

## **Rapport final**

No projet : IA113109

Titre : Valorisation de résidus agricoles par conversion thermochimique afin de produire un combustible destiné aux systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serrioles

Responsable scientifique : Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D.

Établissement : IRDA

10 février 2017

**Section 1 - Chercheurs impliqués et responsable autorisé de l'établissement** (ces personnes doivent également faire parvenir un courriel pour attester qu'ils ont lu et approuvent le rapport.)

Nom du responsable de l'établissement :

Stéphane Lemay , ing., P.Eng., agr., Ph.D.

Chercheurs impliqués :

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D. IRDA

Olga Solomatnikova, M. Sc., chimiste, CRIQ

Patrice Seers, B.Ing., M.Ing., Ph.D. ÉTS

Luc Belzile, M. Sc., agroéconomiste, IRDA

## **Section 2 - Partenaires**

Centre de recherche industriel du Québec (CRIQ)

École de technologie supérieure (ÉTS)

McGill University – MacDonald Campus

Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)

Équipement Benoit Rivard Inc. (EBR Équipement)

Ferme Pleine Terre inc.

Ferme Houblons des jarrets noirs

Ferme Arbres Joyeux

Agriculture et Agroalimentaire Canada

### **Section 3 – Fiche de transfert**

## **RÉDUIRE LA FACTURE ÉNERGÉTIQUE ET L'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE DU CHAUFFAGE EN SERRES PAR LA VALORISATION DE BIOMASSES ET DE RÉSIDUS AGRICOLES**

**Godbout, S., Palacios J. H., Brassard, P., Zegan, D., Solomatnikova, O., Larouche, J-P., Belzile, L., Patry, A., Elcadhi, S., Seers, P., Le Roux, E. et Pelletier, F.**

**No de projet :** (réservé à l'administration) **Durée :** 03/2014 – 01/2017

### **FAITS SAILLANTS**

Les résidus générés par les producteurs agricoles peuvent être transformés et utilisés à des fins énergétiques, incluant le chauffage des serres. Les résultats de ce projet ont démontré que la pyrolyse est une technique efficace pour transformer ce type de biomasses sources d'énergie potentielles telles que la biohuile.

Le pyrolyseur conçu par l'équipe de l'IRDA et du CRIQ a été utilisé avec succès afin de produire des huiles pyrolytiques à partir de biomasses variées, telles que le bois (résidu ligneux), le panic érigé (culture énergétique herbacée) et la fraction solide de lisier de porc (biomasse d'origine animale). De même, la pyrolyse de plastique a été effectuée, notamment du polyéthylène à faible densité, démontrant ainsi la possibilité de valoriser les résidus plastiques agricoles et confirmant la polyvalence du procédé. La pyrolyse des résidus organique s'impose comme une des techniques qui permet de substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables et moins polluantes.

Ces huiles ont le potentiel d'être utilisées comme carburant dans les systèmes de chauffage des serres afin de substituer le mazout n° 2, résultant en des impacts économiques et environnementaux positifs. Toutefois, afin de minimiser les coûts et les travaux d'adaptation du système de chauffage, l'huile pyrolytique peut être mélangée avec du diesel ou du biodiesel (à un ratio de 30% ou moins d'huile). Dans ce cas, l'ajout d'un surfactant est nécessaire afin de stabiliser l'émulsion. Dans ce projet, une émulsion stable et homogène a été obtenue à partir de 1 % de surfactant, 5 % de méthanol, 30 % d'huile pyrolytique et le reste étant du carburant diesel.

Toutefois, il y a encore plusieurs défis à relever avant d'arriver à une large production et utilisation des huiles pyrolytiques. Premièrement, le procédé spécifique pour améliorer la qualité de l'huile reste à déterminer afin d'atteindre toutes les exigences de qualité en vigueur. Deuxièmement, les paramètres de combustion doivent être optimisés et par conséquent, les ajustements des systèmes de chauffage des serres seront nécessaires. Néanmoins, l'amélioration de la qualité de l'huile pourrait grandement faciliter ces divers ajustements. Enfin, le prix cible de 0,34 à 0,69 \$/L auquel l'huile pyrolytique devrait être vendue afin de rivaliser avec le mazout n° 2 sera un défi, mais pourrait être atteint lors de la mise en échelle.

### **OBJECTIF(S) ET MÉTHODOLOGIE**

Le projet s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche dont l'objectif, à moyen terme, est de mettre à la disposition des producteurs agricoles un procédé de valorisation énergétique de certains résidus produits à la ferme. L'objectif principal est de transformer à l'aide de pyrolyseur conçu par l'équipe de l'IRDA et du CRIQ des résidus agricoles sous forme des huiles pyrolytiques afin de les utiliser dans les systèmes de chauffage de serres en remplacement du mazout n°2. Dans un premier temps, les résidus agricoles ayant le plus fort potentiel d'être transformés en biohuile ont été identifiés selon le contexte serricole. Des matériaux organiques ainsi que plastiques ont été analysés. Ensuite, des essais préliminaires ont permis d'identifier les conditions optimales de pyrolyse pour chaque type de résidus. Des essais de combustion ont permis d'évaluer différents mélanges de biohuile et de diesel. Une analyse technico-économique a été réalisée à partir des résultats obtenus. Enfin, une analyse environnementale a permis d'évaluer des voies de valorisation du biocharbon.

## RÉSULTATS SIGNIFICATIFS POUR L'INDUSTRIE

Ce projet a permis notamment de démontrer la faisabilité de production d'un combustible à haut potentiel d'utilisation dans les entreprises agricoles utilisant le chauffage au mazout n° 2 (serres et autres). En effet, ces entreprises pourraient remplacer le mazout par l'huile pyrolytique (figure 1 et tableau 1). La présente étude a permis de mettre en lumière qu'un tel remplacement consentirait un gain environnemental (scenario exemple au tableau 2) et économique. Le gain environnemental provient de la réduction de la consommation du combustible fossile par un combustible renouvelable amenant une réduction des émissions à gaz à effet de serre. Le gain économique résulte de la possibilité de disposer d'un combustible à moindre coût issu de la valorisation de résidus agricoles de proximité et de la mise en échelle de la production.



Figure 1 Échantillon d'huile pyrolytique à haut potentiel énergétique pour le remplacement du mazout n° 2 dans les systèmes de chauffage

Tableau 1 Propriétés de l'huile pyrolytique produite et exigence de la norme ASTM D7544-09

	Teneur en eau	pH	Teneur en solides	Valeur calorifique brute	Viscosité cinématique à 40 °C	Densité à 15 °C
	%	-	%	MJ kg <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	g ml <sup>-1</sup>
Moyenne	31,9	2	0,135	13,8	11,9	1,179
Exigence de la norme*	≤ 30	--	≤ 2,5	≥ 15	≤ 125	1,1 – 1,3

Tableau 2 Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique

Mélange		Pouvoir calorifique	Consommation d'huile	Émissions de GES	Réduction
Mazout n° 2	Huile pyrolytique				
%	%	MJ/t	t/année	kg CO <sub>2</sub> e/année	%
<b>Huile pyrolytique à 25 MJ/kg</b>					
0	100	25 000	19,0	18 415	37
70	30	39 000	12,2	27 151	7
100	0	45 000	10,6	29 231	0
<b>Huile pyrolytique à 28 MJ/kg (avec co-pyrolyse de 10 % de plastique)</b>					
0	100	28 000	17,0	16 442	44
70	30	39 900	11,9	26 538	9
100	0	45 000	10,6	29 231	0

Le traitement thermochimique permettant la production de cette huile, nommé pyrolyse, est une technique pouvant être mise en place par l'industrie à différentes échelles et dans différentes régions. Il a été démontré qu'il s'agit d'un traitement polyvalent pour la transformation de différents types de matières organiques (p. ex., des résidus ligneux, de biomasses herbacées et d'origine animale), ainsi que de matières plastiques, facilitant davantage la création d'une nouvelle filière industrielle énergétique.

Le potentiel de valorisation des coproduits de la pyrolyse, soit le biocharbon et les gaz non condensés, a aussi été évalué. Cette étude a permis de démontrer qu'il est possible de produire des biocharbons ayant les propriétés désirées pour réduire les émissions de GES du sol et séquestrer du carbone, tout en produisant une biohuile qui peut être utilisée pour substituer les combustibles fossiles. Cependant, la valorisation des gaz par recirculation dans le procédé de pyrolyse, n'est pas une voie appropriée pour améliorer la qualité de l'huile. Alors, d'autres voies de valorisation devraient être étudiées.

## **APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE ET/OU SUIVI À DONNER**

La principale application pour l'industrie est au niveau énergétique, notamment pour les entreprises agricoles chauffant actuellement au mazout n° 2. D'un autre côté, il en découle l'opportunité de créer des entreprises en circuit court de traitement et de transformation de matières résiduelles, particulièrement d'origine agricole. D'autre part, une entreprise agricole pourrait acquérir la technologie afin de produire leur propre combustible à partir des résidus produits sur place ou de ceux à proximité.

Au cours de la réalisation du présent projet, plusieurs autres applications possibles pour l'industrie ont été relevées pour lesquelles il serait intéressant de faire un suivi. Deux aspects devraient être particulièrement étudiés soit :

1) Une filière en production de biocharbons innovants issus de résidus agricoles pourrait se développer parallèlement. Les biocharbons seraient produits dans ce cas, avec des caractéristiques spécifiques pour une utilisation finale dans le secteur des amendements et de la fertilisation du sol, la séquestration de carbone et d'azote, la réduction des émissions de GES issues des sols, l'absorption et la filtration de polluants. La sélection et le contrôle approprié des paramètres de pyrolyse est une étape clé de ce principe ;

2) La production d'huile pyrolytique comme biocide : les molécules et les substances biocides actives dans certaines biomasses sont transférées à l'huile lors de la pyrolyse. L'utilisation de l'huile est prometteuse notamment en agriculture biologique.

## **POINT DE CONTACT POUR INFORMATION**

Nom du responsable du projet : Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D.

Téléphone : 418 643-2380 p. 600

Télécopieur : 418-644-6855

Courriel : [stephane.godbout@irda.qc.ca](mailto:stephane.godbout@irda.qc.ca)

## **REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS**

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA, du CRIQ, de l'ÉTS, de l'Université McGill et de l'UQTR. ainsi que l'appui des fermes « Pleine Terre Inc. », « Houblons des jarrets noirs » et « Arbres Joyeux » et le fabricant d'équipements industriels « EBR Inc.».

**Section 4 - Activités de transfert et de diffusion scientifique** (documentation en appui dans le dossier annexe intitulé « Annexe 1 - Activités de transfert et de diffusion scientifique »)

Présentation à l'activité « Portes Ouvertes IRDA, CRSAD et CDPQ. » 2014. Titre : Réduire la facture énergétique et l'empreinte carbone des fermes : Pyrolyse de la biomasse agricole.

Présentation à la conférence annuelle de 2014 de la Société Canadienne de Génie Agroalimentaire et de Bioingénierie (CSBE/SCGAB). Titre : Innovative strategy for the management of swine manure excess by solid fraction separation and pyrolysis.

Présentation à la 12e conférence sur le biogaz et la bioénergie et assemblée générale annuelle de l'Association pour la prévention de la contamination de l'air et du sol (APCAS). 2014. Titre: Valorisation énergétique de la biomasse agricole.

Affiche à la conférence ICEF12. 2015. Titre : Converting downgraded potatoes into bio-oil by pyrolysis : reaction parameters for obtaining the highest yield and analysis of the bio-oil quality.

Affiche à la Conférence de 2015 sur le génie biologique agricole du Nord-Est (*Northeast Agricultural Biological Engineering Conference*, NABEC). Titre : Biomass pyrolysis in a vertical auger reactor: Effect of operational conditions on products yields and analysis of bio-oil and biochar characteristics.

Affiche au colloque du Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMR). 2015. Titre : Valorisation des gaz non condensables issus de la pyrolyse de résidus agricoles.

Présentation à la session « Le biocharbon en agriculture et en environnement » dans le cadre du congrès annuel de la Société canadienne de la science du sol (SCSS), le groupe ISMOM (*International Symposium of Interactions of Soil Minerals with Organic Components and Microorganisms*) et l'Association québécoise de spécialistes en sciences du sol (AQSSS). 2015. Titre : Biochar production: a tool to mitigate climate change.

Présentation et article (CSBE15-067) : à la conférence annuelle de la Société Canadienne de Génie Agroalimentaire et de Bioingénierie (CSBE/SCGAB). 2015. Titre : Downgraded Potatoes Pellets: Energetic Potential and Optimisation of the Raw Material Drying

Présentation et article (n° CSBE16-077) à la conférence annuelle de la Société Canadienne de Génie Agroalimentaire et de Bioingénierie (CSBE/SCGAB). 2016. Titre : Optimal pyrolysis operational parameters for the production of high quality bio-oil from agricultural and forest residues in a vertical auger reactor.

Présentation et article (n° 16-019) à la Conférence sur le Génie Biologique Agricole du Nord-Est (*Northeast Agricultural Biological Engineering Conference*, NABEC). 2016. Titre : Pyrolysis of agricultural and forest biomasses in a vertical auger reactor: optimal operational parameters for biochar production.

Article scientifique soumis au journal « *Energies* » (évaluation par des pairs en cours). 2016. Titre : Production of engineered biochars in a vertical auger pyrolysis reactor for climate change mitigation.

Article scientifique publié au « *Journal of Environmental Management* ». 2016. Titre : Soil biocharbon amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved.

Résumé soumis à la conférence annuelle de 2017 de la Société Canadienne de Génie Agroalimentaire et de Bioingénierie (CSBE/SCGAB). Titre : Effect of six engineered biochars on greenhouse gas emissions from a loamy sand and a silt loam

**Section 5 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs** (documentation en appui dans le dossier annexe intitulé « Annexe 2 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs »)

Article de diffusion publié via l'infolettre de l'IRDA. 2017. Alimenter les serres qui nous alimentent. [https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/billet-chauffage\\_serres\\_jan-2017.pdf](https://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/billet-chauffage_serres_jan-2017.pdf)

Présentation au symposium « Les résidus agricoles et agroalimentaires : une richesse inexploitée! ». 2015. Titre : La pyrolyse comme procédé de valorisation des résidus.

Présentation à « l'Expo IRDA » lors de l'activité Portes Ouvertes IRDA, CRSAD et CDPQ. 2014. Titre : Réduire la facture énergétique et l'empreinte carbone des fermes : Pyrolyse de la biomasse agricole. (<https://www.irda.qc.ca/fr/communiqués/plus-de-200-personnes-lors-des-portes-ouvertes-sur-l-innovation-en-production-porcine/>)

Publication du résumé du projet dans le site web de l'IRDA. 2014. Valorisation de résidus agricoles par conversion thermochimique afin de produire un combustible destiné aux systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serricoles. <https://www.irda.qc.ca/fr/projets/valorisation-de-residus-agricoles-par-conversion-thermochimique-afin-de-produire-un-combustible-destine-aux-systemes-de-chauffage-au-mazout-no-2-actuellement-en-place-dans-les-entreprises-serricoles/>

## Section 6 – Grille de transfert des connaissances

<b>1. Résultats</b> Présentez les faits saillants (maximum de 3) des principaux résultats de votre projet.	<b>2. Utilisateurs</b> Pour les résultats identifiés, ciblez les utilisateurs qui bénéficieront des connaissances ou des produits provenant de votre recherche.	<b>3. Message</b> Concrètement, quel est le message qui devrait être retenu pour chacune des catégories d'utilisateurs identifiées? Présentez un message concret et vulgarisé. Quels sont les gains possibles en productivité, en rendement, en argent, etc.?	<b>4. Cheminement des connaissances</b> a) Une fois le projet terminé, outre les publications scientifiques, quelles sont les activités de transfert les mieux adaptées aux utilisateurs ciblés? (conférences, publications écrites, journées thématiques, formation, etc.)  b) Selon vous, quelles pourraient être les étapes à privilégier en vue de maximiser l'adoption des <b>résultats par les utilisateurs</b> .
Un combustible de type huile pyrolytique a été produit à partir de matières agricoles de nature variée : ligneuse, herbacée, animale et plastique. Plusieurs des caractéristiques exigées en termes de qualité ont été atteintes. La réduction de la teneur en eau demeure encore un défi.	Le projet vise une solution au problème énergétique actuel de la production en serre. Ce sont donc les producteurs qui seront les utilisateurs finaux. Dû au stade précoce de la technologie, les résultats de la recherche concernent le secteur de l'industrie et de la recherche désirant pousser davantage les résultats.	Il est possible de créer un combustible renouvelable par la valorisation de matières agricoles à l'aide d'un pyrolyseur à vis, une technologie robuste et polyvalente. L'impact économique et environnemental est d'un grand potentiel si la technologie peut être adaptée à grande échelle.	a) Les conférences, les publications écrites et les journées thématiques demeurent les meilleurs moyens de transfert des résultats.  b) 1. Diffusion de l'information ; 2. Retour d'information ; 3. Démonstration des résultats ; 4. Mise à l'échelle de la technologie; 5. Formation et 6. Suivi
Les coproduits de la pyrolyse ont une haute valeur d'utilisation. Le biocharbon peut être utilisé, entre autres comme amendement au sol, pour séquestrer du carbone et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre issues des sols.	Producteurs et industrie	Les producteurs (en serre ou autres) auront à leur disponibilité un matériel d'amendement, séquestreur de carbone ou réducteur d'émissions issues de ces propres résidus ou de la région.  L'industrie dédiée à la production d'huile pyrolytique aura l'opportunité d'être plus rentable par la valorisation des gaz non condensés et par la vente de biocharbon aux producteurs agricoles.	
Au cours de l'étude, d'autres débouchés pour l'huile ont été identifiés, notamment, comme produit biocide utilisable contre les ravageurs de certaines cultures.	Producteurs et industrie	Les producteurs auront à leur disponibilité un produit biocide biologique. Ceci intéressera notamment les producteurs en agriculture biologique. Il en résultera une opportunité pour l'industrie de mettre en marché un tel produit.	

## **Section 7 - Contribution et participation de l'industrie réalisées**

La compagnie Équipement Benoit Rivard Inc. (EBR Équipement) a contribué amplement à la conception et la fabrication du système de condensation et de récupération de l'huile et du biocharbon. Elle a participé aussi à la réalisation des adaptations et des modifications de plusieurs composantes de l'installation de la pyrolyse et au choix des matériaux spéciaux (joints, isolations et autres).

La Ferme Pleine Terre Inc., la Ferme Houblons des Jarrets Noirs et la Ferme Arbres Joyeux nous ont gentiment offert leur collaboration dans différents volets après avoir pris connaissances de la nature du projet. Ils, nous ont fourni du matériel (résidus à évaluer) et ont participé au projet avec des recommandations concernant la qualité, la disponibilité et les méthodes de disposition des résidus.

Certaines industries (présentées dans la liste de partenaires de la section 2) ont offert de l'espace dans leurs installations pour réaliser des expériences et ont participé aux consultations concernant le choix de matériel.

L'usine de charbon de bois Feuille d'Érable qui nous a accompagné pendant le projet s'est avérée intéressée à l'un des débouchés identifiés lors de la recherche, et collabore actuellement dans le cadre d'un nouveau projet.

**Section 8 - Rapport scientifique et/ou technique** (format libre réalisé selon les normes propres au domaine d'étude)

Voir annexe 1.

## Annexe 1 Rapport scientifique



L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

#### **Notre mission**

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

#### **Notre vision**

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

#### **Pour en savoir plus**

[www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca)

## PARTENAIRES



**Valorisation de résidus agricoles par conversion thermochimique afin de produire un combustible destiné aux systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serricoles**  
Rapport final

Présenté à :

**Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation**

*Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, INNOV'ACTION agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada*

Préparé par :

---

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D.  
IRDA

---

Joahnn H. Palacios, ing. jr, M. Sc.  
IRDA

---

Patrick Brassard, ing. jr, M. Sc.  
Étudiant au doctorat, McGill University

---

Dan Zegan, ing., M. Sc.  
IRDA

---

Olga Solomatnikova, chimiste, M.Sc.  
CRIQ

---

Luc Belzile, économiste, M.Sc.  
IRDA

---

Alicia Patry, agronome  
IRDA

---

Patrice Seers, ing., Ph.D.  
ÉTS

---

Salha Elcadhi  
Étudiante à la maîtrise, ÉTS

---

Étienne Le Roux, Ph.D.  
IRDA et UQTR

---

Frédéric Pelletier, ing., M. Sc.  
IRDA

## LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Godbout, S., J. H. Palacios, P. Brassard, D. Zegan, O. Solomatnikova, L. Belzile, A. Patry, P. Seers, S. Elcadhi, E. Le Roux et F. Pelletier. 2017. Valorisation de résidus agricoles par conversion thermochimique afin de produire un combustible destiné aux systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serricoles. Rapport final. IRDA et partenaires. 94 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement Inc. (IRDA)

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

Responsable scientifique : Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D., IRDA

Chargé de projet : Joahnn H. Palacios, ing. jr, M. Sc., IRDA

## ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D., IRDA

Joahnn H. Palacios, ing. jr, M. Sc.

Patrick Brassard, ing. jr, M. Sc., IRDA et McGill University

Dan Zegan, ing., M. Sc., IRDA

Olga Solomatnikova, chimiste, M.Sc., CRIQ

Luc Belzile, économiste, M.Sc., IRDA

Alicia Patry, agronome, IRDA

Patrice Seers, ing., Ph.D., ÉTS

Salha Elcadhi, IRDA et ÉTS

Étienne Le Roux, IRDA et UQTR

Frédéric Pelletier, ing. M. Sc., IRDA

## COLLABORATEURS

Vijaya Raghavan, Ph.D., professeur, McGill University

Simon Barnabé, Ph.D., professeur, UQTR

Michelle Grenier, Biostatisticienne, IRDA

Annabelle Hospital, ÉTS

Patrick Dubé, chimiste, Ph.D., IRDA

Romain Lemaire, Ph.D., ÉTS

Jean-Pierre Larouche, chimiste, IRDA

Mireille Pruneau-Rodrigue, ing. jr., stagiaire IRDA

Cédric Morin, technicien, IRDA

Alice Marciniak, stagiaire, IRDA

René Morissette, ing., M. Sc., AAC

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 600

Courriel : [stephane.godbout@irda.qc.ca](mailto:stephane.godbout@irda.qc.ca)

## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA, du CRIQ de l'ÉTS, de l'Université McGill et de l'UQTR, ainsi que l'appui des fermes « Pleine Terre Inc. », « Houblons des jarrets noirs » et « Arbres Joyeux » et le fabricant d'équipements industriels « EBR Inc. ».

## RÉSUMÉ

---

Les entreprises serricoles font face à des enjeux en matière énergétique menaçant leur compétitivité. L'innovation ainsi que l'adaptation à de nouvelles technologies s'avèrent primordiales pour elles afin de demeurer compétitives (SPSQ, 2007). Un des points critiques de la consommation d'énergie du secteur serricole est le chauffage. Le mazout n° 2 est la source d'énergie utilisée par la plupart de ces entreprises (77 % des entreprises, représentant 40 % de la superficie totale des serres). De plus, l'utilisation de ce combustible est soumise à de fortes pressions environnementales dues à son origine fossile.

Dans le présent projet, il a été proposé de produire par pyrolyse rapide un combustible issu de matières résiduelles agricoles qui pourrait être utilisé dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serricoles. Dans un premier temps, selon les conditions du contexte agricole actuel, les résidus agricoles ayant un fort potentiel d'être transformés en biohuile ont été identifiés. Ensuite, des essais préliminaires ont permis d'identifier les conditions optimales pour la pyrolyse de ces résidus. En plus, des tests ont été effectués afin d'évaluer l'amélioration du rendement et de la qualité de l'huile pyrolytique par l'utilisation de résidus plastiques agricoles. D'autres tests ont permis de déterminer les quantités du mélange de biohuile et de diesel propice à alimenter les systèmes de chauffage au mazout n° 2. Par la suite, des essais de combustion des mélanges ont été réalisés dans un système de combustion construit particulièrement pour ce projet. Enfin, à partir des résultats obtenus, une analyse technico-économique et environnementale du processus a été réalisée. Cette analyse inclut également un volet pour l'évaluation des voies de valorisation du biocharbon et des gaz coproduits lors de la pyrolyse.

Ce projet a permis de développer une expertise unique dans l'émergence d'une nouvelle filière agroénergétique. En effet, de nouvelles connaissances ont été acquises et produites pour créer par pyrolyse un combustible issu de résidus agricoles organiques et plastiques pouvant être utilisé dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2. Toutefois, afin de minimiser les coûts et les travaux d'adaptation du système de chauffage, l'huile pyrolytique peut être mélangée avec du diesel ou du biodiesel (à un ratio de 30 % ou moins d'huile). Dans ce projet, une émulsion stable et homogène a été obtenue et dont les proportions étaient de 1 % de surfactant, 5 % de méthanol, 30 % d'huile pyrolytique et le reste étant du carburant diesel.

Il reste encore des défis avant d'arriver à une large production et utilisation de l'huile pyrolytique. Premièrement, il reste à déterminer le procédé spécifique pour améliorer la qualité de l'huile afin d'atteindre toutes les exigences de qualité en vigueur. Deuxièmement, les paramètres de combustion doivent être optimisés, et par conséquent, les ajustements exacts à faire aux systèmes de chauffage des serres. Cependant, l'amélioration de la qualité de l'huile pourrait grandement faciliter ou minimiser ces ajustements. Enfin, le prix cible de 0,34 à 0,69 \$/L auquel l'huile pyrolytique devrait être vendue afin de rivaliser avec le mazout n° 2 comporte un défi de grande importance, mais pourrait être atteint lors de la mise en échelle.

Enfin, ce projet a étudié le potentiel de valorisation des coproduits de la pyrolyse, soit le biocharbon et les gaz non condensés. Il a été démontré qu'il est possible de produire des biocharbons ayant les propriétés désirées

pour réduire les émissions de GES du sol et séquestrer du carbone. Également, Il s'est avéré que la valorisation des gaz non-condensables par recirculation dans le procédé de pyrolyse, n'est pas une voie appropriée pour améliorer la qualité de l'huile. Alors, d'autres voies de valorisation devraient être étudiées pour ce coproduit.

# TABLE DES MATIÈRES

Résumé .....	i
1 Introduction .....	9
1.1 Contexte énergétique des entreprises serricoles .....	9
1.2 Résidus agricoles : une ressource énergétique renouvelable .....	10
1.3 La pyrolyse : une technologie polyvalente.....	11
1.4 L'expertise de l'équipe de recherche.....	13
1.5 Références.....	13
2 Hypothèses et objectifs de l'étude .....	16
2.1 Hypothèses de l'étude .....	16
2.2 Objectif principal.....	16
2.3 Objectifs spécifiques.....	16
3 Méthodologie générale et plan du rapport.....	17
4 Étape n° 1 – Essais préliminaires et optimisation des paramètres de pyrolyse .....	19
4.1 Résumé.....	19
4.2 Introduction .....	19
4.3 Méthodologie.....	20
4.3.1 Banc d'essai .....	20
4.3.2 Sélection des intrants .....	22
4.3.3 Conditionnement des biomasses .....	23
4.3.4 Dispositif expérimental .....	23
4.3.5 Rendements des produits de la pyrolyse et analyse des échantillons de biohuile.....	24
4.3.6 Analyse statistique .....	25
4.4 Résultats et discussion .....	25
4.4.1 Analyse des biomasses .....	25
4.4.2 Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation.....	26
4.4.3 Valeurs optimales de pyrolyse estimées par le modèle statistique pour la production de biohuile.....	29
4.4.4 Production de la biohuile aux paramètres optimaux de pyrolyse et validation du modèle statistique.....	30
4.5 Conclusion .....	31

4.6	Remerciements .....	32
4.7	Références.....	32
5	Étape n° 2 - Essais de copyrolyse pour la valorisation de résidus plastiques en serriculture .....	35
5.1	Introduction .....	35
5.2	Matériel et méthodes .....	36
5.2.1	Banc d'essai et matériel de pyrolyse.....	36
5.2.2	Essais d'homogénéisation et de solubilisation des huiles.....	37
5.3	Résultats.....	37
5.3.1	Résultats de la pyrolyse.....	37
5.3.2	Essais d'homogénéisation des deux fractions d'huile obtenues par la co-pyrolyse de la biomasse et du plastique .....	39
5.3.3	Analyse des huiles pyrolytiques obtenues par la pyrolyse de plastique.....	40
5.4	Conclusion.....	40
5.5	Remerciements.....	41
5.6	Références.....	41
6	Étape n° 3 – Essais de combustion de l'huile de pyrolyse .....	43
6.1	Résumé.....	43
6.2	Introduction .....	43
6.3	Méthodologie.....	45
6.3.1	Montage expérimental.....	45
6.3.2	Préparation des émulsions.....	47
6.4	Résultats et discussion .....	49
6.5	Conclusions .....	50
6.6	Références.....	51
7	Étape n° 4 – analyse économique et environnementale de l'utilisation de l'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage à base de mazout n° 2 en serriculture.....	53
7.1	Analyse économique.....	53
7.1.1	Contexte .....	53
7.1.2	Méthode.....	53
7.1.3	Résultats.....	56
7.1.4	Discussion et conclusion.....	57

7.2	Impact environnemental de l'utilisation de l'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage à base de mazout n° 2 dans la serriculture.....	57
7.2.1	Introduction.....	57
7.2.2	Méthode.....	57
7.2.3	Résultats.....	58
7.2.4	Conclusion.....	59
7.3	Références.....	60
8	Étape n° 5 – Caractérisation du biocharbon et analyse des voies potentielles de valorisation.....	61
8.1	Introduction.....	61
8.1.1	Qu'est-ce que le biocharbon?.....	61
8.1.2	Voies de valorisation du biocharbon.....	62
8.2	Objectifs.....	63
8.3	Méthodologie.....	63
8.3.1	Production et caractérisation physico-chimique des biocharbons.....	63
8.3.2	Évaluation de l'utilisation des biocharbons comme outil de lutte contre les changements climatiques.....	64
8.4	Résultats et discussion.....	66
8.4.1	Production de biocharbons dans les conditions de pyrolyse optimales.....	66
8.4.2	Essais d'incubation.....	69
8.5	Conclusions.....	76
8.6	Références.....	77
9	Étape n° 6 – Potentiel de valorisation des gaz pyrolytiques.....	79
9.1	Introduction.....	79
9.1.1	Les gaz non condensables (GNC).....	79
9.1.2	Valorisation des GNC par la recirculation dans le système de pyrolyse.....	80
9.2	Matériels et méthodes.....	81
9.2.1	Essais et échantillonnage des gaz non-condensables de pyrolyse.....	81
9.2.2	Analyse des GNC de pyrolyse.....	82
9.2.3	Valorisation des GNC de pyrolyse.....	82
9.3	Résultats et discussions.....	83
9.3.1	Calculs des pourcentages volumiques des GNC.....	83

9.3.2	Influence des paramètres de pyrolyse sur les GNC.....	84
9.3.3	Suivi de la formation des GNC en fonction de la température au cours de la pyrolyse .....	87
9.3.4	Étude de la valorisation des GNC de pyrolyse.....	88
9.4	Conclusions .....	91
9.5	Références.....	91
10	Conclusions globales.....	94

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Variables et niveaux du design Box-Behnken des essais préliminaires .....	24
Tableau 2	Propriétés des biomasses étudiées.....	26
Tableau 3	Rendements et caractéristiques des biohuiles du test d'optimisation de la pyrolyse de la FSLP .....	27
Tableau 4	Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation de la pyrolyse du bois.....	27
Tableau 5	Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation de la pyrolyse du panic érigé.....	28
Tableau 6	Valeurs optimales de pyrolyse estimées par le modèle de surface de réponse pour la production de biohuile .....	30
Tableau 7	Caractéristiques de la biohuile produite aux conditions optimales de pyrolyse et valeurs prédites par le modèle statistique .....	31
Tableau 8	Rendement des produits de pyrolyse des trois types d'intrants .....	38
Tableau 9	Paramètres de pyrolyse et rendements obtenus dans les tests complémentaires de pyrolyse .....	38
Tableau 10	Paramètres de production de l'huile de pyrolyse et rendements obtenus (à compléter une fois les tests réalisés).....	48
Tableau 11	Paramètres de production serricole retenus pour l'analyse économique. ....	54
Tableau 12	Calcul du coût cible de la biohuile pour trois valeurs de pouvoir calorifique .....	56
Tableau 13	Analyse de sensibilité du coût cible de la biohuile en fonction de différents coûts du mazout.....	57
Tableau 14	Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 15 MJ/kg.....	58
Tableau 15	Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 25 MJ/kg.....	59
Tableau 16	Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 28 MJ/kg (avec copyrolyse de 10 % de plastique) .....	59
Tableau 17	Valeurs estimées des rendements et des ratios H/Corg, O/Corg et C/N des biocharbons produits dans les conditions de pyrolyses optimales selon les modèles de surface de réponse .....	67
Tableau 18	Propriétés physico-chimiques des biocharbons produits dans les conditions de pyrolyse optimales.....	68

Tableau 19	Validation du modèle statistique .....	69
Tableau 20	Propriétés physico-chimiques des sols avant incubation et des mélanges sol-biocharbon après incubation : sable loameux.....	70
Tableau 21	Propriétés physico-chimiques des sols avant incubation et des mélanges sol-biocharbon après incubation : loam limoneux.....	71
Tableau 22	Exemple de calcul des émissions de CO <sub>2</sub> (µg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ), mélange loam limoneux et biocharbon 5 (26-07-2016).....	72
Tableau 23	Émissions cumulatives de CO <sub>2</sub> et de N <sub>2</sub> O après 45 jours et propriétés des biocharbons.....	73
Tableau 24	Paramètres de pyrolyse du panic érigé et du bois pour la valorisation des GNC .....	83
Tableau 25	Résultats bruts de l'analyse GC-TCD/FID des GNC mesurés lors de l'essai de pyrolyse du bois (650 °C, 90 s et 1 L <sub>N</sub> /min) en retirant l'influence atmosphérique.....	84
Tableau 26	Résultats bruts de l'analyse GC-TCD/FID des GNC mesurés lors de l'essai de pyrolyse du bois (650 °C, 90 s et 1 L <sub>N</sub> /min) en retirant l'influence atmosphérique.....	84
Tableau 27	Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du panic érigé (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) .....	85
Tableau 28	Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du bois (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) .....	86
Tableau 29	Résultats de rendement de la pyrolyse de panic érigé et propriétés physico-chimiques des huiles pyrolytiques obtenues .....	89
Tableau 30	Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du panic érigé (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) et Masse calculée de ces GNC. Comparaison avec le rendement en gaz obtenu par différence.....	90
Tableau 31	Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du bois (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) et Masse calculée de ces GNC. Comparaison avec le rendement en gaz obtenu par différence.....	90

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Schéma du pyrolyseur .....	21
Figure 2	Image du mélange bois-plastique utilisé pour l'étude de copyrolyse .....	37
Figure 3	Huile pyrolytique avant (gauche et centre) et après le traitement (droite) .....	39
Figure 4	Filtres suite au traitement de l'huile .....	40
Figure 5	Condensat obtenu par la pyrolyse du PEbd (gauche) et échantillon soluble dans le biodiesel (droite).....	40
Figure 6	Schéma du banc d'essai .....	45

Figure 7	Vue de coupe du générateur de swirl (gauche) et schéma des espacements entre les blocs mobiles (blanc) et blocs fixes (gris) où $\xi_m$ est l'angle de débattement maximum et $\xi$ est l'angle effectif (droite).....	46
Figure 8	Vue d'ensemble du banc d'essai .....	47
Figure 9	Mélange huile - diesel après le traitement de brassage sans surfactant (gauche) et avec surfactant (droite) .....	48
Figure 10	Évolution du prix du mazout n° 2 au Bas Saint-Laurent.....	54
Figure 11	Pente de la régression Concentration de CO <sub>2</sub> vs Temps (moyenne, 26-07-2016).....	72
Figure 12	Émissions cumulatives de CO <sub>2</sub> -C – sable loameux.....	74
Figure 13	Émissions cumulatives de CO <sub>2</sub> -C – loam limoneux.....	74
Figure 14	Émissions cumulatives de N <sub>2</sub> O-N – sable loameux.....	75
Figure 15	Émissions cumulatives de N <sub>2</sub> O-N – loam limoneux.....	75
Figure 16	Système de collecte des GNC de pyrolyse .....	81
Figure 17	Suivi de la composition des GNC au cours d'une pyrolyse, exemple de l'essai 21 .....	88

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE DES ENTREPRISES SERRICOLES

Les entreprises serricoles font face à des enjeux majeurs en matière énergétique qui menacent leur compétitivité, et voire même leur existence au Québec à plus ou moins long terme, tel qu'exprimé dans le rapport de consultation publié par le Syndicat des producteurs en serre du Québec (SPSQ, 2007). En effet, bon nombre d'entreprises serricoles ont des coûts énergétiques très importants. La hausse des coûts de l'énergie, la hausse des prix des combustibles fossiles et une tendance à la hausse des prix des ressources énergétiques font en sorte qu'il sera de plus en plus difficile de demeurer concurrentiel avec des produits à prix compétitifs.

