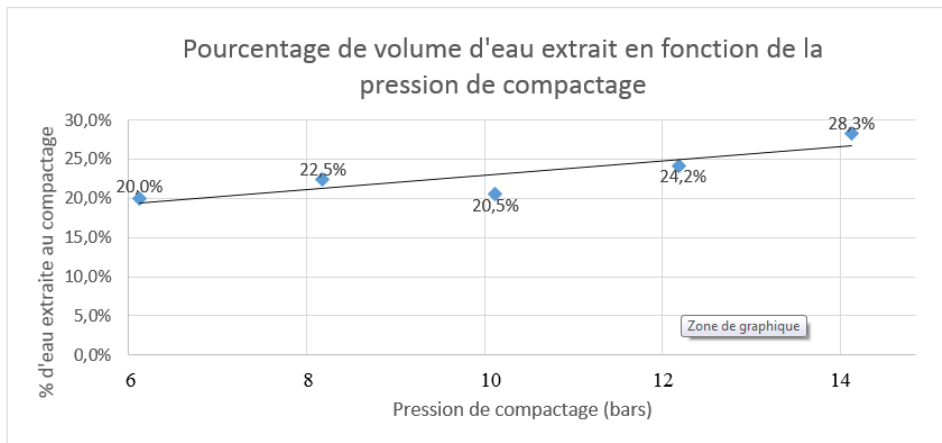


Figure 9 : impact de la pression de compactage sur la déshydratation

Effet du taux d'humidité initial

Des taux d'humidité variant de 50 à 80%*H* ont été étudiés. Les échantillons ont été obtenus avec un crible de 10mm et compactés pendant 5minutes sous une pression de 9bars. On note la limite de l'efficacité du filtre-pressé qui ne permettra de diminuer le taux d'humidité que jusqu'à 50-60%*H*, en deçà, seul le séchage « thermique » sera efficace.

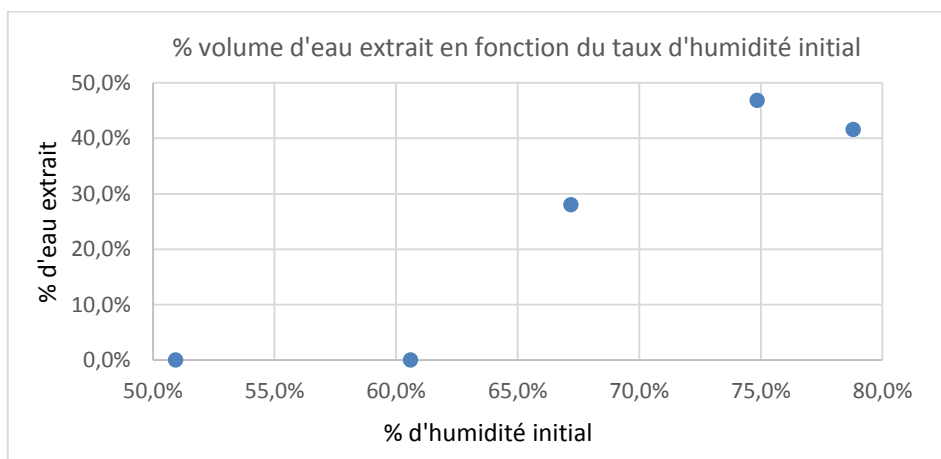


Figure 10 : impact du taux d'humidité initial sur les résultats de compactage

Ajout d'un élément sec

Afin de diminuer le taux d'humidité globale du résidu, un mélange herbe-papier a été testé. Le papier est issu d'une activité de destruction de document et sa granulométrie est donc imposé par le gisement (bande de papier de largeur 6mm).



Figure 11 : exemple de palets composite herbe-papier

Deux taux de papier ont été testés : 2,5% de la masse et 5% de la masse de l'échantillon en papier. Le papier absorbe une partie du liquide, cependant, il est à l'origine d'une baisse de la tenue mécanique globale des palets particulièrement au taux de 5%. Néanmoins, un galet contenant 2,5% en masse de papier possède une tenue correcte. De fait, le taux d'humidité n'est pas affecté par ce mélange et de surcroît, le PCI perd 0.3kWh/kg et le taux de cendre augmente de près de 0.5%.

Fabrication de granulés

Des granulés d'herbes ont été obtenus à partir du résidu broyé avec un crible de Ø10mm et un taux d'humidité de 80%. Une optimisation du prototype de machine à granulés est en cours de finalisation et permettra de présenter des résultats complémentaires lors de la conférence, notamment sur la cinétique de déshydratation qui est beaucoup plus rapide que pour les galets puisque on obtient un taux inférieur à 20%H en 24H par séchage à l'ambiance.