Un des points critiques de la consommation énergétique du secteur serricole est le coût élevé du chauffage. Au Québec, en 2005, les dépenses totales des entreprises serricoles reliées à l'achat de combustible pour le chauffage s'élevaient à 24,3 M\$ (soit 10,7 % de la valeur des ventes). La source d'énergie utilisée pour le chauffage par la plupart des entreprises en serriculture est le mazout n° 2 (77 % des entreprises, représentant 40 % de la superficie). Il s'agit surtout des entreprises de petite taille, les plus importantes utilisant davantage le gaz naturel (10 % des entreprises, représentant 35 % de la superficie des serres) selon l'UPA et al. (2008).

L'innovation et l'adaptation de nouvelles technologies pour compenser ces hausses du prix de l'énergie s'avèrent primordiales pour demeurer compétitif. Le recours à la valorisation de la biomasse vise à remplacer présentement l'utilisation de combustibles fossiles traditionnels (mazout, propane, gaz naturel, mazout lourd) par celle des biocombustibles de diverses origines (bois en longueur, résidus forestiers et biomasses densifiées telles que bûches, granules de biomasse ligneuse ou herbacée). L'intérêt pour l'utilisation des énergies alternatives est croissant, mais les différentes incertitudes surtout du point de vue technico-économique et le peu de travaux de recherche au Québec ne comblent pas les attentes des producteurs (SPSQ, 2013). En effet, certaines des nouvelles technologies, comme le chauffage par combustion de la biomasse, requièrent la conversion des systèmes existants conventionnels à des coûts d'investissement importants. Dans le cas du secteur serricole, les entreprises ne sont pas prêtes à déboursier de tels montants étant donné leur faible marge de profit (UPA et al., 2008).

Les objectifs ciblés du projet répondaient également aux attentes d'un deuxième domaine prioritaire visé par le programme Innov'Action: La valorisation des résidus végétaux et animaux de la production agricole ou de la transformation alimentaire. L'agriculture génère une quantité importante de résidus tels que le lisier de porcs, le fumier de volaille, la paille, les litières usées, etc. Le potentiel énergétique des principaux résidus de récolte au Canada est estimé à 0,3 EJ (Exajoules) à partir de 17,8 millions de tonnes par an de biomasse séchée au four (excluant les quantités qui doivent rester sur le terrain pour assurer la fertilité des sols et celles perdues lors de la collecte ou utilisées comme litière pour animaux et le paillage) (Wood et Layzell, 2003). Les fumiers utilisés comme source d'énergie pourraient fournir ainsi 0,065 EJ/an d'énergie. Pour le secteur énergétique, les différentes matières organiques qui constituent la biomasse peuvent être utilisées soit directement (ex. : bois de chauffage), suite à une légère transformation (ex. : granules de biomasse végétale), ou encore après une

méthanisation de la matière organique (biogaz) ou différentes transformations chimiques (biocarburants) ou thermochimiques (huile pyrolytique, charbon, gaz). Par ailleurs, l'importance à accorder à une source spécifique de biomasse demeure intrinsèquement liée aux taux de concentration des biocomposés qu'elle contient, puisque ce sont précisément ces derniers qui constituent l'élément catalyseur du processus de production agroénergétique. Les différentes sources de biomasse agricole sont non seulement différentes en raison de leur nature, mais également en raison du potentiel qu'elles représentent en termes de production d'énergie. En fait, plusieurs sources de biomasse peuvent être utilisées par plus d'une filière agroénergétique. En d'autres mots, les possibilités liées à la valorisation des différentes sources de biomasse par le secteur agroénergétique sont multiples (UPA Mauricie, 2009).

## 1.2 RÉSIDUS AGRICOLES : UNE RESSOURCE ÉNERGÉTIQUE RENOUVELABLE

Les principaux types de résidus de biomasse valorisable énergétiquement sont les résidus de bois (tels que les copeaux de bois et les sciures de bois provenant de produits fraîchement coupés, de scieries, de palettes, etc., les débris de construction et de démolition dérivés du bois), les résidus de cultures lignocellulosiques (pailles de blé, d'avoine ou d'orge et les tiges de maïs), les différents résidus agricoles (matières végétales), les résidus issus de la transformation d'aliments à la ferme et les résidus de meuneries (résidus d'émondage du maïs, résidus de soya et d'avoine et remoulage de blé) (Brodeur et al., 2008). Les sous-produits animaux comprennent les fèces, l'urine et le fumier (y compris les litières). Les fumiers représentent une ressource d'une valeur énergétique importante, surtout s'il s'agit d'un fumier relativement sec dont la composition inclue une litière riche en cellulose (bran de scie et paille) et qui se trouve à proximité des systèmes de traitement par pyrolyse. En plus de son apport agronomique, le fumier est une matière organique qui renferme un pouvoir énergétique pouvant contribuer à améliorer le bilan énergétique pour les producteurs qui l'utilisent. Plusieurs fermes porcines pourraient être dans l'obligation d'adopter de nouvelles pratiques ou de nouvelles solutions afin de réduire la fertilisation en phosphore et d'atteindre l'équilibre réglementaire. Quelle quantité d'énergie pourrait être produite si toutes les déjections des animaux de ferme au Québec étaient converties en énergie? En utilisant une méthodologie semblable à celle de Wood et Layzell (2003), il est estimé que ces fumiers pourraient générer, par exemple, en les transformant en biogaz, 13 PJ (Pétajoules) d'énergie, soit environ la moitié de la consommation actuelle d'énergie du secteur agricole québécois. Évidemment, ce calcul reste théorique, car les besoins agronomiques doivent être d'abord comblés, mais force est de constater que la valeur énergétique des fumiers au Québec est appréciable (Lease et Théberge, 2005).

Par ailleurs, la transformation du plastique en produits énergétiques comme le diesel ou comme additifs pour les combustibles constitue l'avenue la plus intéressante et la plus payante pour les agriculteurs selon l'étude de Guertin et Lavallée (2009). Il s'agit aussi de la façon la plus sécuritaire pour l'environnement de disposer des plastiques. Le recyclage du plastique est plutôt difficile, car il est généralement souillé par du sol, de l'herbe ou d'autres matières auxquelles il a été exposé. Cependant, le plastique, même souillé par différents matériels, représente une source d'énergie équivalente à 90 – 95 % de la valeur énergétique du mazout léger. En effet, le mazout léger libère 49 MJ/kg, alors qu'un plastique comme le polyéthylène à basse densité (PEbd) BTU/lb 46 MJ/kg (Garthe et Kowal, 1993). Le secteur agricole au Québec affiche une consommation annuelle en produits

plastiques d'environ 7000 tonnes. La majorité des produits plastiques distribués dans le milieu agricole québécois sont fabriqués à partir de PEbd dans une proportion approchant les 80 % et de polyéthylène à haute densité (PEhd) dans une proportion de 12 % (Guertin et Lavallée, 2009).

### 1.3 LA PYROLYSE : UNE TECHNOLOGIE POLYVALENTE

La technologie proposée dans le cadre du présent projet a comme but de produire par pyrolyse rapide un combustible issu de matières résiduelles agricoles (résidus végétaux, animaux et plastiques) qui pourrait substituer une partie du mazout n° 2 actuellement utilisé par les entreprises serricoles. L'huile pyrolytique obtenue par la pyrolyse de la biomasse représente une bonne alternative de remplacement des énergies fossiles par les énergies renouvelables et moins polluantes.

La pyrolyse est un procédé thermochimique de transformation de la biomasse à haute température en absence d'oxygène. La biomasse ou l'intrant soumis à la pyrolyse est transformé en un produit carbonisé (biocharbon) et en une fraction gazeuse qui est en partie transformée en biohuile (ou huile pyrolytique) par condensation. L'huile pyrolytique est de grand intérêt dû à son potentiel énergétique (pouvoir calorifique ~18 MJ/L) et son contenu en produits chimiques de grande valeur (Agrinova, 2009). Les quantités obtenues de chaque fraction varient selon la nature de l'intrant traitée et les paramètres opératoires. Lorsque les paramètres sont optimisés afin de réaliser un traitement de type « pyrolyse rapide » (températures d'environ 500 °C et un temps de résidence très court dans la chambre de réaction, d'environ 2 secondes), la production d'huile est favorisée (60 - 75 % de la masse sèche).

En plus de présenter un potentiel important pour la valorisation des résidus agricoles, cette technologie permet aussi la valorisation d'autres types de résidus provenant de l'agriculture tels que les résidus de plastique. Il existe un intérêt croissant aussi pour la pyrolyse rapide d'autres matières résiduelles, entre autres les cartons et les résidus de construction (Cantrell et al. 2012; Lehto et al. 2013; Bezhad et Eldridge 2007; CEPAF 2007; et Mark Shaw 2006).

La technologie de production de la biohuile par pyrolyse de résidus forestiers et agricoles est en plein essor et plusieurs entreprises canadiennes, telles qu'Ensyn Technologies inc., Dynamotive Energy Systems Corporation et Advanced BioRefinery inc. (ABRI), commercialisent déjà des équipements de pyrolyse. ABRI, une entreprise située près d'Ottawa, a conçu des prototypes pouvant transformer 1, 50 et 100 tonnes de matière sèche par jour (TSPJ) (Lehto, 2013).

La pyrolyse de résidus plastiques, tels que le polyéthylène à haute densité (PEhd) et le polystyrène (PS), dans le but de produire de l'huile pyrolytique a déjà fait l'objet de plusieurs études scientifiques (Lee, 2012). La copyrolyse de plastiques résiduels et de la biomasse permet d'augmenter considérablement le pouvoir calorifique d'huile pyrolytique et d'améliorer sa compatibilité avec des produits pétroliers. De plus, la possibilité d'utiliser de l'huile pyrolytique (produite avec du plastique de type PEhd) mélangée avec du diesel dans un moteur à combustion interne a déjà été évaluée par Kumar et al. (2013).

Des recherches sont en cours pour transformer la biohuile afin qu'elle soit utilisable dans les moteurs diesel. Le centre de la technologie de l'énergie de CANMET a étudié la combustion d'une émulsion constituée de biohuile et du biodiesel dans le moteur diesel ordinaire. Le mélange évalué est non corrosif, facile à enflammer et présente les mêmes propriétés que le diesel classique. La majorité des chaudières, des turbines et des centrales électriques peuvent être alimentées par un tel mélange sans devoir apporter de modifications importantes aux appareils d'alimentation et d'injection, ce qui permet des économies substantielles en capitaux (CEPAF, 2007). Toutefois, la recherche doit être poussée pour parvenir à produire un combustible de type huile pyrolytique pouvant être utilisé efficacement dans les systèmes de chauffage actuels des serres.

Selon l'information fournie par Agrinova en 2009, le coût de production de la biohuile se comparait à celui du mazout pour un même contenu énergétique (15,9 \$/GJ dans le cas de la biohuile, par rapport à 17,7\$/GJ pour le mazout n° 2). Cependant, les caractéristiques et la qualité de l'huile pyrolytique n'en faisaient pas un substitut envisageable pour les utilisateurs de mazout. Or, l'augmentation du prix des carburants fossiles et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) expliquent le développement accéléré des biocarburants et des biocombustibles dans le monde industrialisé. L'étude récente réalisée par l'équipe VTT (Lehto et al., 2013) montre des résultats encourageants pour l'utilisation de biohuiles dans différentes sources énergétiques stationnaires telles que chaudières et fournaies industriels. Selon l'équipe VTT, cela est possible lorsque les caractéristiques des biohuiles sont soigneusement prises en considération pour la formulation finale du combustible.

Les systèmes de combustion sont très sensibles aux changements de la qualité des combustibles utilisés, et par conséquent, une standardisation est requise afin de créer des combustibles permettant d'opérer les systèmes de combustion avec une haute efficacité. Toutefois, les propriétés physico-chimiques de la biohuile produite à partir des résidus agricoles sont différentes du mazout n° 2. Par contre, il est possible d'adapter (alimentation, injection, matériaux, etc.) à la biohuile les systèmes de combustion conçus initialement pour utiliser le mazout n° 2. De plus, il pourrait être possible de modifier les propriétés de la biohuile de façon à se rapprocher de celles du mazout n° 2 par co-pyrolyse de plastiques et de biomasses. Naturellement, les entreprises serricoles, et en général les utilisateurs finaux de la biohuile, sont intéressés par le coût total de l'implantation de la technologie par rapport aux énergies fossiles. Par conséquent, l'aspect coût-bénéfice pour le producteur en serre sera pris en considération à chaque étape décisionnelle du projet proposé.

Le développement de la filière des biohuiles présenterait des avantages pour les communautés rurales au niveau de la création d'emplois (4 emplois/mégawatt ou 16 emplois/100 TSPJ) (Lehto, 2013). Pour le moment, la biohuile ne représente qu'une infime part du marché des carburants. Toutefois, il est prévu que sa croissance se fera par l'entremise de nombreuses petites unités, relativement peu dispendieuses à construire et qui peuvent être situées à proximité de la matière première. Par exemple, une coopérative pourrait se procurer une unité de pyrolyse pour convertir le fumier en biohuile. Ou bien, des entrepreneurs privés pourraient se procurer des unités mobiles afin de se déplacer jusqu'aux sites où se trouvent les surplus des différents types de résidus. L'application de cette technologie pour la production d'une biohuile destinée aux systèmes de chauffage des

serres permettrait une polyvalence dans l'utilisation de divers résidus agricoles, un impact environnemental positif important, et contribuerait à l'amélioration des coûts d'exploitation.

## 1.4 L'EXPERTISE DE L'ÉQUIPE DE RECHERCHE

Au Québec, l'IRDA est reconnu comme un des 12 centres de recherche ou de transfert de technologies qui sont spécialisés dans la valorisation de la biomasse et qui peuvent aider ou accompagner les producteurs agricoles dans leurs démarches d'amélioration du chauffage, comme cité par la SPSQ (2013) dans l'étude et le plan d'action visant la structuration de la chaîne d'approvisionnement et d'innovation en biomasse pour le chauffage en agriculture. L'IRDA détient une expertise de près de dix ans dans le domaine de la pyrolyse. Des essais préliminaires réalisés en 2007-2008 à partir de la fraction solide de lisier de porc avaient donné des résultats encourageants concernant la valorisation énergétique des résidus animaux (Verma et Solomatnikova, 2011). Par la suite, l'IRDA en partenariat avec le CRIQ a développé une approche de pyrolyse originale basée sur l'utilisation d'un réacteur vertical à vis sans fin. Des essais d'optimisation ont été réalisés en 2009-2010 en poursuivant l'objectif d'augmenter le rendement en biohuile à partir du solide de lisier de porc préalablement bioséché par une technique aussi développée par l'IRDA. Les rendements ont atteint un pourcentage de plus de 62 % pour la production de biohuile qui présentait un pouvoir calorifique de 22,5 MJ/kg (Verma et Solomatnikova, 2011). Une demande de brevet a été déposée en 2013. Les brevets canadien (CA 2830968) et américain (US 9,486,774 B2) concernant cette technologie ont été délivrés conjointement à l'IRDA et au CRIQ en 2016 (Verma et al., 2016a,b).

## 1.5 RÉFÉRENCES

Agrinova, 2009. Biohuile Pyrolytique. Fiche disponible en ligne à : [www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/developpement\\_regional/ruralite/groupe\\_travail/Biohuile\\_pyrolytique.pdf](http://www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/developpement_regional/ruralite/groupe_travail/Biohuile_pyrolytique.pdf)

Agéco, 2006. Profil de consommation d'énergie à la ferme dans six des principaux secteurs de production agricole du Québec. Rapport No 1. Groupe Agéco, 75 pages

Brodeur, C., J. Cloutier, D. Crowley, X. Desmeules, S. Pigeon et R-M. St-Arnaud. 2008. La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques. CRAAQ

Bezhad et Eldridge, 2007. Utilisation des Biohuiles issues de la transformation de la paille comme substitut aux carburants fossiles, sujet de Controverse, ITMP.

Cantrell, K., B. et Martin J., H., 2012. Poultry litter and switchgrass blending and pelletizing characteristics for biochar production, American Society of Agricultural and Biological Engineers.

CEPAF, 2007. La production de biocarburants dans les milieux ruraux du Québec. La Pocatière (Québec), Canada.

Garthe, J. et P. Kowal. 1993. Resource Recovery: Turning Waste into Energy. Agricultural and Biological Engineering Solid Waste Management, Bulletin C-11, Penn State University Cooperative Extension, PA, June 1993.

Guertin, S-P. et S. Lavallée. 2009. Disposition et valorisation énergétique des matières plastiques utilisées à la ferme. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 71 pages.

IRDA, 2013. Contribution de l'agriculture à l'avenir énergétique du Québec : Des solutions issues de la recherche agroenvironnementale appliquée. Mémoire présenté à la Commission sur les enjeux énergétiques du Québec.

Kumar, S., R. Prakash, S. Murugan et R. K. Singh, 2013. Performance and emission analysis of blends of waste plastic oil obtained by catalytic pyrolysis of waste HDPE with diesel in a CI engine. Energy Conversion and Management, 74 : 323-331.

Lee, Kyong-Hwan. 2012. Pyrolysis of Waste Polystyrene and High-Density Polyethylene, Material Recycling - Trends and Perspectives, Dr. Dimitris Achilias (Ed.), ISBN: 978-953-51-0327-1, InTech, (en ligne) [www.intechopen.com/books/material-recycling-trends-and-perspectives/pyrolysis-of-waste-polystyrene-and-high-density-polyethylene](http://www.intechopen.com/books/material-recycling-trends-and-perspectives/pyrolysis-of-waste-polystyrene-and-high-density-polyethylene).

Lease, N. et Théberge, L., 2005. Le secteur agricole au Québec : Une source d'énergie pour l'avenir? - Union québécoise pour la conservation de la nature, UQCN, FrancVert, Volume 2 numéro 1, mars 2005

Lehto, J., Oasmaa, A., Solantausta, Y., Kytö, M. et David Chiamonti, D., 2013. Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils. Espoo 2013. VTT Technology 87. 79 p.

Mark Shaw, 2006. Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass to Maximize Bio-oil Yield: An Overview. Department of Agricultural & Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

SPSQ, 2007. Rapport de Consultation – Le Secteur Serricole Québécois, la Communication et la Question Énergétique. Québec, Canada.

SPSQ, 2013. Étude et plan d'action visant la structuration de la chaîne d'approvisionnement et d'innovation en biomasse pour le chauffage en agriculture. Québec, Canada.

UPA, Hydro Québec et CDAQ, 2008. L'efficacité énergétique dans le secteur serricole. Fiche pratique. Québec, Canada.

UPA Mauricie, 2009. Étude quantitative et qualitative du potentiel de production de biomasse et de biocarburants sur les fermes de la Mauricie, Rapport final

Verma, M. et Solomatnikova, O., 2011. Développement d'un procédé de transformation à la ferme de la fraction solide des lisiers de porc en produits énergétiques. Projet CDAQ n° 6280. Rapport final. IRDA-CRIQ. 66 pages

Verma, M., Godbout, S., Solomatnikova, O., Zegan, D., Larouche, J-P. et Pelletier, F., 2016a. Patent 2830968 – System and process for thermochemical treatment of matter containing organic compounds. <http://brevets-patents.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/2830968/summary.html>

Verma, M., Godbout, S., Solomatnikova, O., Zegan, D., Larouche, J-P. et Pelletier, F., 2016b. Patent US 9486774 B2 – System and process for thermochemical treatment of matter containing organic compounds. Official Gazette for Patents. <https://www.uspto.gov/learning-and-resources/official-gazette/official-gazette-patents>

Wood, S. M. et Layzell, D. B., 2003. A Canadian Biomass Inventory: Feedstocks for a Bio-based Economy. BIOCAP Canada Foundation, Queen's University, Kingston, Canada.

## 2 HYPOTHÈSES ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

---

### 2.1 HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE

Dans la présente étude, il est proposé de produire par pyrolyse rapide un combustible issu de matières résiduelles agricoles qui pourrait être utilisé dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serrioles. Les hypothèses évaluées sont :

1. La pyrolyse rapide de résidus agricoles produit de la biohuile, du biocharbon et des gaz pyrolytiques, la portion de biohuile pouvant être valorisée comme combustible dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2 ;
2. L'utilisation de l'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2 assure un gain environnemental et économique pour la serriole ;
3. L'ajout des résidus de plastique dans les intrants du procédé de pyrolyse améliore la qualité de la biohuile ;
4. Les co-produits de la pyrolyse rapide sont valorisables à des fins énergétiques ou agronomiques.

### 2.2 OBJECTIF PRINCIPAL

Acquérir les connaissances pour produire, par pyrolyse rapide, un combustible issu de résidus agricoles destiné aux systèmes de chauffage des serres utilisant le mazout n° 2.

### 2.3 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Pour atteindre l'objectif principal, ce projet avait les objectifs spécifiques suivants :

1. Identifier les matières résiduelles agricoles transformables en biohuile ;
2. Adapter et optimiser le procédé de pyrolyse rapide pour ces matières ;
3. Améliorer la qualité de l'huile avec un adjuvant issu d'un résidu plastique ;
4. Évaluer l'adaptation nécessaire pour un système de chauffage à la biohuile pyrolytique ;
5. Explorer le potentiel de valorisation du biocharbon et des gaz pyrolytiques.

### 3 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET PLAN DU RAPPORT

De façon globale, la présente étude a été divisée en six grandes étapes décrites brièvement dans cette section. Par la suite, le rapport est constitué d'un chapitre pour chaque étape. Chaque chapitre présente les détails de la réalisation de l'étape respective, incluant le contexte, les objectifs, la méthodologie, les résultats et les conclusions.

Étape n° 1 – Essais préliminaires et optimisation des paramètres de pyrolyse : Cette étape a débuté par l'identification et la sélection des biomasses et résidus agricoles ayant un potentiel technique et économique intéressant pour la production d'huile pyrolytique, particulièrement dans le contexte serricole québécois. Par la suite, le système de pyrolyse a été mis place et instrumenté pour ensuite effectuer des essais préliminaires afin de déterminer les conditions optimales de pyrolyse spécifiques à chacun des intrants sélectionnés. Deux critères de performance ont été étudiés : le rendement massique et la qualité de la biohuile telle que définie par la norme ASTM D7544-12 (*Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel*).

Étape n° 2 – Essais de co-pyrolyse pour la valorisation de résidus plastiques en serriculture : Cette étape a permis d'évaluer la qualité et le rendement de la production de l'huile lors de l'utilisation de plastique comme additif dans l'intrant du procédé. Le polyéthylène à basse densité, le plastique le plus utilisé en agriculture, a été utilisé seul ou en mélange avec de la biomasse pour l'évaluation de la production d'huile pyrolytique.

Étape n° 3 – Essais de combustion de l'huile de pyrolyse : le potentiel d'utilisation des mélanges d'huile pyrolytique-diesel dans les systèmes de chauffage à base de mazout n° 2 a été évalué à cette étape. D'abord, un mélange approprié d'huile pyrolytique de diesel et d'un surfactant permettant l'homogénéisation et la stabilisation du mélange a été trouvé. La qualité des mélanges a été évaluée dans une optique d'utilisation dans les systèmes de chauffage sans devoir modifier de façon importante le système de chauffage en place. Un banc d'essais d'un système de combustion des mélanges a été mis en place et instrumenté (mesure, contrôle, etc.) afin de pouvoir réaliser les différents essais. L'évaluation des biohuiles a été faite en déterminant la qualité de la combustion (gaz de combustion), l'énergie fournie et le niveau d'encrassement de la buse d'atomisation du système d'injection. La combustion du diesel dans le système a servi comme référence.

Étape n° 4 – Analyse technico économique et impact environnemental de l'utilisation de l'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage à base de mazout n° 2 en serriculture : La réduction des émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> issues de l'utilisation de combustibles fossiles a été calculée. L'analyse technico-économique a consisté essentiellement à déterminer la faisabilité de la substitution d'une partie du mazout n° 2 par de la biohuile. L'analyse s'est concentrée sur le contexte des plus petites serres puisque le potentiel de substitution y est plus fort. Une budgétisation partielle a été réalisée et une valeur de remplacement optimale a été calculée. Enfin, des analyses de sensibilité, particulièrement en fonction des fluctuations du prix du mazout n° 2, ont complété l'analyse de la faisabilité économique.

Étape n° 5 – Caractérisation du biocharbon et analyse des voies potentielles de valorisation : Les objectifs de cette étape ont été de 1) définir la qualité du biocharbon en fonction des conditions de la pyrolyse et de la nature de la biomasse utilisée et de 2) catégoriser le biocharbon, et en fonction de ses propriétés, proposer une voie de valorisation potentielle. En effet, même si les paramètres du procédé de pyrolyse sont optimisés afin de produire de l'huile pyrolytique, une fraction des intrants est transformée en biocharbon. L'analyse s'est attardée au potentiel d'utilisation du biocharbon comme amendement au sol dans le but de séquestrer du carbone et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, dans un contexte de lutte contre les changements climatiques.

Étape n° 6 – Potentiel de valorisation des gaz pyrolytiques. Les activités de cette étape s'insèrent dans le cadre du cinquième objectif du projet. En effet, des rejets gazeux sont produits durant la pyrolyse, constitués de gaz n'ayant pas été condensés en huile. Cette étape a été exécutée dans le but de déterminer le potentiel de la valorisation de ces gaz, particulièrement, pour une valorisation énergétique afin d'augmenter l'efficacité du procédé.

## 4 ÉTAPE N° 1 – ESSAIS PRÉLIMINAIRES ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE PYROLYSE

Patrick Brassard<sup>1,2</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>2</sup> et Stéphane Godbout<sup>2</sup>, Jean-Pierre Larouche<sup>2</sup>, Michèle Grenier<sup>2</sup>,  
Dan Zegan<sup>2</sup> et Vijaya Raghavan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université McGill, Faculté de l'agriculture et des sciences de l'environnement. Dép. de génie des bioressources

<sup>2</sup> Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

### 4.1 RÉSUMÉ

La pyrolyse et la valorisation des coproduits résultants (biohuile et biocharbon) seraient une solution de gestion durable des résidus agricoles et forestiers. La biohuile pourrait remplacer le mazout n° 2 dans les systèmes de chauffage. Le biocharbon peut être utilisé comme amendement du sol tout en atténuant les changements climatiques, car il pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre et séquestrer le carbone. Cependant, les rendements et les propriétés des produits sont fortement influencés par le type de résidu et les paramètres de la pyrolyse. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'influence des paramètres de la pyrolyse (température, temps de résidence dans la chambre de réaction et débit d'azote) sur les rendements produits et les propriétés des biohuiles (teneur en eau, pH et teneur en solides) afin d'optimiser le processus de fabrication pour obtenir des huiles de la plus haute qualité possible. La pyrolyse du bois, du panic érigé et de la fraction solide du fumier de porc (FSLP) a été réalisée dans un réacteur à vis verticale. Le plan expérimental mis en place suit le modèle Box-Behnken, soit un modèle de surface de réponse de second ordre nécessitant 15 tests de pyrolyse pour chaque type de biomasse. Il a ensuite été possible d'identifier les paramètres de pyrolyse optimaux nécessaires à la production de biohuile avec la plus faible teneur en eau, ce qui est souhaité pour la combustion. Les modèles prédictifs montrent que des rendements élevés en biohuile (55,4 % et 57,9 %) avec une teneur relativement faible en eau (36,4 % et 32,6 %) peuvent être obtenus à partir du panic érigé et du bois, respectivement, si des paramètres de pyrolyse appropriés sont sélectionnés. La teneur minimum en eau de la biohuile de la pyrolyse de la FSLP était beaucoup plus élevée, soit à 70,3 %. L'ajout de plastique comme adjuvant à la biomasse et le traitement de la biohuile pour éliminer l'eau pourraient être considérés comme des solutions pour améliorer encore la qualité de la biohuile.

### 4.2 INTRODUCTION

Le secteur agricole est responsable d'environ 7,9 % des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) dans la province de Québec (Canada). En 2014, un nouveau rapport publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014) a montré que «les émissions mondiales de GES ont atteint des niveaux sans précédent malgré le nombre croissant de politiques visant à réduire les changements climatiques». Les émissions de gaz à effet de serre devraient être abaissées de 40 à 70 % par rapport aux valeurs

de 2010 au milieu du siècle et à près de zéro à la fin du siècle pour limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à deux degrés Celsius (IPCC, 2014).

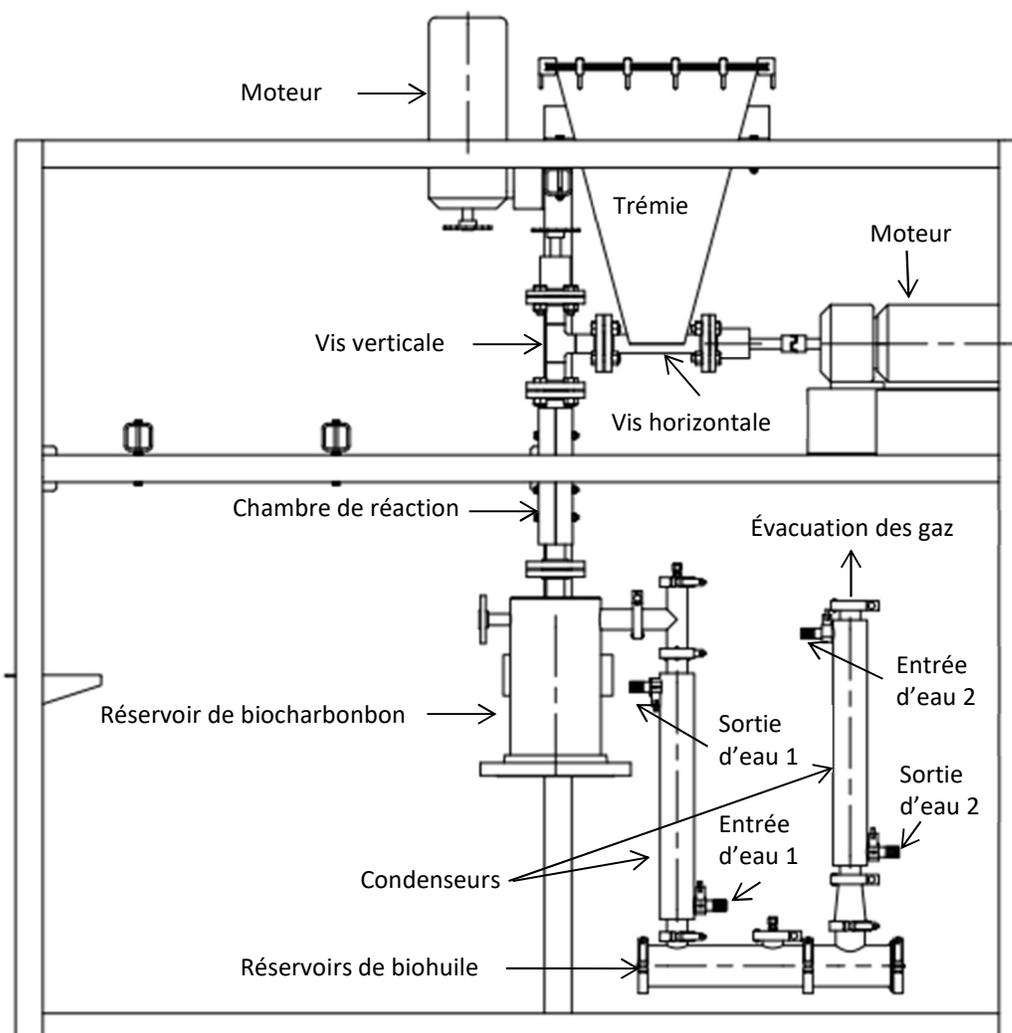
La pyrolyse de la biomasse résiduelle est proposée comme stratégie pour atténuer les changements climatiques. Ce procédé, défini comme une méthode de conversion thermo-chimique de biomasse se produisant à haute température (350 à 700 °C) et sans oxygène, produit un biocharbon solide, une biohuile liquide, et des gaz non condensables. Le biocharbon pourrait séquestrer le carbone de la biomasse pendant de longues périodes (plus d'un siècle) et réduire les émissions de GES lorsqu'il est appliqué au sol. La biohuile a un pouvoir calorifique supérieur qui peut atteindre 18 MJ/kg et pourrait être utilisée pour remplacer le mazout n° 2. Toutefois, les caractéristiques de la biohuile pourraient constituer un obstacle à l'utilisation comme combustible dans les appareils de chauffage. Par exemple, la teneur en eau élevée dans la biohuile abaisse la valeur énergétique, le faible pH cause la corrosion des équipements et la teneur élevée en solides peut bloquer les filtres et les injecteurs. Ainsi, des modifications du brûleur ou un traitement de mise à niveau de la biohuile pourraient être nécessaires. Étant donné que les rendements et les caractéristiques des produits dépendent du type de biomasse ainsi que des paramètres de la pyrolyse, il est important de choisir les paramètres les plus appropriés afin de produire une biohuile nécessitant des traitements minimaux et un minimum de modifications à l'appareil de chauffage.

Le but de cette étude était d'évaluer l'influence des paramètres de pyrolyse (température, temps de résidence de la biomasse dans le réacteur et débit d'azote) sur les rendements des produits et sur les propriétés les plus importantes de la biohuile (teneur en eau, pH et teneur en solides). Le deuxième objectif était d'identifier les conditions optimales de pyrolyse afin de produire une biohuile avec le meilleur potentiel pour remplacer le mazout fossile dans les systèmes de chauffage au mazout (c'est-à-dire avec la plus faible teneur en eau, la plus faible teneur en solides et le pH le plus élevé). La qualité des biohuiles produites a été évaluée, basée sur la norme ASTM D7544-12, qui spécifie les caractéristiques des biocombustibles liquides de pyrolyse destinés à être utilisés dans les brûleurs industriels.

## 4.3 MÉTHODOLOGIE

### 4.3.1 Banc d'essai

Un réacteur de pyrolyse à vis sans fin (brevet CA 2830968) a été développé par l'Institut de recherche et de développement pour l'agroenvironnement (IRDA) en collaboration avec le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). L'unité de pyrolyse (Figure 1) a été installée au Laboratoire sur les énergies en agriculture durable (LEAD) de l'IRDA (Deschambault, QC, Canada). Le pyrolyseur comprend une trémie, une vis d'alimentation horizontale, une vis verticale traversant un bloc chauffant de 25,4 cm de long, un réservoir pour la récupération du biocharbon et un système de condensation pour récupérer la biohuile.



**Figure 1 Schéma du pyrolyseur**

Le matériel à pyrolyser est placé dans la trémie d'alimentation. Un agitateur a été installé dans la trémie afin de faciliter l'alimentation de la vis horizontale lors de l'utilisation de matériaux à basse densité. Le matériel arrive dans la chambre de réaction à vis verticale (tube en acier de 2,54 cm de diamètre) par la vis horizontale. La vitesse de rotation des vis peut être commandée individuellement par des moteurs réducteurs contrôlant ainsi le débit d'alimentation et le temps de résidence du matériel dans la chambre de réaction. La puissance thermique est fournie par deux éléments chauffants de 1 500 Watts insérés dans un bloc de cuivre autour du tube dans la zone de réaction. Des thermocouples sont installés dans ce bloc pour enregistrer la température à la paroi extérieure du tube et pour commander les éléments chauffants.

À la sortie de la chambre de réaction à vis verticale, le produit solide de la pyrolyse (charbon) tombe dans le réservoir (31,4 cm de haut et 16,8 cm de diamètre). Un pot (15,2 cm de long) est placé dans le réservoir pour récupérer le charbon accumulé. L'accès au réservoir est réalisé par une bride au fond. De plus, les particules

fines sont séparées du gaz par un déflecteur intérieur (10,2 cm de diamètre et 10,5 cm de long) placé à la sortie du réacteur. Le gaz est alors évacué par une ouverture dans la partie supérieure du réservoir et il est dirigé vers le système de condensation de type «*tube in tube*» à contre-courant. Ce dernier est composé de deux tubes refroidis à l'eau et de deux réservoirs d'accumulation en acier inoxydable. Lorsque le gaz traverse l'espace annulaire du premier tube de condensation (45,7 cm de long, 38,1 mm de diamètre intérieur et 63,5 mm de diamètre extérieur), une quantité de condensat s'accumule dans le premier réservoir en acier inoxydable de 76,2 mm de diamètre et passe ensuite au second tube de condensation pour une nouvelle étape de condensation, avec l'accumulation du condensat dans le deuxième réservoir. L'eau de refroidissement (avec une température ambiante de 15 à 19 °C dans le premier condenseur et de 3 à 4 °C dans le deuxième) circule à contre-courant dans chaque tube central du condenseur. La température de l'eau est mesurée à l'entrée et à la sortie de chaque condenseur.

L'unité de pyrolyse est conçue afin d'empêcher l'entrée d'oxygène dans le système. Chaque bride est munie avec des joints de graphite à haute température (150 psi). Pour chaque réaction, l'air dans le système est purgé avec de l'azote qui est injecté dans la trémie. Alors que le flux d'azote assure que la réaction de pyrolyse se produise dans un environnement sans oxygène, il aide également à évacuer les gaz de pyrolyse.

#### 4.3.2 Sélection des intrants

Il existe une panoplie de biomasses et résidus au Québec pouvant être utilisé comme biocombustibles. Dans le présent projet, il a été prévu de sélectionner des intrants de diverses origines disponibles en milieu agricole. Ainsi, plusieurs études consultées portant sur la biomasse et les résidus agricoles disponibles au Québec pour une valorisation énergétique (Guertin et Lavallée, 2009, Écoressources, 2010, Fournel, 2011, ÉcoRessources, 2012) ont mené l'équipe de recherche à sélectionner un intrant de chacun des quatre types suivants : biomasse forestière, culture lignocellulosique, résidus d'une production animale et plastique.

Puisque le bois est le combustible solide le plus répandu à des fins énergétiques, des résidus d'origine forestière ont été sélectionnés en premier lieu. Plus précisément, des granulés de faits d'un mélange d'épinette noire et de pin gris ont été sélectionnés. Cet intrant a fait office de témoin. Ensuite, le panic érigé (plante pérenne) a été sélectionné. Cette plante fait partie des cultures lignocellulosiques les plus prometteuses pour la production de biomasse énergétique en climat tempéré. Comme biomasse d'origine animale, la fraction solide de lisier de porc (FSLP) a été sélectionnée dû à l'importante production de porc au Québec et au caractère polluant et de gestion problématique dans certaines régions du Québec. Enfin, le polyéthylène basse densité a été ciblé étant donné son utilisation dans le recouvrement des serres et dans autres activités agricoles. Les 6 catégories d'usages de ces polyéthylènes sont les suivantes : couverture flottante, équipement d'irrigation, paillis, mini-tunnel, film d'ensilage, et le recouvrement des serres. Le rapport publié par Guertin et Lavallée (2009) prétend que 228 787 kg de polyéthylène issu des productions en serre sont produits par année au Québec. Toutefois, ce dernier intrant n'a pas fait l'objet de tests préliminaires et n'a été utilisé que dans les essais de co-pyrolyse réalisés à l'étape n° 2.

### 4.3.3 Conditionnement des biomasses

Toutes les biomasses ont été broyées et tamisées à une granulométrie de 1 à 3,8 mm avant la pyrolyse. Les propriétés chimiques des biomasses ont été mesurées en laboratoire. La composition élémentaire a été obtenue en utilisant le procédé EPA-3050. La teneur en C et en N de la biomasse a été évaluée par les méthodes de combustion et gravimétrique et la teneur en Cl par titrage au nitrate d'argent au laboratoire IRDA (Québec, Canada). Les propriétés physiques des biomasses y compris la teneur en cendres, le pouvoir calorifique supérieur et la teneur en humidité ont été déterminées en laboratoire selon les normes ASTM respectives. La cellulose, l'hémicellulose et la lignine ont été analysées selon la méthode AFNOR.

### 4.3.4 Dispositif expérimental

Des essais de pyrolyse avec le réacteur à vis verticale ont été effectués afin d'étudier l'influence des paramètres de pyrolyse sur les rendements des produits et les caractéristiques de la biohuile. La température, le temps de résidence de la biomasse dans la chambre de réaction et le débit de N<sub>2</sub> ont été choisis comme variables indépendantes. Tout d'abord, une revue de la littérature et des essais préliminaires ont été effectués afin d'identifier l'éventail des conditions de pyrolyse nécessaires pour obtenir des rendements élevés de biohuile avec chacune des trois biomasses sélectionnées. Pour les trois biomasses, le débit de N<sub>2</sub> variait entre 1 et 5 L min<sup>-1</sup> et le temps de résidence entre 60 et 120 secondes. La gamme optimale de température de pyrolyse sélectionnée a été entre 500 et 650 °C pour le bois et la FSLP, et entre 450 et 600 °C pour le panic érigé.

Ensuite, les essais finaux ont été réalisés pour étudier l'effet des trois variables indépendantes sur trois caractéristiques de l'huile : la teneur en eau, la teneur en solides de pyrolyse et le pH. Le dispositif expérimental était basé sur la méthodologie de surface de réponse (MSR), qui est un regroupement de techniques statistiques et mathématiques pour le développement, l'amélioration et l'optimisation de procédés (Myers et al., 2009). La MSR est utile pour illustrer la relation entre les variables de réponse (variables dépendantes) et les variables de procédé (variables indépendantes). D'ailleurs, cette méthode a été récemment utilisée afin d'identifier les paramètres de pyrolyse optimaux pour produire les plus hauts rendements de biohuile dans les études d'Oramahi et al. (2015), Kumar et Singh (2013), Brown et Brown (2012) et Abnisa et al. (2011).

Le dispositif expérimental Box-Behnken a été sélectionné pour la collecte des données. Pour une expérience à trois facteurs, cette conception factorielle incomplète nécessite trois niveaux uniformément espacés pour chaque facteur, codés -1, 0 et +1 (Tableau 1). Deux variables (niveaux -1 et +1) sont groupées ensemble dans un factoriel 2<sup>2</sup>, tandis que le troisième facteur reste fixe au centre (niveau 0, Tableau 1). Un total de 15 expériences a été effectué dans un ordre aléatoire, y compris trois répétitions d'une expérience avec les trois variables indépendantes fixées à leur point central. Un modèle Box-Behnken a été réalisé pour chacune des trois biomasses, pour un total de 45 essais.

**Tableau 1 Variables et niveaux du design Box-Behnken des essais préliminaires**

Variables indépendantes	Biomasse	Niveaux		
		-1	0	1
Température (°C)	Bois	500	575	650
	FSLP	500	575	650
	Panic érigé	450	525	600
Temps de résidence (s)	Chaque biomasse	60	90	120
Débit de N <sub>2</sub> (L min <sup>-1</sup> )	Chaque biomasse	1	3	5

#### 4.3.5 Rendements des produits de la pyrolyse et analyse des échantillons de biohuile

Les rendements de la biohuile (Équation 1) et du biocharbon (Équation 2) ont été calculés sur une base de biomasse humide. Le rendement en gaz non condensable (Équation 3) a été calculé par différence. De plus, le rendement de la fraction organique de la biohuile a été calculé en soustrayant la teneur en eau du rendement en biohuile (Équation 4).

$$\text{Rendement}_{\text{bio-huile}}(\text{wt. \%}) = \frac{m_{B1} + m_{B2}}{m_f} \times 100 \quad \text{Équation 1}$$

$$\text{Rendement}_{\text{biocharbon}}(\text{wt. \%}) = \frac{m_{\text{Biochar}}}{m_f} \times 100 \quad \text{Équation 2}$$

$$\text{Rendement}_{\text{gaz}}(\text{wt. \%}) = \frac{m_f - m_{\text{Biochar}} - m_{B1} - m_{B2}}{m_f} \times 100 \quad \text{Équation 3}$$

$$\text{Rendement}_{\text{liquide organique}}(\text{wt. \%}) = \frac{100 - \text{teneur en eau}}{100 \times \text{rendement bio - huile}} \quad \text{Équation 4}$$

Où  $m_{B1}$  et  $m_{B2}$  sont les quantités de biohuiles produites dans le premier et le deuxième condenseur (g), respectivement,  $m_{\text{biocharbon}}$  est la masse de biocharbon recueillie dans le réservoir (g),  $m_f$  est la masse de matière pyrolysée (g) et la *teneur en eau* est la quantité d'eau dans l'échantillon de biohuile (% en poids).

Les échantillons de biohuile ont été analysés au laboratoire du Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) pour la teneur en eau (méthode de Karl-Fisher), la teneur en solides de pyrolyse par filtration des solides dans le méthanol (ASTM D7579-09) et le pH. Chaque analyse a été effectuée en duplicata et les résultats ont été comparés à la spécification standard pour le biocombustible liquide de pyrolyse de la norme ASTM D7544 12 (ASTM, 2012). Il est à noter que les échantillons de la FSLP ont été très hétérogènes et il n'était pas possible d'obtenir un mélange homogène pour leur analyse sans l'addition du méthanol. À cet effet, 5 % de méthanol a été ajouté à chaque mélange.

### 4.3.6 Analyse statistique

L'effet des paramètres de pyrolyse sur le rendement en fraction organique de la biohuile et sur trois indicateurs importants de la qualité de la biohuile (teneur en eau, pH et teneur en solides) a été étudié. L'objectif était d'identifier les conditions optimales de pyrolyse afin de produire une biohuile avec la plus faible teneur en eau, le moins de particules solides et avec le pH le plus élevé. La méthode des moindres carrés de la méthode RSREG de SAS (SAS Institute inc., 2012) a été utilisée pour estimer les paramètres du modèle de régression de surface quadratique de réponse (Équation 5) adaptée aux données expérimentales obtenues à partir du modèle Box-Behnken :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 R + \beta_3 N + \beta_4 T^2 + \beta_5 (R * T) + \beta_6 R^2 + \beta_7 (N * T) + \beta_8 (N * R) + \beta_9 N^2 + \varepsilon \quad \text{Équation 5}$$

Où Y est la variable de réponse étudiée (teneur en eau, teneur en solides ou pH), 0, ... 9 sont les coefficients de régression à estimer, T, R et N sont les valeurs des variables indépendantes (température, temps de résidence de la biomasse et débit de N<sub>2</sub>), respectivement, et ε est l'erreur aléatoire. Un test d'ajustement du modèle a été effectué pour vérifier l'adéquation des données avec le modèle.

Ensuite, l'analyse canonique (SAS Institute inc., 2012) a été utilisée pour déterminer la nature du point stationnaire (ou le point sur la surface où les dérivées partielles sont égales à zéro) qui peut être un point de réponse maximale, un point réponse minimale, ou un point de selle. Dans le cas d'un point de selle, l'énoncé RIDGE (SAS Institute inc., 2012) a été utilisé pour indiquer la direction dans laquelle de nouvelles expérimentations devraient être effectuées pour produire la diminution ou l'augmentation la plus rapide de la réponse estimée à partir du point stationnaire.

## 4.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.4.1 Analyse des biomasses

Les résultats de la caractérisation des biomasses (Tableau 2) ont montré que les trois biomasses sont très différentes. La teneur en carbone était la plus élevée pour le bois (47,1 %) et la plus faible pour la FSLP (40,5 %). Ceci est inversement proportionnel à la teneur en cendres, qui était la plus élevée pour la FSLP (8,8 %) et la plus faible pour le bois (0,54 %). La FSLP présentait une teneur élevée en N et en Cl (2,26 % et 3 609 mg kg<sup>-1</sup>, respectivement) par rapport au bois et au panic érigé. La teneur en oxygène était faible pour la FSLP (28,2 %) comparativement au bois (40 %) et le panic érigé (42,5 %). La teneur en H variait de 3,23 % (panic érigé) à 6,38 % (bois). Enfin, toutes les biomasses présentaient une faible teneur en humidité après séchage (entre 6,5 et 8 %).

**Tableau 2 Propriétés des biomasses étudiées**

Paramètre	Unités	Bois	FSLP	Panic érigé
C <sub>total</sub>	b.h.%	47,1	40,5	43,5
N	b.h.%	0,108	2,26	0,624
O	b.h.%	40,0	28,2	42,5
H	b.h.%	6,39	5,85	3,23
Cl	mg kg <sup>-1</sup>	10	3 609	28
Volatiles	b.h.%	99,6	91,2	96,0
Cendres	b.s.%	0,54	8,8	3,65
Teneur en humidité	b.s.%	6,5	8,0	7,2
Lignine	b.s.%	24,0	12,9	11,2
Cellulose	b.s.%	30,4	11,9	42,9
Hémicellulose	b.s.%	29,9	22,0	30,1

La composition de la matière première influence la composition des produits obtenus suite à la pyrolyse. Les conditions opératoires vont aussi influencer beaucoup la composition chimique et les rendements en huile, gaz et biocharbon. La proportion de cellulose, d'hémicellulose et de lignine dans la biomasse influencera le degré de réactivité de la biomasse pendant le traitement (Lehmann et Joseph, 2009). L'hémicellulose et la cellulose, qui sont plus volatiles lors de la dégradation thermique (Yang et al., 2007), sont dégradées à 200-300 et 300-400 °C, respectivement, et la lignine est dégradée entre 200-700 °C, ce qui représente une large gamme de températures (Kim et al., 2012). À partir des résultats de l'analyse des constituants chimiques des biomasses, le bois pourrait nécessiter la température la plus élevée pour se décomposer, avec une teneur en lignine plus élevée (24 %) par rapport à celle de la FSLP et du panic érigé (12,9 % et 11,2 %, respectivement). Les teneurs en hémicellulose du bois et du panic érigé sont semblables (29,9 % et 30,1 %, respectivement) et supérieures à celle de la FSLP (22 %). La teneur en cellulose du panic érigé était la plus élevée (42,9 %) par rapport au bois (30,4 %) et à la FSLP (11,9 %).

#### 4.4.2 Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation

Les résultats des essais de pyrolyse effectués suivant la conception de Box-Behnken sont présentés au Tableau 3, au Tableau 4 et au Tableau 5 pour la pyrolyse de la FSLP, du bois et du panic érigé, respectivement. Pour chaque combinaison de paramètres de pyrolyse (température, temps de résidence de la biomasse et débit de N<sub>2</sub>), les rendements en produits et les propriétés de la biohuile (teneur en eau, teneur en solides de pyrolyse et pH) y sont indiqués. Le rendement en biohuile est très variable, selon les conditions de pyrolyse et la biomasse. Il a varié de 38,6 à 45,7 % pour la pyrolyse de la FSLP, de 48,6 % à 63,6 % pour la pyrolyse du bois et de 48,1 à 61,4 % pour la pyrolyse du panic érigé. La teneur élevée en matières volatiles et en cellulose du bois et du panic érigé pourrait être à l'origine de rendements élevés en biohuile (Mythili et al., 2013).

**Tableau 3 Rendements et caractéristiques des biohuiles du test d'optimisation de la pyrolyse de la FSLP**

Paramètres de pyrolyse			Rendement des produits				Propriétés des biohuiles		
T	t	N <sub>2</sub>	Biohuile (total)	Biohuile (sans eau)	Biocharbon	Gaz	Teneur en eau	Teneur en solides	pH
°C	s	L min <sup>-1</sup>	%	%	%	%	%	%	
500	60	3	42,8	12,5	41,6	14,9	70,7	5,50	4,5
650	60	3	42,7	10,5	33,8	21,8	75,4	2,55	5,3
500	120	3	41,7	10,8	39,6	17,0	74,1	3,00	4,6
650	120	3	39,1	8,5	32,6	27,2	78,3	1,50	5,9
500	90	1	45,7	12,4	38,8	15,1	72,8	1,90	5,0
650	90	1	44,0	7,7	32,4	22,8	82,6	0,26	5,7
500	90	5	39,3	10,6	40,4	19,5	73,1	6,00	4,4
650	90	5	38,3	9,3	32,1	28,8	75,7	3,80	5,0
575	60	1	46,7	10,8	36,7	15,0	76,9	2,00	4,8
575	120	1	45,7	12,0	34,7	17,7	73,8	0,48	5,6
575	60	5	40,1	11,7	38,5	20,6	70,7	7,60	4,3
575	120	5	38,6	9,2	35,9	24,5	76,2	3,50	5,2
575	90	3	42,3	11,7	35,8	21,0	72,4	3,00	5,2
575	90	3	43,7	12,1	36,0	19,4	72,2	3,30	-
575	90	3	43,6	11,9	34,8	19,8	72,7	2,20	4,9

**Tableau 4 Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation de la pyrolyse du bois**

Paramètres de pyrolyse			Rendement des produits				Propriétés des biohuiles		
T	t	N <sub>2</sub>	Biohuile (total)	Biohuile (sans eau)	Biocharbon	Gaz	Teneur en eau	Teneur en solides	pH
°C	s	L min <sup>-1</sup>	%	%	%	%	%	%	
500	60	3	57,6	39,0	31,2	10,9	32,3	0,04	2,1
650	60	3	56,0	36,8	18,3	25,2	34,2	0,52	2,8
500	120	3	63,6	41,9	23,4	12,4	34,1	0,18	2,4
650	120	3	48,6	27,4	17,6	33,3	43,7	0,12	2,3
500	90	1	61,9	39,9	24,6	13,2	35,6	0,39	2,5
650	90	1	52,4	31,3	18,0	29,0	40,3	0,82	2,5
500	90	5	55,2	36,3	30,2	14,2	34,2	0,07	2,0
650	90	5	48,8	27,8	17,5	33,1	43,0	0,55	4,1
575	60	1	49,1	31,8	22,6	28,0	35,2	0,12	2,0
575	120	1	58,8	34,4	21,2	19,6	41,5	0,56	2,2
575	60	5	56,8	37,8	22,2	20,5	33,4	0,08	2,4
575	120	5	54,4	35,2	19,9	25,2	35,3	0,29	2,3
575	90	3	60,0	38,1	20,7	18,8	36,5	0,26	2,1
575	90	3	60,6	40,6	20,6	18,2	33,0	0,39	-
575	90	3	61,5	39,4	20,2	17,8	35,9	0,10	2,6

**Tableau 5 Rendements et caractéristiques des huiles du test d'optimisation de la pyrolyse du panic érigé**

Paramètres de pyrolyse			Rendement des produits				Propriétés des biohuiles		
T	t	N <sub>2</sub>	Biohuile (total)	Biohuile (sans eau)	Biocharbon	Gaz	Teneur en eau	Teneur en solides	pH
°C	s	L min <sup>-1</sup>	%	%	%	%	%	%	
450	60	3	57,8	35,4	25,6	16,4	38,8	0,40	2,4
600	60	3	51,5	30,8	16,8	30,5	40,2	0,88	2,8
450	120	3	59,4	34,1	24,4	15,9	42,6	0,46	2,6
600	120	3	48,1	21,8	18,5	32,9	54,7	0,13	2,7
450	90	1	59,2	34,3	26,4	14,0	42,0	0,42	2,6
600	90	1	48,9	21,3	18,7	31,9	56,5	0,29	3,3
450	90	5	60,1	37,1	24,9	14,4	38,2	0,43	2,5
600	90	5	44,8	20,4	17,3	37,2	54,5	0,12	2,9
525	60	1	61,4	34,7	20,5	17,9	43,6	0,80	2,8
525	120	1	56,8	42,3	21,9	21,1	25,5	0,69	2,8
525	60	5	55,0	33,4	19,9	24,5	39,3	0,40	2,7
525	120	5	54,5	27,9	20,9	24,1	48,8	0,78	2,9
525	90	3	58,3	37,2	20,2	21,2	36,2	0,88	2,8
525	90	3	58,5	31,0	21,3	19,9	46,9	0,72	2,7
525	90	3	59,0	30,8	20,0	20,6	47,9	0,63	2,9

Lorsque la teneur en eau est soustraite de la biohuile, le rendement est très faible pour la pyrolyse de la FSLP (7,7 % à 12,5 %). Ce rendement est supérieur pour le bois (27,4 % à 40,6 %) et le panic érigé (20,4 % à 42,3 %), selon les paramètres de pyrolyse utilisés. Il est à noter que la teneur en eau est presque toujours supérieure à la valeur maximale spécifiée par le standard (30 %, ASTM D7544-12), allant de 70,7 % à 82,6 % pour la FSLP, de 32,3 à 43,7 % pour le bois et de 25,5 % à 56,5 % pour le panic érigé. Les analyses ont été effectuées sur le mélange de l'huile des deux condensateurs pour chaque essai de pyrolyse à l'exception d'un des échantillons de l'essai du point central de la pyrolyse de la FSLP (à 575 °C, 90 s et 3 L min<sup>-1</sup> de N<sub>2</sub>) pour lequel la teneur en eau a été analysée séparément. Les résultats ont montré qu'une fraction plus aqueuse est produite dans le premier condenseur. La teneur en eau de cette huile était de 74 %, tandis que celle du deuxième condenseur n'était que de 14,1 %.

La teneur en solides de la biohuile produite à partir de la pyrolyse du bois et du panic érigé (0,04 à 0,9 %) est toujours inférieure à la valeur maximale spécifiée par la norme (2,5 %; ASTM D7544-12), ce qui signifie que les particules fines de biocharbon sont séparées des vapeurs pyrolytiques de manière satisfaisante par le pyrolyseur. Cependant, la pyrolyse de la FSLP produit une teneur en solides plus élevée dépassant parfois la limite de la norme (0,5 à 7,6 %).

Le pH de la biohuile est toujours acide, en particulier celle produite à partir de la pyrolyse du bois et du panic érigé (2,0 à 4,1) (Bridgwater, 2012). Le pH de la biohuile de la FSLP est légèrement plus élevé, de 4,3 à 5,9, car sa composition chimique est très différente par rapport aux biohuiles obtenues à partir du bois. La biohuile de la FSLP est constituée principalement des acides gras. D'autres composés organiques comme les hydrocarbures aromatiques et différents cholestérols sont présents dans la biohuile en faible quantité. (Verma, M. et Solomatnikova. O., 2011) Par contre, des biohuiles fabriquées à partir du bois contiennent une quantité importante des acides de chaînes de carbone courtes tel qu'acide acétique, acide formique, etc. qu'influence considérablement leur pH. La teneur en cendre de lisier de porc est de 8,8 %. Certains travaux de recherche démontrent une relation directe entre le contenu en matière inorganique dans la matière première et la quantité d'eau générée par la pyrolyse. La teneur en cendre plus élevée que 3% l'influence de la composition chimique et l'augmente la teneur en eau des huiles pyrolytiques (Yildiz et al., 2015). Donc ce phénomène explique bien la teneur élevée de l'eau dans les huiles pyrolytiques obtenues à partir du lisier de porc.

#### 4.4.3 Valeurs optimales de pyrolyse estimées par le modèle statistique pour la production de biohuile

Les paramètres du modèle de prédiction de la valeur des trois variables dépendantes (teneur en eau, pH et teneur en matières solides de la biohuile) ont été estimés pour les trois biomasses en utilisant la méthode des moindres carrés. Le test d'ajustement n'a jamais été significatif ( $P > 0,05$ ), et le R carré était toujours supérieur à 0,78, ce qui signifie un bon ajustement du modèle. L'analyse canonique indiquait que le point stationnaire était un point selle. Cela signifie qu'il n'y a pas eu un optimum unique. Le Tableau 6 indique la direction dans laquelle d'autres expériences de pyrolyse doivent être effectuées afin d'obtenir des valeurs minimales et maximales de la teneur en eau, du pH et de la teneur en solides.

La valeur de pH est en fonction de la composition chimique de l'huile pyrolytique et il n'y aurait aucune relation entre le pH et la quantité d'eau. Cependant, les résultats d'une analyse de corrélation montrent que le pH est inversement corrélé à la teneur en eau. Par exemple, le pH de la biohuile provenant de la pyrolyse FSLP peut être relativement élevé (la valeur prédite maximale est de 5,7). Cependant, la teneur en eau minimale prédite est de 70,3 %, ce qui est très élevé. À l'opposé, les biohuiles obtenues de la pyrolyse du panic érigé et du bois ont une teneur en eau plus faible, avec des valeurs prédites minimales de 36,4 % et 32,6 % respectivement, ce qui est légèrement supérieur à l'exigence de la norme (30 % maximum). Cependant, le pH est par conséquent plus faible.

Puisque la teneur en matières solides de la biohuile provenant de la pyrolyse du bois et du panic érigé n'a jamais dépassé 0,88 %, ce qui est inférieur à la valeur maximale requise par la norme ASTM D7544-09 (2,5 % maximum), le même résultat est donc attendu pour d'autres paramètres de pyrolyse à l'intérieur des plages évaluées. Pour la biohuile de la FSLP, la teneur minimale prédite en solides serait de 0,61 %, ce qui respecte la limite maximale de la norme.

**Tableau 6 Valeurs optimales de pyrolyse estimées par le modèle de surface de réponse pour la production de biohuile**

	Rendement du biohuile (sans eau)		Teneur en eau		Teneur en solides		pH	
	%		%		%		-	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
	<b>FSLP</b>							
Valeur estimée	9,3	12,6	70,3	78,1	4,5	5,68	0,61	5,85
Température (°C)	648	543	550	636	530	632	613	549
Temps de résidence (s)	95	63	65	89	74	105	95	73
Débit d'azote (L min <sup>-1</sup> )	2,6	3,2	3,9	1,9	4,2	2,2	1,3	4,5
	<b>Panic érigé</b>							
Valeur estimée	22,2	37,5	36,4	54,4	2,5	3,05	0,35	0,89
Température (°C)	597	491	500	596	465	566	596	539
Temps de résidence (s)	96	111	113	97	72	87	98	63
Débit d'azote (L min <sup>-1</sup> )	3,4	1,9	1,9	3,4	3,1	1,3	3,3	2,2
	<b>Bois</b>							
Valeur estimée	31,8	41,9	32,6	41,4	1,97	3,22	0	0,51
Température (°C)	641	508	559	639	545	637	535	625
Temps de résidence (s)	103	104	60,7	105	63	87	65	90
Débit d'azote (L min <sup>-1</sup> )	3,3	2,9	3,0	2,7	2,9	4,1	3,2	1,5

Enfin, puisqu'il n'est pas possible de produire une biohuile ayant simultanément la plus faible teneur en eau, la plus faible teneur en solides (respecte la norme dans la majorité des cas) et le pH le plus élevé (pas de norme spécifique), la teneur en eau devenait donc de toute évidence l'indicateur le plus important de la qualité des huiles car il va influencer son pouvoir calorifique. Ainsi, la biohuile ayant le meilleur potentiel pour être utilisée comme combustible pourrait être produite à partir de la pyrolyse du bois à 559 °C, avec un temps de résidence de la biomasse de 61 secondes et un débit de N<sub>2</sub> de 3 L min<sup>-1</sup>.

#### 4.4.4 Production de la biohuile aux paramètres optimaux de pyrolyse et validation du modèle statistique

Le modèle de régression de surface de réponse quadratique a été validé avec les paramètres de pyrolyse attendus pour produire la biohuile avec le meilleur potentiel d'utilisation comme combustible. Le test de pyrolyse avec les paramètres sélectionnés à l'étape précédente a été réalisé en deux répétitions. La biohuile a été analysée pour ses caractéristiques physico-chimiques et les résultats sont présentés au Tableau 7. Les rendements moyens des produits étaient les suivants : 58,3 % de biohuile, 26,6 % de biocharbon et 14,4 % de gaz. Un excellent rendement en fraction organique de la biohuile (39,7 %) a été obtenu en raison de la faible teneur en eau (31,9 % en moyenne), ces valeurs étant proches à la valeur prédite et à l'exigence de la norme de la teneur en eau (30 %). Le pH de la biohuile était égal à la valeur prédite (2,0). La teneur en matières solides de

la biohuile (0,135 %) était proche de la valeur prédite (0,0) et satisfaisait l'exigence de la norme. La valeur calorifique brute, la viscosité cinématique et la densité de la biohuile produite dans les conditions optimales ont également été mesurées et ont satisfait les exigences de la norme.

**Tableau 7** Caractéristiques de la biohuile produite aux conditions optimales de pyrolyse et valeurs prédites par le modèle statistique

	Rendement en biohuile (sans eau)	Teneur en eau	pH	Teneur en solides	Pouvoir calorifique supérieur	Viscosité cinématique à 40°C	Densité à 15 °C
	%	%	-	%	MJ kg <sup>-1</sup>	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> (cSt)	g ml <sup>-1</sup>
Test 1	38,6	32,4	2	0,13	13,8	10,4	1,176
Test 2	40,9	31,3	2	0,14	--	13,5	1,181
Moyenne	39,7	31,9	2	0,135	13,8	11,9	1,179
Valeur prédite	38,9	32,8	2	0	--	--	--
Exigence de la norme*	--	≤ 30	--	≤ 2,5	≥ 15	≤ 125	1,1 – 1,3

\*Norme ASTM-D7544-09

## 4.5 CONCLUSION

La pyrolyse de la biomasse pourrait être une excellente solution de gestion pour les résidus agricoles et forestiers. Selon ses propriétés, la biohuile produite à partir de la pyrolyse pourrait être utilisée comme combustible pour remplacer le mazout. Étant donné que les ressources énergétiques fossiles sont en voie de disparition et que leurs impacts négatifs sur l'environnement deviennent de plus en plus évidents, la pyrolyse des résidus organiques s'impose comme une des techniques qui permet de substituer les énergies fossiles par les énergies renouvelables et moins polluantes. Ainsi, la pyrolyse permettra de résoudre la problématique de gestion à la ferme des résidus agricoles. De plus, le biocharbon produit pourrait être utilisé comme amendement du sol pour séquestrer le carbone et réduire les émissions de GES. Les résultats de cette étude ont montré que les rendements des produits et les caractéristiques de la biohuile sont étroitement liés aux paramètres de la pyrolyse et au type de biomasse. Les résultats de l'analyse statistique montrent qu'il est possible d'obtenir de la biohuile avec un fort potentiel pour remplacer le mazout fossile dans les appareils de chauffage. En particulier, la biohuile obtenue à partir de la pyrolyse du bois à 559 °C, avec un temps de résidence de 61 secondes et un débit de N<sub>2</sub> de 3 L min<sup>-1</sup> répondrait à la norme ASTM D7544-12 pour presque tous les paramètres, à l'exception de la teneur en eau (32,6 %) et le pouvoir calorifique supérieur (13,8 MJ kg<sup>-1</sup>), bien que proches de la valeur cible (maximum 30 % et minimum 15 MJ kg<sup>-1</sup>, respectivement).

De plus, des biohuiles avec une teneur en eau relativement faible de 36,4 % pourraient être obtenues à partir de la pyrolyse du panic érigé si les paramètres de pyrolyse sont bien sélectionnés. Cependant, la pyrolyse de la FSLP produit une biohuile ayant une teneur en eau élevée (minimum 70,3 %) qui serait difficilement utilisable comme combustible. La co-pyrolyse de résidus de plastique et de biomasse, le traitement de la biohuile pour

réduire sa teneur en eau et les modifications du système de condensation pourraient être considérés comme des solutions pour améliorer la qualité des biohuiles pour l'utilisation dans les appareils de chauffage.

## 4.6 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient le MAPAQ et l'IRDA pour leur contribution financière par le biais du programme Innov'Action. Les auteurs remercient également, Olga Solomatnikova (CRIQ), Cédric Morin (IRDA), Étienne Le Roux (IRDA et UQTR) et Salha Elcadhi (ÉTS) pour leur aide lors de la mise en œuvre et de la réalisation des expériences.

## 4.7 RÉFÉRENCES

Abnisa, F., W.M.A. Wan Daud and J.N. Sahu. 2011. Optimization and characterization studies on bio-oil production from palm shell by pyrolysis using response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*. 35: 3604-3616.

ASTM. 2012. D7544-12: Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bridgwater, A.V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 38: 68-94

Brown, J.N. and R.C. Brown. 2012. Process optimization of an auger pyrolyzer with heat carrier using response surface methodology. *Bioresource Technology*. 103: 405-414.

CRAAQ. 2008. La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec, Québec, Canada, 21 p.

ÉcoRessources. 2010. Étude technico-économique de filières de bioproduits industriels à base de produits ou de biomasses agricoles. Rapport d'étape : Phase 1. Rapport final présenté au Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), Québec. 212 p.

ÉcoRessources, 2012. Inventaire régionalisé des biomasses exploitables pour la production de bioénergie au Québec. Rapport final présenté au Ministère des Ressources naturelles, Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques, Québec. 137 p.