6.4 Déshydratation thermique

La dernière phase de conditionnement afin d'obtenir un stockage d'énergie sous forme solide s'intéresse au séchage et donc à la stabilisation du produit. Les échantillons de masse 50g étudiés ont été broyés avec le crible Ø10mm et ont une humidité initiale de 80%H. Le séchage a été réalisé soit en ambiance naturelle (séchage à l'air libre) (Figure 12) soit en enceinte ventilée avec point froid (Figure 13).

Les résultats obtenus indiquent que le taux de 30%H de taux d'humidité est atteignable avec près de 96 heures (4jours) de séchage en ambiance naturelle (23°C).

La cible de 20% de taux d'humidité est plus difficile à atteindre et requiert des taux de compactage plus importants, ce taux ayant un impact sur l'épaisseur des galets qui sont donc plus fins pour une masse initiale équivalente.

A noter que cette durée de séchage n'est pas aisément compatible avec un procédé industriel. De plus, cette cinétique de séchage est trop lente au regard du développement des moisissures en surface qui ont le temps de se développer.

Le séchage par convection forcée quant à lui permet d'atteindre le taux de 20%H d'humidité en près de 48h sans développement de moisissure. Les échantillons obtenus ont été conservés pendant plus de 6mois à température et humidité ambiante (local extérieur non chauffé) sans dégradation ou développement de moisissure.

L'apport d'énergie thermique (chaleur fatale) serait un plus pour accélérer le séchage et pour atteindre des cinétiques plus proches d'un besoin industriel. De même, si le taux de 20%H permet la stabilisation du résidu, un taux inférieur est requis pour l'utilisation en chaudière (10%H max).

Pour affiner ces travaux, une étude de la diffusion massique est en cours de réalisation et sera présentée lors de la conférence.

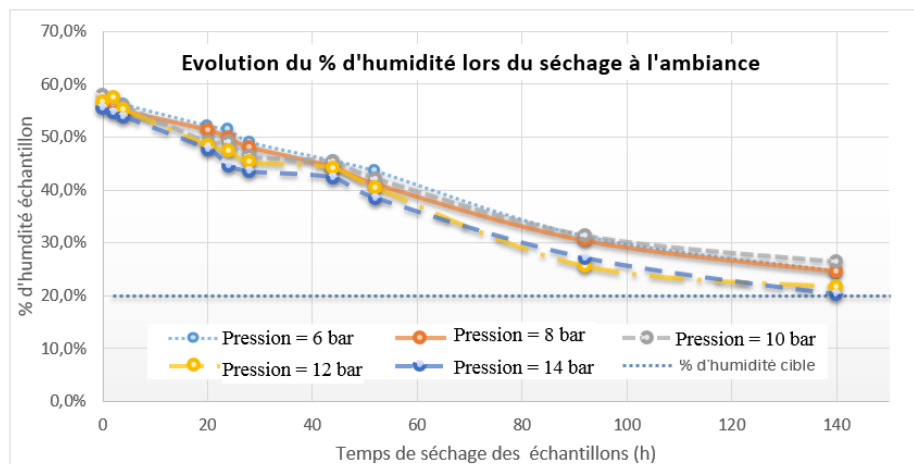


Figure 12 : évolution du taux d'humidité lors du séchage naturel

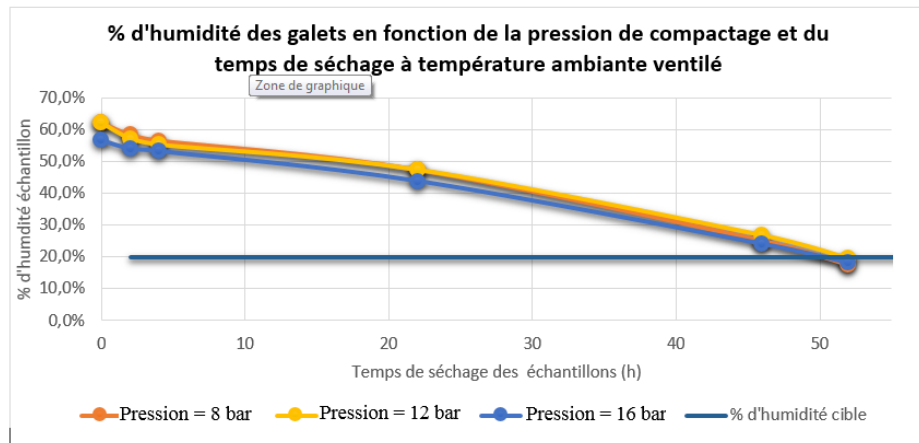


Figure 13 : évolution du taux d'humidité lors du séchage en convection forcée

6.5 Valorisation énergétique

Potentiel énergétique

En complément des analyses élémentaires du résidu, une étude sur les propriétés énergétiques a été entreprise. Ainsi, le taux de cendre sur matière sèche du résidu d'herbe est inférieur 7% à comparer avec les taux de 1.02wt% [1], 2.47wt% [2] et 10wt% [3]. Le pouvoir calorifique PCI mesurée est de 4,6kWh/kg (obtenu avec une bombe calorimétrique Parr 6200 Calorimeter) (contre 7.2kWh/kg [1] ; 1.3kWh/kg pour [2]).

Dès à présent on peut constater des variations importantes dans les caractéristiques inhérentes au gisement tant sur la composition, le PCI ou le taux de cendre mais également aux précédés industriels qui produisent ces résidus. Ceci étant, si on compare les résultats obtenus avec les propriétés d'un granulé de bois utilisé comme combustible dans les systèmes de chauffage adaptés (norme EN 14961-2), on obtient les valeurs suivantes :

Pouvoir calorifique : > 4,6 kWh par kg

Teneur max en eau : < 10 %

Teneur en cendres : moins de 0,5 % à 0,7 %

Masse volumique apparente ≥ 600 kg/m³

Sans surprise, le taux de cendre est bien supérieur à celui du bois mais les autres propriétés semblent convenables du point de vue énergétique avec un séchage adapté.

Valorisation en biocarburant : essais préliminaires

L'objectif de ces premiers tests par DSC (Figure 14) et ATG (Figure 15) est d'appréhender les propriétés de dégradation du résidu d'herbe.

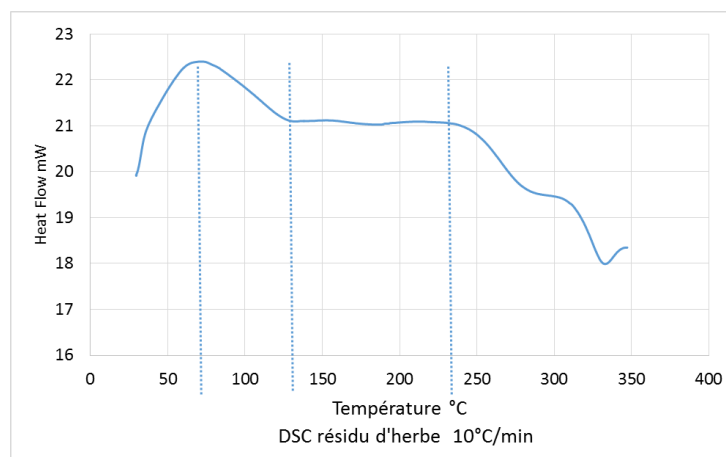


Figure 14 : DSC résidu d'herbe

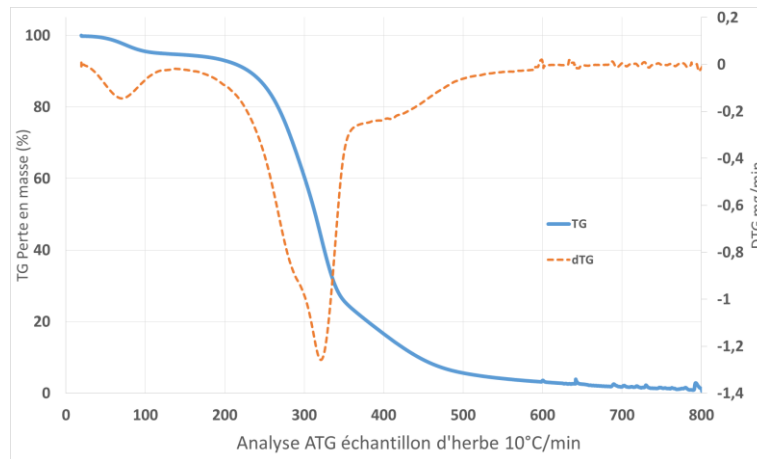


Figure 15 : ATG résidu d'herbe

Ces résultats montrent 3 phases : une première de séchage puis, une dégradation pyrolytique en 3 phases :

- entre 200°C et 290°C avec une perte de masse qui correspond à la dégradation de certaines formes d'hémicellulose ([4],[12]),
- entre 300°C et 360°C avec une perte de masse qui correspond à la dégradation à d'autres types d'hémicellulose et de cellulose [12],
- entre 360°C et 600°C dégradation de la lignine [4],

A noter que pour d'autres études [2], la pyrolyse semble s'opérer à plus hautes températures (600°C-800°C) sans explication triviale.