Fournel, 2011. Caractérisation des émissions atmosphériques lors de la combustion à la ferme de la biomasse lignocellulosique et herbacée. Revue de littérature. Rapport présenté à l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec. 36 p.

Godbout, S., Pelletier, F., Palacios, J.H., Zegan, D., Villeneuve, J., Morrissette, R., Savoie, P., 2011a. Bioenergy production from agricultural biomasses: a Canadian perspective. Bioenergy and other Renewable Energy Technologies and Systems (BRETS). 33th International Symposium of Section IV of CIGR.

Guertin, S-P. et S. Lavallée, 2009. Disposition et valorisation énergétique des matières plastiques utilisées à la ferme. Rapport final présenté au Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec (CDAQ), 72 p.

IPCC. 2014. Climate change 2014, Mitigation of climate change. Online: [www.mitigation2014.org](http://www.mitigation2014.org). Page consulted on November 2014.

Kumar, S. and R.K. Singh. 2014. Optimization of process parameters by response surface methodology (RSM) for catalytic pyrolysis of waste high-density polyethylene to liquid fuel. Journal on Environmental Chemical Engineering. 2: 115-122.

Kim, K.H., J-Y. Kim, T-S. Cho, J.W. Choi. 2012. Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). Bioresource Technology. 118: 158-162.

Lehmann, J. and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. Biochar for Environmental Management – Science and Technology. Edited by Lehmann J. and S. Joseph. Earthscan. ISBN : 978-1-84407-658-1

Myers, R. H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M. 2009. Douglas C. Wiley Series in Probability and Statistics: Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments (3rd Edition). Published by John Wiley & Sons, Inc. New Jersey (USA). 705 pages.

Mythili, R., P. Venkatachalam, P. Subramanian and D. Uma. 2013. Characterization of bioresidues for biooil production through pyrolysis. Bioresource Technology. 138: 71-78.

Oramahi, H.A., Wahdina, F. Diba, Nurhaida and T. Yoshimura. 2015. Optimization of production of lignocellulosic biomass bio-oil from oil palm trunk. Procedia Environmental Science. 28: 769-777.

SAS Institute inc. 2012. SAS/STAT(R) 12.1 Users guide, The RSREG Procedure. Online: [http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/65328/HTML/default/viewer.htm#statug\\_rsreg\\_overview.htm](http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/65328/HTML/default/viewer.htm#statug_rsreg_overview.htm). Page consulted on June 15, 2016.

Waladi, W., B. Partek, and J. Manoosh. 1999. Regulating ammonia concentration in swine housing: Part II. Application examples. *Trans. ASAE* 43(4): 540-547.

Yang, H., R. Yan, H. Chen, D.H. Lee and C. Zheng. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 86: 1781-1788.

Yildiz, G., F. Ronsse, R. Venderbosch, R. v. Duren, S. R. A. Kersten and W. Prins (2015). "Effect of biomass ash in catalytic fast pyrolysis of pine wood." *Applied Catalysis B: Environmental* 168–169: 203-211

## 5 ÉTAPE N° 2 - ESSAIS DE COPYROLYSE POUR LA VALORISATION DE RÉSIDUS PLASTIQUES EN SERRICULTURE

Olga Solomatnikova<sup>1</sup>, Patrick Brassard<sup>2-3</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>2</sup> et Stéphane Godbout<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de recherche industriel du Québec (CRIQ)

<sup>2</sup> Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

<sup>3</sup> Université McGill, Faculté de l'agriculture et des sciences de l'environnement. Dép. de génie des bioressources

### 5.1 INTRODUCTION

Le polyéthylène basse densité (PEbd) est le plastique le plus utilisé en serriculture. Il représente donc une importante source de déchets potentiellement valorisables (Dilara et Briassoulis, 2000). De nombreuses études sur la pyrolyse du PEbd ont été menées depuis les 20 dernières années. En effet, au même titre que les matières organiques, les matières plastiques ont un pouvoir calorifique très élevé (40 MJ/kg contre 20 MJ/kg pour le bois) (Mairesse et al., 1999). La pyrolyse du PEbd est un processus souvent lent dont la cinétique de la dégradation thermique est un facteur très important, car les proportions de produits de pyrolyse en dépendront (Kayacan et Dogan, 2008, Point et al., 2001, ResearchGate question, 2014, Seifali Abbas-Abadi et al., 2015 et Westerhout et al., 1997).

Comme mis de l'avant dans le brevet de Point et al. (2015) et l'étude de Seifali Abbas-Abadi (Point et al., 2009 et Seifali Abbas-Abadi et al., 2015), le PEbd est d'abord fluidifié dans une enceinte avec un agitateur, puis un gaz vecteur (comme le N<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>) est introduit pour enfin procéder à la pyrolyse. La température optimale de la pyrolyse qui a été utilisée dans une majorité des publications est comprise entre 400 et 450 °C. En dessous de ces températures, le PEbd forme principalement une cire (Ademiluyi et Akpan, 2007 et Kayacan I., Dogan, 2008) tandis qu'au-dessus de 450 °C, il y a majoritairement formation de gaz non condensables (ResearchGate question. 2014 et Williams et Williams, 1999). Dans le cas de PEhd, l'effet contraire est observé, il commence à se dégrader à 380 °C, le 50 % de dégradation est atteint à 440°C avec la vitesse de chauffage 20 °C/min. Le condensat liquide est obtenu entre 400 et 450 °C. Avec l'augmentation de la température de la pyrolyse (500-550 °C) la production principalement de cire est observée.

L'utilisation de catalyseurs tels que les zéolites ou le sulfure de plomb afin d'éviter la formation de cire cires et de diminuer la température de la pyrolyse (Na et al., 2006, ResearchGate, 2014 et Seifali Abbas-Abadi, 2015). Ces catalyseurs auront pour effet de diminuer l'énergie d'activation du PEbd, cela va permettre d'abaisser la température de fusion et donc permettre une pyrolyse aussi efficace à une température plus faible. Le ratio catalyseur / PEbd optimal a été déterminé à 10 % (Seifali Abbas-Abadi, 2015).

L'utilisation du sulfure de plomb comme catalyseur s'avère intéressante, car aucune trace de sulfure n'a été retrouvée dans l'huile, ni même de saturation du catalyseur au fur et à mesure des expériences. Le sulfure de plomb est donc un bon catalyseur, car il peut résister à de très hautes températures, être utilisé sur plusieurs expériences et ne nécessite pas de régénération entre chaque traitement (Shah et al., 2005).

Il a été démontré que la vitesse de chauffage de l'enceinte de pyrolyse était un facteur important afin d'obtenir une plus grande fraction liquide. En effet, plus cette vitesse est faible, plus il y a formation de cire et non d'huile pyrolytique (Kayacan et Dogan, 2008). L'étude de Seifali Abbas-Abadi et al. (2015) a permis de mettre en avant aussi l'importance de l'agitation durant le traitement. En effet, l'agitation permettrait l'augmentation de la fraction de gaz condensable (de 85 à 91 %).

La fraction de gaz condensé permet l'obtention d'une huile pyrolytique qui est majoritairement composée d'oléfines, de paraffine et de composés aromatiques (CDS Analytical Inc., sans date, Seifali Abbas-Abadi et al., 2011). Elle a pu être comparée au carburant d'aviation JP-4 qui est un mélange 50/50 de kérosène et de pétrole (Ademiluyi et Akpan, 2007).

Des tests ont été effectués sur un mélange de PEbd et de polystyrène (PS) par Kiran et al. (2000). Ils ont montré une diminution importante de la quantité d'huile produite. Cela est dû à la différence de point de fusion des différents plastiques.

L'objectif de cette étape du projet a été d'étudier le potentiel de valoriser les résidus plastiques des serres générés au Québec par leur transformation en huile pyrolytique pour son utilisation comme combustible dans les systèmes de chauffage.

## 5.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 5.2.1 Banc d'essai et matériel de pyrolyse

Le pyrolyseur et la configuration du banc d'essai utilisé est présenté à la Figure 1 (section 4.3.1). Puisque la plupart de plastiques utilisés en agriculture au Québec est du polyéthylène à basse densité, ce matériel a été sélectionné pour la présente étude. Afin de faciliter les travaux de préparation du matériel pour la pyrolyse, des billes de 2,5 mm de ce plastique disponibles commercialement ont été utilisées.

Trois types d'intrants ont été étudiés : 1) bois (granules d'épinette noire et de pin gris broyés et tamisés de 1 à 3,8 mm), 2) mélange bois/plastique PEbd à un ratio massique 80 %/20 % (Figure 2), et 3) plastique PEbd sans biomasse. Les paramètres de pyrolyse de départ ont été ceux trouvés à l'étape d'optimisation pour la production d'huile pyrolytique de bois, soit à 559 °C, avec un temps de résidence de 61 secondes et un débit de N<sub>2</sub> de 3 L min<sup>-1</sup>. D'autres tests complémentaires utilisant des paramètres de pyrolyse différents ont été exécutés pour la pyrolyse de plastique afin d'augmenter la production en huile. Ces tests ont mené à une modification

des paramètres de co-pyrolyse du mélange bois/plastique, particulièrement pour le temps de résidence (180 s) et le ratio massique du mélange (90 %/10 %).



**Figure 2 Image du mélange bois-plastique utilisé pour l'étude de copyrolyse**

## 5.2.2 Essais d'homogénéisation et de solubilisation des huiles

### Huiles obtenues par la co-pyrolyse biomasse-plastique

Ces essais de co-pyrolyse ont permis de produire plusieurs échantillons d'huiles pyrolytiques. Puisque ces dernières ont été très hétérogènes, plusieurs essais d'homogénéisation des huiles des deux condenseurs ont été entrepris. Dans un premier temps, l'effet de l'augmentation de la température sur l'homogénéisation a été évalué. Pour ce faire, une quantité de 100 ml de chaque échantillon a été testée séparément sous agitation aux températures suivantes : 40, 50, 60 et 80 °C.

La possibilité de mettre en solution de la fraction paraffinée dans du biodiesel a aussi été évaluée. À cet effet, du biodiesel a été ajouté à l'échantillon d'huile pyrolytique obtenu par la co-pyrolyse de la biomasse et du PEbd. Par la suite le mélange a été mis sous agitation pendant 1 heure à la température de la pièce.

### Huiles obtenues par la co-pyrolyse de plastique

La solubilisation de condensat obtenu par la pyrolyse de PEbd a été effectuée avec du biodiesel ainsi que du diesel pétrolier. En plus, une analyse de caractérisation par chromatographie en phase gazeuse et du pouvoir calorifique de ce condensat a été effectuée.

## 5.3 RÉSULTATS

### 5.3.1 Résultats de la pyrolyse

La pyrolyse de bois a été effectuée afin de valider la constance des résultats suite aux tests d'optimisation de l'étape précédente. Les rendements en huile obtenus pour la pyrolyse de bois (57 – 59 %) (Tableau 8) se

trouvent toujours dans la plage des tests d'optimisation de la pyrolyse (49 – 61 %) (Tableau 4). Il est donc attendu que les rendements en liquide organique (huile sans eau) soient similaires (28 – 42 %), ainsi que leur teneur en eau (32 – 44 %). La constance du réacteur de pyrolyse a donc été validée.

Par la suite, lorsque le bois a été mélangé avec du plastique (80 %/20 %), la co-pyrolyse a produit un rendement légèrement plus faible en huile (47 %) (Tableau 8). Cela pourrait s'expliquer par le fait que la pyrolyse du plastique, à ces conditions, produit une quantité très faible en huile (15,7 %) (Tableau 8). Suite à ce résultat, des tests complémentaires ont été exécutés, variant que la température (de 559 °C à 450 °C, comme recommandé dans la littérature) et le temps de résidence (de 60 à 180 s) afin d'augmenter le rendement en huile de la pyrolyse du plastique. Les résultats, résumés au Tableau 9, permettent d'observer que le plus haut rendement (33,4 %) a été obtenu en conservant la température de pyrolyse à 559 °C et en augmentant le temps de résidence à 180 s.

**Tableau 8 Rendement des produits de pyrolyse des trois types d'intrants**

Échantillon intrant	Bois		Bois-plastique (80 %-20 %)	Plastique
	Test 1	Test 2		
Huile	57,1 %	59,5 %	46,9 %	15,7 %
Solide	27,5 %	25,6 %	33,9 %	78,8 %
Gaz*	14,6 %	14,2 %	18,8 %	6,1 %

\*Incluant les pertes

**Tableau 9 Paramètres de pyrolyse et rendements obtenus dans les tests complémentaires de pyrolyse**

Échantillon intrant	Plastique				Bois-plastique (90 %-10 %)	
					Test 1	Test 2
	<b>Paramètres de pyrolyse</b>					
Température (°C)	559	450	559	450	559	559
Temps de résidence (s)	61	60	180	180	180	180
Débit d'azote (L min <sup>-1</sup> )	3	3	3	3	3	3
	<b>Rendement des produits</b>					
Huile	15,7 %	1,3 %	33,4 %	5,2 %	46,1 %	48,7 %
Solide	78,8 %	97,4 %	54,0 %	93,1 %	22,0 %	21,3 %
Gaz*	6,1 %	1,3 %	12,6 %	1,6 %	31,6 %	29,7 %

\*Incluant les pertes

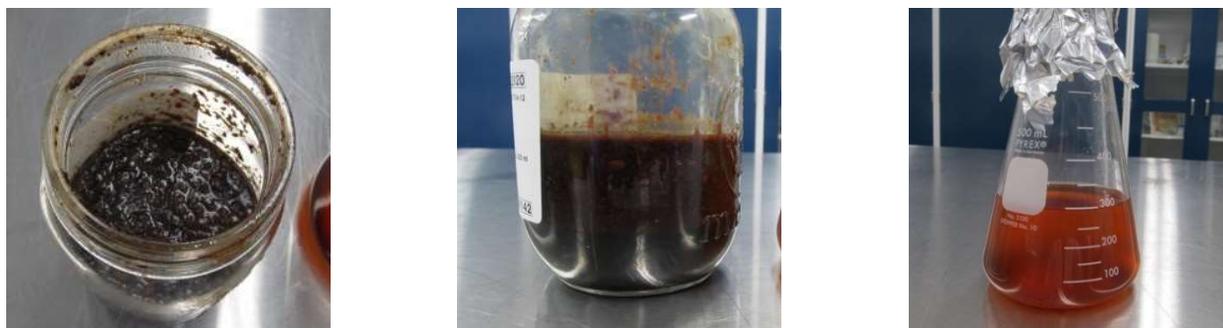
Enfin, deux réactions de co-pyrolyse bois plastique ont été entreprises avec les paramètres précédemment sélectionnés (Tableau 9). Malgré que le ratio de plastique a été réduit de 20 % à 10 % à cette étape, le rendement en huile est resté constant (46 % à la première réaction) ou légèrement supérieur (49 % à la

deuxième réaction). Cette huile a donc été sélectionnée pour les analyses subséquentes décrites aux sections suivantes.

### 5.3.2 Essais d'homogénéisation des deux fractions d'huile obtenues par la co-pyrolyse de la biomasse et du plastique

Chaque échantillon d'huile pyrolytique obtenu par co-pyrolyse de bois avec du PEbd était très hétérogène. L'huile pyrolytique était visiblement constituée de deux phases. Suite au traitement d'homogénéisation avec augmentation de la température, aucun effet n'a été observé à 40 et à 50 °C. À 60 °C, la fraction probablement riche en paraffines a commencé à se ramollir et à 80 °C, elle est devenue très molle. Par contre, l'huile restait toujours hétérogène.

Un essai d'homogénéisation par addition de biodiesel a été effectué. Suite à l'ajout du biodiesel à la fraction paraffinique de l'échantillon d'huile pyrolytique obtenu par la co-pyrolyse de la biomasse et du PEbd et après l'étape d'agitation, la fraction paraffinique est passée complètement en solution. Par contre, d'autres matières en suspension ont été observées. Pour enlever la matière en suspension, le mélange a été filtré en utilisant le filtre «Whatman glass microfibre GF/D». La Figure 3 présente l'huile pyrolytique avant et après le traitement. La Figure 4 présente les filtres utilisés. Ces essais ont démontré que la fraction riche en paraffines passe en solution dans le biodiesel. Par contre, il reste encore des particules en suspension. Ces dernières sont majoritairement solubles dans le méthanol.



**Figure 3 Huile pyrolytique avant (gauche et centre) et après le traitement (droite)**



**Figure 4 Filtres suite au traitement de l'huile**

### 5.3.3 Analyse des huiles pyrolytiques obtenues par la pyrolyse de plastique

La Figure 5 (gauche) présente une image du condensat obtenu par la pyrolyse du PEbd. À la température de la pièce, le condensat obtenu est un solide huileux. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse (GC/MS) a démontré que ce sont des paraffines, saturées et non saturées, de chaînes de carbone variées de  $C_7$  à  $C_{22}$ . Le pouvoir calorifique de ce condensat a été de 45,7 MJ/kg (moyenne des trois échantillons). Cette fraction est complètement soluble dans le biodiesel. De plus, les mêmes essais de solubilisation de condensat obtenu par la pyrolyse de PEbd ont été effectués avec le diesel pétrolier. Il est complètement soluble dans le diesel pétrolier.



**Figure 5 Condensat obtenu par la pyrolyse du PEbd (gauche) et échantillon soluble dans le biodiesel (droite)**

## 5.4 CONCLUSION

À la lumière des résultats, il est possible de conclure que les huiles pyrolytiques, fabriquées par la co-pyrolyse du bois et du plastique PEbd, dans les conditions de pyrolyse établies dans le présent projet, peuvent être utilisées comme combustible, mais seulement en mélange avec du biodiesel ou du diesel pétrolier. Des travaux supplémentaires sont nécessaires afin d'établir les proportions optimales d'huile pyrolytique/biodiesel ou diesel pétrolier et de déterminer les propriétés physico-chimiques de ces mélanges.

Il faut souligner que l'équipement de pyrolyse utilisé dans le présent projet n'est pas été optimisé pour la pyrolyse de plastiques résiduels. Aucun catalyseur n'a été utilisé durant les réactions. De plus, il serait intéressant de réaliser des tests de pyrolyse avec un mélange de biomasse avec une très faible proportion de polymère (0,5 à 2 %), ce qui serait possiblement assez efficace pour permettra d'augmenter le pouvoir calorifique de l'huile pyrolytique.

## 5.5 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les travaux ont été réalisés grâce à l'appui technique et scientifique du CRIQ et de l'IRDA. Les auteurs remercient le stagiaire postdoctoral Étienne Le Roux et la stagiaire graduée Alice Marciniak pour leurs contributions à la réalisation de cette étape.

## 5.6 RÉFÉRENCES

Ademiluyi T., Akpan C. (2007). Preliminary evaluation of fuel oil produced from pyrolysis of low density polyethylene water-sachet wastes. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 11 (3) 15-19.

CDS Analytical inc. [en ligne] (page consultée le 18-03-2015). <http://www.mooreanalytical.com/app/download/10444126799/58+Polyethylene.pdf?t=1425503015>

Dilara P.A., Briassoulis D. (2000). Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76, 309-321.

Kayacan I., Dogan O.M. (2008). Pyrolysis of low and high density polyethylene. Part I: Non-isothermal pyrolysis kinetics. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30 (5) 385-391.

Kiran N., Ekinci E., Snape C.E. (2000). Recycling of plastic wastes via pyrolysis. *Resources Conservation and Recycling*, 29, 273-283.

Mairesse M., Petit J.M., Cheron J., Falcy M. (1999) Produits de dégradation thermique des matières plastiques. *Hygiène et sécurité du travail*, 174, 47-57

Na J.-G., Jeong B.-H., Chung S.H., Kim S.-S. (2006). Pyrolysis of low-density polyethylene using synthetic catalysts produces from fly ash. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 8 (2) 126-132

Point J., Malinova A., Juillet H. 2009. Procédé de dégradation par pyrolyse de déchets de matières plastiques en vue de leur transformation en mélange d'hydrocarbures utilisables comme combustibles. Brevet WO 0118152 A1. 15-03-2001.

ResearchGate question. 2014. [en ligne] (page consultée le 18-03-2015). [www.researchgate.net/post/Why\\_did\\_I\\_only\\_get\\_gas\\_and\\_wax\\_from\\_my\\_polyethylene\\_pyrolysis\\_reaction](http://www.researchgate.net/post/Why_did_I_only_get_gas_and_wax_from_my_polyethylene_pyrolysis_reaction)

Seifali Abbas-Abadi M., McDonald A.G., Nekoomanesh Haghghi M., Yeganeh H. (2015). Estimation of pyrolysis product of LDPE degradation using different process parameters in a stirred reactor. *Polyolefins Journal*, 2 (1) 39-47.

Shah J., Rasul Jan M., Hussain Z. (2005). Catalytic pyrolysis of low-density polyethylene with lead sulphide into fuel oil. *Polymer Degradation and Stability*, 87, 329-333.

Westerhout R.W.J., Waanders J., Kuipers J.A.M., van Swaaij W.P.M. (1997). Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethylene, polypropene, and polystyrene modeling, experimental determination and comparison with literature model and data. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36, 1955-1964

Williams P.T., Williams E.A. (1999). Fluidised bed pyrolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51, 107-126.

## 6 ÉTAPE N° 3 – ESSAIS DE COMBUSTION DE L'HUILE DE PYROLYSE

Patrice Seers<sup>1</sup>, Annabelle Hospital<sup>1</sup>, Salha Elcadhi<sup>1-2</sup>, Romain Lemaire<sup>1</sup>, Patrick Brassard<sup>2-3</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>2</sup> et Stéphane Godbout<sup>2</sup>

<sup>1</sup> École de technologie supérieure (ÉTS), Laboratoire TFT, Département de génie mécanique, Montréal, Canada

<sup>2</sup> Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

<sup>3</sup> Université McGill, Faculté de l'agriculture et des sciences de l'environnement. Dép. de génie des bioressources

### 6.1 RÉSUMÉ

Les objectifs principaux de cette étape ont été d'évaluer l'impact des propriétés des huiles (teneur en eau, pH et pouvoir calorifique) sur les émissions de la combustion afin d'identifier les propriétés optimales permettant la réduction des émissions par rapport à la combustion du diesel. Un réacteur de pyrolyse à vis verticale breveté a été utilisé pour produire les biohuiles avec différents paramètres de fonctionnement dans la chambre de réaction (temps de résidence du matériel, température et débit d'azote). Au cours de cette phase, douze différentes biohuiles ont été produites à partir de granulés de bois (un mélange d'épinette noire et de pin gris). Ils ont été mélangés avec du carburant diesel (30 % en poids) et avec un tensioactif (1,5 % en poids dilué dans du méthanol) pour produire les émulsions à évaluer. La combustion des émulsions a été réalisée avec un brûleur utilisant un atomiseur par air spécialement construit pour ce projet. Les conditions de combustion ont d'abord été déterminées à l'aide d'un échantillon contenant 100 % de carburant diesel. Ensuite, les émissions de CO et de NOx ont été comparées à celles provenant de la combustion de cinq émulsions aux mêmes conditions. Les résultats préliminaires avec les différentes émulsions ont montré la difficulté d'obtenir une flamme stable permettant de mesurer adéquatement les émissions polluantes, et ce, malgré des ajustements sur les conditions d'opération du brûleur. Malgré ces difficultés, des résultats préliminaires, qui devront être confirmés ultérieurement, obtenus avec une seule émulsion montrent une baisse des émissions d'oxyde d'azote en faveur de l'émulsion d'huile de pyrolyse due au pouvoir calorifique plus faible de cette dernière. Cette baisse est toutefois accompagnée d'une augmentation des émissions de monoxyde de carbone. Des essais seront donc poursuivis afin de trouver des conditions d'opérations permettant la stabilisation des flammes d'émulsions diesel-huile de pyrolyse dans le but d'étudier l'effet des caractéristiques de l'huile de pyrolyse sur les émissions polluantes.

### 6.2 INTRODUCTION

La production de l'huile de pyrolyse permet de valoriser la biomasse parfois difficilement utilisable. Ainsi les études sur la combustion des huiles de pyrolyse conduites en laboratoire se font généralement en la mélangeant à un autre carburant (alcool ou hydrocarbures) afin de faciliter sa combustion. De plus, les études présentent les émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes d'azote (NOx) et dans certains cas, les

hydrocarbures imbrûlés et les particules. Ainsi, une courte revue de la littérature portant sur les émissions polluantes de la combustion des huiles de pyrolyse a été effectuée en lien direct avec l'objectif du projet.

De façon générale, plus le ratio C/H est élevé, plus la combustion de l'huile de pyrolyse a tendance à produire du CO, des suies et à exhiber une flamme lumineuse (Shihadeh et al., 1994). Les résultats de Choi et al. (2016) montrent que la combustion de l'huile de pyrolyse de bois présentait des émissions en CO plus de 100 fois supérieures à celles de l'éthanol pur dans un brûleur de 35 kW. De plus, Choi et al. (2016) ont ajouté différentes concentrations d'éthanol afin de stabiliser la flamme d'huile de pyrolyse et leurs résultats montrent que les mélanges contenant entre 10 % et 30 % d'éthanol permettaient de minimiser les émissions de CO qui devenaient même inférieures à celles de l'éthanol pur.

Ji-Lu et Yong-Ping (2010) ont brûlé de l'huile de pyrolyse de riz à différents ratios dans un brûleur de 44 kW et ont observé que les émissions en CO diminuaient rapidement avec la réduction du mélange carburant-air qui passait d'un excès d'air de 1,2 à 1,5, après quoi les émissions étaient indétectables. Khodier et al. (2009) ont également rapporté des émissions de CO à peine détectable lors de la combustion de l'huile de pyrolyse de résidu de bois sous mélange très pauvre en carburant. Une conclusion similaire est présentée par Shihadeh et al. (1994) qui ont rapporté des émissions de CO comparables à celles obtenues avec du diesel pour un excès d'air présentant une concentration de 3 % d'O<sub>2</sub> dans les gaz brûlés.

Les oxydes d'azote (NOx), soit le NO et NO<sub>2</sub>, sont principalement produits à haute température et à partir de l'azote contenu dans le combustible. Les résultats expérimentaux de Stamatov et al. (2006) démontrent que les indices d'émission en NOx de l'huile de pyrolyse étaient supérieurs à ceux du diesel et que la différence provenait des NOx produits à partir de l'azote contenu dans l'huile de pyrolyse. La comparaison de deux huiles de pyrolyse par Baxter et al. (1994) montrait également que l'huile de pyrolyse contenant le plus d'azote produisait le plus de NOx. Ces observations ont été confirmées récemment par Martin et Boateng (2014) qui ont rapporté que les émissions de NOx étaient gouvernées par le contenu d'azote dans le carburant, les huiles de pyrolyse ayant des niveaux plus élevés d'azote produisant plus de NOx. Il semble donc admis par la communauté scientifique que l'augmentation des NOx lors de la combustion d'huile de pyrolyse provienne de la présence de l'azote dans le carburant, comme mentionné ci-dessus ou encore dans les résultats de Choi et al. (2016) et Shihadeh et al. (1994).

Les émissions de particules résultant de la combustion de l'huile de pyrolyse sous de bonnes conditions d'opération proviennent principalement des cendres contenues dans l'huile lors de sa production. Pour cette raison, les particules sont donc difficiles à réduire puisque la matière n'est pas combustible (Lehto et al., 2014). Ainsi la quantité de cendres contenue dans l'huile de pyrolyse est le paramètre important pour ce polluant. La présence de particules entraîne une augmentation de la luminosité de la flamme, augmentant ainsi les pertes par radiation (Kowalewski, 2015).

Cette courte revue de littérature permet de conclure qu'en général les émissions des huiles de pyrolyses sont comprises entre celles des hydrocarbures légers et lourds (Lehto et al., 2014) et qu'il est possible, en

mélangeant l'huile de pyrolyse à un autre carburant, d'obtenir des émissions polluantes plus faibles que celles obtenues par les carburants purs. La combustion de l'huile de pyrolyse seule ou mélangée dépend des propriétés de l'huile de pyrolyse, qui elles-mêmes varient en fonction de la biomasse et du procédé de pyrolyse utilisés. Ainsi l'objectif de cette étude est d'évaluer expérimentalement comment les conditions de production de l'huile de pyrolyse de bois influencent les émissions polluantes émises lors de la combustion. Cet objectif sera atteint en brûlant des huiles de pyrolyse dont les paramètres du procédé de production (température, apport d'azote et temps de résidence) ont été variés. Chacune des huiles sera ainsi mélangée à du carburant diesel afin de créer une émulsion contenant 30 % massique d'huile de pyrolyse. Les émissions de CO et NOx sont mesurées au sein d'un brûleur de laboratoire décrit dans ce qui suit.

## 6.3 MÉTHODOLOGIE

### 6.3.1 Montage expérimental

Les émulsions d'huile de pyrolyse – diesel sont brûlées en utilisant le montage expérimental présenté à la Figure 6. Ainsi, l'émulsion est contenue dans un réservoir (Figure 6 à gauche) déposé sur une balance électronique (Ohaus NV2101) permettant de mesurer la consommation instantanée de carburant. L'atomisation de l'émulsion se fait à l'aide d'un injecteur par pulvérisation d'air (Delavan 30610-1). Afin de maintenir une flamme stable, une flamme pilote de méthane est utilisée et permet une inflammation continue du carburant liquide pulvérisé. L'air de combustion provient d'un ventilateur qui alimente un générateur de swirl localisé à la base du brûleur qui permet d'améliorer la qualité de la combustion à l'aide d'un écoulement structuré. Le générateur de swirl est inspiré des travaux de Tzanetakis et al. (2011) et Tzanetakis (2011).

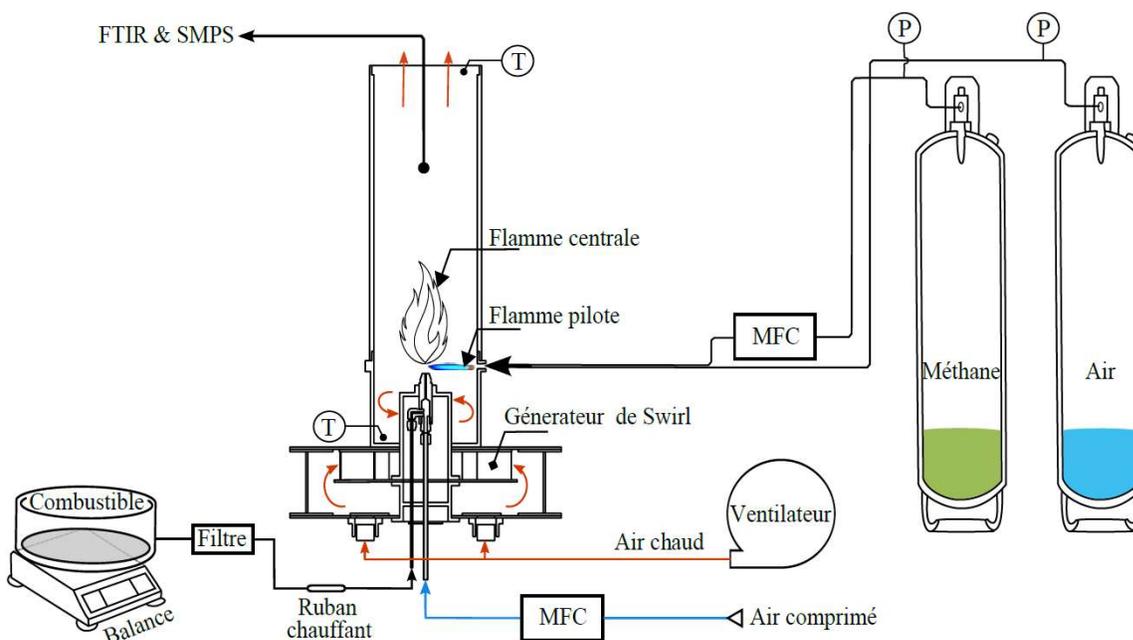
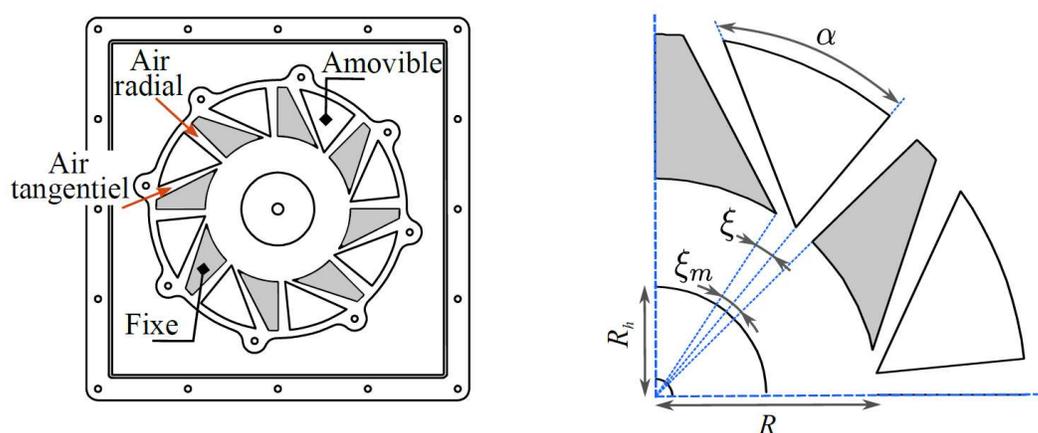


Figure 6 Schéma du banc d'essai

Le générateur de swirl est formé d'une poulie mobile pouvant déplacer huit blocs sur un arc de cercle (Figure 7, gauche). L'espacement entre les blocs mobiles et les blocs fixes (Figure 7, droite) permettent ainsi d'orienter l'air entrant dans la chambre de combustion. L'écoulement résultant de cette géométrie permet d'obtenir un swirl théorique compris entre 0 (sans rotation) et une valeur maximale de 4,1 lorsque calculé à l'aide de l'équation de Beér et Chigier (1972). Dans la réalité, le swirl est inférieur à cause du frottement aux parois (Tzanetakakis, 2011).



**Figure 7** Vue de coupe du générateur de swirl (gauche) et schéma des espacements entre les blocs mobiles (blanc) et blocs fixes (gris) où  $\xi_m$  est l'angle de débattement maximum et  $\xi$  est l'angle effectif (droite)

Un tube de 18 cm de diamètre et de 40 cm de longueur situé au-dessus du brûleur complète la chambre de combustion. La Figure 8 présente le montage réel sur lequel les débitmètres pour le carburant de la flamme pilote et pour l'atomiseur de carburant sont visibles à l'avant-plan (en jaune). La torche de la flamme pilote est visible par ses tuyaux d'alimentation (rouge (méthane) et vert (air)). Finalement, la Figure 8 présente également la prise des gaz d'échappement avec sa ligne chauffante (petit cylindre à l'avant-plan). La température à la sortie de la chambre de combustion est mesurée avec un thermocouple rigide de type K. L'acquisition des données ainsi que le contrôle des paramètres du brûleur et de la flamme pilote se font à l'aide du logiciel LabVIEW. Les émissions polluantes sont mesurées à l'aide d'un analyseur FTIR (*Fourier Transform InfraRed spectroscopy*) de California Analytical Instruments (CAI). L'analyseur permet de mesurer le CO, les hydrocarbures imbrûlés (THC), les NOx et le CO<sub>2</sub>. Un analyseur CAI 600 est également utilisé pour mesurer la concentration d'O<sub>2</sub> dans les gaz de combustion.

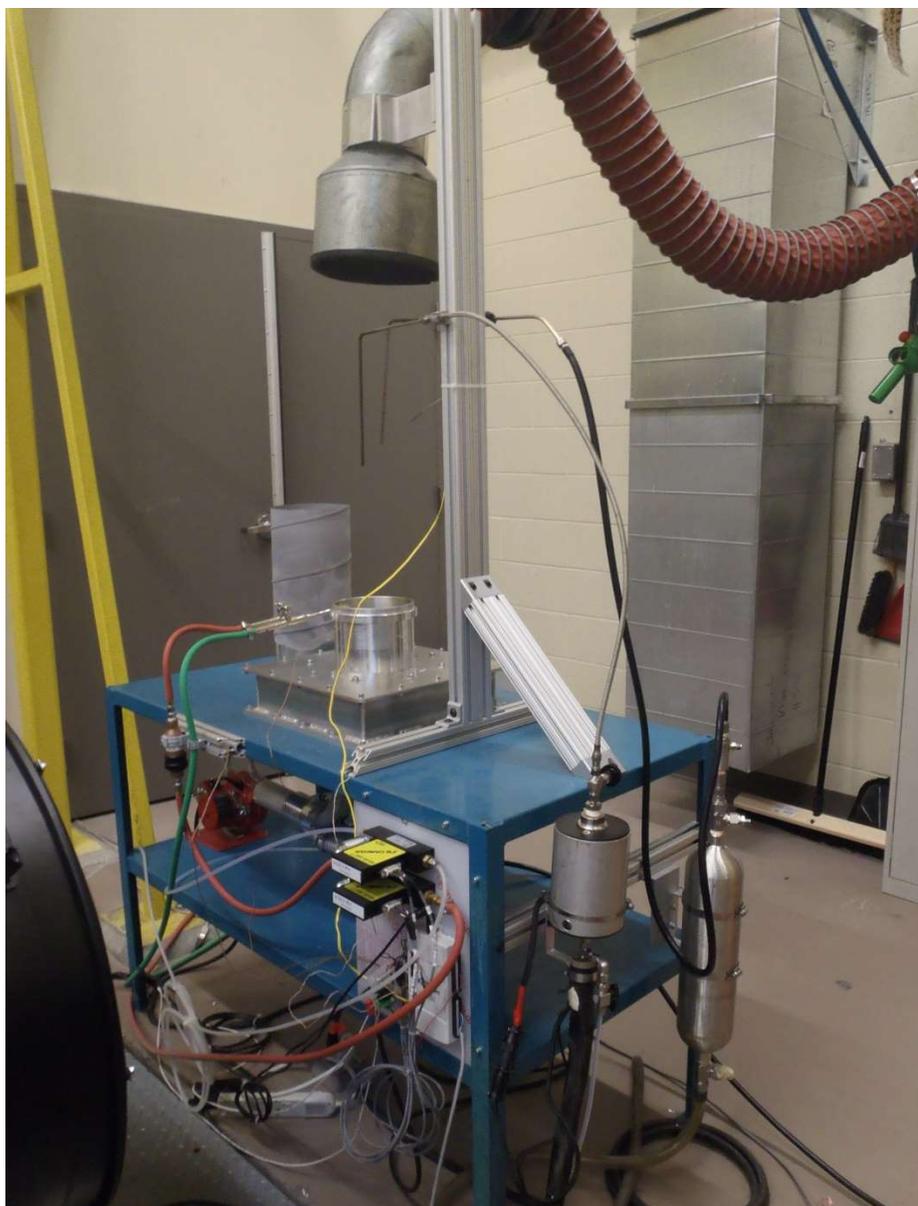


Figure 8 Vue d'ensemble du banc d'essai

### 6.3.2 Préparation des émulsions

L'huile de pyrolyse a été mélangée à du carburant diesel afin d'obtenir une émulsion. Quoique l'huile de pyrolyse fut fréquemment mélangée à de l'éthanol (Choi et al., 2016; Krumdieck et Daily, 1998; Stamatov et al., 2006; Tzanetakis et al., 2011), l'intérêt de la mélanger avec du diesel est que le carburant normalement utilisé dans les chaudières s'apparente davantage à du diesel qu'à un alcool. Dans le cadre du présent projet, l'huile de pyrolyse fut mélangée à du carburant diesel à l'aide d'un surfactant afin de créer une émulsion. Les travaux de Chiaramonti et al. (2003) ont permis d'identifier le surfactant à utiliser ainsi que les proportions. Ainsi le

surfactant Hypermer B-246SF fut mélangé à du méthanol avec un ratio massique 1:5 (surfactant : méthanol). L'émulsion obtenue est composée en proportion massique de 1 % de surfactant, 5 % de méthanol, 30 % d'huile de pyrolyse et le reste étant du carburant diesel. Afin d'obtenir une émulsion stable pendant quelques heures, le mélange doit être agité à 2000 tours/minute pendant 40 minutes à une température de 30 °C.



**Figure 9** Mélange huile - diesel après le traitement de brassage sans surfactant (gauche) et avec surfactant (droite)

Comme les conditions de production des 5 huiles de pyrolyse testées étaient différentes, elles sont présentées dans le Tableau 10. Celui-ci comprend également le rendement en huile de pyrolyse c'est-à-dire le pourcentage massique de la biomasse convertie en huile et en eau (le mélange étant nommée huile de pyrolyse) ainsi que la teneur en eau c'est-à-dire la fraction massique d'eau contenue dans l'huile de pyrolyse obtenue par le procédé.

**Tableau 10** Paramètres de production de l'huile de pyrolyse et rendements obtenus

	Température (°C)	Temps de résidence (s)	Débit d'azote (LPM)	Rendement en huile de pyrolyse (%)	Teneur en eau (%)
HP1	575	120	1	58,8	41,5
HP2	575	60	1	49,1	35,2
HP3	575	90	3	60	36,5
HP4	575	120	5	54,4	35,3
HP5	575	60	5	56,8	33,4

Le pouvoir calorifique de chaque émulsion a été mesuré expérimentalement à l'aide d'une bombe calorimétrique isothermique (CAL2K-ECO) respectant la norme ASTM D240-14. Ainsi, un échantillon de l'émulsion est placé dans un cylindre qui est pressurisé d'oxygène à 3000 kPa et le mélange est enflammé alors que le pouvoir calorifique est par la suite déterminé à l'aide d'un logiciel de post-traitement. Le pouvoir calorifique du mélange diesel-surfactant-méthanol fut également mesuré, permettant d'isoler le pouvoir calorifique de l'huile de pyrolyse seule.

## 6.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus avec le montage expérimental détaillé précédemment n'ont pas permis de maintenir une flamme stable, dans la majorité des cas, lorsqu'une émulsion composée sur une base massique de 30 % d'huile de pyrolyse était utilisée. Les résultats préliminaires ne sont donc pas concluants, car les flammes des émulsions diesel-huile de pyrolyse s'éteignaient fréquemment durant les tests et ne permettaient pas d'atteindre un régime d'opération stable bien que quelques techniques différentes de stabilisation aient été testées. En effet, le préchauffage de l'air, le préchauffage du carburant ainsi que la réduction du débit d'air de combustion ont été testés, mais sans succès pour le moment.

Cette difficulté à obtenir des flammes stables lors de l'emploi d'émulsions ne permet pas de présenter des résultats expérimentaux, car une nouvelle procédure de test doit être développée. Toutefois les différents essais opérés jusqu'à présent ont permis d'identifier quelques facteurs liés à l'huile de pyrolyse qui peuvent influencer négativement la flamme et qui sont : 1) la forte teneur en eau; 2) la présence de matière solide dans l'huile; 3) une forte viscosité.

La présence d'eau réduit de façon significative le pouvoir calorifique du carburant se traduisant par une baisse des températures mesurées. Cette baisse de température devrait toutefois être bénéfique pour la réduction des oxydes d'azote qui sont fonction de la température de la flamme. Par contre, le fait d'utiliser de l'air de combustion préchauffé, afin d'aider à la stabilité de la flamme, entraînait également une augmentation de la température du tuyau d'alimentation de carburant situé à proximité de la chambre de combustion et se traduisait par l'apparition de bouchons de vapeur (probablement l'eau contenue dans l'huile) responsables d'oscillations de la flamme et parfois de son extinction. Les matières solides en suspension dans l'huile n'ont pas pu être filtrées avec les méthodes traditionnelles. Celles-ci entraînaient notamment l'encrassement progressif de l'orifice et bouchaient l'injecteur de carburant. Pour diminuer la viscosité de l'émulsion d'huile de pyrolyse et pour maintenir la stabilité de l'émulsion, les résultats suggèrent de maintenir le carburant à une température de 40 °C.

Seule l'émulsion contenant de l'huile HP4 fut relativement stable et a permis une comparaison des émissions polluantes avec le carburant diesel. Ces résultats préliminaires devront être confirmés par des tests ultérieurs sous des conditions offrant une meilleure stabilité de flamme. Pour cette unique comparaison, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'émulsion contenant 30 % d'huile de pyrolyse HP4 a été mesuré à l'aide de la bombe calorimétrique décrite précédemment. Un PCI de 35,4 MJ/kg a été mesuré pour l'émulsion alors que le

PCI de l'huile de pyrolyse seule a pu être calculé à partir de cette mesure et une valeur de 14,6 MJ/kg a été obtenue.

L'unique comparaison entre l'émulsion et du carburant diesel fut obtenue avec un débit de carburant (émulsion ou carburant diesel) de 153 mg/s. Comme le PCI de l'émulsion est plus faible que le diesel seul, une température de gaz brûlés plus faible était observée. Cette baisse de température explique en partie une baisse de 36 % des émissions de NO lorsque l'émulsion fut brûlée (1,26 g de NO / kg d'émulsion contre 1,9 g de NO / kg de diesel). Toutefois, cette baisse de NO, qui est dû à une baisse de la température des gaz brûlés, était accompagnée par une hausse des émissions de CO pour l'émulsion. Le CO n'était pas détectable lors de la combustion du diesel, mais atteignait une valeur de 8,26 g de CO / kg d'émulsion. L'emploi d'émulsion diesel-huile de pyrolyse suppose donc une combustion moins complète. L'étude future des émissions particulières, en plus des émissions gazeuses, sera donc d'un grand intérêt afin de statuer sur l'influence de l'adjonction d'huile de pyrolyse sur la combustion.

## 6.5 CONCLUSIONS

L'objectif principal était d'évaluer les émissions polluantes de quelques émulsions diesel-huile de pyrolyse de bois à l'aide d'un brûleur de laboratoire. La difficulté principale associée à la combustion des émulsions de l'huile de pyrolyse était de maintenir une flamme stable sur une période permettant d'évaluer les émissions polluantes. Toutefois, des résultats préliminaires obtenus pour une émulsion de diesel contenant 30 % d'huile de pyrolyse, sur une base massique, montraient des émissions polluantes de CO supérieures au diesel. En contrepartie, les émissions de NO étaient plus faibles avec l'émulsion d'huile de pyrolyse qu'avec le diesel dû au fait que le pouvoir calorifique de l'huile de pyrolyse est plus faible.

Les essais seront poursuivis afin de trouver des conditions d'opération satisfaisantes assurant la répétabilité des résultats. Ainsi, avec ces nouvelles conditions, plusieurs autres tests seront réalisés avec une douzaine d'émulsions d'huiles de pyrolyse qui permettront d'établir possiblement les conditions de production d'une huile de pyrolyse offrant une combustion minimisant les émissions polluantes. Tous ces résultats seront ultérieurement présentés dans un article qui sera publié conjointement avec les équipes de L'École de technologie supérieure (ÉTS), du CRIQ et de l'IRDA.

## 6.6 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les travaux ont été réalisés grâce à l'appui technique et scientifique de l'ÉTS, du CRIQ et de l'IRDA.

## 6.7 RÉFÉRENCES

Baxter, L., B. Jenkins et F. Winter (1994) «Baseline NOx emissions during combustion of wood-derived pyrolysis oils». In Proceedings of Biomass Pyrolysis Oil Properties and Combustion Meeting. 270 printed. p. 26-28.

Beér, J. M., N. A. Chigier. 1972. Combustion aerodynamics, Krieger Publishing Company, New York, USA.

Chiaramonti, D., M. Bonini, E. Fratini, G. Tondi, K. Gartner, A. V. Bridgwater, H. P. Grimm, I. Soldaini, A. Webster et P. Baglioni. 2003. «Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines—Part 1 : emulsion production». Biomass and Bioenergy, vol. 25, no 1, p. 85-99.

Choi, S. K., Y. S. Choi, S. J. Kim, Y. W. Jeong (2016) «Characteristics of flame stability and gaseous emission of biocrude-oil/ethanol blends in a pilot-scale spray burner». Renewable Energy, vol. 91, p. 516-523.

Ji-Lu, Z., K. Yong-Ping (2010) «Spray combustion properties of fast pyrolysis bio-oil produced from rice husk». Energy Conversion and Management, vol. 51, p. 182–188.

Khodier, A., P. Kilgallon, N. Legrave, N. Simms, J. Oakey, T. Bridgwater (2009) «Pilot-scale combustion of fast-pyrolysis bio-oil: Ash deposition and gaseous emissions». Environmental Progress and Sustainable Energy, vol. 28, no 3, p. 397-403.

Kowalewski, Dylan. 2015. «Emissions and properties of Bio-oil and Natural Gas Co-combustion in a Pilot Stabilised Swirl Burner». Master degree thesis. University of Toronto.

Krumdieck, S. P., J. W. Daily (1998) «Evaluating the Feasibility of Biomass Pyrolysis Oil for Spray Combustion Applications» Combustion Science and Technology, vol. 134, no 1-6, p. 351-365.

Lehto, J., A. Oasmaa, Y. Solantausta, M. Kyto, D. Chiaramonti. 2014. «Review of fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass». Applied Energy, vol. 116, p. 178-190.

Martin, J.A., A.A. Boateng (2014) «Combustion performance of pyrolysis oil/ethanol blends in a residential-scale oil-fired boiler». Fuel, vol. 133, p. 34-44.

Shihadeh, A, P. Lewis, R. Manurung J. Beer (1994) «Combustion Characterization Of Wood-Derived Flash Pyrolysis Oils In Industrial-Scale Turbulent Diffusion Flames». In Proceedings of Biomass Pyrolysis Oil Properties and Combustion Meeting. 281. p. 26-28.

Stamatov, V., D. Honnery, J. Soria (2006) «Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species». Renewable Energy, vol. 31, no 13, p. 2108-2121.

Tzanetakis, T. «Spray combustion characteristics and emissions of a wood derived fast pyrolysis liquid-ethanol blend in a pilot stabilized swirl burner», Thèse de doctorat, University of Toronto, 2011.

Tzanetakis, T., S. Moloodi, N. Farra, B. Nguyen, A. McGrath, M.J. Thomson (2011) «Comparison of the spray combustion characteristics and emissions of a wood-derived fast pyrolysis liquid-ethanol blend with number 2 and number 4 fuel oils in a pilot-stabilized swirl burner». Energy & Fuels, vol. 25, no 10, p. 4305-4321.

## 7 ÉTAPE N° 4 – ANALYSE ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE DE L'UTILISATION DE L'HUILE PYROLYTIQUE DANS LES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE À BASE DE MAZOUT N° 2 EN SERRICULTURE

Luc Belzile, Alicia Patry, Frédéric Pelletier, Joahnn H. Palacios et Stéphane Godbout

Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

### 7.1 ANALYSE ÉCONOMIQUE

#### 7.1.1 Contexte

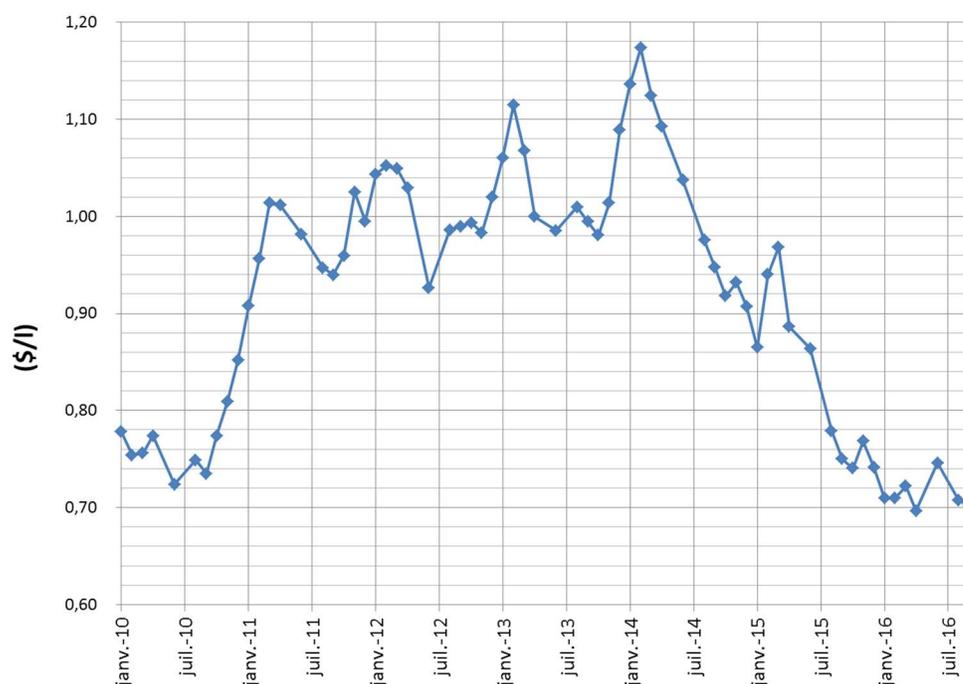
La faisabilité économique de l'utilisation de combustibles alternatifs en serriculture repose grandement sur le coût de production de ces combustibles. En effet, ces combustibles doivent pouvoir être produits à des coûts qui soient concurrentiels avec le prix des combustibles existant. Dans les productions en serre, le combustible à substituer pour plusieurs entreprises est le mazout n° 2. Plus particulièrement, c'est le cas des entreprises serricoles de plus petites tailles et en région périphérique. Pour que ces entreprises aient un intérêt à substituer le mazout par de la biohuile, celle-ci doit être produite à un coût qui puisse concurrencer le mazout n° 2. Dans ce contexte, l'évolution du prix du mazout devient un facteur au cœur de la faisabilité économique de l'utilisation de la biohuile comme combustible en serriculture.

La Figure 10 illustre l'évolution du mazout n° 2 au Bas Saint-Laurent entre 2010 et 2016. Il est possible d'abord d'y constater la forte fluctuation autant à court qu'à moyen terme. Aussi, si la capacité de la biohuile à concurrencer le mazout était bien meilleure au début de 2014, lorsque le prix du mazout était élevé, les perspectives se sont détériorées avec la baisse de ce prix depuis. Cependant, cela ne signifie pas que les perspectives ne peuvent pas redevenir plus favorables. En effet, le prix du mazout est fortement lié au prix des énergies fossiles en général et ce prix est l'objet de fortes fluctuations. Cela dit, il faudra tout de même espérer que la tendance à long terme du prix des énergies fossiles en général soit à la hausse. Cette tendance à la hausse combinée à la réduction du coût de production de la biohuile par des progrès technologiques favorisera la substitution du mazout en serriculture.

#### 7.1.2 Méthode

Afin de pouvoir estimer le coût de production de la biohuile, il faut pouvoir le faire à l'échelle de la production commerciale. Or, dans ce projet cette mise à l'échelle n'a pas été faite et les essais ont été réalisés suivant un procédé expérimental. Il est alors très difficile d'évaluer des coûts de production avec justesse. Toutefois, avec des données de prix du produit à substituer et certaines informations techniques émanant du projet, il est

possible d'évaluer un coût cible de la biohuile. Ce coût cible est en fait le coût de production auquel il faudrait pouvoir produire la biohuile pour qu'elle soit concurrentielle avec le mazout.



Source : Régie de l'énergie

**Figure 10 Évolution du prix du mazout n° 2 au Bas Saint-Laurent**

Le calcul du coût cible s'effectue en retenant tout d'abord un scénario de base quant à la production serricole. Dans la présente analyse, les paramètres du scénario retenus sont tirés des *Références économiques* du Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ, 2009) et présentés au Tableau 11. Il s'agit des paramètres associés à une serre individuelle dans la région de Mont-Joli au Bas St-Laurent qui est chauffée pendant une période de quatre mois et demie. À partir de l'ensemble des paramètres, il est possible de calculer la consommation annuelle totale de combustible, laquelle se traduit par 476 075 mégajoules (MJ).

**Tableau 11 Paramètres de production serricole retenus pour l'analyse économique.**

Superficie (m <sup>2</sup> )	653
Consommation (L/m <sup>2</sup> )	4,18
Période chauffée (mois)	4,5
Consommation totale en mazout léger (L)	12 270
Pouvoir calorifique du mazout léger (MJ/L) <sup>a</sup>	38,8
Consommation énergétique totale (MJ)	476 075

<sup>a</sup> Source : ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.

Avec la consommation annuelle totale de combustible ainsi que les pouvoirs calorifiques du mazout et de la biohuile, il est possible de calculer des coûts cibles. Dans le cas de la biohuile, trois scénarios de pouvoir calorifique sont retenus, soit 15 MJ/kg (le minimum requis par la norme ASTM D7544), 25 MJ/kg (moyenne des résultats obtenus lorsque il y a un traitement ou une séparation de la partie aqueuse de l'huile; Garcia-Perez et al., 2007, Bhattacharya et al., 2009, Azagohar et al., 2013; Sirijanusorn et al., 2013) et 28,8 MJ/kg (moyenne des résultats obtenus à partir du mélange à 10 % d'huile de plastic et 90 % d'huile de bois). Par ailleurs, puisque la biohuile est toujours exploitée en mélange avec le mazout, différents scénarios de mélange sont aussi retenus, soit :

- Mélange 1 : 50 % mazout/50 % huile;
- Mélange 2 : 60 % mazout/40 % huile;
- Mélange 3 : 70 % mazout/30 % huile;
- Mélange 4 : 90 % mazout/10 % huile;

Le coût cible peut être obtenu selon les équations comme suit. D'abord, à partir de l'équation du coût total de la consommation de carburant (Équation 6), le coût cible de la biohuile est ensuite obtenu par une transformation mathématique simple, tel que dans l'Équation 7.

$$\text{Coût total (\$)} = (C_{tm} * 1\,000 * C_m) + (C_{tbh} * 1\,000 * C_{bh}) \quad \text{Équation 6}$$

Où :  $C_{tm}$ , la consommation totale du mazout (t);  
 $C_m$ , le coût unitaire du mazout (\$/kg);  
 $C_{tbh}$ , la consommation totale de la biohuile (t);  
 $C_{bh}$ , le coût unitaire de la biohuile (\$/kg);

$$C_{bh} = \frac{\text{Coût total} - (C_{tm} * 1\,000 * C_m)}{C_{tbh} * 1\,000} \quad \text{Équation 7}$$

Par la suite, la consommation de chaque combustible est quant à elle calculée selon l'Équation 8 :

$$\text{Consommation (t)} = \frac{\text{Consommation totale (MJ)} * \text{Proportion dans le mélange (\%)}}{\text{pouvoir calorifique } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{t}}\right)} \quad \text{Équation 8}$$

### 7.1.3 Résultats

Le coût cible a été calculé pour les trois scénarios relatifs au pouvoir calorifique de la biohuile et les résultats sont présentés au Tableau 12. Ce calcul est en fait une optimisation de l'Équation 10, en fonction de différents coûts du mazout. En utilisant le coût moyen du mazout des trois dernières années, soit 1,03 \$/kg (0,89 \$/litre), les coûts cibles de la biohuile sont respectivement de 0,34, 0,57 et 0,66 \$/kg à des pouvoirs calorifiques de 15, 25 et 28,8 MJ/kg.

**Tableau 12** Calcul du coût cible de la biohuile pour trois valeurs de pouvoir calorifique

	Combustible ou mélange	Mélange 1 (15 MJ/kg)	Mélange 2 (25 MJ/kg)	Mélange 3 (28,8 MJ/kg)
	<b>Scénarios</b>			
Pouvoir calorifique (MJ/t)	<i>Mazout no 2 (100 %)</i>	45 000	45 000	45 000
	<i>Biohuile (100 %)</i>	15 000	25 000	28 800
	Mélange (50 % mazout/50 % huile)	30 000	35 000	-
	Mélange (60 % mazout/40 % huile)	33 000	37 000	-
	Mélange (70 % mazout/30 % huile)	36 000	39 000	-
	Mélange (90 % mazout/10 % huile)	42 000	43 000	43 380
Consommation totale (t)	<i>Mazout no 2 (100 %)</i>	10,58	10,58	10,58
	<i>Biohuile (100 %)</i>	31,74	19,04	16,53
	Mélange (50 % mazout/50 % huile)	15,87	13,60	-
	Mélange (60 % mazout/40 % huile)	14,43	12,87	-
	Mélange (70 % mazout/30 % huile)	13,22	12,21	-
	Mélange (90 % mazout/10 % huile)	11,34	11,07	10,97
Coût du mazout léger (\$/kg)		1,03		
Coût des mélanges - mazout/biohuile (\$/t)		10 888		
Coût cible de la biohuile (\$/kg)		<b>0,34</b>	<b>0,57</b>	<b>0,66</b>

Par ailleurs, une analyse de sensibilité a été réalisée en utilisant plusieurs prix du mazout, et ce, pour les trois scénarios de pouvoir calorifique de la biohuile. Les résultats sont présentés au Tableau 13. Il est difficile d'interpréter ces valeurs de coût cible, car comme il a été mentionné précédemment, une évaluation de la mise à l'échelle commerciale n'a pas été réalisée. Toutefois, pour des travaux futurs où la mise à l'échelle commerciale sera testée, l'information économique contenue dans la présente analyse sera utile pour estimer la faisabilité de différentes techniques de pyrolyse et pour différentes matières.

**Tableau 13 Analyse de sensibilité du coût cible de la biohuile en fonction de différents coûts du mazout**

Coût du mazout (\$/kg)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)		
	15	25	28,8
Coût cible de la biohuile (\$/kg)			
0,81	0,27	0,45	0,52
0,93	0,31	0,52	0,59
1,04	0,35	0,58	0,67
1,16	0,39	0,64	0,74
1,28	0,43	0,71	0,82

#### 7.1.4 Discussion et conclusion

Comme mentionné précédemment, la faisabilité de la substitution du mazout par la biohuile dans le chauffage des serres dépend principalement de deux éléments, soit le prix du mazout et le coût de production de la biohuile. Il faut alors que le premier montre des tendances à la hausse tandis que le deuxième peut être réduit par des progrès technologiques. De plus, dans des travaux futurs, il sera intéressant de réaliser une mise à l'échelle commerciale avec la collaboration d'un ou plusieurs fabricants. La mise à l'échelle permettra de mieux évaluer la faisabilité à partir des coûts cibles estimés dans la présente analyse économique.

## 7.2 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'UTILISATION DE L'HUILE PYROLYTIQUE DANS LES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE À BASE DE MAZOUT N° 2 DANS LA SERRICULTURE

### 7.2.1 Introduction

Comme pour l'analyse économique, puisque le procédé est encore expérimental, il est encore très difficile d'évaluer avec justesse l'impact environnemental positif que pourrait avoir l'utilisation d'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage des serres. Une analyse simplifiée de l'impact environnemental de l'utilisation de l'huile pyrolytique a donc été produite suivant les mêmes scénarios que pour l'analyse économique. L'analyse porte seulement sur le potentiel de réduction des émissions de GES suite à l'utilisation de l'huile pyrolytique dans les systèmes de chauffage des serres.

### 7.2.2 Méthode

Les facteurs d'émissions de GES issus de la combustion de l'huile pyrolytique seule ou mélangée au mazout ont été estimés à partir de valeurs trouvées dans la littérature. Selon la littérature, la plupart des biocarburants ou biohuiles produits à partir de résidus de bois, de résidus agricoles ou de cultures dédiées, si utilisés seuls, vont

émettent tout au long de leur cycle de vie entre 30 et 40 % des émissions de GES du mazout ou du diesel (O'Connor, 2013; Sheehan et al., 1998; Snowden-Swan et Male, 2012).

Dans la présente analyse, les émissions de GES de la combustion de l'huile pyrolytique ont été fixées arbitrairement par l'équipe de recherche à 35 % des émissions du mazout, soit 967 kg CO<sub>2</sub>e/t. Le coefficient d'émissions de GES du mazout est de 2 763 kg CO<sub>2</sub>e/t, calculé à partir des valeurs présentées dans le Rapport d'inventaire national des sources et puits de gaz à effet de serre au Canada (Environnement Canada, 2015 – Tableau 1-1 et Tableau A6-4). Par la suite, une régression linéaire a été utilisée pour estimer les émissions de GES des mélanges de mazout et d'huile pyrolytique.

Les potentiels de réduction des émissions de GES ont été calculés pour des mélanges avec différentes proportions de mazout et d'huile pyrolytique. Trois pouvoirs calorifiques ont été retenus pour l'huile pyrolytique, soit 15, 25 et 28 MJ/kg. L'huile pyrolytique avec un pouvoir calorifique de 28 MJ/kg devrait être produite suite à l'ajout de 10 % de plastique lors de la pyrolyse.

### 7.2.3 Résultats

Les tableaux 14, 15 et 16 présentent les potentiels de réduction des émissions de GES pour les différents mélanges de mazout et d'huile pyrolytique ainsi que pour les deux pouvoirs calorifiques de cette dernière. Selon les estimations, l'utilisation d'huile pyrolytique pure permettrait de réduire les émissions de GES de 37 % dans le cas de l'huile ayant un pouvoir calorifique égal à 25 MJ/kg et de 44 % dans le cas de celle ayant un pouvoir calorifique égale à 28 MJ/kg. Par contre, l'utilisation de l'huile pyrolytique avec un pouvoir calorifique de 15 MJ/kg a pour effet d'augmenter les émissions de GES de 5 % puisque la quantité d'huile pyrolytique nécessaire est trois fois supérieure au mazout et que son pouvoir calorifique y est environ trois fois inférieur.

**Tableau 14 Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 15 MJ/kg**

Mélange		Pouvoir calorifique	Consommation d'huile	Émissions de GES	Réduction
Mazout n° 2	Huile pyrolytique				
%	%	MJ/t	t/année	kg CO <sub>2</sub> e/année	%
0	100	15 000	31,7	30 692	-5
60	40	33 000	14,4	29 496	-1
70	30	36 000	13,2	29 413	-1
90	10	42 000	11,3	29 283	0
100	0	45 000	5,7	16 101	0

**Tableau 15 Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 25 MJ/kg**

Mélange		Pouvoir calorifique	Consommation d'huile	Émissions de GES	Réduction
Mazout n° 2	Huile pyrolytique				
%	%	MJ/t	t/année	kg CO <sub>2</sub> e/année	%
0	100	25 000	19,0	18 415	37
60	40	37 000	12,9	26 308	10
70	30	39 000	12,2	27 151	7
90	10	43 000	11,1	28 602	2
100	0	45 000	10,6	29 231	0

**Tableau 16 Réduction des émissions de GES avec de l'huile pyrolytique à 28 MJ/kg (avec copyrolyse de 10 % de plastique)**

Mélange		Pouvoir calorifique	Consommation d'huile	Émissions de GES	Réduction
Mazout n° 2	Huile pyrolytique				
%	%	MJ/t	t/année	kg CO <sub>2</sub> e/année	%
0	100	28 000	17,0	16 442	44
60	40	38 200	12,5	25 481	13
70	30	39 900	11,9	26 538	9
90	10	43 300	11,0	28 404	3
100	0	45 000	10,6	29 231	0

Dans la situation plus probable, où l'huile pyrolytique et le mazout seraient mélangés dans une proportion 30/70, l'utilisation d'huile pyrolytique pure permettrait de réduire les émissions de GES de 7 % dans le cas de l'huile ayant un pouvoir calorifique égal à 25 MJ/kg et de 9 % dans le cas de celle ayant un pouvoir calorifique égale à 28 MJ/kg.

## 7.2.4 Conclusion

L'utilisation de l'huile pyrolytique en substitution du mazout n° 2 résulte en un impact environnemental positif. Toutefois, celle-ci doit avoir une haute qualité, notamment en termes de pouvoir énergétique. Une huile ayant le minimum exigé par la norme, soit 15 MJ/kg, ne permettra pas de réduire les émissions de GES comparativement à l'utilisation du mazout n° 2. Dans les deux autres scénarios simulés, la production et utilisation des huiles contenant un pouvoir énergétique de 25 et 28 MJ/kg, la réduction des émissions de GES serait jusqu'à 37 % et 44 %, respectivement. Plus la quantité d'huile est grande dans le mélange mazout n° 2 – huile, plus est importante la réduction en émissions de GES. La valeur exacte de la réduction serait à déterminer lorsque le ratio approprié pour les systèmes de chauffages des serres sera établi.

## 7.3 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les travaux ont été réalisés grâce à l'appui technique et scientifique de l'IRDA.

## 7.4 RÉFÉRENCES

Azargohar, R., K.L. Jacobson, E.E. Powel and A.K. Dalai. 2013. Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained, from Canadian waste biomass. *Journal of Analytic and Applied Pyrolysis*. 104: 330-340.

Bhattacharya, P., P.H. Steele, E.B.M. Hassan, B. Mitchell, L. Ingram and C.U. Pittman Jr. 2009. Wood/plastic copyrolysis in an auger reactor: Chemical and physical analysis of the products. *Fuel*. 88: 1251-1260.

Centre de références en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2009. Chauffage des serres - Consommation mensuelle de combustible (AGDEX 717/290). CRAAQ, 15 pages.

Environnement Canada. 2015. Rapport d'inventaire national 1990–2013 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. ISSN : 1719-0487.

Garcia-Perez, M., T.T. Adams, J.W. Goodrum, D.P. Geller and K.C. Das. 2007. Production and fuel properties of Pine Chip Bio-oil/biodiesel Blends. *Energy & Fuels*. 21: 2363-2372.

O'Connor, D. 2013. Advanced Biofuels – GHG Emissions and Energy Balances. Report T39-T5. (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. 122 pages.

Sheehan, J., V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski, et H. Shapouri. 1998. Life-cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. NREL/SR-580-24089. Golden, Colo.: National Renewable Energy Laboratory.

Sirijanusorn, S., K. Sriprateep and A. Pattiya. 2013. Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. *Bioresource Technology*. 139: 343-348.

Snowden-Swan, L.J. et J.L. Male. 2012. Summary of Fast Pyrolysis and Upgrading GHG Analysis. Pacific Northwest National Laboratory. Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830.