Ces premiers résultats indiquent qu'une pyrolyse menée jusqu'à 600°C semble nécessaire pour dégrader le résidu.

Conclusion & perspectives

Cette étude a permis de valider la possibilité de valorisation énergétique de résidus de type herbe de tonte possédant un taux d'humidité de 80%H. En effet, si le processus de valorisation est initié suffisamment tôt pour éviter la dégradation du résidu (fermentation), sa stabilisation (abaissement de son activité en eau) est opérante dès le taux d'humidité 20%H.

Deux formes ont été étudiées (palet et granulé) qui ont montré des potentiels intéressants ($PCI > 4,6 \text{ kWh/kg}$). Malgré l'utilisation d'un filtre-presse, il apparaît difficile d'obtenir une stabilisation des palets sans séchage thermique assisté (convection forcée). Le granulé sera davantage exploré dans la suite de nos travaux car cette forme semble plus propice à l'étude des cinétiques de dégradation thermique et à son utilisation industrielle (forme conventionnelle). De plus, son séchage thermique s'obtient plus rapidement (<24H en convection naturelle). Les premiers essais d'analyse de dégradation indiquent une dégradation centrée entre 200°C et 550°C conforme à une partie de la littérature [4],[12]) mais en décalage avec d'autres auteurs [2] dont les travaux montrent des dégradation à plus hautes températures.

Pour la présentation d'octobre, une version révisée de cet article sera proposée notamment avec des essais avec le prototype fonctionnel de machine à granulé. L'étude des cinétiques est en cours de réalisation (transfert massique et thermique pour le séchage hydrique, cinétique de dégradation pour la pyrolyse et gazéification). La composition des gaz de pyrolyse sera également fournie pour la conférence. Une version à jour de ce document sera transférée au préalable.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Mme Nicole Cruzols et Mr Maxime Souchet pour leur contribution à ces travaux.

Nomenclature

%H : pourcentage d'humidité
 a_w Water Activity
 PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
 ATG : Analyse ThermoGravimétrique
 DSC : Differential Scanning Calorimetry

Références

- [1] P. Wang, S. Zhan, H. Yu, X. Xue, and N. Hong, "The effects of temperature and catalysts on the pyrolysis of industrial wastes (herb residue)," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 9, pp. 3236–3241, 2010.
- [2] F. Guo, Y. Dong, L. Dong, and Y. Jing, "An innovative example of herb residues recycling by gasification in a fluidized bed," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 4, pp. 825–832, 2013.
- [3] F. Guo, Y. Dong, Z. Lv, P. Fan, S. Yang, and L. Dong, "Pyrolysis kinetics of biomass (herb residue) under isothermal condition in a micro fluidized bed," *Energy Convers. Manag.*, vol. 93, pp. 367–376, 2015.
- [4] X. Zeng, R. Shao, F. Wang, P. Dong, J. Yu, and G. Xu, "Industrial demonstration plant for the gasification of herb residue by fluidized bed two-stage process," *Bioresour. Technol.*, vol. 206, pp. 93–98, 2016.
- [5] C. Bonazzi and J.-J. Bimbenet, "Séchage des produits alimentaires - Principes," *Tech. L'ingénieur*, vol. 33, no. Procédés chimie-bio-agro | Agroalimentaire Réf. f3000, pp. 1–14, 2003.
- [6] C. V. Bezerra, L. H. Meller da Silva, D. F. Corrêa, and A. M. C. Rodrigues, "A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of passion fruit peel," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 85, pp. 750–755, 2015.
- [7] A. Koukouch *et al.*, "Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 565–574, 2017.
- [8] D. Chen, X. Liu, and X. Zhu, "A one-step non-isothermal method for the determination of effective moisture diffusivity in powdered biomass," 2013.
- [9] E. Chantoiseau, "Identification des mécanismes mis en jeu lors de la déshydratation assistée thermiquement par suivi de la pression de pores," INP Toulouse, 2009.
- [10] Stéphane COUTURIER, "Etude de la déshydratation mécanique assistée thermiquement," Université de Bordeaux I, 2002.
- [11] C. Bergins, "Kinetics and mechanism during mechanical/thermal dewatering of lignite☆," *Fuel*, vol. 82, no. 4, pp. 355–364, 2003.
- [12] K. Werner, L. Pommer, and M. Broström, "Thermal decomposition of hemicelluloses," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 110, no. May 2015, pp. 130–137, 2014.

25-27 Octobre 2017
Monastir – Tunisie