## 8 ÉTAPE N° 5 – CARACTÉRISATION DU BIOCHARBON ET ANALYSE DES VOIES POTENTIELLES DE VALORISATION

Patrick Brassard<sup>1-2</sup>, Stéphane Godbout<sup>2</sup>, V. Raghavan<sup>1</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>2</sup>, Michèle Grenier<sup>2</sup> et Dan Zegan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université McGill, Faculté de l'agriculture et des sciences de l'environnement. Dép. de génie des bioressources

<sup>2</sup> Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

### 8.1 INTRODUCTION

#### 8.1.1 Qu'est-ce que le biocharbon?

Le biocharbon, coproduit de la pyrolyse, est un matériau poreux dont la surface spécifique peut varier de 5 à 750 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, ayant une teneur élevée en carbone qui peut demeurer stable sur une longue période de temps (> 1000 ans). Le rendement en biocharbon et ses propriétés sont influencés par les conditions de pyrolyse et par le type de biomasse utilisé (Enders et al., 2012). Par exemple, la pyrolyse lente, qui se caractérise par un temps de résidence de la biomasse dans le réacteur de quelques minutes à quelques heures à moins de 450 °C, favorise les rendements de biocharbon (environ 35 %). La pyrolyse rapide, dont le temps de réaction est beaucoup plus faible (quelques secondes) avec des températures plus élevées (environ 500 °C), favorisera la production de biohuile alors que le rendement en biocharbon sera réduit (Bridgwater et al., 2012). La composition chimique de la biomasse utilisée aura aussi un impact sur le rendement et les propriétés du biocharbon. Par exemple, un contenu plus élevé en lignine favorisera la formation de biocharbon, la lignine se dégradant à des températures allant de 200 à 700 °C, alors que l'hémicellulose et la cellulose se dégradent autour de 200-300 °C et 300-400 °C, respectivement. Les principaux paramètres de pyrolyse influençant les propriétés du biocharbon sont : la vitesse de chauffage, la température, la pression dans le réacteur, le temps de résidence du solide et le temps de résidence des vapeurs dans le réacteur. Ce dernier est influencé par le débit du gaz inerte (azote) dans le réacteur. Comme tous les biocharbons sont différents, il est important de produire des biocharbons ayant les propriétés désirées en fonction de leur application. Cependant, peu d'études ont été réalisées dans le but d'établir la relation entre les paramètres de pyrolyse et les propriétés du biocharbon. Par définition, le biocharbon est utilisé comme amendement au sol et permettrait d'améliorer les propriétés physiques du sol, d'augmenter le rendement des cultures, d'absorber les polluants dans le sol et dans l'eau, de séquestrer du carbone et de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Le résidu solide de la pyrolyse ayant généralement un pouvoir calorifique intéressant, il peut être utilisé comme source d'énergie. Dans ces cas, il faudra parler de charbon pyrolytique.

## 8.1.2 Voies de valorisation du biocharbon

### Outil de lutte contre les changements climatiques

La possibilité de produire du biocharbon pouvant être utilisé comme outil de lutte contre les changements climatiques a été évoquée depuis 2005 (Verma et al., 2014). Le biocharbon permettrait d'y parvenir de deux façons. Premièrement, contrairement à la biomasse qui se décompose rapidement et qui émet du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, le biocharbon produit par pyrolyse contient une forme de carbone stable pouvant résister à la décomposition. Ainsi, lorsque le biocharbon est appliqué au sol, une partie du carbone peut y être séquestrée pour de longues périodes de temps, allant jusqu'à plus de 1000 ans (Haefele et al., 2011; Kuzyakov et al., 2014; Singh et al., 2012). Un biocharbon avec de faibles ratios O/C<sub>org</sub> et H/C<sub>org</sub> (< 0,2 et < 0,4, respectivement) indiquerait un fort potentiel de séquestration du carbone.

Deuxièmement, plusieurs études (Brassard et al., 2016) ont démontré que l'amendement du biocharbon au sol permettrait de réduire les émissions de GES, et plus particulièrement du N<sub>2</sub>O, un puissant gaz à effet de serre ayant un potentiel de réchauffement climatique de 298 par rapport au CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007). Les mécanismes impliqués sont encore mal compris de la communauté scientifique, cependant des études ont évoqué l'effet de chaulage du biocharbon, un changement de la diversité et de l'activité des micro-organismes, l'adsorption du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par le biocharbon et l'aération du sol. Les biocharbons ayant un ratio C/N < 30 permettraient de favoriser la réduction des émissions de N<sub>2</sub>O du sol (Brassard et al., 2016).

### Autres utilisations du biocharbon

Selon plusieurs études, le biocharbon a une certaine valeur agronomique, car il permettrait d'améliorer la structure sur sol (aération), la rétention en eau et le prélèvement des nutriments par les plantes, permettant ainsi d'améliorer le rendement des cultures (Major et al., 2010a, Novak et al., 2009). Dépendamment de la composition chimique de la biomasse, le biocharbon peut contenir certains éléments fertilisants (N, P, K), particulièrement pour les biocharbons produits à partir de biomasses agricoles comme le fumier. Cependant, ces derniers ne peuvent pas être utilisés comme un fertilisant, qui est généralement appliqué au champ chaque année, car le taux de relâchement des éléments nutritifs n'est pas connu et dépend des propriétés du biocharbon et du sol. Il a été démontré que le biocharbon pourrait retenir les nutriments et les relâcher graduellement (Agblevor, 2010; Hossain et al., 2011), permettant ainsi de réduire les pertes par ruissellement et lixiviation.

Le biocharbon peut aussi être utilisé comme outil de remédiation environnementale. En effet, le biocharbon peut adsorber des contaminants organiques et inorganiques (Xie et al., 2015), des métaux lourds (Uchimiya et al., 2011) et des pesticides (Cabrera et al., 2014) dans le sol, réduisant ainsi le ruissellement et la lixiviation de ces éléments vers les cours d'eau. Les caractéristiques du biocharbon favorisant l'adsorption des polluants sont : une grande surface spécifique, un pH élevé, une bonne capacité d'échange cationique (CEC) et anionique (AEC), son hydrophobicité et sa charge négative (Inyang et al., 2010). Des températures de pyrolyse élevées résultent généralement à des biocharbons plus efficaces pour adsorber les contaminants organiques (Ahmad et al., 2014;

Tang et al., 2013). Conséquemment, une attention particulière doit être portée à l'utilisation du biocharbon dans le sol, car il pourrait réduire l'efficacité des pesticides (Kookana et al., 2011).

## 8.2 OBJECTIFS

Le but principal du projet était d'acquérir les connaissances nécessaires pour produire, par pyrolyse rapide, un combustible issu de résidus agricoles destiné aux systèmes de chauffage des serres utilisant le mazout n° 2. Cependant, il a été démontré que le coproduit solide de la pyrolyse, le biocharbon, peut fournir de nombreux bénéfices lorsqu'il est appliqué au sol. Ainsi, les sous-objectifs de ce chapitre sont de :

- 1 Définir la qualité du biocharbon en fonction des conditions de la pyrolyse et de la nature de la biomasse utilisée ;
- 2 Proposer des voies de valorisation du biocharbon en fonction de ses propriétés et étudier son efficacité pour une voie de valorisation sélectionnée.

Plus spécifiquement, l'utilisation du biocharbon comme amendement au sol dans le but de séquestrer du carbone et de réduire les émissions de gaz à effet de serre a été étudiée.

## 8.3 MÉTHODOLOGIE

### 8.3.1 Production et caractérisation physico-chimique des biocharbons

À la suite des essais réalisés afin de définir les conditions de pyrolyse permettant de produire de la biohuile ayant les propriétés optimales (Chapitre 5), le biocharbon produit à chacun des 45 essais a été analysé au laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA. Les teneurs en eau, en matière volatile et en cendre ont été analysées selon la méthode ASTM D-1762-84. Les teneurs en carbone total, hydrogène, azote et oxygène ont été analysées par combustion (Leco TruSpec, St. Joseph, MI, USA). La teneur en éléments (P, K, Ca, Mg, Al, B, Cu, Fe, Mn, Mo, Na, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, S, Ba et Sr) a été analysée suivant la méthode de digestion EPA3050. De plus, le phosphore (P) soluble à l'eau a été mesuré.

De la même façon que pour la sélection des conditions de pyrolyses permettant de produire la biohuile optimale, la méthodologie de surface de réponse a été utilisée afin de déterminer les conditions de pyrolyse optimales pour produire 6 biocharbons devant être testés en conditions d'incubation dans le sol. Les variables dépendantes étudiées étaient les ratios C/N, O/C<sub>org</sub> et H/C<sub>org</sub>. Un ratio C/N maximum (> 30) indiquerait un biocharbon ayant le potentiel de réduire les émissions de N<sub>2</sub>O du sol, alors que des ratios O/C<sub>org</sub> et H/C<sub>org</sub> minimums (<0,2 et <0,6, respectivement), indiqueraient un biocharbon ayant un fort potentiel de séquestration du carbone (Brassard et al., 2016). Ainsi, pour chaque biomasse, les conditions de pyrolyse sélectionnées sont celles permettant de produire un biocharbon avec des ratios O/C<sub>org</sub> et H/C<sub>org</sub> minimums (biocharbon avec le meilleur potentiel de séquestration de carbone) et maximum (biocharbon avec le moins bon potentiel de séquestration de carbone).

### 8.3.2 Évaluation de l'utilisation des biocharbons comme outil de lutte contre les changements climatiques

#### Incubation des biocharbons dans le sol

Deux types de sols, un sable loameux et un loam limoneux, ont été prélevés de l'horizon 0 - 15 cm sur des parcelles des fermes expérimentales de l'IRDA à Deschambault et Saint-Lambert-de-Lauzon, respectivement. Les sols ont été séchés à l'air puis tamisés afin de retenir la fraction < 4 mm.

Les six biocharbons produits à l'étape précédente ont été utilisés pour les essais d'incubation dans le sol en chambre de croissance (Conviron) pendant 45 jours afin de mesurer les émissions de GES ( $N_2O$ ,  $CO_2$  et  $CH_4$ ). Afin de reproduire les conditions environnementales réelles au champ, l'éclairage a été activé de jour entre 5h00 et 20h00, alors que la température a été ajustée à 22°C pour cette même période et à 18°C la nuit (de 20h00 à 5h00).

14 traitements ont été évalués, soit 12 mélanges (six biocharbons et deux sols) et les deux sols sans biocharbon (témoins). Les biocharbons ont été ajoutés aux sols à un taux de 2 % (b.h.), puis mélangés uniformément à l'aide d'un mélangeur à culbute. Par la suite, chaque mélange a été réparti dans quatre pots Mason de 1 litre (ouverture de 8,6 cm de diamètre et hauteur de 18 cm). 757,4 g (b.h.) de mélange de sable loameux et 771,2 g (b.h.) du mélange de loam limoneux a été ajouté dans chaque pot dans le but d'obtenir la même quantité de mélange sec par pot (748 g). Les sols ont été compactés pour que chaque mélange occupe le même volume. Ainsi, la densité des mélanges avec le sable loameux et le loam limoneux a été ajustée à 1,35 et 1,15, respectivement. De la même façon, un traitement constitué d'un biocharbon de chaque biomasse ajouté aux deux sols à une dose de 4 % a été réalisé. Ce traitement n'a pas été répété et avait pour but de vérifier la tendance lorsqu'une dose plus élevée de biocharbon est utilisée.

Les sols ont été fertilisés et irrigués immédiatement avant la période d'incubation. Une dose standard de fertilisant azoté pour une culture de maïs de 170 kg d'azote (N) par hectare a été ajoutée dans chaque pot sous la forme d'une solution de nitrate d'ammonium ( $NH_4NO_3$ ), soit 485,71 kg  $NH_4NO_3$  ha<sup>-1</sup>. En considérant une couche de sol de 17 cm et une masse volumique apparente de 1320 kg m<sup>-3</sup><sub>sol</sub> (Guide de référence de fertilisation), une dose de 75,6 mg N kg<sup>-1</sup><sub>sol</sub> était nécessaire, soit 216,5 g  $NH_4NO_3$  kg<sup>-1</sup><sub>sol sec</sub>.

Afin de favoriser les émissions de  $N_2O$ , la teneur en eau a été ajustée afin d'occuper 80 % de la porosité (WFPS = 80 %). Lorsque la teneur en eau se situe entre 70 et 80 % WFPS, la dénitrification devient la source prédominante de  $N_2O$  (Ussiri et Lal, 2012). La quantité d'eau à ajouter a été calculée selon Équation 9 :

$$WFPS (\%) = \frac{\theta_m \times P_B}{\rho_{H_2O} \times TP} \times 100 \quad \text{Équation 9}$$

Où  $\theta_m$  = teneur en eau gravimétrique = masse d'eau (g) / masse de sol sec (g);  $p_b$  = densité apparente du sol = masse de sol sec (g) / volume ( $\text{cm}^3$ );  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  = densité de l'eau = 1; TP = porosité totale =  $1 - (P_b/P_p)$ , où  $P_p$  est la densité d'une particule de sol = 2,65. La teneur en eau a été réinitialisée à 80 % WFPS dans chaque pot aux jours 23, 37 et 44, la veille des jours d'échantillonnage.

## Suivi des émissions de GES

L'échantillonnage des gaz a été effectué aux jours 1, 2, 3, 10, 17, 24, 31, 38 et 45. Tout d'abord, un échantillon ( $t_0$ ) a été prélevé au-dessus d'une dizaine de pots avant leur fermeture. Ensuite, les pots ont été fermés hermétiquement. Pour chaque traitement, un échantillon ( $t_{15}$ ) a été prélevé dans l'un des quatre pots 15 minutes après leur fermeture. Enfin, pour les trois autres pots (trois répétitions) de chaque traitement, un échantillon ( $t_{30}$ ) a été prélevé 30 minutes après leur fermeture.

Les couvercles des pots Mason étaient munis d'un passe-paroi et d'un septum. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une seringue de 60 ml, puis 20 ml de l'échantillon était transféré dans une fiole préalablement mise sous vide. Les échantillons ont ensuite été analysés par chromatographie en phase gazeuse (GC-MS) afin de mesurer les concentrations de  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ . Les émissions ont été calculées sur une base massique ( $E_m$ ;  $\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) selon l'Équation 10:

$$E_m = \frac{V}{m_s} \times \frac{dC}{dt} \quad \text{Équation 10}$$

Où V = Volume d'air libre dans le pot ( $\text{m}^3$ ),  $m_s$  = masse du mélange sec (kg),  $dC/dt$  = pente de la régression <<concentration de gaz ( $\text{mg m}^{-3}$ ) vs temps (h)>>.

Un graphique de la concentration de gaz ( $\text{mg m}^{-3}$ ) en fonction du temps (h) a été tracé pour chaque répétition et pour la moyenne afin de calculer la pente de régression. La pente a été calculée à partir de trois concentrations, soit à  $t_0$  et  $t_{15}$  (identiques pour chaque répétition) et à  $t_{30}$ . La concentration (en  $\text{mg m}^{-3}$ ) a été calculée au préalable à partir de la concentration en ppmv à l'aide de l'Équation 11:

$$\text{Concentration} \left( \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{C \times M \times P}{R \times T \times 1000} \quad \text{Équation 11}$$

Où C = concentration du gaz (ppmv), M = masse molaire ( $\text{CO}_2$  et  $\text{N}_2\text{O}$  = 44), P = pression (101 325 Pa), R = constante (8,314), T = température (298,15 K) et 1000 = facteur de conversion.

Les émissions ont été cumulées sur la période d'échantillonnage de 45 jours. Une analyse statistique a été réalisée afin de déterminer les différences significatives entre les différents traitements. Plus précisément, un modèle mixte normal qui comprend les effets fixes du type de biocharbon, de la date et de l'interaction date X biocharbon a été ajusté. Les effets aléatoires sont les répétitions, l'interaction biocharbon X répétition et

l'erreur expérimentale. La date est un facteur de mesures répétées et une matrice de variance covariance a été modélisée pour s'ajuster aux corrélations entre les relevés effectués sur une même unité expérimentale à des dates différentes. Les effets fixes étaient tous significatifs. Les tests de différences deux à deux entre les biocharbon, par date de relevé, ont été effectués.

## Suivi des propriétés physico-chimiques du sol

Les deux sols ont été analysés avant de faire les mélanges. Le carbone total et l'azote total ont été mesurés par combustion LECO. Le N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub> ont été extraits à partir de 5 g d'échantillon dans 25 g de KCl 2M pendant 1 h d'agitation. P, K, Ca, Al et Mg ont été mesurés par la méthode Mehlich-3. De plus, la concentration en P soluble à l'eau a été évaluée à l'aide de la méthode Sissingh. Le carbone total soluble (CTS) et le carbone inorganique (CI) ont été mesurés par extraction à l'eau. La teneur en matière organique à 375°C, le pH à l'eau, la teneur en eau et la granulométrie du sol ont aussi été mesurés.

Les mêmes analyses ont été réalisées sur les mélanges après la période d'incubation. Cependant, le P soluble (méthode Sissingh) a été mesuré seulement pour les sols sans biocharbon et ceux avec le biocharbon de la FSLP.

## 8.4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 8.4.1 Production de biocharbons dans les conditions de pyrolyse optimales

Les valeurs prédites du rendement et des ratios H/C<sub>org</sub>, O/C<sub>org</sub> et C/N des biocharbons produits aux conditions optimales de pyrolyse déterminées à l'aide de l'analyse de surface de réponse sont présentées au tableau 3. Tel que rapporté dans la littérature (Scott et al., 1988), les rendements en biocharbon les plus élevés sont obtenus à une température de pyrolyse plus faible. Selon l'analyse de variance (ANOVA) de chaque modèle, le rendement en biocharbon est significativement dépendant de la température pour les trois biomasses (Pr < 0,05), alors que le temps de résidence est significatif seulement pour le biocharbon de panic érigé et que le débit d'azote n'a pas d'impact significatif. Les rendements en biocharbon les plus élevés ont été obtenus pour la FSLP (32,2 à 40 %) en raison de sa haute teneur en cendre (11,5 %). Les rendements pour la pyrolyse du bois (17,2 à 27,8 %) et du panic érigé (17,4 à 25,2) sont semblables. Cependant, le rendement le plus élevé prédit pour le bois (27,8 %) est plus grand que pour le panic érigé (25,2 %) malgré que la température de pyrolyse soit plus élevée pour le bois. Ce résultat reflète la teneur en lignine plus élevée de bois, qui forme principalement du biocharbon lors de la pyrolyse.

Les valeurs minimales des indicateurs de stabilité du biocharbon (ratios H/C<sub>org</sub> et O/C<sub>org</sub>) indiquent un potentiel de séquestration de carbone élevé (Brassard et al., 2016). L'analyse de surface de réponse a démontré que les biocharbons produits à partir des trois biomasses peuvent avoir un potentiel de séquestration de carbone élevé seulement lorsque les conditions de pyrolyse optimales sont sélectionnées. Les ratios H/C<sub>org</sub> minimums prédits sont de 0,47, 0,54 et 0,66 pour les biocharbons du panic érigé, du bois et de la FSLP, respectivement. Cela signifie que pour les conditions de pyrolyses optimales, au moins 50 % du contenu en carbone du biocharbon devrait être séquestré dans le sol pour plus de 100 ans (Budai et al., 2013). Similairement, les ratios O/C<sub>org</sub>

minimum prédits sont de moins de 0,2 (0,10, 0,14 et 0,14 pour les biocharbons de panic érigé, de bois et de la FSLP, respectivement) et confirment le potentiel de séquestration de carbone élevé des biocharbons produits avec des paramètres de pyrolyse semblables. L'ANOVA a permis de conclure que la température a un impact significatif ( $Pr < 0.05$ ) sur les ratios  $H/C_{org}$  et  $O/C_{org}$  des biocharbons. En effet, plus la température est élevée, plus faibles sont les indicateurs de stabilité du biocharbon. De plus, un temps de résidence plus élevé résulte en des ratios  $H/C_{org}$  et  $O/C_{org}$  significativement plus faibles pour le panic érigé, et donc un potentiel de séquestration du carbone plus élevé.

Les biocharbons avec un ratio C/N élevé ( $> 30$ ) pourraient permettre de réduire les émissions de  $N_2O$  du sol (Brassard et al., 2016). Les résultats de l'analyse de surface de réponse (Tableau 17) démontrent que le ratio C/N varie beaucoup selon le type de biomasse, de 430 à 541 pour le bois, de 95 à 115 pour le panic érigé et de 11,0 à 13,0 pour la FSLP. Peu importe les conditions de pyrolyse, les biocharbons de bois et de panic érigé pourraient permettre de réduire les émissions de  $N_2O$  du sol. Ainsi, l'ANOVA a révélé qu'aucun paramètre de pyrolyse n'a un impact significatif sur le ratio C/N.

**Tableau 17 Valeurs estimées des rendements et des ratios  $H/C_{org}$ ,  $O/C_{org}$  et C/N des biocharbons produits dans les conditions de pyrolyses optimales selon les modèles de surface de réponse**

	Rendement (%)		$H/C_{org}$		$O/C_{org}$		C/N	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
	<b>Bois</b>							
Valeur estimée	17,2	27,8	0,54	0,81	0,14	0,25	477	539
Température (°C)	646	507	646	515	642	517	639	522
Temps de résidence (s)	89	79	99	79	103	80	75	90
Débit d'azote ( $L\ min^{-1}$ )	3,6	3,4	2,9	3,9	2,8	4,1	2,8	4,4
	<b>Panic érigé</b>							
Valeur estimée	17,4	25,2	0,47	0,77	0,10	0,23	100	108
Température (°C)	593	451	588	456	594	462	588	466
Temps de résidence (s)	78	88	106	80	102	75	74	72
Débit d'azote ( $L\ min^{-1}$ )	3,3	2,8	3,1	3,4	2	3,4	3,3	3,1
	<b>FSLP</b>							
Valeur estimée	32,2	40	0,66	0,90	0,14	0,21	11,5	12,8
Température (°C)	649	507	628	508	631	543	594	614
Temps de résidence (s)	95	79	94	79	94	73	84	103
Débit d'azote ( $L\ min^{-1}$ )	3	3,4	1,6	3,6	1,7	4,4	4,9	1,5

Afin de réaliser des essais d'incubation, six biocharbons ont été produits, soit deux pour chaque biomasse. L'un a été produit avec les paramètres de pyrolyse moyens permettant de produire un biocharbon avec les propriétés permettant de favoriser le potentiel de séquestration de carbone (ratios  $H/C_{org}$  et  $O/C_{org}$  minimums).

L'autre a été produit avec les paramètres de pyrolyse moyens permettant d'obtenir un biocharbon avec les propriétés opposées (ratios H/C<sub>org</sub> et O/C<sub>org</sub> maximums). Les paramètres de pyrolyse et les propriétés des biocharbons obtenus sont présentés au Tableau 18. Le biocharbon 4 a été produit à deux répétitions.

**Tableau 18 Propriétés physico-chimiques des biocharbons produits dans les conditions de pyrolyse optimales**

	Unité	B1	B2	B3	B4a	B4b	B5	B6
		Bois	Bois	P.É. <sup>1</sup>	P.É.	P.É.	FSLP <sup>2</sup>	FSLP
<b>Paramètres de pyrolyse</b>								
Température	°C	644	516	459	591	591	630	526
T. résidence	s	101	80	78	104	104	94	76
Débit d'azote	L min <sup>-1</sup>	2,9	4,0	3,4	2,6	2,6	1,7	4,0
<b>Propriétés du biocharbon</b>								
Teneur en eau	%(b.h.)	1,2	0,9	1,5	1,0	1,8	0,9	0,9
pH		7,6	6,8	6,4	8,7	8,9	9,3	8,6
C <sub>total</sub>	%(b.h.)	80,0	71,6	67,1	79,5	80,2	49,2	51,5
C <sub>organique</sub>	%(b.h.)	76,0	70,7	64,9	79,1	79,9	45,2	47,4
H	%(b.h.)	3,73	4,8	4,85	3,36	3,35	3,36	3,73
O	%(b.h.)	13,4	21,6	22,9	10,0	9,59	13,7	15,6
N	%(b.h.)	0,166	0,141	0,641	0,828	0,780	4,05	4,40
Cendres (750°C)	%(b.s.)	2,1	1,4	4,1	5,6	5,4	28,1	23,6
P <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	134	175	1095	1656	1573	23087	27684
P <sub>soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	7,16	13,7	109	26,7	32,1	55,7	165
K	mg kg <sup>-1</sup>	2784	2043	4474	6688	6834	38791	32904
Ca	mg kg <sup>-1</sup>	6101	4278	7397	11074	10377	41300	35765
Mg	mg kg <sup>-1</sup>	884	622	1851	2833	2698	13596	11540
Al	mg kg <sup>-1</sup>	131	77,3	76,3	97,8	103	423	349

<sup>1</sup> Panic érigé; <sup>2</sup> Fraction solide de lisier de porc.

Le modèle statistique a été validé à l'aide des propriétés des biocharbons obtenus. Les valeurs obtenues et prédites des rendements et des ratios H/C<sub>org</sub>, O/C<sub>org</sub> et C/N sont présentées au Tableau 19. Les régressions linéaires des valeurs obtenues vs prédites indiquent que les modèles sont généralement bien ajustés aux valeurs expérimentales pour le rendement (R<sup>2</sup> = 0,97), le ratio C/N (R<sup>2</sup> = 1,0), le ratio H/C<sub>org</sub> (R<sup>2</sup> = 0,88) et le ratio O/C<sub>org</sub> (R<sup>2</sup> = 0,74). Les biocharbons n° 1 et n° 4 ont le meilleur potentiel pour lutter contre les changements climatiques, car ils ont un potentiel de séquestration de carbone élevé (H/C<sub>org</sub> < 0,7; O/C<sub>org</sub> < 0,2) et ils ont le potentiel de réduire les émissions de GES du sol (C/N < 30).

Tableau 19 Validation du modèle statistique

Échantillon	Rendement (%)		H/Corg		O/Corg		C/N	
	Obtenu	Prédit	Obtenu	Prédit	Obtenu	Prédit	Obtenu	Prédit
B1	18,5	17,8	482	486	0,58	0,54	0,13	0,14
B2	26,4	27,3	508	534	0,81	0,81	0,23	0,25
B3	26,9	24,4	105	108	0,89	0,77	0,26	0,22
B4	18,8*	18,3	99,4*	103	0,50*	0,48	0,09*	0,10
B5	34,9	33,0	12,1	11,9	0,89	0,72	0,23	0,16
B6	46,4	39,3	11,7	11,8	0,94	0,88	0,25	0,21

\*Moyenne des deux répétitions.

## 8.4.2 Essais d'incubation

### Suivi des propriétés du sol

Les propriétés physico-chimiques des sols avant incubation et des mélanges sol-biocharbon après incubation sont présentées aux tableaux 20 et 21 pour les sols de type sable loameux et loam limoneux, respectivement. L'ajout du biocharbon de la FSLP (B5 et B6) a eu un effet chaulant, permettant d'augmenter considérablement le pH dans les deux types de sol comparativement au témoin. Par exemple, le pH du sable loameux et du loam limoneux avec le biocharbon de la FSLP (n° 5) a atteint 6,9 et 6,0, comparativement aux sols témoins dont le pH après incubation se situait à 5,4 et 4,9, respectivement. Les biocharbons de bois et de panic érigé ont eu peu d'impact sur le pH du sol.

Le carbone total dans le sol après incubation est plus élevé dans tous les échantillons avec biocharbon comparativement aux témoins. La quantité de carbone soluble est plus élevée dans les échantillons avec le biocharbon de la FSLP comparativement aux témoins, avec une différence d'environ 61 ppm dans le sable loameux et de près de 72 ppm dans le loam limoneux. La teneur en C<sub>soluble</sub> des échantillons avec les biocharbons de bois et de panic érigé est semblable à celle des échantillons témoin.

L'azote (N) total a augmenté considérablement dans les échantillons avec le biocharbon de la FSLP en raison de la teneur élevée en N de ce dernier. Dans les échantillons avec le biocharbon de panic érigé, le N total est légèrement plus élevé par rapport au témoin. Finalement, une légère diminution de la teneur en N a été observée dans les échantillons avec du biocharbon de bois mélangé au loam limoneux. Sauf dans les mélanges de loam limoneux avec du biocharbon de la FSLP, la teneur en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans les échantillons avec du biocharbons est plus faible que dans les échantillons témoins après incubation. Cela signifie que l'ajout de biocharbon a provoqué l'immobilisation de l'azote, ce qui ne serait pas avantageux pour le producteur, car l'engrais appliqué au sol serait retenu par le biocharbon et ne serait pas disponible pour les plantes.

**Tableau 20 Propriétés physico-chimiques des sols avant incubation et des mélanges sol-biocharbon après incubation : sable loameux**

Propriété	Unité	Mélanges après l'incubation							Sol initial avant incubation
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	T	
Humidité	%(b.h.)	16,1	16,3	16,6	16,8	16,7	16,7	15,3	1,24
pH		5,5	5,5	5,8	5,7	6,9	6,5	5,4	6,15
M.O.	%(b.s.)	--	--	--	--	--	--	--	1,6
C <sub>total</sub>	%(b.s.)	1,127	1,170	1,247	1,193	1,051	1,153	0,611	0,675
C <sub>total soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	51,1	50,9	63,7	59,4	166,2	144,5	68,6	88,0
C <sub>org soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	41,1	39,6	50,7	46,4	107,4	107,6	46,6	62,4
C <sub>inorg soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	10,0	11,4	13,1	12,9	58,8	36,8	22,0	25,6
N	%(b.h.)	0,049	0,056	0,060	0,058	0,079	0,095	0,047	0,052
N-NH <sub>4</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	0,57	0,5	0,5	0,5	1,0	1,1	0,6	0,871
N-NO <sub>3</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	70,90	70,6	65,8	61,9	66,6	76,5	77,4	5,41
P <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	147,0	151,7	155,3	152,0	288,3	273,3	149,3	145
P <sub>soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	--	--	--	--	22,6	21,4	3,2	4,13
K	mg kg <sup>-1</sup>	41,7	49,0	82,1	75,2	520,3	426,0	33,4	31,4
Ca	mg kg <sup>-1</sup>	599,3	619,7	648,7	619,7	851,7	797,0	616,0	615
Mg	mg kg <sup>-1</sup>	14,8	15,7	29,0	19,3	148,7	134,7	14,7	13,9
Al	mg kg <sup>-1</sup>	1266	1288	1261	1262	1201	1224	1305	1261

B1 à B6 : Mélange du sol avec les biocharbons 1 à 6 (voir tableau 2); T : Sol témoin sans biocharbon

En ce qui concerne le phosphore total (P<sub>total</sub>), l'ajout de biocharbon de bois et de panic érigé n'a eu aucun impact comparativement aux sols sans biocharbon. Seuls les biocharbons de la FSLP ont permis une augmentation de la teneur en P des sols de 102,5 à 139 mg/kg. Considérant que l'ajout du P du biocharbon au départ représente environ 423 mg de P par pot (565 mg kg<sup>-1</sup>) pour le biocharbon n° 5, et 353 mg par pot (472 mg kg<sup>-1</sup>) pour le biocharbon n° 6, selon la teneur en P Mehlich III, 24,6 % et 25,7 % du P du biocharbon n° 5 est devenu disponible dans le sable loameux et dans le loam limoneux, respectivement. Pour ce qui est du biocharbon n° 6, 26,3 % et 21,7 % du P est devenu disponible. La proportion de P<sub>soluble</sub> par rapport au P disponible à la plante (Mehlich III) après incubation est de 2,15 % dans le sable loameux et de 1,7 % dans le loam limoneux.

Le taux de saturation en phosphore (P/Al) après incubation dans le sable loameux est de 11,5 % et de 2,5 % dans le loam limoneux. Ce taux demeure sous les seuils environnementaux (13,1 % pour une teneur en argile du sol de moins de 30 %) lors de l'ajout de biocharbons de bois et de panic érigé. Cependant, le taux est dépassé et atteint 24 % lors de l'ajout du biocharbon de la FSLP dans le sable loameux, et 15,1 % dans le loam limoneux avec le biocharbon n° 5 seulement. La teneur en potassium (K) a augmenté avec l'ajout de biocharbon, surtout pour la FSLP, mais aussi pour le panic érigé.

**Tableau 21 Propriétés physico-chimiques des sols avant incubation et des mélanges sol-biocharbon après incubation : loam limoneux**

Propriété	Unité	Mélanges après l'incubation							Sol initial avant incubation
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	T	
Humidité	%(b.h.)	23,7	23,8	23,2	25,3	26,4	25,6	23,5	3,19
pH		5,0	5,0	5,2	5,1	6,0	5,6	4,9	5,4
M.O.	%(b.s.)	--	--	--	--	--	--	--	3,78
C <sub>total</sub>	%(b.s.)	2,777	2,920	2,833	2,923	2,630	2,543	1,677	1,730
C <sub>total soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	113,1	129,0	139,0	140,3	215,7	207,0	124,8	156,1
C <sub>org soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	81,0	94,9	98,4	92,4	172,0	171,9	100,6	111,1
C <sub>inorg soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	32,0	34,4	40,7	48,1	43,7	35,2	24,3	45,0
N	%(b.h.)	0,137	0,147	0,158	0,157	0,215	0,209	0,152	0,145
N-NH <sub>4</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	1,5	1,6	1,3	1,3	1,5	2,5	2,8	5,7
N-NO <sub>3</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	133,3	140,7	140,3	134,0	156,7	200,3	152,7	42,2
P <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	31,1	32,0	35,7	32,5	176,0	133,3	30,9	30,3
P <sub>soluble</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	--	--	--	--	13,7	10,0	0,5	0,942
K	mg kg <sup>-1</sup>	62,6	67,7	93,2	100,8	504,3	352,7	53,8	51,7
Ca	mg kg <sup>-1</sup>	971,0	950,0	1019	992,3	1314	1171	976,0	950
Mg	mg kg <sup>-1</sup>	117,7	119,0	132,3	114,3	276,3	234,7	112,7	115
Al	mg kg <sup>-1</sup>	1275	1270	1244	1249	1164	1187	1269	1192

B1 à B6 : Mélange du sol avec les biocharbons 1 à 6 (voir Tableau 18) ; T : Sol témoin sans biocharbon

## Suivi des émissions des GES

Les émissions de N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> ont été mesurées. Cependant, seuls les résultats des émissions de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub> sont présentés, car les émissions de CH<sub>4</sub> sont négligeables pour tous les traitements. Un exemple des résultats du calcul est présenté au Tableau 22 pour les émissions de CO<sub>2</sub> (mg kg<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) du mélange loam limoneux avec le biocharbon 5. Les résultats détaillés du calcul de la pente sont présentés pour le 26-07-2016 (Figure 11).

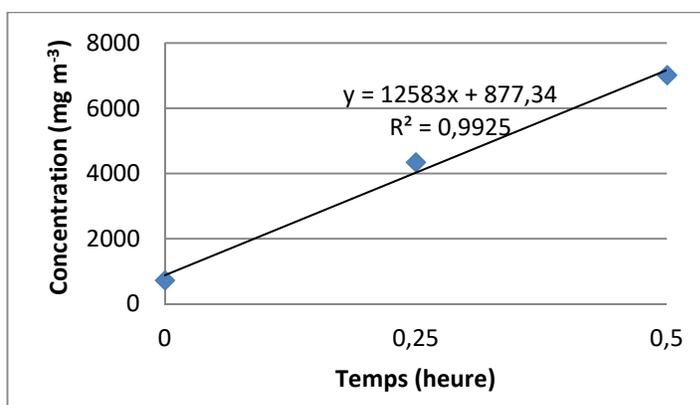
Les émissions cumulatives de N<sub>2</sub>O-N et de CO<sub>2</sub>-C après 45 jours ont été calculées et sont présentées au Tableau 23. Les différences significatives des traitements avec biocharbon par rapport aux sols témoins sans biocharbon (P < 0.01) sont indiquées.

Les émissions sont plus élevées dans le sol de type loam limoneux que dans le sable loameux. Les figures 12 à 15 montrent que les émissions ont été les plus importantes lors des premières journées d'incubation, puis se sont stabilisées jusqu'au jour 24. Par la suite, les traitements ont été irrigués la veille de chaque échantillonnage pour atteindre la teneur en eau initiale (80 % WFPS), ce qui a mené à une légère augmentation des émissions.

**Tableau 22 Exemple de calcul des émissions de CO<sub>2</sub> (µg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), mélange loam limoneux et biocharbon 5 (26-07-2016)**

	Unité	Date	t <sub>0</sub>	t <sub>15</sub>	T <sub>30</sub> (R1)	T <sub>30</sub> (R2)	T <sub>30</sub> (R3)	T <sub>30</sub> (Moy.)
Temps	h		0	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5
Concentration	ppmv	26-juill.	400	2 412	3 586	4 163	3 946	3 898
Concentration	mg m <sup>-3</sup>	26-juil	719,7	4 338,2	6 448,9	7 487,6	7 096,8	7 011,1
Volume	m <sup>3</sup>				0,00035	0,00035	0,00035	0,00035
Masse sèche	g				747	747	747	747
Pente		26-juil			11 458	13 536	12 754	12 583
Emissions de CO <sub>2</sub>	mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	26-juil			5,368	6,342	5,975	5,895
		27-juil			4,026	3,964	4,244	4,078
		28-juil			2,735	2,914	3,137	2,928
		04-août			0,959	0,770	0,864	0,864
		11-août			0,345	0,275	0,262	0,294
		18-août			0,046	0,000	0,000	0,000
		25-août			0,457	0,483	0,399	0,446
		01-sept			0,685	0,770	0,768	0,741
		09-sept			0,374	0,344	0,626	0,448

t : Temps de l'échantillonnage après la fermeture du pot; C : concentration; V : Volume d'air dans le pot; ms : masse de sol



**Figure 11 Pente de la régression Concentration de CO<sub>2</sub> vs Temps (moyenne, 26-07-2016)**

Les émissions de CO<sub>2</sub>-C dans les mélanges de sable loameux avec les biocharbons 2 à 6 sont significativement plus élevées que dans le sol témoin sans biocharbon (Tableau 23), ce qui confirme que le C du B1 produit à partir du bois à température élevée (644 °C) est le plus stable. L'émission de C sous forme de CO<sub>2</sub> (0,047 g kg<sup>-1</sup><sub>sol</sub>) représente seulement 0,2 % de l'apport total de C par le biocharbon (16,2 g kg<sup>-1</sup><sub>sol</sub>). Dans le loam limoneux, les émissions de CO<sub>2</sub>-C des traitements avec B1, B2 et B4 ne sont pas significativement plus élevées que celles du sol sans biocharbon. Le C émis par ces biocharbons représente 0,23, 0,25 et 0,27 % du C ajouté. L'hypothèse

selon laquelle les biocharbons avec un faible ratio  $O/C_{org}$  ( $<0,20$ ) et un faible ratio  $H/C_{org}$  ( $<0,7$ ) sont plus stables s'est donc avérée véridique pour B1 et B4. Le biocharbon 6 produit de la pyrolyse de la FSLP à faible température est celui qui a causé l'augmentation la plus importante des émissions de  $CO_2$ , qui sont significativement plus élevées que dans le sol témoin. L'émission de  $0,264 \text{ g C kg}^{-1}$  et  $0,32 \text{ g C kg}^{-1}$  dans le sable et le loam, respectivement, représente 2,40 % et 2,04 % du C total ajouté dans les deux sols, respectivement. Le ratio élevé en  $O/C_{org}$  (0,25) et  $H/C_{org}$  (0,94) explique la dégradation plus rapide de ce biocharbon. Lorsque la dose de biocharbon est doublée à 4 % (B2, B4 et B5), les émissions de  $CO_2$  augmentent légèrement par rapport au traitement avec l'ajout de 2 % du même biocharbon. Cependant, la proportion de C émis par rapport au C ajouté est réduite.

**Tableau 23 Émissions cumulatives de  $CO_2$  et de  $N_2O$  après 45 jours et propriétés des biocharbons**

Échantillon	$CO_2$ ( $mg \text{ CO}_2\text{-C kg}^{-1}_{sol}$ )		$N_2O$ ( $mg \text{ N}_2\text{O-N kg}^{-1}_{sol}$ )		Propriétés des biocharbons		
	Sable	Loam	Sable	Loam	$O/C_{org}$	$H/C_{org}$	C/N
B1 (2 %)	46,9	150,6	1,578*	1,23	0,13	0,58	482
B2 (2 %)	69,9*	151,1	0,662	1,61	0,23	0,81	508
B3 (2 %)	214,6*	233,6*	0,318	0,28*	0,26	0,89	105
B4 (2 %)	106,2*	159,6	0,179	1,20	0,09	0,51	99
B5 (2 %)	195,1*	259,7*	0,761	4,35*	0,23	0,89	12,1
B6 (2 %)	264,1*	334,9*	2,153*	14,42*	0,25	0,94	11,7
Témoin	13,8	109,6	0,072	2,27	--	--	--
B2 (4 %)	84,3	163,5	0,232	1,64	0,23	0,81	508
B4 (4 %)	131,4	308,4	0,058	0,07	0,09	0,51	99
B5 (4 %)	235,9	425,7	0,209	0,47	0,23	0,89	12,1

\*Différence significative ( $P < 0,01$ ) par rapport au témoin; Aucune analyse statistique n'a été réalisée sur les sols amendés avec 4 % de biocharbon.

L'ajout de biocharbon n'a pas eu le même effet sur les émissions de  $N_2O$  dans les deux types de sols. Dans le sable loameux, les émissions de  $N_2O$  ont augmenté par rapport au sol témoin, et la différence est significative pour B1 et B6. Cependant, les émissions ont tendance à diminuer lorsque la dose de biocharbon est doublée, et devient même plus faible que pour le témoin avec B4. Dans le loam limoneux, les biocharbons de la FSLP (B5 et B6) ont causé une augmentation significative ( $P < 0,01$ ) des émissions de  $N_2O$ , en raison du faible ratio C/N de ces biocharbons. Cependant, les biocharbons de bois et de panic érigé contribuent à diminuer les émissions de  $N_2O$ , la diminution étant significative ( $P < 0,01$ ) pour B3 produit à partir de panic érigé. L'essai réalisé avec une double dose de biocharbon démontre que les émissions de  $N_2O$  pourraient être presque éliminées avec B4 et réduites avec B5.

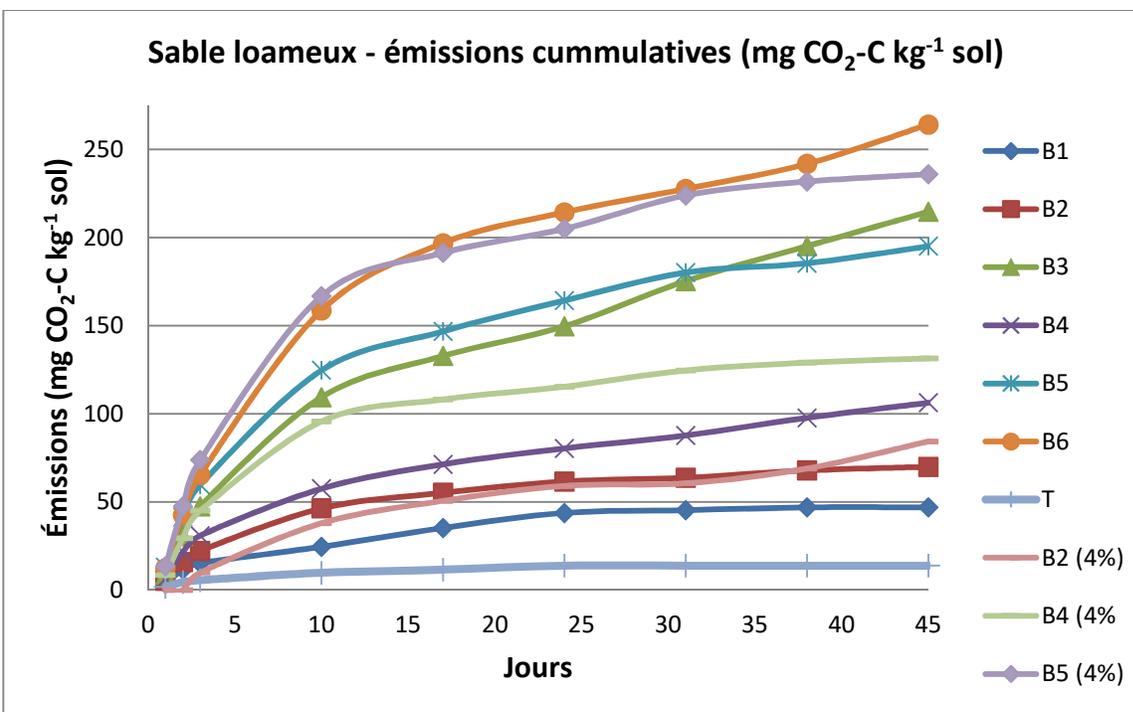


Figure 12 Émissions cummulative de CO<sub>2</sub>-C – sable loameux

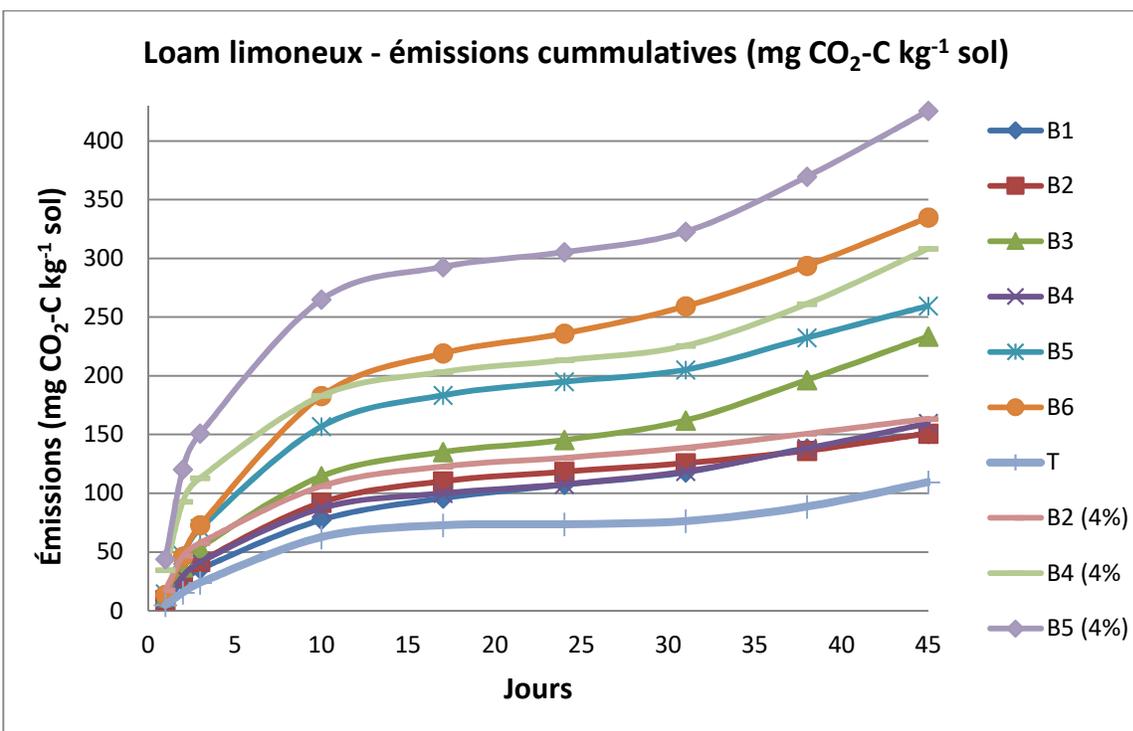


Figure 13 Émissions cummulative de CO<sub>2</sub>-C – loam limoneux

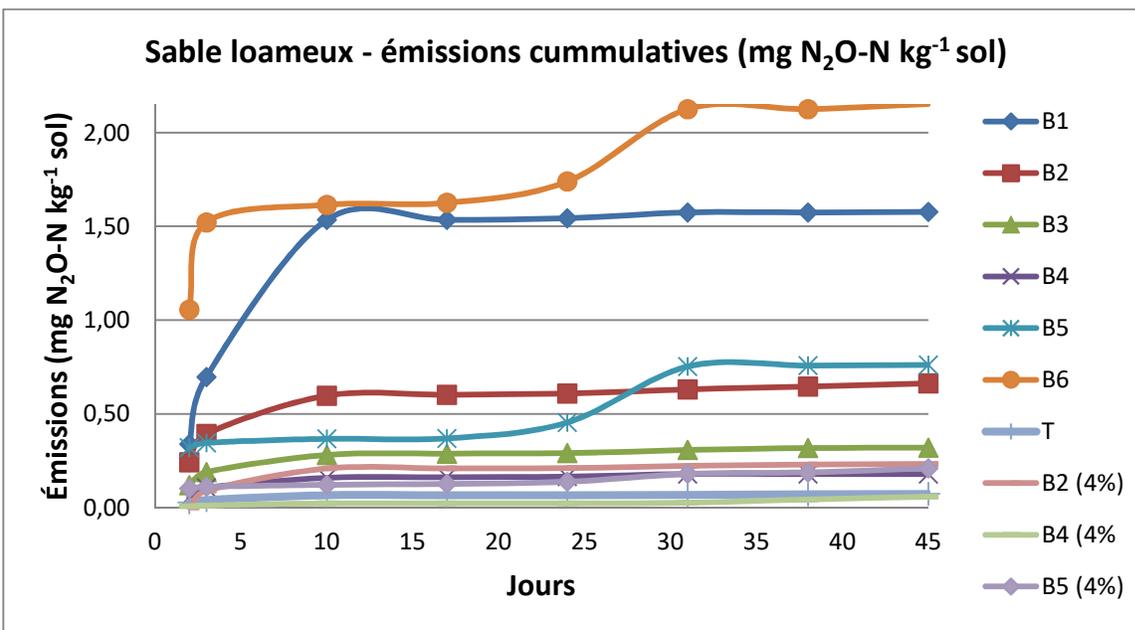


Figure 14 Émissions cummulative de N<sub>2</sub>O-N – sable loameux

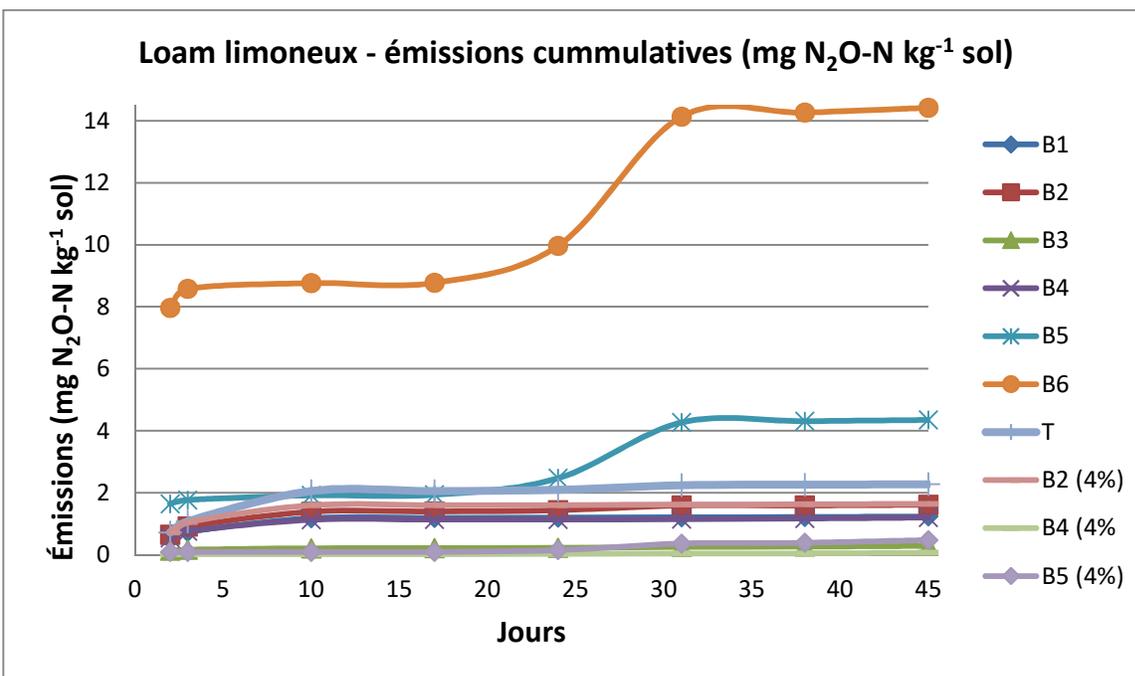


Figure 15 Émissions cummulative de N<sub>2</sub>O-N – loam limoneux

## 8.5 CONCLUSIONS

La valorisation du biocharbon coproduit lors de la production d'huile pyrolytique est un moyen d'améliorer le bilan environnemental de la pyrolyse de biomasses agricoles et forestières. Cette étude a permis de démontrer qu'il est possible de produire des biocharbons ayant les propriétés désirées pour réduire les émissions de GES du sol et séquestrer du carbone, tout en produisant une biohuile qui peut être utilisée pour substituer les combustibles fossiles. Les résultats obtenus ont aussi démontré que les propriétés du biocharbon sont dépendantes des conditions de pyrolyse et de la biomasse utilisée. Les modèles de surface de réponse développés ont permis de prédire adéquatement les propriétés des biocharbons produits dans les conditions de pyrolyse optimales pour chaque biomasse.

Des essais d'incubation des biocharbons en chambre de croissance ont permis d'étudier l'impact du biocharbon sur les émissions de GES et de valider son potentiel de séquestration de carbone. Les résultats ont démontré que les émissions de  $N_2O$  ont diminué seulement dans les mélanges de loam limoneux avec les biocharbon de bois de panic érigé, ces derniers ayant un ratio C/N élevé ( $> 30$ ). De ces biocharbons, celui produit à partir du bois à température élevée, ayant de faibles ratios  $O/C_{org}$  et  $H/C_{org}$  (0,13 et 0,58, respectivement), n'a pas causé d'augmentation significative des émissions de  $CO_2$  dans les deux types de sol, ce qui est un indicateur de la stabilité du carbone. Similairement, le biocharbon de panic érigé produit à haute température n'a eu aucun impact significatif sur les émissions de  $CO_2$  dans le loam limoneux, ses ratios  $O/C_{org}$  et  $H/C_{org}$  étant plus faible que 0,2 et 0,7, respectivement.

L'analyse des sols après incubation a démontré que certains biocharbons, principalement ceux produits à partir de la FSLP, permettent d'augmenter la teneur en N et en P dans le sol et pourraient être utilisés comme fertilisants. Cependant, une attention particulière doit être portée à la disponibilité de l'azote pour les plantes, car le biocharbon peut immobiliser l'azote. En effet, la teneur en  $NH_4^+$  et en  $NO_3^-$  a diminué dans plusieurs traitements avec du biocharbon par rapport au témoin. Enfin, l'ajout de biocharbon de la FSLP permet d'augmenter la teneur en P du sol. Cependant, seulement 20 à 25 % de ce P serait disponible pour la plante après l'incubation de 45 jours.

En conclusion, certains biocharbons produits à partir du bois et du panic érigé dans des conditions de pyrolyses prédéterminées permettent de réduire les émissions de  $N_2O$  et de séquestrer du carbone dans le sol. Cependant, des essais supplémentaires en présence de plantes et des essais au champ permettraient de confirmer les résultats obtenus dans cette étude et de valider l'hypothèse selon laquelle les biocharbons permettraient d'augmenter le rendement des cultures.

## 8.6 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le

ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les travaux ont été réalisés grâce à l'appui technique et scientifique de l'université de McGill et de l'IRDA.

## 8.7 RÉFÉRENCES

Ahmad, M., A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S.S. Lee and Y.S. Ok. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*. 99: 19-33.

Brassard, P., S. Godbout and V. Raghavan. 2016. Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*. 181: 484-497.

Bridgwater, A.V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 38: 68-94.

Budai, A.; Zimmerman, A. R.; Cowie, A. L.; Webber, J. B. W.; Singh, B. P.; Glaser, B.; Masiello, C. A.; Andersson, D.; Shields, F.; Lehmann, J.; Camps Arbestain, M.; Williams, M.; Sohi, S.; Joseph, S. Biochar Carbon Stability Test Method : An assessment of methods to determine biochar carbon stability. *Int. Biochar Initiat.* **2013**, 1–10.

Enders, A., K. Hanley, T. Whitman, S. Joseph and J. Lehmann. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114: 644-653.

Haefele, S.M., Y. Konboon, W. Wongboon, S. Amarante, A.A. Maarifat, E.M. Pfeiffer and C. Knoblauch. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*. 121: 430-440.

Hossain, M.K., V. Strezov, K.Y. Chan, A. Ziolkowski and P.F. Nelson. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal on Environmental Management*. 92: 223-228.

Inyang, M., B. Gao, P. Pullammanappallil, W. Ding and A.R. Zimmerman. 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*. 101: 8868-8872.

IPCC. 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Online: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html). Page consultée en janvier 2017.

Kookana, R.S., A.K. Sarmah, L. Van Zwieten, E. Krul and B. Singh. 2011. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Advances in Agronomy*. 112: 103-143.

Kuzyakov, Y., I. Bogomolova and B. Glaser. 2014. Biochar Stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific <sup>14</sup>C analysis. *Soil Biology & Biochemistry*. 70: 229-236.

Maguire R. O. et F. A. Agblevor. 2010. Biochar in agricultural systems. Virginia Cooperative Extension. Publication 442.311. En ligne : <http://pubs.ext.vt.edu/442/442-311/442-311.html>. Page consultée en janvier 2017.

Major, J. , M. Rondon, D. Molina, S. J. Riha, J. Lehmann. 2010a. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 333: 117–128.

Novak, J.M., W.J Busscher. W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., Niandou, M.A.S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal plain soil. *Soil Science* 174, 105–112.

Scott, D. S.; Piskorz, J.; Bergougnou, M. a.; Overend, R. P.; Graham, R. The role of temperature in the fast pyrolysis of cellulose and wood. *Ind. Eng. Chem. Res.* 1988, 27, 8–15.

Singh, B.P., A.L. Cowie and R.J. Smernik. 2012. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science and Technology*. 46: 11770-11778.

Tang, J., W. Zhu, R. Kookana and A. Katayama. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 116: 653-659.

Uchimyia, M., K.T. Klasson, L.H. Wartelle and I.M. Lima. 2011. Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 2. Copper desorption isotherms. *Chemosphere*, 82: 1438–1447.

Ussiri, D. et R. Lal. 2012. Soil emission of nitrous oxide and its mitigation. Springer Science & Business Media. 378 pages.

Verma, M., S. Godbout, S.K. Brar, O. Solomatnikova, S.P. Lemay and J.P. Larouche. 2012. Biofuel production from biomass by thermochemical conversion technologies. *International Journal of Chemical Engineering*. Article 542426. 18 pages.

Verma, M., N. M'hamdi, Z. Dkhili, S.K. Brar and K. Misra. 2014. Thermochemical Transformation of Agro-biomass into Biochar: Simultaneous Carbon Sequestration and Soil Amendment. *Biotransformation of Waste Biomass into High Value Biochemicals*. Springer Link. pp. 51-70.

Xie, T., K.R. Reddy, C. Wang, E. Yargicoglu and K. Spokas. 2015. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 45:9, 939-969.

## 9 ÉTAPE N° 6 – POTENTIEL DE VALORISATION DES GAZ PYROLYTIQUES

Étienne Le Roux<sup>1,2</sup>, Patrick Brassard<sup>2,3</sup>, Jean-Pierre Larouche<sup>2</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>2</sup>, Stéphane Godbout<sup>2</sup>,  
Simon Bernabé<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR)

<sup>2</sup> Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA)

<sup>3</sup> Université McGill, Faculté de l'agriculture et des sciences de l'environnement. Dép. de génie des bioressources

### 9.1 INTRODUCTION

#### 9.1.1 Les gaz non condensables (GNC)

Lors de la pyrolyse, il se forme une phase gazeuse composée des produits de dégradation des constituants de la biomasse, ainsi qu'une phase solide appelée biocharbon. La phase gazeuse est ensuite entraînée dans un système de condensation dans lequel la phase liquide, l'huile pyrolytique, se forme. En fin de procédé la phase gazeuse n'est plus constituée que de gaz non-condensables (GNC). L'étude de ces GNC fait l'objet de moins de recherches que les autres produits de pyrolyse. Cependant, pour comprendre les mécanismes de décomposition de la biomasse lors de la pyrolyse et donc la future composition de l'huile pyrolytique, il est utile d'étudier la phase gazeuse produite.

Pour des biomasses lignocellulosiques, les GNC produits par pyrolyse rapide sont composés principalement de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>) avec de plus faibles quantités de dihydrogène (H<sub>2</sub>) ainsi que de petites chaînes carbonées C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> (1, 2). Les rendements de ces différents gaz varient selon la nature de la biomasse, qu'elle soit agricole ou forestière, du fait d'une différence au niveau de la distribution des principaux constituants : hémicelluloses, cellulose, lignines, extractibles et cendres.

Les mécanismes de formation des GNC de pyrolyse ont été étudiés pour les hémicelluloses, la cellulose et les lignines (3). L'holocellulose (hémicelluloses + cellulose) est la source principale des oxydes de carbone. Du CO<sub>2</sub> et de CO sont formés respectivement majoritairement par les réactions primaires et secondaires de décomposition thermique de l'holocellulose. Le CO est influencé par la teneur en cellulose de la biomasse (présence de groupement carbonyle) alors que le CO<sub>2</sub> est influencé par celle des hémicelluloses (présence de groupement carboxyle).

Le CH<sub>4</sub> et le H<sub>2</sub> proviennent majoritairement de la décomposition thermique des lignines. Le CH<sub>4</sub> est libéré par la décomposition des groupements méthoxyles des lignines alors que le H<sub>2</sub> est produit par le craquage des chaînes carbonées des groupements aromatiques des lignines. Les mêmes hypothèses de formation des GNC se retrouvent dans une étude du comportement pyrolytique de différentes biomasses canadiennes (1).

### 9.1.2 Valorisation des GNC par la recirculation dans le système de pyrolyse

Depuis quelques années une valorisation particulière des GNC de pyrolyse se développe : la recirculation dans le système de pyrolyse. L'idée est de créer une atmosphère réactive, oxydante avec  $\text{CO}_2$  et réductrice avec  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$ , afin de modifier la qualité des produits de pyrolyse (4). L'effet provoqué par l'introduction séparée des principaux GNC de pyrolyse ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2$ ) dans un système pyrolytique a été étudié pour une biomasse agricole (des rafles de maïs) pyrolysée dans un réacteur à lit fluidisé (4). En comparant avec les résultats obtenus en atmosphère inerte ( $\text{N}_2$ ), les auteurs ont observé une diminution du rendement en huile pour une atmosphère de  $\text{CO}$  ainsi qu'une augmentation du rendement en GNC. Une atmosphère de  $\text{H}_2$  semble favoriser la proportion d'eau dans la phase liquide produite par pyrolyse alors qu'une atmosphère de  $\text{CO}_2$  diminuerait la production de biocharbon. Concernant les propriétés physico-chimiques de l'huile et sa composition, les auteurs ont principalement noté que les atmosphères réductrices,  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$ , ont permis d'augmenter le pouvoir calorifique de la biohuile en diminuant sa teneur en oxygène. De plus, les atmosphères  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$  ont eu pour effet d'augmenter les teneurs en acides et en cétones et de diminuer celles en composés phénoliques et en anhydrosucres dans la biohuile produite.

La recirculation des GNC permettrait également d'obtenir une biohuile avec de meilleures caractéristiques de combustion (5). Cela se traduit principalement par une plus faible teneur en composés oxygénés pour l'huile produite. Dans ce but, les auteurs ont modifié un réacteur de pyrolyse à lit fluidisé préexistant pour recycler les GNC produits en tant que gaz de fluidisation du milieu réactionnel (5,6). L'effet de désoxygénation de l'huile pyrolytique recherché par les auteurs a été particulièrement observé pour des échantillons de chêne et de panic érigé. Bien que son rendement s'en retrouve diminué, la biohuile produite en recirculation des GNC possède ainsi de meilleures propriétés physico-chimiques avec, par exemple, un plus fort pouvoir calorifique et une plus faible acidité. Pour les auteurs (5), les effets bénéfiques de la recirculation des GNC sur la qualité de l'huile pyrolytique sont comparables à ceux obtenus après une pyrolyse catalysée par zéolithe. Ainsi, l'avantage du recyclage de GNC est de ne pas offrir de surcoût comme ceux liés à l'achat du catalyseur et aux problèmes de désactivation et régénération de celui-ci.

Ce procédé de recirculation breveté (6) a ensuite été utilisé pour diverses biomasses telles que l'eucalyptus (7), le guayule (8) et un mélange de résidus de plastique agricole et de panic érigé (9). Une autre étude s'est intéressée au recyclage des GNC dans un procédé de pyrolyse à lit fluidisé, mais cette fois-ci en additionnant à un système de pyrolyse à craquage catalytique (10). Dans ce cas-ci, les auteurs précisent que les GNC agissent comme des co-réactifs au cours de la réaction de pyrolyse au côté des catalyseurs également présents. Une augmentation du pouvoir calorifique et du pH de l'huile a été notée lorsque les GNC étaient recirculés dans le système de pyrolyse. Selon les auteurs, ces améliorations peuvent être attribuées à l'action des GNC qui favorise des réactions de désoxygénation telles que la décarboxylation ou la décarbonylation.

Cette étude avait pour but d'étudier la recirculation des GNC comme moyen de valorisation des GNC produits par pyrolyse rapide de biomasse forestière (granules de bois) et agricole (fraction solide de lisier de porc et panic érigé).

## 9.2 MATERIELS ET METHODES

### 9.2.1 Essais et échantillonnage des gaz non-condensables de pyrolyse

Le dispositif expérimental des essais de pyrolyse est présenté à la section 4.3.4 de ce rapport. L'analyse des GNC a été effectuée seulement pour les essais avec le bois et le panic érigé. Les GNC ont été collectés dans un premier temps dans des sacs hermétiques de fabrication interne à l'IRDA, voir Figure 16. Le prélèvement s'est effectué au moyen d'une pompe double tête R Series Dia-Vac de la compagnie Air Dimensions. Seule une partie des GNC produits par la pyrolyse est prélevée, l'autre partie est rejetée dans l'atmosphère. L'échantillonnage a été réglé de façon à minimiser son impact sur les réactions de pyrolyse, et plus particulièrement sur le flux des vapeurs de pyrolyse à l'intérieur du procédé.



**Figure 16** Système de collecte des GNC de pyrolyse

Deux types de mesures ont été réalisés avec cette méthode indirecte :

- Un prélèvement continu des GNC pendant toute la durée de la pyrolyse dans un seul sac. Cela a permis d'avoir une mesure globale de la production des GNC ;
- Un prélèvement à intervalles réguliers dans plusieurs sacs séparés. Cette technique a permis d'étudier la formation des GNC au cours de la pyrolyse.

## 9.2.2 Analyse des GNC de pyrolyse

La composition des GNC de pyrolyse a été déterminée au moyen d'un chromatographe en phase gazeuse Varian 3600 GC équipé d'un détecteur à conductivité thermique (TCD) et d'un détecteur à ionisation de flamme (FID). Une fois injectés dans le GC, les gaz sont entraînés vers le système de séparation composé de deux colonnes de même dimension (3 m de longueur et 3,175 mm de diamètre intérieur) :

- Molsieve 5A, colonne remplie d'une zéolithe de type 5A et dotée d'un tamis moléculaire d'une granulométrie de 80/100 mesh ;
- Porapak Q, colonne remplie d'un polymère de type Q et dotée d'une granulométrie de 80/100 mesh.

Les GNC sont séparés en parallèle dans ces deux colonnes chauffées à une température de 100°C. Le temps total d'analyse est de 9 min. Le gaz vecteur est l'hélium (He) dont le débit a été fixé à 25 ml/min. La Molsieve 5A et la Porapak Q sont couplées respectivement au TCD et au FID. Le TCD permet de mesurer l'oxygène (O<sub>2</sub>), l'azote (N<sub>2</sub>), et le monoxyde de carbone (CO). Le dihydrogène (H<sub>2</sub>) est un GNC potentiel surtout pour des températures de pyrolyse élevées, mais sa sensibilité au détecteur TCD est la même que celle du gaz vecteur utilisé pendant l'analyse (13). La mesure de H<sub>2</sub> n'est donc pas possible. Le FID permet de mesurer le méthane (CH<sub>4</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), et l'éthène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). L'analyse des GNC est quantitative grâce à une calibration effectuée avec un mélange de gaz standard.

## 9.2.3 Valorisation des GNC de pyrolyse

La voie de valorisation choisie pour ce projet est la recirculation dans le système pyrolytique des GNC générés par la pyrolyse. L'hypothèse est de créer une atmosphère suffisamment réactive pour entraîner des modifications au niveau des réactions pyrolytiques dans le but final d'améliorer la qualité de l'huile produite. En s'appuyant sur la littérature (5, 10 et 26), des réactions de désoxygénations sont attendues. Cependant, il faut signaler que tous ces travaux de recirculation des GNC dans la littérature ont été effectués au moyen de réacteur à lit fluidisé. Cette technologie de réacteur de pyrolyse est très différente de celle d'un réacteur à vis et consomme beaucoup plus d'azote, jusqu'à cent fois plus, que ce dernier. Ces différences pourraient éventuellement influencer la réactivité de l'atmosphère de pyrolyse créée par la recirculation.

Une partie des gaz produits par pyrolyse est pompée au niveau du second condenseur pour ensuite être redistribué dans la trémie alimentation. L'arrivée des GNC recyclés se situe au même niveau que celle de l'azote. La même pompe R-Series a été utilisée pour les expériences de recyclage. En effet, comme la pompe est équipée d'une double tête, les prélèvements des GNC pour l'analyse GC et pour la recirculation peuvent se dérouler parallèlement. Les expériences de recyclage ont été menées pour le panic érigé et le bois dans les conditions de pyrolyse propres au point central de chaque biomasse. Les conditions opératoires du point central et du recyclage sont résumées dans le Tableau 24 pour le panic érigé et le bois respectivement. Pour préserver le temps de résidence des vapeurs de pyrolyse, le débit de gaz circulant dans le système de pyrolyse doit être

conservé. Ainsi, le débit de 3 L/min d'azote du point central est remplacé par 1 L/min de N<sub>2</sub> + 2 L/min de GNC. La recirculation a été lancée cinq minutes après le début des réactions de pyrolyse. Ce laps de temps a été jugé suffisant pour que la production des GNC se soit stabilisée.

**Tableau 24 Paramètres de pyrolyse du panic érigé et du bois pour la valorisation des GNC**

	Température de pyrolyse	Temps de résidence des solides	Débit de gaz
	(°C)	(s)	(L/min)
	<b>Panic érigé</b>		
Point central	525	90	3(N <sub>2</sub> )
Recyclage	525	90	1(N <sub>2</sub> ) + 2(GNC)
	<b>Bois</b>		
Point central	575	90	3(N <sub>2</sub> )
Recyclage	575	90	1(N <sub>2</sub> ) + 2(GNC)

## 9.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 9.3.1 Calculs des pourcentages volumiques des GNC

Les concentrations volumiques obtenues par GC-TCD/FID directement à la sortie du pyrolyseur sont des données brutes. Pour étudier les GNC réellement générés par la décomposition thermique des biomasses lignocellulosiques, il a fallu retravailler ces résultats (14). Ainsi les concentrations volumiques mesurées par la chromatographie gazeuse ont été recalculées. Pour illustrer la méthode de calcul employée, les résultats de la pyrolyse du bois à 650 °C, avec un temps de résidence des solides de 90 s et un débit d'azote de 1 L/min sont donnés en exemple (Tableau 25). D'abord, comme première hypothèse, l'O<sub>2</sub> n'est pas produit lors des réactions de pyrolyse. Son origine est extérieure au procédé de pyrolyse, il est atmosphérique. Les quantités mesurées proviennent de fuites qui ont pu se produire, soit pendant le prélèvement de l'échantillon, soit au cours du stockage du sac d'échantillonnage. Par conséquent, du fait de la composition atmosphérique, une partie de l'azote mesuré proviendrait également des fuites selon une proportion O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> de 21/78. Ses quantités de GNC n'étant pas issue du procédé de pyrolyse sont donc retirées des données brutes (Tableau 25) :

- Pour O<sub>2</sub>, 6,00 % vol
- Pour N<sub>2</sub>, 6,00 \* (78/21) = 22,26 %

**Tableau 25 Résultats bruts de l'analyse GC-TCD/FID des GNC mesurés lors de l'essai de pyrolyse du bois (650 °C, 90 s et 1 L<sub>N</sub>/min) en retirant l'influence atmosphérique**

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
	%	%	%	%	%	%	%
% vol brut	6,00	40,80	26,60	6,40	11,80	1,33	0,59
% vol retiré	6,00	22,29					
% vol brut sans l'influence atmosphérique	-	18,51	26,60	6,40	11,80	1,33	0,59

Comme deuxième hypothèse, le N<sub>2</sub> n'est pas considéré comme produit de pyrolyse de biomasse lignocellulosique (3). Ainsi seuls CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, et C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> seront considérés comme GNC produits par pyrolyse. Afin de connaître la distribution des GNC réellement produits par chaque expérience de pyrolyse, la contribution de N<sub>2</sub> est enlevée des données de concentrations volumiques puis le tout est remis sur 100, voir Tableau 26. Les résultats sont donc exprimés en pourcentage. C'est à partir de ces données qu'a été discutée l'influence des paramètres de pyrolyse (température, temps de résidence des solides, débit d'azote) par rapport à la formation des GNC de pyrolyse : CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, et C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

**Tableau 26 Résultats bruts de l'analyse GC-TCD/FID des GNC mesurés lors de l'essai de pyrolyse du bois (650 °C, 90 s et 1 L<sub>N</sub>/min) en retirant l'influence atmosphérique**

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
	%	%	%	%	%	%	%
% vol brut sans l'influence atmosphérique	-	18,51	26,60	6,40	11,8	1,33	0,59
% vol brut sans l'influence atmosphérique + sans N <sub>2</sub>	-	-	26,60	6,40	11,8	1,33	0,59
Distribution des GNC générés par la pyrolyse	-	-	56,94	13,70	25,26	2,85	1,25

### 9.3.2 Influence des paramètres de pyrolyse sur les GNC

Le Tableau 27 et le Tableau 28 regroupent les distributions calculées des GNC produits par pyrolyse, respectivement du panic érigé et du bois. Comme attendu, les principaux GNC générés par pyrolyse sont les oxydes de carbone, CO et CO<sub>2</sub>. Ils comptent pour plus de 80 % des GNC produits. Le méthane, CH<sub>4</sub>, est le troisième GNC d'importance produit lors de la pyrolyse du panic érigé et du bois. Les hydrocarbures légers, éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) et éthène (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), sont générés en quantité négligeable.

**Tableau 27 Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du panic érigé (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC)**

Essai	Température de pyrolyse (°C)	Temps de résidence des solides (s)	Débit d'azote (L/min)	Rendement (%)	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Rapport CO/CO <sub>2</sub>
16	450	60	3	16,4	40,02	6,81	51,63	0,83	0,71	0,78
17	525	60	1	17,9	43,39	6,83	47,73	1,08	0,97	0,91
18	525	90	3	21,2	41,75	7,65	48,56	0,98	1,06	0,86
19	600	90	1	31,9	50,10	12,85	33,15	2,32	1,57	1,51
20	600	120	3	32,9	46,95	13,24	36,12	2,17	1,52	1,30
21*	525	90	3	19,9	-	-	-	-	-	-
22	525	120	1	21,1	43,90	9,28	44,13	1,22	1,47	0,99
23	525	60	5	24,5	38,87	5,25	54,41	0,78	0,70	0,71
24	450	90	1	14,0	35,55	2,94	60,81	0,31	0,39	0,58
25	600	60	3	30,5	50,47	10,43	35,45	2,52	1,14	1,42
26	525	120	5	24,1	40,26	8,33	49,28	0,94	1,19	0,82
27	450	90	5	14,4	34,74	2,45	62,33	0,21	0,26	0,56
28	600	90	5	37,2	48,50	11,87	36,12	2,22	1,29	1,34
29	450	120	3	15,9	35,81	3,99	59,29	0,38	0,53	0,60
30	525	90	3	20,6	41,52	7,24	49,25	0,96	1,03	0,84

\*Échantillon pris pour un test de suivi de la composition

Pour l'ensemble des expériences de pyrolyse, le rapport CO/CO<sub>2</sub> a été calculé pour mieux visualiser la prédominance d'un oxyde de carbone par rapport à l'autre. D'après la littérature (16), la pyrolyse du panic érigé devrait produire plus de CO<sub>2</sub> que celle du bois, du fait d'une plus grande teneur en hémicelluloses par rapport aux biomasses forestières. Cependant, l'analyse chimique des biomasses montre une teneur identique en hémicelluloses pour le panic érigé et le bois (~30 %) (Tableau 2, section 4.4.1). Par conséquent, les différences observées entre les valeurs du rapport CO/CO<sub>2</sub> pour le panic érigé et le bois doivent être liées aux paramètres de pyrolyse telle que la température de pyrolyse. Ainsi, pour le panic érigé, le rapport est compris entre 0,6 et 0,9 pour toutes les pyrolyses excepté celles effectuées à la température la plus élevée (600 °C) qui donnent des valeurs supérieures à 1, à l'exception des pyrolyses effectuées à la température la plus faible (500 °C).

Les expériences de pyrolyse ont été menées selon un plan d'expérience de type Box Behnken dans le but de déterminer les paramètres de pyrolyse (la température de pyrolyse, le débit d'azote et le temps de résidence des solides) optimales pour la production en huile pyrolytique. La similitude des résultats pour les GNC aux points centraux répétés à trois reprises pour les deux séries d'expériences démontrent la fiabilité du protocole d'analyse.

**Tableau 28 Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du bois (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC)**

Essai	Température de pyrolyse (°C)	Temps de résidence des solides (s)	Débit d'azote (L/min)	Rendement (%)	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Rapport CO/CO <sub>2</sub>
31	575	120	1	19,6	50,76	12,36	34,09	1,66	1,13	1,49
32	500	90	5	14,2	41,66	3,24	54,62	0,27	0,21	0,76
33	650	90	5	33,1	54,33	13,23	28,56	2,79	1,09	1,90
34	575	60	1	28	46,29	8,56	43,51	0,90	0,73	1,06
35	575	90	3	18,8	48,38	10,08	39,51	1,25	0,78	1,22
36	575	120	5	25,2	52,00	10,54	35,13	1,49	0,84	1,48
37	650	60	3	25,2	53,13	12,34	31,39	2,14	0,99	1,69
38	500	60	3	10,9	41,22	2,63	55,69	0,26	0,20	0,74
39	650	90	1	29	56,94	13,70	25,26	2,85	1,26	2,25
40	575	90	3	18,2	48,22	10,01	39,69	1,29	0,79	1,21
41	650	120	3	33,3	57,84	13,87	24,01	3,10	1,18	2,41
42	575	60	5	20,5	44,97	6,92	46,95	0,66	0,50	0,96
43	500	90	1	13,2	43,84	6,90	48,06	0,56	0,65	0,91
44	575	90	3	17,8	48,35	10,12	39,36	1,34	0,83	1,23
45	500	120	3	12,4	43,28	6,74	48,90	0,54	0,55	0,89

Afin de préciser les influences des paramètres de pyrolyse au niveau de la distribution GNC générés par la pyrolyse rapide du bois et du panic érigé, une analyse statistique de type ANOVA a été pratiquée sur ces résultats présentés aux Tableaux 27 et 28. Ainsi, d'après l'analyse ANOVA, seule la température de pyrolyse a une influence significative sur la distribution des GNC pour les expériences de pyrolyse du panic érigé. Concernant le bois, les paramètres de température de pyrolyse, de temps de résidence des solides et de débit d'azote ont une influence significative sur la distribution des GNC, excepté pour CO et C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> où le débit d'azote n'a pas d'influence. Ces résultats confirment le fait que la température de pyrolyse est un des paramètres très influents dans le rendement des GNC. Il a été observé que pour des températures de pyrolyse inférieures à 500°C, les oxydes de carbone sont les constituants principaux des GNC (1). Plus la température augmente, plus les réactions secondaires de pyrolyse sont favorisées. Cela entraîne une augmentation de la production de CO, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub> et une diminution de CO<sub>2</sub> (1,19). L'évolution inverse de la production de CO et de CO<sub>2</sub> peut en partie s'expliquer par la réaction de Boudouard (20) dans laquelle le CO<sub>2</sub> réagit avec le biocharbon pour former du CO :  $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{C}(\text{s}) \rightarrow 2\text{CO}(\text{g})$ . Cela a pour conséquence de diminuer le rendement en biocharbon de la pyrolyse.

Cet effet de la température, déjà remarqué pour les valeurs d'un rapport CO/CO<sub>2</sub>, se confirme en comparant les résultats des essais de même temps de résidence et de même débit d'azote :

- Essais 27 et 28, 24 et 19, 29 et 20, 16 et 25 pour le panic érigé qui correspondent à une augmentation de température de 450 °C à 600 °C ;
- Essais 32 et 33, 38 et 37, 43 et 39, 45 et 41 pour le bois qui correspondent à une augmentation de température de 500 °C à 650 °C.

Dans tous les cas, les pourcentages de CO, ainsi que ceux des hydrocarbures légers (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> et C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) augmentent pendant que celui du CO<sub>2</sub> diminue avec l'augmentation de la température. Plus la température de pyrolyse est élevée, plus les réactions secondaires de l'holocellulose, formant principalement CO, et celles des lignines, formant CH<sub>4</sub>, sont favorisées (1, 21) au détriment des réactions primaires de dégradation thermique de l'holocellulose produisant majoritairement du CO<sub>2</sub>. A noter également que pour les essais concernés, une diminution du rendement en biocharbon est observée ce qui pourrait amener à penser que la réaction de Boudouard s'est produite.

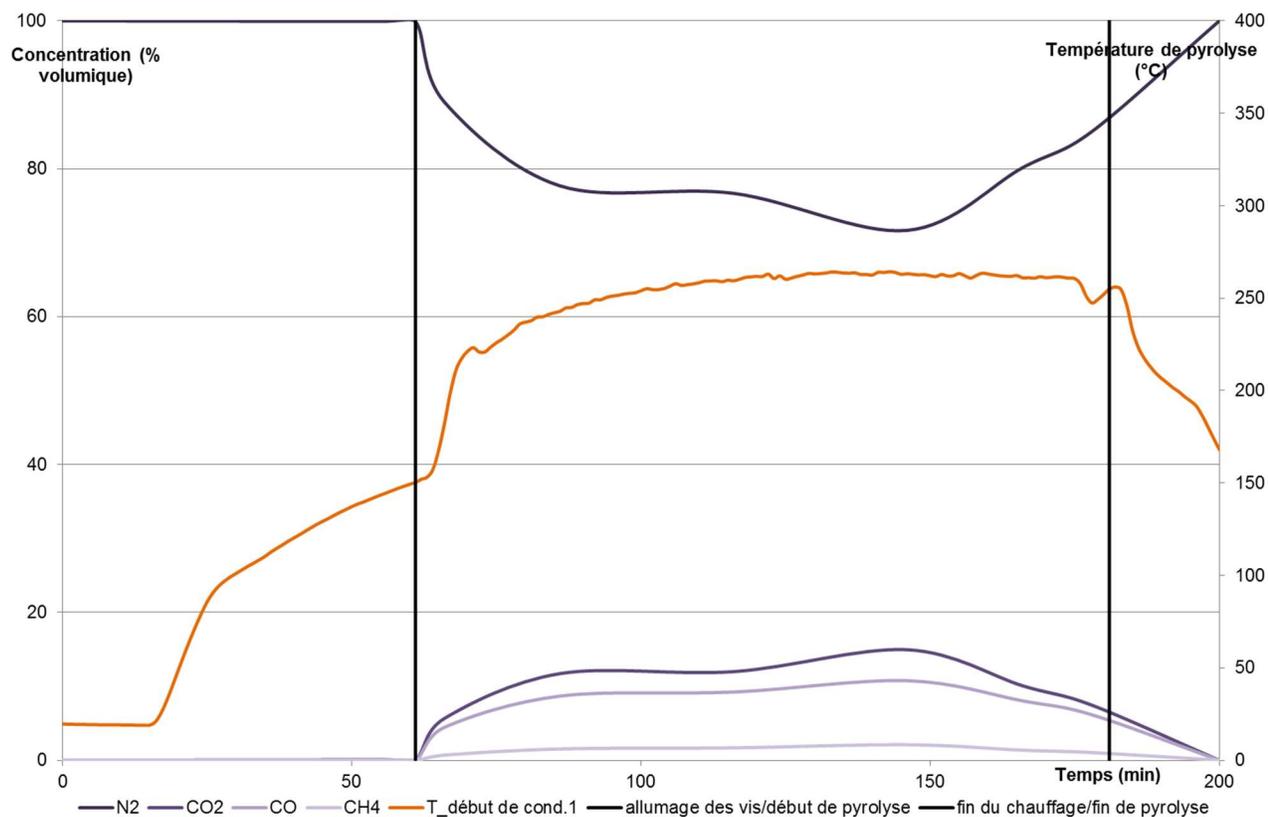
À propos du temps de résidence des solides, en suivant la même méthodologie de comparaison d'essais pour le bois, une augmentation du temps de résidence a pour effet de favoriser le CO et les hydrocarbures au détriment du CO<sub>2</sub>. L'hypothèse est qu'un rallongement du temps de résidence des solides promeut les réactions secondaires (21) au détriment des réactions primaires de pyrolyse.

Selon l'analyse ANOVA, le débit d'azote n'influence pas de la même manière les différents GNC générés par la pyrolyse du bois. Alors que l'analyse statistique confirme que le débit d'azote n'a pas d'effet significatif pour CO et C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, une augmentation du débit favorise la formation de CO<sub>2</sub> au détriment de CH<sub>4</sub> et C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Une hypothèse serait que plus le débit d'azote est élevé plus le temps de résidence des vapeurs de pyrolyse est faible. Cette réduction du temps de résidence aurait pour effet de favoriser les réactions primaires de pyrolyse au dépend des réactions secondaires. L'influence du débit d'azote est peut-être quelque moins discernable que celle des autres paramètres de pyrolyse, car une augmentation du débit d'azote de 1 L/min à 5 L/min dans le système de pyrolyse apporte un effet de dilution pour les GNC formés qui pourrait atténuer la lecture des résultats.

### 9.3.3 Suivi de la formation des GNC en fonction de la température au cours de la pyrolyse

L'essai 21 pour le panic érigé PE a été l'objet d'une étude de suivi de la formation des GNC au cours de la pyrolyse. La Figure 17 représente l'évolution de la concentration volumique de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO et CH<sub>4</sub> dans les GNC en fonction du temps de pyrolyse. Les hydrocarbures légers, éthane et éthène, ont été écartés de ce graphique, car leur pourcentage respectif ne dépassait pas les 0,5 % volumique. Un état d'équilibre de formation des GNC semble s'installer au cours de la pyrolyse. Ce phénomène avait déjà été observé pour des expériences de pyrolyse rapide de panic érigé et de chêne (5, 14). En effet, 10 à 15 min après l'allumage des vis, c'est-à-dire le début de l'entraînement de la biomasse dans le système pyrolytique, la concentration volumique des GNC atteint un palier. Il est situé autour de 77 %vol pour le N<sub>2</sub>, 12 %vol pour le CO<sub>2</sub>, 9 %vol pour le CO et 1,5 %vol

pour le CH<sub>4</sub>. Cet équilibre au niveau des GNC s'accompagne d'une stabilisation de la température des vapeurs de pyrolyse au niveau du début du premier condenseur, en l'occurrence autour de 263 °C. Ce régime d'équilibre constituerait la pyrolyse "réelle", c'est-à-dire un régime où les réactions de dégradation thermique de pyrolyse se dérouleraient au maximum de leurs capacités (5). Une répétition de cette expérience de suivi des GNC, toujours avec le panic érigé, a confirmé l'existence de cet état d'équilibre.



**Figure 17** Suivi de la composition des GNC au cours d'une pyrolyse, exemple de l'essai 21

### 9.3.4 Étude de la valorisation des GNC de pyrolyse

Les résultats des rendements et certaines propriétés physiques des essais de recirculation sont présentés au Tableau 29 pour le panic érigé et le bois. L'effet le plus remarquable de la recirculation des GNC est l'augmentation du rendement en huile surtout dans le cas du bois. Cette augmentation semble liée à la diminution du rendement en gaz. Ce phénomène a déjà été observé dans la littérature lors d'une étude sur la pyrolyse de sciures de bois dans un milieu composé de gaz de pyrolyse (27). Cependant, la grande variabilité des premiers résultats des propriétés physico-chimiques de l'huile (la teneur en eau, la teneur en insolubles dans le méthanol et le pH) produite en atmosphère inerte et celle produite lors de la recirculation ne permet pas d'apporter des conclusions sur l'effet de la recirculation des GNC. À première vue, l'apport en gaz réactifs dans

l'atmosphère de pyrolyse ne semble pas avoir eu d'effets sur les propriétés physico-chimiques de l'huile. Malgré une plus forte présence en gaz réducteurs (CO et CH<sub>4</sub>), la recirculation pour le bois semble aussi peu efficace que celle pour le panic érigé afin d'entraîner des modifications au niveau de l'huile pyrolytique.

**Tableau 29 Résultats de rendement de la pyrolyse de panic érigé et propriétés physico-chimiques des huiles pyrolytiques obtenues**

Essai	Température de pyrolyse	Temps de résidence des solides	Débit d'azote	Rendement			Propriétés physico-chimiques de la biohuile produite		
				Biohuile	Biochar	Gaz	Teneur en eau	Teneur en insolubles	pH
	(°C)	(s)	(L/min)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	
Pyrolyse de panic érigé									
18	525	90	3	58,3	20,2	21,2	36,24	0,8772	2,78
21	525	90	3	58,5	21,3	19,9	46,93	0,7212	2,72
30	525	90	3	59	20	20,6	47,88	0,6347	2,88
Rec.1	525	90	1+2	60,9	19,8	18,7	47,48	0,7381	2,9
Rec.2	525	90	1+2	60	19,9	19,7	40,80	1,0564	2,94
Pyrolyse du bois									
35	575	90	3	60	20,7	18,8	36,51	0,2579	2,08
40	575	90	3	60,6	20,6	18,2	34,30	0,3942	2,3
							7,02	0,2523	-
44	575	90	3	61,5	20,2	17,8	35,93	0,0999	2,64
Rec.1	575	90	1+2	62,9	22,3	14,6	34,65	0,1777	2,30
Rec.2	575	90	1+2	62,8	21,2	15,7	34,65	0,2639	2,46

Les résultats de la distribution de la composition chimique des GNC produits par pyrolyse ainsi que la masse de ces différents GNC sont présentés dans le Tableau 30 et Tableau 31. Concernant les GNC, la recirculation ne semble pas avoir la même influence pour le bois et le panic érigé. En effet, les oxydes de carbone évoluent de façon inverse. Ainsi, pour le bois, les pourcentages de CO et de CO<sub>2</sub> semblent respectivement diminuer et augmenter sous l'effet de la recirculation, alors que pour le panic érigé, les concentrations augmentent respectivement de 9,5 % et 11 % à 19 % et 21,5 % pour le CO et le CO<sub>2</sub>. Pour expliquer ces phénomènes, plusieurs hypothèses existent dans la littérature. Une atmosphère plus riche en CO, comme c'est le cas pour la recirculation lors de la pyrolyse du bois, favoriserait la désoxygénation de l'huile pyrolytique à travers la production de CO<sub>2</sub>. Une atmosphère plus riche en CO<sub>2</sub>, comme c'est le cas pour la recirculation lors de la pyrolyse du panic érigé, entraînerait une augmentation de la production de CO. Ces différences au niveau de la production de GNC devraient se traduire par des différences au niveau de la composition chimique des huiles pyrolytiques.

**Tableau 30 Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du panic érigé (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) et Masse calculée de ces GNC. Comparaison avec le rendement en gaz obtenu par différence**

Essai	Température de pyrolyse (°C)	Temps de résidence des solides (s)	Débit d'azote (L/min)	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Masse totale des GNC (g)	Rendement en gaz (%)
Distribution des GNC formés par pyrolyse (% sans N <sub>2</sub> )										
18	525	90	3	41,75	7,65	48,56	0,98	1,06		
21*	525	90	3							
30	525	90	3	41,52	7,24	49,25	0,96	1,03		
Rec.1	525	90	1+2	42,41	7,67	47,78	1,01	1,13		
Rec.2*	525	90	1+2							
Masse des GNC formés par pyrolyse (g)										
18	525	90	3	49,69	5,21	90,79	1,25	1,27	148,22	21,2
21*	525	90	3						-	19,9
30	525	90	3	50,17	5,01	93,50	1,24	1,25	151,17	20,6
Rec.1	525	90	1+2	47,11	4,88	83,39	1,21	1,25	137,84	18,7
Rec.2*	525	90	1+2							19,7

\*Échantillon pris pour un test de suivi de la composition

**Tableau 31 Distribution de la composition chimique des GNC produit par pyrolyse du bois (Résultats calculés à partir de l'analyse GC-TCD/FID des GNC) et Masse calculée de ces GNC. Comparaison avec le rendement en gaz obtenu par différence**

Essai	Température de pyrolyse (°C)	Temps de résidence des solides (s)	Débit d'azote (L/min)	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Masse totale des GNC (g)	Rendement en gaz (%)
Distribution des GNC formés par pyrolyse (% sans N <sub>2</sub> )										
35	525	90	3	48,38	10,08	39,51	1,25	0,78		
40	525	90	3	48,22	10,01	39,69	1,29	0,79		
44	525	90	3	48,35	10,12	39,36	1,34	0,83		
Rec.1	525	90	1+2	46,75	8,81	42,77	0,93	0,75		
Rec.2	525	90	1+2	47,04	9,26	41,79	1,10	0,81		
Masse des GNC formés par pyrolyse (g)										
35	525	90	3	47,33	5,65	60,73	1,31	0,76	115,79	18,8
40	525	90	3	46,37	5,52	59,97	1,33	0,76	113,95	18,2
44	525	90	3	45,71	5,48	58,46	1,36	0,78	111,79	17,8
Rec.1	525	90	1+2	36,79	3,97	52,88	0,78	0,59	95,01	14,6
Rec.2	525	90	1+2	45,70	5,15	63,79	1,15	0,79	116,59	15,7

## 9.4 CONCLUSIONS

L'étude des GNC générés par pyrolyse est une étape importante dans la compréhension des mécanismes de pyrolyse de biomasse lignocellulosique. Ce projet a surtout permis de défricher la voie. Il a donné un premier aperçu de ce qu'il est possible de faire (analyse, valorisation) au niveau des GNC de pyrolyse.

L'analyse des GNC de pyrolyse a été menée de façon à ne pas exposer l'appareillage GC-TCD/FID à une détérioration en raison des condensations imprévues de gaz de pyrolyse. C'est ainsi que le prélèvement des GNC de pyrolyse dans des sacs hermétique a été la méthode préconisée. L'analyse GC-TCD/FID a permis d'identifier les principaux GNC générés par la pyrolyse de biomasse lignocellulosique : CO, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.

La valorisation choisie pour ce projet a été la recirculation des GNC dans le système pyrolytique. Elle a été effectuée dans le but d'améliorer les propriétés de combustion de l'huile pyrolytique. Malheureusement, il semble, d'après les premiers résultats obtenus, que cette recirculation n'a eu que peu d'effet concernant les propriétés physico-chimiques de l'huile. Une analyse de la composition chimique des huiles issues des expériences de recirculation nous donneraient une meilleure information sur la réelle influence de cette valorisation. Cependant, il se peut que les résultats ne soient pas aussi marqués que ceux retrouvés dans la littérature, du fait d'une différence au niveau de la technologie de pyrolyse utilisée. Le système de pyrolyse à vis utilisé dans ce projet ne se prête peut-être pas aussi bien à ce genre de valorisation que les réacteurs à lits fluidisés répertoriés dans la littérature.

## 9.5 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les travaux ont été réalisés grâce à l'appui technique et scientifique de l'UQTR et de l'IRDA. Les auteurs remercient le stagiaire postdoctoral Étienne Le Roux et la stagiaire graduée Alice Marciniak pour leurs contributions à la réalisation de cette étape.

## 9.6 REFERENCES

1. Azargohar R, Jacobson KL, Powell EE, Dalai AK. Evaluation of properties of fast pyrolysis products obtained, from Canadian waste biomass. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2013;104(0):330–40.
2. Park Y-K, Yoo ML, Lee HW, Park SH, Jung S-C, Park S-S, et al. Effects of operation conditions on pyrolysis characteristics of agricultural residues. *Renew Energy*. 2012;42(0):125–30.

3. Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 2007;86(12–13):1781–8.
4. Zhang H, Xiao R, Wang D, He G, Shao S, Zhang J, et al. Biomass fast pyrolysis in a fluidized bed reactor under N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, {CH<sub>4</sub>} and {H<sub>2</sub>} atmospheres. *Bioresour Technol*. 2011;102(5):4258–64.
5. Mullen CA, Boateng AA, Goldberg NM. Production of Deoxygenated Biomass Fast Pyrolysis Oils via Product Gas Recycling. *Energy Fuels*. 2013;27(7):3867–74.
6. Mullen CA, Boateng AA, Goldberg NM. Methods for producing bio-oils. US20140238835A1, 2014. p. 16.
7. Pighinelli ALMT. b, Boateng AA., Mullen CA., Elkasabi Y. Evaluation of Brazilian biomasses as feedstocks for fuel production via fast pyrolysis. *Energy Sustain Dev*. 2014;21:42–50.
8. Boateng AA, Elkasabi Y, Mullen CA. Guayule (*Parthenium argentatum*) pyrolysis biorefining: Fuels and chemicals contributed from guayule leaves via tail gas reactive pyrolysis. *Fuel*. 2016;163:240–7.
9. Dorado C, Mullen CA, Boateng AA. Coprocessing of Agricultural Plastic Waste and Switchgrass via Tail Gas Reactive Pyrolysis. *Ind Eng Chem Res*. 2015;54(40):9887–93.
10. Mante OD, Agblevor FA, Oyama ST, McClung R. The influence of recycling non-condensable gases in the fractional catalytic pyrolysis of biomass. *Bioresour Technol*. 2012;111(0):482–90.
11. Godbout S, Palacios J, Brassard P, Pelletier F, Lemay S, Bussi eres D. Energy Production from Direct Combustion of Agricultural Biomass on Farm. In Manitoba, Canada; p. 10 p. Available from: [www.irda.qc.ca/fr/publications/energy-production-from-direct-combustion-of-agricultural-biomass-on-farm/](http://www.irda.qc.ca/fr/publications/energy-production-from-direct-combustion-of-agricultural-biomass-on-farm/)
12. Godbout S, Larouche J-P, Pelletier F, Solomatnikova O, Verma M, Zegan D. Système et procédé pour un traitement thermochimique de matière contenant des composés organiques. Google Patents; 2012. Available from: <http://www.google.sh/patents/WO2012126096A1?cl=fr>
13. Li D, Briens C, Berruti F. Oxidative pyrolysis of kraft lignin in a bubbling fluidized bed reactor with air. *Biomass Bioenergy*. 2015;76:96–107.
14. Brown JN. Development of a lab-scale auger reactor for biomass fast pyrolysis and process optimization using response surface methodology. [Ames, Iowa]: Iowa State University; 2009.

15. Goorts MP. Applying gas chromatography to analyze the composition and tar content of the product gas of a biomass gasifier. Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering Division Thermofluids Engineering Section Combustion Technology; 2008 p. 83. Report No.: WVT 2008.24.
16. Oasmaa A, Solantausta Y, Arpiainen V, Kuoppala E, Sipilä K. Fast pyrolysis bio-oils from wood and agricultural residues. *Energy Fuels*. 2010;24(2):1380–8.
17. AFNOR. Amendements organiques et supports de culture - Caractérisation de la matière organique par fractionnement biochimique et estimation de sa stabilité biologique. AFNOR; Report No.: XP U44-162.
18. Goering H., Van Soest PJ. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service; 1970 p. 24. Report No.: Handbook No. 379, 1-20.
19. Fu P, Yi W, Bai X, Li Z, Hu S, Xiang J. Effect of temperature on gas composition and char structural features of pyrolyzed agricultural residues. *Bioresour Technol*. 2011;102(17):8211–9.
20. Waheed QMK, Nahil MA, Williams PT. Pyrolysis of waste biomass: investigation of fast pyrolysis and slow pyrolysis process conditions on product yield and gas composition. *J ENERGY Inst*. 2013 Nov;86(4):233–41.
21. Yang Y, Brammer JG, Mahmood ASN, Hornung A. Intermediate pyrolysis of biomass energy pellets for producing sustainable liquid, gaseous and solid fuels. *Bioresour Technol*. 2014 Oct;169:794–9.
22. Materazzi S, Risoluti R. Evolved Gas Analysis by Mass Spectrometry. *Appl Spectrosc Rev*. 2014 Nov 17;49(8):635–65.
23. Worasuwannarak N, Sonobe T, Tanthapanichakoon W. Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. *J Anal Appl PYROLYSIS*. 2007 Mar;78(2):265–71.
24. Chen Y, Duan J, Luo Y. Investigation of agricultural residues pyrolysis behavior under inert and oxidative conditions. *J Anal Appl PYROLYSIS*. 2008 Nov;83(2):165–74.
25. Isabel Moreno A, Font R. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved. *J Anal Appl PYROLYSIS*. 2015 May;113:464–73.
26. Heo HS, Park HJ, Yim J-H, Sohn JM, Park J, Kim S-S, et al. Influence of operation variables on fast pyrolysis of *Miscanthus sinensis* var. *purpurascens*. *Bioresour Technol*. 2010 May;101(10):3672–7.
27. Chang C-C, Wu S-R, Lin C-C, Wan H-P, Lee H-T. Fast Pyrolysis of Biomass in Pyrolysis Gas: Fractionation of Pyrolysis Vapors Using a Spray of Bio-oil. *ENERGY FUELS*. 2012 May;26(5):2962–7.

## 10 CONCLUSIONS GLOBALES

---

Cette étude a permis d'acquérir de nouvelles connaissances pour pouvoir produire par pyrolyse rapide un combustible issu de résidus agricoles pouvant être utilisés dans les systèmes de chauffage au mazout n° 2 actuellement en place dans les entreprises serricoles. En effet, le secteur agricole peut fournir des biomasses et des résidus pouvant être transformés et utilisés à des fins énergétiques, incluant particulièrement le chauffage des serres. Les résultats de ce projet ont démontré que la pyrolyse est une technique efficace pour transformer ces biomasses et résidus en huile ayant une valeur énergétique et environnementale intéressante.

Le pyrolyseur conçu par l'équipe de l'IRDA et du CRIQ a produit avec succès des huiles à partir de biomasses variées, tels que le bois (résidu ligneux), le panic érigé (culture énergétique herbacée) et la fraction solide de lisier de porc (biomasse d'origine animale). De l'huile a aussi été produite à partir de la pyrolyse de plastique, notamment du polyéthylène à basse densité, démontrant ainsi la possibilité de valoriser les résidus plastiques agricoles et démontrant la polyvalence du procédé.

Ces huiles ont le potentiel d'être utilisées comme carburant dans les systèmes de chauffage des serres afin de substituer le mazout n° 2, résultant en des impacts économiques et environnementaux bénéfiques selon le scénario. Toutefois, afin de minimiser les coûts et les travaux d'adaptation du système de chauffage, l'huile pyrolytique peut être mélangée avec du diesel ou du biodiesel (à un ratio de 30 % ou moins d'huile). Dans ce cas, l'ajout d'un surfactant est nécessaire afin de stabiliser l'émulsion. Dans ce projet, une émulsion stable et homogène a été obtenue à partir de 1 % de surfactant, 5 % de méthanol, 30 % d'huile pyrolytique et le reste étant du carburant diesel, suivi d'un traitement de brassage.

Le potentiel de valorisation des coproduits de la pyrolyse, soit le biocharbon et les gaz non condensés, a aussi été évalué. Cette étude a permis de démontrer qu'il est possible de produire des biocharbons ayant les propriétés désirées pour réduire les émissions de GES du sol et séquestrer du carbone, tout en produisant une biohuile qui peut être utilisée pour substituer les combustibles fossiles. Cependant, la valorisation des gaz par recirculation dans le procédé de pyrolyse n'est pas une voie appropriée pour améliorer la qualité de l'huile. Alors, d'autres voies de valorisation devraient être étudiées.

Plusieurs défis demeurent avant d'arriver à une large production et utilisation de l'huile pyrolytique. Premièrement, un procédé spécifique pour améliorer la qualité de l'huile doit être développé afin d'atteindre toutes les exigences de qualité en vigueur. Deuxièmement, les paramètres de combustion devront être optimisés, et par le fait même, les ajustements exacts à faire aux systèmes de chauffage des serres devront être revus. Cependant, l'amélioration de la qualité de l'huile pourrait grandement faciliter ces ajustements. Enfin, le prix cible à atteindre de 0,34 à 0,69 \$/L auquel l'huile pyrolytique devrait être vendue afin de rivaliser avec le mazout n° 2 sera un défi, mais pourrait, selon l'avis des auteurs, être atteint lors de la mise en échelle.

Annexe 2 Documentation en appui des activités de transfert et de diffusion scientifique et de diffusion et de transfert aux utilisateurs

- La documentation en appui des **Activités de transfert et de diffusion scientifique** se trouve dans le dossier annexe intitulé « Annexe 1 - Activités de transfert et de diffusion scientifique »
- La documentation en appui des **Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs** se trouve dans le dossier annexe intitulé « Annexe 2 - Activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs »