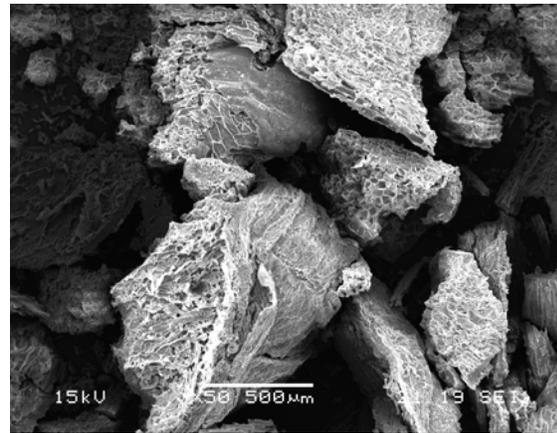
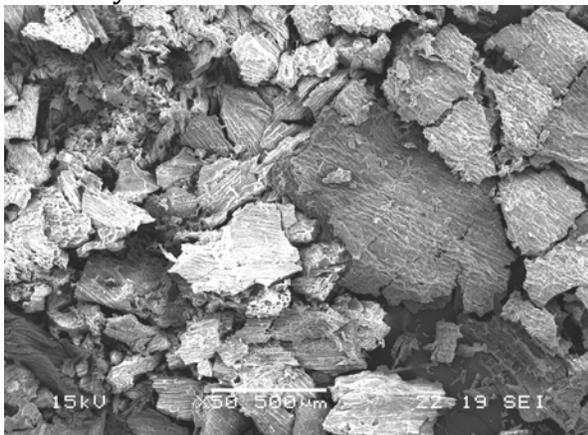




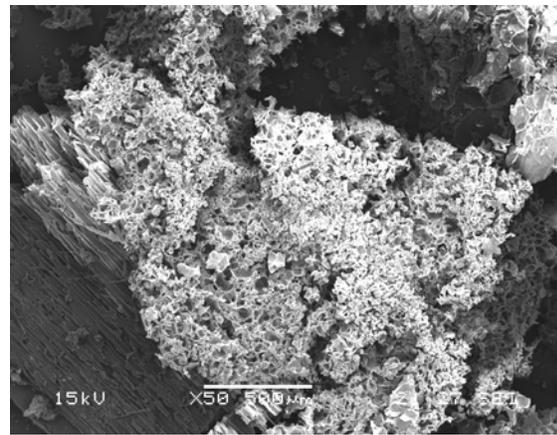
Bois recyclé



Chou



Poireau



Pomme de terre

Analyse des propriétés de biochars

Rapport présenté par

The Char Team



UNIVERSITÉ
LAVAL

25 avril 2015



Correspondance :

Suzanne Allaire
2480 Boulevard Hochelaga
Pavillon Envirotron
Université Laval
Québec, QC, Canada G1V 0A6
E-mail : suzanne.allaire@fsaa.ulaval.ca

Photos : Agnès Lejeune

© 2015

Référence :

Allaire SE, Lange SF, Auclair IK, Quinche M, Greffard L (The Char Team) (2015) Rapport : Analyse des propriétés de biochars. CRMR-2015-SA-3. Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables, Université Laval, Québec, Canada, 61 p.

Table des matières

1. INTRODUCTION	6
2. OBJECTIFS	8
3. MATERIEL ET METHODES	14
3.1. MATIERES ORGANIQUES RESIDUELLES (MOR) ET METHODES DE PYROLYSE	14
3.1.1. BOIS DUR	14
3.1.2. BOIS MOU RESINEUX	14
3.1.3. BOIS MOU NON RESINEUX	15
3.1.4. PLANTES NON LIGNEUSES	16
3.1.5. AUTRES MATIERES	16
3.2. METHODES D'ANALYSE DES BIOCHARS	21
3.2.1. PROPRIETES GENERALES	21
3.2.2. PROPRIETES PHYSIQUES	22
3.2.3. PROPRIETES CHIMIQUES	23
3.2.4. PROPRIETES BIOLOGIQUES	24
4. RESULTATS ET DISCUSSION	31
4.1. PROPRIETES GENERALES	31
4.2. PROPRIETES PHYSIQUES	32
4.3. PROPRIETES CHIMIQUES	41
4.4. PROPRIETES BIOLOGIQUES	49
5. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS	50
6. REFERENCES	59

Liste des tableaux

TABLEAU 1. MEMBRES DU 'CHAR TEAM' AYANT PARTICIPE A CE RAPPORT	10
TABLEAU 2. INSTANCES FOURNISSEURS DE BIOCHARS OU AYANT DONNE ACCES A LEUR PYROLYSEUR	11
TABLEAU 3. ORGANISMES AYANT FOURNI DE LA MATIERE PREMIERE A PYROLYSER	12
TABLEAU 4. ORGANISMES AYANT CONTRIBUE AU PROJET EN OFFRANT DES SUBVENTIONS OU DES COMPLEMENTS DE BOURSES D'ETUDE AUX ETUDIANTS	13
TABLEAU 5. MATIERES ORGANIQUES RESIDUELLES (MOR) ET METHODES DE PYROLYSE DES BIOCHARS	18
TABLEAU 6. QUELQUES PHOTOS DES BIOCHARS	20
TABLEAU 7. METHODES D'ANALYSE DE LA COMPOSITION GENERALE DES BIOCHARS	26
TABLEAU 8. METHODES D'ANALYSE DES PROPRIETES PHYSIQUES	27
TABLEAU 9. METHODES D'ANALYSE DES PROPRIETES CHIMIQUES	28
TABLEAU 10. METHODES D'ANALYSE DES PROPRIETES BIOLOGIQUES	29
TABLEAU 11. COMPARAISON DES ANALYSES DE CE RAPPORT AVEC CELLES DES ANALYSES SUGGEREES PAR L'IBI (2012) ET L'EBC (2012)	30
TABLEAU 12. PROPRIETES GENERALES DES BIOCHARS	34
TABLEAU 13. PROPRIETES PHYSIQUES GENERALES DES BIOCHARS	36
TABLEAU 14. PROPRIETES PHYSIQUES DES BIOCHARS RELATIVES A L'EAU	37
TABLEAU 15. PROPRIETES PHYSIQUES DES BIOCHARS RELATIVES A LA GRANULOMETRIE ET A LA RESISTANCE A L'ABRASION	39
TABLEAU 16. PROPRIETES CHIMIQUES DES BIOCHARS RELATIVES A L'ACIDITE	43
TABLEAU 17. TENEURS EN CERTAINS ELEMENTS TOTAUX	44
TABLEAU 18. TENEURS DES BIOCHARS EN MACRO ET MICROELEMENTS ECHANGEABLES (RELATIVES AUX PLANTES)	45
TABLEAU 19. TENEURS EN MACRO ET MICROELEMENTS SOLUBLES DES BIOCHARS (RELATIVES AU TRANSPORT DE CONTAMINANTS ET AUX PLANTES)	46
TABLEAU 20. TENEURS TOTALES DES BIOCHARS EN METAUX ET METALLOÏDES (RELATIVES A L'ENVIRONNEMENT)	47
TABLEAU 21. TENEURS TOTALES DES BIOCHARS EN METAUX ET METALLOÏDES (RELATIVES A L'ENVIRONNEMENT) (SUITE)	48
TABLEAU 22. TENEURS EN HAP DE CERTAINS BIOCHARS (RELATIVES A L'ENVIRONNEMENT)	49
TABLEAU 23. PROPORTIONS DES VERS DE TERRE QUI ONT CHOISI LE MELANGE DE TERRE CONTENANT 10% COMPARATIVEMENT A LA TERRE A JARDIN SEULE, ET CONTENANT 50% DE BIOCHAR AINSI QUE LE TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE APRES 3 ET 6 JOURS DANS LES MEMES MELANGES (RELATIVES A LEUR TOXICITE)	51
TABLEAU 24. RESUME DES PROPRIETES GENERALES ET PHYSIQUES DES BIOCHARS	56
TABLEAU 25. RESUME DES PROPRIETES CHIMIQUES DES BIOCHARS	57
TABLEAU 26. RESUME DES PROPRIETES BIOLOGIQUES DES BIOCHARS	58

Liste des figures

FIGURE 1. TENEURS RELATIVES EN DIFFERENTS TYPES DE CARBONE DANS LES BIOCHARS (VERT : C_{ORG} , ROUGE : C_{INORG} , BLEU : C_{GRAPH})	35
FIGURE 2. REMONTEE CAPILLAIRE DES DIFFERENTS BIOCHARS SOUS UNE TENSION DE -0.05 M (TRES MOUILLE) A -1.5 M (HUMIDE)	38
FIGURE 3. COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES DES DIFFERENTS BIOCHARS	40
FIGURE 4. PREFERENCE DES VERS DE TERRE POUR LA TERRE A JARDIN SEULE (0% DE BIOCHAR) OU LA TERRE CONTENANT 10% VOLUMIQUE DE BIOCHAR	52
FIGURE 5. PREFERENCE DES VERS DE TERRE POUR LA TERRE A JARDIN SEULE (0% DE BIOCHAR) OU LA TERRE CONTENANT 50% DE BIOCHAR	53
FIGURE 6. TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE A JARDIN AMENDEE DE 10% DE BIOCHAR	54
FIGURE 7. TAUX DE GERMINATION DE LA LAITUE DANS LA TERRE A JARDIN AMENDEE DE 50% DE BIOCHAR	55

Analyse des propriétés de biochars

1. Introduction

Le Québec produit des millions de tonnes de matières organiques résiduelles (MOR) chaque année provenant de l'industrie forestière, de l'industrie agricole, de l'industrie alimentaire, des municipalités et de l'industrie de la construction-démolition. On y compte entre autre annuellement 5.8 M de tonnes de MOR commerciales et urbaines. Une partie des MOR agricoles est recyclée directement au champ ou suite à un compostage. Des millions de tonnes ne peuvent pas être réutilisées sur place par risque de recirculation de pathogènes ou parce que le compostage n'est pas toujours facile, entre autre pour les résidus très humides. L'industrie alimentaire produit des MOR souvent trop humides pour le compostage. De plus, cette dernière ne possède généralement pas les terres pour épandre ces résidus. Dans certains cas, elle est obligée d'envoyer ses MOR aux villes pour que celles-ci les gèrent.

Les municipalités tant qu'à elles, particulièrement les grandes villes, produisent des millions de tonnes de MOR parfois contaminés et parfois propres. On parle, entre autre, de résidus verts comme ceux de la tonte des gazons et les feuilles mortes qui pourraient être compostées, mais dont les sacs de plastique et les impuretés causent différents problèmes, sans compter les grands volumes générés par le nettoyage des rues, des drains, des égouts, de l'émondage et des fosses septiques. Les sacs de vidange des citoyens, les bacs bruns de recyclage (qui sont rares au Québec), les centres de tri et les éco-centres sont d'autres voies de récupérations de MOR. Ces centres produisent aussi plusieurs millions de tonnes de résidus annuellement. Tout comme l'industrie alimentaire, elles aussi ne possèdent pas nécessairement les surfaces d'épandages suffisantes.

D'une part, environ 60% de ces 5.8 M t urbaines générées annuellement au Québec ne sont pas réutilisées, de cela seulement 21% de ces MOR putrescibles a été recyclé en 2012 (Recyc-Québec, 2014). D'autre part, la Politique québécoise de gestion des MOR et le plan d'action du MAPAQ visent à réduire l'enfouissement de ces MOR de 60% d'ici 2015 (objectif non atteint) et de 100% d'ici 2020. Cette politique cherche à trouver la meilleure finalité environnementale pour ces résidus. Ceci pousse les municipalités à chercher différentes voies de valorisation pour leurs MOR. L'industrie a grandement amélioré son efficacité en fabriquant toute une panoplie de produits à partir de ce qu'on considérait autrefois comme résidus (ex : sciure, copeaux). La récolte forestière québécoise génère plus de 6.4 M t de résidus (CEF, 2015). L'industrie forestière québécoise cherche à utiliser la totalité de la biomasse qui sort de ses forêts. Il reste encore beaucoup de résidus comme les branches et les écorces qui peuvent, ensemble, représenter jusqu'à 25% de l'arbre. On parle donc de millions de tonnes de résidus produites annuellement ou trop peu sont recyclées. Il faudra faire beaucoup mieux pour les exploiter.

Ces MOR pourraient servir d'énergie, mais le marché québécois de l'énergie est extrêmement compétitif à cause des subventions à l'hydro-électricité qui résulte en de très faible coût au kilowatt. Le compostage offre une autre voie de recyclage, mais ne constitue pas la meilleure option pour plusieurs MOR. De plus, le marché peut absorber seulement une partie des volumes potentiels de compost. De plus, le compostage émet une grande quantité de GES. Si l'infrastructure de compostage est bien installée et de grande dimension, les biogaz peuvent être captés et vendus. Par contre, il faut de grandes installations pour que le captage des biogaz soit économiquement rentable. La majorité de ces MOR doit donc trouver d'autres voies de valorisation.

La méthanisation des MOR peut produire une grande quantité de biogaz pouvant servir d'énergie. Ce procédé produit, par contre, un grand volume de résidus, le digestat, constitué entre 50 et 90% du volume initial des MOR (Agrinova, 2013). En tant que matière résiduelle fertilisante (MRF), le digestat est

soumis à la réglementation du MDDEFP (Agrinova, 2013). La qualité du digestat, déterminé par son innocuité, sa teneur en nutriment et sa stabilité, fluctue selon le procédé, les traitements, l'entreposage et le type d'intrant (Agrinova, 2013). Il faut traiter et valoriser ces digestats qui contiennent plus de 70% d'eau. La phase liquide est souvent séparée de la phase solide. Puis, le solide est traité par déshydratation, compostage et granulation ou par pyrolyse pour former du biochar.

Outre l'enfouissement direct, le compostage et la méthanisation, l'incinération sert souvent d'alternative au traitement des déchets. Il élimine un grand volume de déchet, mais coûte cher. L'énergie qui sort de l'incinérateur peut servir à chauffer des édifices. Avec le coût de l'énergie actuel au Québec, cette option ne semble pas encore rentable. De plus, la très grande variation de la demande, en partie due aux saisons, cause un problème dans le contrôle de la distribution. Par ailleurs, on ne valorise pas facilement les cendres. La pyrolyse est, par conséquent, une alternative intéressante à l'enfouissement direct, au compostage, à la méthanisation et à l'incinération. Le biochar est une alternative à ces procédés en surmontant les limitations de celui-ci comme la réduction des émissions de gaz (réutilisation dans les systèmes de pyrolyse), la stabilisation du matériel transformé, la facilité de manutention, de transport et de distribution. Il offre la possibilité d'économie d'échelle et de transformation de MOR contaminées aux plastiques et contaminants organiques. De plus, ce matériel stérile élimine les risques biologiques.

La pyrolyse (on inclut ici la torréfaction dans les méthodes de pyrolyse) consiste à carboniser en présence ou en quantité minime d'oxygène entre 275°C et 1000°C des résidus qui contiennent du carbone. La matière organique est ainsi transformée thermo-chimiquement pour produire des molécules à plus haute densité énergétique comme des huiles, des gaz et un solide (du biochar) (Sohi et coll., 2010). La proportion d'huile, de gaz et de biochar varie selon la méthode de pyrolyse et la matière première. Les huiles peuvent servir à la production d'énergie et de produits transformés comme des biopesticides. Au Québec, les gaz sont souvent récupérés afin de sécher les MOR avant de les pyrolyser. Du fait que les chars peuvent être produits à partir de différentes sources de matières (ex : pneus, plastiques, MOR variées) et selon divers procédés, la pyrolyse ouvre la porte à toutes sortes de MOR, même celles contenant des sacs de plastique.

Le biochar, aussi appelé «biocharbon végétal ou char», se différencie du charbon minéral dit «charbon» du fait qu'il ne s'agit pas de matériel fossile, mais est fabriqué à partir de biomasse actuelle (CQVB, 2011). Le biochar est un matériel initialement stérile, hautement densifié contenant une grande proportion de carbone qui se présente sous forme de fragments noirs, légers, poreux, sec et facile à transporter.

D'une part, plusieurs instances sont intéressées par le biochar. On pense, entre autre, aux générateurs, transformateurs, gestionnaires de MOR, vendeurs de produits agro-environnementaux, producteurs agricoles et firmes conseils, c'est à dire tous les membres de la filière des déchets. De plus, il y a un engouement pour le biochar en agriculture et en environnement puisqu'on lui confère des propriétés intéressantes pour la croissance végétale, la séquestration du carbone et l'interception de contaminants (Verheijen et coll., 2010, Montanarella, 2013). L'enjeu est donc de plusieurs millions de dollars.

Cet engouement provient du fait que les biochars amélioreraient la fertilité, la teneur en eau et la vie microbienne des sols, augmentant du coup la productivité végétale qu'elle soit en sols agricoles, en sols artificiels ou en sols dégradés (Allaire et Lange, 2013). Ces 'vertus' semblent toutefois varier selon leurs propriétés, le type de sol, l'espèce végétale et le climat. Pour en faire le meilleur usage, on doit bien connaître les propriétés de ces biochars en lien avec la matière première et la méthode de pyrolyse ayant servie à les fabriquer.

D'autre part, la jeune filière de biochar montre un besoin indéniable d'outils pour l'ensemble de ses acteurs et pour son implantation stable au Québec. Afin que les présents freins de ce marché comme la réglementation, les subventions aux autres modes de transformation des MOR et le manque de

connaissances sur le biochar ne soient plus limitant au développement de cette filière, elle doit bien connaître les propriétés des biochars.

Un des outils de base, pour aider au développement de cette filière, concerne la caractérisation des biochars, la connaissance de la variabilité de leurs propriétés en fonction de tous les paramètres des MOR, de leur préparation et de la méthode de pyrolyse. Ces informations serviront tant aux fabricants, qu'aux générateurs et aux consommateurs de biochar, que ce soit afin de connaître comment obtenir les propriétés désirées, de sélectionner la technologie adéquate pour la transformation de MOR, ou de sélectionner le biochar approprié pour des besoins spécifiques. Bien que la pyrolyse existe depuis des millénaires, on ne maîtrise pas encore totalement la méthodologie pour fabriquer des biochars avec des caractéristiques spécifiques pour des applications spécifiques.

On présente brièvement dans ce rapport : l'équipe de travail (Tableau 1) soit ceux qui ont analysé du biochar et écrit ce rapport, qui ont fourni de la matière à pyrolyser ou du biochar, donné accès à leur pyrolyseur (Tableaux 2 et 3) ou qui ont supporté financièrement le projet d'une façon ou d'une autre (Tableau 4). L'équipe remercie tous ces gens et ces instances pour leur contribution à ce projet.

La grande partie du rapport décrit les méthodes d'analyse et les propriétés de plusieurs biochars, principalement d'origines québécoises, fabriqués de MOR variées et plusieurs méthodes de pyrolyse. Certaines analyses sont en cours présentement. Par conséquent, les analyses statistiques ne sont pas encore complétées. On ne discutera donc pas de comparaisons statistiques ni de corrélations dans ce rapport. Les valeurs sont simplement fournies sans être discutées. Les comparaisons et la discussion viendront dans le cadre d'articles scientifiques, de mémoires et de thèses de doctorat. Il est aussi question de méthodes d'analyse des biochars. On décrit ces méthodes et on les compare avec celles reconnues par différents organismes.

2. Objectifs

L'objectif de l'analyse comparative des propriétés physico-bio-chimiques des biochars est de créer une banque de données de référence afin d'aider les générateurs de MOR, les gestionnaires de ces MOR, le fabricant de pyrolyseurs et de biochar et les utilisateurs-transformateurs de biochars. L'analyse fournit les informations pour comprendre ultérieurement comment on peut obtenir le produit désiré avec les caractéristiques désirées et une matière résiduelle précise pour un objectif d'utilisation spécifique. Le but étant de limiter les essais et erreurs et faciliter les étapes de mise en valeur et de mise en marché du biochar pour des applications agricoles (ex : terreaux) et environnementales.

L'équipe s'est aussi donné comme sous-objectif, de définir les méthodes d'analyse des biochars. Puisque ce type de produit est apparu sur le marché il y a peu de temps comme amendement aux sols agricoles, aux sols contaminés, pour la remise en état de sites dégradés, ou encore dans les terreaux, les méthodes d'analyse ne sont pas encore officialisées ni au Canada ni au Québec.

Certaines méthodes d'analyse du biochar, utilisées dans la littérature, proviennent des analyses standard soit de l'industrie du charbon et de l'énergie, de l'industrie des engrais ou d'amendements agricoles. Certaines analyses sont influencées par des méthodes légales de déclaration obligatoires pour la protection de l'environnement comme dans le cas des métaux lourds. L'International Biochar Initiative (IBI) a suggéré des méthodes d'analyse des biochars (IBI, 2012), mais la liste est incomplète pour certaines utilisations, dont pour la croissance végétale. L'European Biochar Certificate (EBC, 2012) en a aussi suggéré. Elles sont parfois similaires, parfois différentes de l'IBI. De plus, certaines sont parfois obligatoires par l'IBI, alors qu'elles ne le sont pas pour

l'EBC et vice versa. Le choix des méthodes obligatoires est aussi teinté par l'industrie du charbon et de l'énergie, quoique souvent inutiles pour des applications agricoles et environnementales. L'EBC requière aussi des déclarations obligatoires de contenus en contaminants (ex : métaux lourds, HAP) en vues d'applications environnementales, mais avec des normes et des méthodes différentes basées sur les règles européennes en vigueur plutôt que nord-américaines. Au Canada, le Bureau de Normalisation du Québec (BNQ) détient ses accréditations du Conseil canadien des normes (CCN) pour l'élaboration de normes et de certifications. Ces accréditations de calibre international garantissent que les procédures et les méthodes du BNQ sont en conformité avec les règles de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et de l'Organisation mondiale du commerce (OMC). Les MOR sont aussi assujettis à la législation du gouvernement fédéral canadien et du gouvernement provincial québécois que ce soient pour des applications en champs agricoles, pour la production d'aliments ou l'application sur des sites dégradés, mais elles diffèrent des normes de l'IBI et de l'EBC. Pour l'instant, le Québec et le Canada n'ont pas de normes propres au biochar.

L'équipe devait donc, comme sous-objectif, sélectionner les méthodes les plus appropriées pour l'analyse de biochars pour des contextes agricoles (effets sur les propriétés des sols et la croissance végétale) et environnementaux tout en prenant en considération les normes gouvernementales du Québec pour la protection de l'environnement. Un autre sous-objectif concerne la classification de ces biochars selon les normes de l'IBI, de l'EBC et du Québec afin de mieux connaître les opportunités d'utilisation des biochars québécois ici et ailleurs. Cette classification sera discutée dans le cadre d'un autre document.

Ce rapport est préliminaire puisqu'il fournit des données sur une partie seulement des biochars de différents projets de notre équipe. D'autres biochars viennent d'arriver au laboratoire alors que d'autres sont en production afin d'élargir la gamme de conditions de pyrolyse et de matières premières. Suite à leur analyse et aux méthodes statistiques multivariées, on pourra cartographier les propriétés selon les méthodes de pyrolyse et la matière première. La classification des biochars fera partie d'une autre thèse, alors que les effets sur la croissance végétale d'une variété de plantes et de conditions feront partie de différents mémoires et thèses ainsi que d'articles. L'équipe (Char Team) compte actuellement 4 étudiants au doctorat et deux étudiants à la maîtrise sur le biochar.

Tableau 1. Membres du ‘Char Team’ ayant participé à ce rapport

Photo	Nom	Courriel	Titre et association	Degré	Responsabilité	Spécialité
	Suzanne E. Allaire	suzanne.allaire@fsaa.ulaval.ca	Professeure titulaire, Université Laval	Ph.D.	Directrice du laboratoire de physique des sols	Physique des sols et des matériaux poreux
	Sébastien F. Lange	sebastien.lange@fsaa.ulaval.ca	Professionnel de recherche, Université Laval	Ph.D	Gestion du laboratoire de physique et hydrodynamique des sols	Physique des sols
	Melissa Quinche Gonzalez	melissa.quinche-gonzalez.1@ulaval.ca	Étudiante au doctorat, Université Laval	M.Sc.	Intérêt sur les biochars en agro-environnement	Agro-environnement
	Isabelle K. Auclair	isabelle.auclair@uqtr.ca	Doctorate, Université du Québec à Trois-Rivières	M.Sc.	Pyrolyse de résidus maraîchers et de bois recyclés et caractérisation de ces biochars	Argoforesterie
	Laurence Greffard	laurence.greffard.1@ulaval.ca	Étudiante à la maîtrise, Université Laval	Biologiste	Revégétalisation de sites miniers avec biochars	Biologie

Tableau 2. Instances fournisseurs de biochars ou ayant donné accès à leur pyrolyseur

Instance	Logo	Personne contact	Courriel	Site internet
Abri-Tech		Peter Fransham, Vice-Président	pfransham@abritechinc.com	http://www.advbiorefineryinc.ca/
Airex		Sylvain Bertrand, Directeur général	sbertrand@airexenergy.com	http://www.airex-energy.com/fr/abr
Award Rubber		Michel Kaine, Président	info@awardrubber.com	http://www.awardrubber.com/
Biopterre		Benoît Cayer, Directeur général	benoit.cayer@biopterre.com	http://www.biopterre.com/
Charbons Basques		David Huard, Directeur	davidhuard@globetrotter.net	http://charbonbasques.com/
Innofibre		Jean-Philippe Jacques, Chercheur	jean.philippe.jacques@cegeptr.qc.ca	http://innofibre.ca/
IRDA		Stéphane Godbout, Chercheur	stephane.godbout@irda.qc.ca	http://www.irda.qc.ca/fr/
Maple Leaf		Simon Langlois, Directeur	simon.langlois@mapleleafcharcoal.com	http://mapleleafcharcoal.com/fr/
Pyrovac		Christian Roy, Propriétaire	croy@pyrovac.com	http://www.canbio.ca/events/quebec/presentations/roy_f.pdf
Wood Ash Industries Inc.		Brian Coghlan, Propriétaire	admin@woodash.net	http://www.woodash.net

Tableau 3. Organismes ayant fourni de la matière première à pyrolyser

Organisme	Logo	Contact	Site internet	Matière première
Biopterre		info@biopterre.com	http://www.biopterre.com/ m/	Résidus forestiers, phragmite
BRQ Fibres et broyures		info@boisrecycle.com	http://www.brq.ca/	Bois recyclé
Centre de Tri Co-Éco		info@co-eco.org	http://co-eco.org/	Branches, écorces
Ferme Norvie	Aucun	norvie30@hotmail.com	Aucun	Résidus de pommes de terre
Ferme Massibec		louis@massibec.com	http://www.massibec.com/ m/	Résidus de choux
Ferme du Domaine 2000		fermedudomaine@fermedudomaine.com	http://www.fermedudomaine.com/ aine.com/	Résidus de poireaux

Tableau 4. Organismes ayant contribué au projet en offrant des subventions ou des compléments de bourses d'étude aux étudiants

Abréviation	Nom complet	Site internet	Contribution
Airex	Airex Energy	http://www.airex-energy.com/fr/abr	1. Bourse MITACS de stage en entreprise (Isabelle Auclair), 2. Participation au projet CRIBIQ
Biopterre	Biopterre	http://www.biopterre.com/	1. Bourse BMP de doctorat (Melissa Quinche), stage en entreprise
CJLP	Centre Jardin Lac Pelletier	http://www.cjlp.ca/	1. Bourse MITACS de stage en entreprise (Laurence Greffard), 2. Participation au projet CRSNG-RDC du CTRI
CRIBIQ	Consortium de Recherche et d'Innovations en Bioprocédés Industriels au Québec	http://www.cribiq.qc.ca/fr/	Programme de subvention
CRIEB	Chaire de recherche industrielle en environnement et biotechnologie	http://www.uqtr.ca/CRIEB	Frais d'analyse
CRSNG	Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada	http://www.nserc-crsng.gc.ca/index_fra.asp	1. Bourse BMP de doctorat (Melissa Quinche), stage en entreprise, 2. Programme de subvention à la découverte, 3. Programme de partenariat ENGAGE
CTRI	Centre de Traitement des Résidus Industriels	http://www.ctri.qc.ca/	Bourse MITACS de stage en entreprise (Laurence Greffard)
FOGRN BC	Programme de formation en gestion des ressources naturelles du Bassin du Congo	http://www.projetfogrn-bc.ulaval.ca/pefogrn_bc_ulaval/	Bourse de doctorat (Boris Merlain Djousse)
FQRNT	Fonds Québécois de Recherche Nature et Technologie	http://www.frqnt.gouv.qc.ca/	1. Bourse MITACS de doctorat (Isabelle Auclair) et maîtrise (Laurence Greffard), bourse BMP (Melissa Quinche) stage en entreprise
Innofibre	Centre d'innovation de produits celluloseux	http://innofibre.ca/	Bourse MITACS de stage en entreprise (Isabelle Auclair)
MAPAQ	Ministère des pêcheries et de l'alimentation du Québec	http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr	Programme Innov'Action
MITACS	MITACS	https://www.mitacs.ca/fr	Bourse MITACS de stage en entreprise (Laurence Greffard, Isabelle Auclair)
U. Laval	Laboratoire de physique des sols	http://www.fsaa.ulaval.ca	Bourse pour étudiants au baccalauréat pour travaux d'analyse

Les biochars proviennent de différents projets de recherche subventionnés ou pas. Seules des parties de certaines subventions ont été utilisées pour l'analyse des biochars dans chacun de ces projets, tous ayant comme objet l'utilisation de biochars pour des problématiques agricoles, horticoles ou environnementales. Les biochars ont la plupart été fournis gratuitement par les entreprises.

3. Matériel et méthodes

3.1. Matières organiques résiduelles (MOR) et méthodes de pyrolyse

Ce rapport traite des propriétés physiques, chimiques et biologiques de plusieurs biochars. Cinq grandes catégories de MOR ont été utilisées pour ces biochars. Soit qu'ils sont fabriqués à partir de bois dur, de bois mou résineux et non résineux, à partir MOR non ligneuses ou à partir d'autres résidus contenant du carbone, C (ex : lisier de porc) (Tableau 5).

3.1.1. Bois dur

Les biochars de bois dur incluent les résidus de la charbonnerie Maple Leaf et Charbons Basques (Tableau 5). Ces charbonnerie brûlent de grandes bûches principalement de bois d'érable (*Acer* sp.) et de merisier (*Betula alleghaniensis*, aussi appelé bouleau jaune) pendant environ 2 jours (Tableau 5) sans oxygène dans des fours par lots (fours de type Missouri). Le bois qui entre dans le pyrolyseur de Maple Leaf contient entre 30 et 52 % d'humidité relative, dépendamment de la saison de production et de l'inventaire de bois disponible. Maple Leaf pyrolyse à environ 350°C sous une certaine pression et recycle les gaz. Leurs fours peuvent produire environ 15 tonnes par jour. Comparativement, Charbons Basques produit à une haute température légèrement plus élevée pendant plus de deux jours (Tableau 5). Le sous-produit de fabrication de ces deux charbonneries sert à fabriquer le biochar. Les résidus sont tamisés après pyrolyse. Les trois biochars de Charbons Basques (BQ-érable-350-1 ou 2 ou 3) diffèrent principalement dans leur granulométrie et la date de fabrication. Cette technologie produit principalement des biochars comparativement à des huiles, mais le ratio dépend de la vitesse de pyrolyse et du cycle de désorption de l'eau avant l'étape de carbonisation. Les écorces font partie intégrante de ces biochars.

Deux autres biochars (Award-Érable-700 et Nuchar-1000) sont faits à partir de résidus de bois dur de l'industrie forestière. Le Award-Érable-700 est le biochar résultant d'une pyrolyse d'écorces d'érable plutôt que de bûches et ce, à 700°C pendant seulement 20 minutes. Le Nuchar-1000 (MeadWestVaco (MWV SN-20) a été acheté de Buyactivatedcharcoal.com. Il est, par la suite, activé à 1000°C. Aucune autre information n'a été donnée sur le procédé de fabrication. Le Nuchar-1000 est le seul charbon activé parmi les biochars de bois dur dans ce rapport. Cette gamme de biochars offre l'occasion de comparer la température de fabrication sur les propriétés des biochars pour une même espèce végétale (Tableau 5).

Des écorces d'eucalyptus (B-Eu-300) ont aussi été transformées au Cameroun dans un pyrolyseur par lot vertical de petite taille fabriqué manuellement avec cheminée et recyclage des gaz. Un peu d'air entre dans le système. La température varie aux alentours de 300°C et la pyrolyse durait de 4 à 6 heures. Les écorces ont été prises à la surface du sol ce qui les a contaminé un peu avec du sol.

3.1.2. Bois mou résineux

Plusieurs biochars ont été fabriqués avec des résidus de bois mou comme des branches, des écorces ou de la sciure de différentes espèces d'épinettes (*Picea* sp.) et de sapins (*Abies* sp.). Ces biochars proviennent de trois compagnies, soit Biopterre avec la technologie d'Abri-Tech, d'Airex Energy ou de Pyrovac avec leur propre technologie. La technologie d'Abri-Tech fonctionne par lot

de fabrication d'environ 2000 kg à l'heure. Elle a été conçue pour produire principalement des huiles pyrolytiques dans une proportion d'environ 65% d'huile et 20% de biochar. Le biochar étant un sous-produit et non le but final, lequel peut contenir des volatils. La biomasse est thermiquement transformée au contact de billes d'acier chauffées pour augmenter la gazéification de la matière. La biomasse doit avoir une granulométrie très fine (inférieur à 2 mm et au maximum 20 mm) pour être pyrolysée pendant seulement quelques minutes à une température variant entre 425 et 550°C, selon les besoins et ce, sans oxygène sous une pression d'environ 1 cm. Il n'y a donc pas besoin de tamisage après pyrolyse. La différence entre les biochars de résineux provenant de la technologie Arbi-Tech réside dans la température de pyrolyse soit 400 ou 500°C (BP-Rés-400 et BP-Rés-500) et la matière première.

Airex Énergie, qui a développé la technologie CarbonFX, est un essaimage de l'entreprise Airex Industries, spécialisé en dépoussiérage industriel. Son pyrolyseur consiste en un réacteur à lit cyclonique développé pour des particules fines comme la sciure de bois. La biomasse est pyrolysée à environ 427°C en quelques secondes, à pression atmosphérique avec une fine entrée d'air et un transfert de chaleur par forte turbulence. Il peut produire environ 250 kg de biochar à l'heure en continu. Il produit principalement du biochar et très peu d'huile. La différence entre les biochars d'Airex, dans ce rapport, provient surtout de la température de fabrication pour les deux premiers (Airex-Résineux 427 ou 454) et du type de MOR pour les deux fabriqués de bois de recyclage provenant de BRQ (Airex-BR-315 ou 426).

Dans le cas de Pyrovac, la matière première (bois mou résineux) qui entre doit avoir entre 10 et 15% d'humidité massique. Il peut accueillir une panoplie de produits ayant une granulométrie comprise entre 0.4 et 40 mm et qui peut être hétérogène. Le temps de pyrolyse est de 15 minutes sous une pression de 20 KPa à une température de 475°C avec une petite entrée d'air, donc légèrement oxygéné. Le pyrolyseur peut produire 3000 kg de biochar à l'heure. La différence entre les deux biochars de Pyrovac réfère à l'entreposage. Le premier (Pyr-résineux-475) a été entreposé pendant environ 2 ans dans un entrepôt et un contenant étanche. Le deuxième (Pyr-résineux-475-vieilli) a été entreposé à l'extérieur dans des super sacs (polypropylène) peu étanches et a été tamisée à 2 mm.

De plus, il était important de tester des résidus de bois de recyclage qui forment de grands volumes peu exploités à cause de leur contenu potentiel en différents agents toxiques. Dans ce rapport, on a testé deux biochars de bois de démolition et de construction composés grossièrement de 90% d'épinettes et 10% de bois dur différents (I-BS-300-24 et 48). Il faut noter que les résidus de l'industrie forestière forment un très grand volume et sont entreposés de façon relativement homogène relatif aux espèces. On peut donc obtenir des biochars d'espèces de bois déterminées. Par contre, les résidus de l'industrie de la construction-démolition offrent surtout des mélanges d'espèces de bois de différentes utilisations, donc moins homogènes. Étant donné que les charpentes et les murs des constructions québécoises sont principalement fabriqués d'épinettes, une grande partie du bois de démolition du Québec contient cette espèce. La technologie utilisée pour ces biochars de bois recyclé consiste en un four par lot où un peu d'air est entré. Étant de vieux bois de démolition, leur teneur en eau massique initiale était basse soit moins de 10%. Ce bois a été broyé et tamisé pour obtenir une granulométrie de 0-2 mm. Une pression atmosphérique est maintenue dans le four. La biomasse est restée dans le four 24 ou 48 heures à 300°C. Ni les gaz ni les huiles ont été recyclés. Deux biochars de bois recyclé ont aussi été obtenus par la technologie d'Airex.

3.1.3. Bois mou non résineux

D'autres biochars ont aussi fabriqué à partir de bois mou non résineux (Tableau 6), soit du feuillu comme du bouleau blanc (*Betula papyrifera*) et du saule (*Salix sp.*) en utilisant l'arbre en

entier, les branches ou les écorces (BP-Saule-x, BP-Feuille-x). Biopterre en a produit plusieurs avec la technologie Abri-Tech. La différence entre ces biochars provient de la matière première (branches vs écorces ou arbres entiers) et ce, pour deux températures de fabrication. On s'est aussi procuré du charbon activé de résidus de noix de Coco (Coco-1000) vendu par Buyactivatedcharcoal.com. Le biochar Coco-1000, le seul biochar activé de ce rapport dans la catégorie des bois mous, est produit par pyrolyse lente à 300°C avec une augmentation de température de 5° par minute soit environ 1 heure d'augmentation. Il est par la suite activé à 1000°C. Les autres conditions de fabrication n'ont pas été communiquées.

3.1.4. Plantes non ligneuses

Le phragmite (*Phragmites australis* sp.) est une plante très envahissante et cause beaucoup de problèmes au Québec. Pour le contrôler, on a tendance à le faucher. Les résidus de fauche de plantes ont été utilisés pour tester le potentiel de ce produit pour la fabrication de biochar. La fauche a été effectuée au printemps sur les tiges de l'année précédente, donc séchées pendant l'hiver. Ces résidus ont été déchiquetés à 8 mm, mais non séchés, puis pyrolysés avec la technologie Abri-Tech à 400 ou 500°C pour former deux biochars (BP-phragmite-400 ou 500).

De plus, certains résidus de productions maraîchères ne peuvent pas facilement être recyclés par du compostage ou incorporés directement au champ. Les pommes de terre déclassées (patates), les feuilles de chou et de poireaux sont trop humides pour être facilement compostés et leur recyclage dans les champs peut causer, dans certains cas, des problèmes de prolifération de maladies. On a donc choisi de les pyrolyser pour connaître leur potentiel en tant que biochars (I-patates-300-24, I-chou-300-48, I-poireau-300-48). Les pommes de terre ont été coupées manuellement en patates juliennes, alors que les résidus de chou et de poireaux ont été coupés avec une fourragère. On a complété leur pyrolyse chez Innofibre et à L'UQTR dans des fours par lot où un peu d'air est entré. Une pression atmosphérique est maintenue dans le four. La biomasse est restée dans le four 24 ou 48 heures à 300°C. Ni les gaz ni les huiles ont été recyclés. Les biochars de pommes de terre ont été fabriqués pendant 24 hrs, car ils ne pouvaient pas supporter 48 heures sans se consommer.

Des rafles de maïs (B-Maïs-300) ont aussi été transformées au Cameroun dans un pyrolyseur par lot vertical de petite taille avec cheminée et recyclage des gaz. Un peu d'air entre dans le système. La température varie aux alentours de 300°C et la pyrolyse durait de 4 à 6 heures.

3.1.5. Autres matières

Cette catégorie inclut des biochars fabriqués de biomasses non standard pour du biochar. On a obtenu du biochar de cogénération la Kirkland Lake Power Corp vendu par Wood Ash Industries (Wood-Ash-1500). Les matières qui entrent dans le cogénérateur sont de toutes tailles provenant de résidus ligneux divers (bois mou tel que pin, bouleau, sapin, épinette) et beaucoup d'impuretés comme du sable. Ils sont brûlés avec flamme entre 1500 et 1800°C pendant moins d'une heure. Certains résidus sont totalement consumés, d'autres à moitié brûlés, pyrolysés en biochar et d'autres moins transformés. Ce procédé génère un produit très variable contenant beaucoup de cendres et moins de 50% de biochar. Les caractéristiques décrites dans ce rapport représentent donc un produit qui sort de cette industrie, mais dont les propriétés varient encore d'avantage que ce qui est présenté dans ce rapport.

Par ailleurs, la production porcine québécoise, avec ses 7.5 millions de porcs annuels (Gariépy et Lacroix, 2013) génère tellement de lisier que le gouvernement québécois a plafonné la production porcine afin d'éviter d'avantages de problèmes environnementaux et sociaux liés à cette production. L'industrie et les instances de recherche sur la gestion et la transformation du lisier de

porc travaillent à valoriser ce lisier depuis bien des années. Ceci inclut quelques petits essais très récents sur sa transformation en biochar. Le lisier provient d'une ferme d'élevage porcin de type croissance-finition où les fractions liquide et solide ont été séparées sous les lattes de la porcherie. Par la suite, la fraction solide collectée a été séchée à l'aide du procédé SHOC^{MD} (les détails du procédé peuvent être consultés dans Léveillé et coll., 2011) (<http://www.irda.qc.ca/fr/publications/le-procede-shoc-une-solution-novatrice-pour-le-traitement-et-la-valorisation-des-residus-organiques/>). La fraction solide sèche du lisier de porcs a été transformée en biochar (IRDA-Lisier-500) au moyen d'une pyrolyse lente avec une alimentation par lot à 500°C pendant 1.5 heure. Un débit de 2 L min⁻¹ d'azote a été établi dans le réacteur à pression atmosphérique pour maintenir une atmosphère inerte et pour favoriser l'évacuation des gaz du réacteur. La matière doit entrer avec un taux d'humidité inférieur à 85%.

Tableau 5. Matières organiques résiduelles (MOR) et méthodes de pyrolyse des biochars

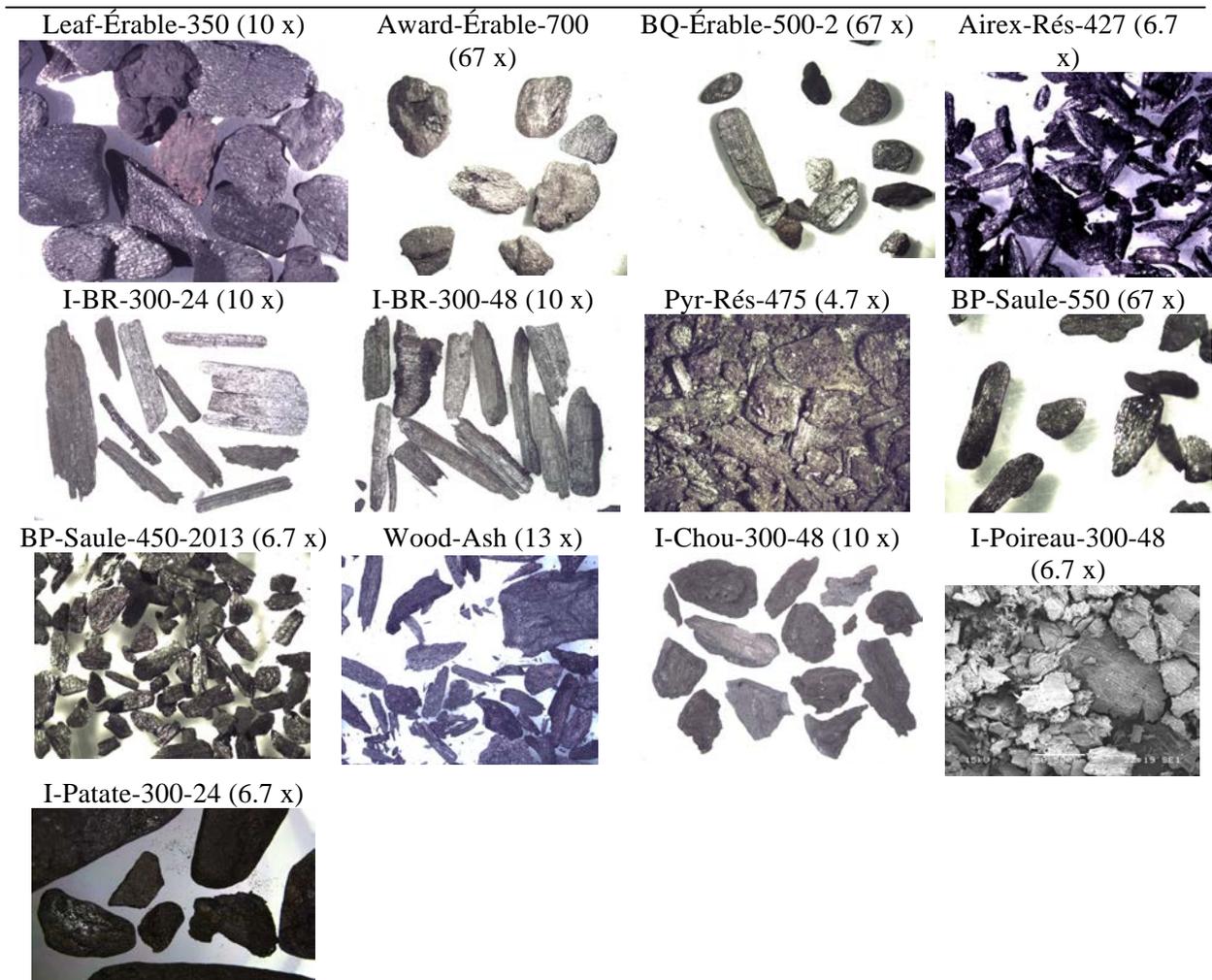
Nom	Matière	Conditionnement	Pyrolyse			
			Temp. (°C)	Durée (hrs)	Pression	Technologie
Bois dur						
Leaf-Érable-350	Résidus de charbonnerie, Érable et merisier	Tamisé après pyrolyse ≤ 1.9 mm, agent liant	350	40	oui	Four type Missouri
BQ-Érable-500-1	Résidus de charbonnerie, >75% d'érable	Tamisage moyen après pyrolyse	500	48-72	oui	Four type Missouri
BQ-Érable-500-2	Résidus de charbonnerie, >75% d'érable	Tamisage fin après pyrolyse	500	48-72	oui	Four type Missouri
BQ-Érable-500-3	Résidus de charbonnerie, >75% d'érable	Tamisage après pyrolyse	500	48-72	oui	Four type Missouri
Award-Érable-700	Écorces d'érable	Aucun	700±100	0.4	oui	Award Rubber
B-Eu-300	Écorces d'eucalyptus	Broyage	300	6	0 KPa	Ménager
Nuchar-1000	Espèce non identifiées	Activation à 1000°C	300-1000	1	NA	NA
Bois mou résineux						
BP-Rés-400	50% branches de sapin-50% branches d'épinettes	Broyage+ séchage avant pyrolyse	400	0.08	0.1 KPa	Abri-Tech
BP-Rés-500	50% branches de sapin-50% épinette	Broyage+ séchage avant pyrolyse	500	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
Airex-Rés-427	Sciure de tronc de résineux	Broyage et tamisage ≤ 2 mm	427	0.01	0 KPa	Airex
Airex-Rés-454	Sciure de tronc d'épinettes	Broyage et tamisage ≤ 2 mm	454	0.01	0 KPa	Airex
Pyr-Rés-475	Écorces de résineux	Tamisage ≥ 0.5 mm	475	0.25	20 Kpa	Pyrovac
Pyr-Rés-500-vieilli	Écorces de bois mou, vieilli en super sac plus de deux ans et tamisé fin	Tamisage ≥ 0.5 mm, séchage 8-15% d'humidité massique	475	0.25	20 Kpa	Pyrovac
Airex-BR-315	Bois de démolition recyclé	Tamissage <6,4mm	315	0.01	0 KPa	Airex
Airex-BR-277	Bois de démolition recyclé	Tamissage <6,4mm	277	0.01	0 KPa	Airex
I-BR-300-24	100% bois de démolition, 90% épinettes, 10% bois dur	Broyé et tamisé 0-3/4	300	24	0 KPa	Four exp
I-BR-300-48	100% bois de démolition, 90% épinettes, 10% bois dur	Broyé et tamisé 0-3/4	300	48	0 KPa	Four exp

La nomenclature des biochars se lit comme suit : a-b-c-d, a est l'instance qui a fournit le biochar, b indique la MOR, c et d déclarent la température et la durée de pyrolyse lorsque nécessaire pour différencier les biochars.

Nom	Matière	Conditionnement	Pyrolyse			
			Temp. (°C)	Durée (hrs)	Pression	Technologie
Bois mou non résineux						
BP-Saule-400	Saule en entier	Broyage+ séchage avant pyrolyse	400	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Saule-450-2013	Saule en entier	Broyage+ séchage avant pyrolyse	450	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Saule-450-2014	Saule en entier	Broyage+ séchage avant pyrolyse	450	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Saule-500	Saule en entier	Broyage+ séchage avant pyrolyse	500	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Saule-550	Saule en entier	Broyage+ séchage avant pyrolyse	550	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Feuille-400	>75% branches de bouleau blanc	Broyage+ séchage avant pyrolyse	400	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
BP-Feuille-500	>75% branches de bouleau blanc	Broyage+ séchage avant pyrolyse	500	0.08	0.1 Kpa	Abri-Tech
Coco-1000	Écaille de noix de coco	Activation à 1000°C	300	NA	NA	NA
Matières non ligneuses						
BP-Phragmite-400	Phragmite	Broyage+ séchage avant pyrolyse	400	0.08	0.1 KPa	Abri-Tech
BP-Phragmite-500	Phragmite	Broyage+ séchage avant pyrolyse	500	0.08	0.1 KPa	Abri-Tech
I-Patate-300-24	Pommes de terres déclassées	Coupe en patates juliennes	300	24	Atm	Four exp
I-Chou-300-48	Résidus de choux	Broyage avec fourragère	300	48	Atm	Four exp
I-Poireau-300-48	Résidus de poireaux	Broyage avec fourragère	300	48	Atm	Four exp
B-Maïs-300	Rafes de maïs	Broyage	300	6	Atm	Custom
Autres						
Wood-Ash-1500	Bois mou de toutes sortes (pin, bouleau, sapin, épinette)	Aucun	1500-1800	<1	Atm	Kirkland Lake Power Corp.
IRDA-Lisier-500	Lisier de porc déshydraté	Tamissage 1-3 mm, séchage à 85% d'humidité massique	500±25	90	-27- à -55 KPa	IRDA

La nomenclature des biochars se lit comme suit : a-b-c-d, a est l'instance qui a fourni le biochar, b indique la MOR, c et d déclarent la température et la durée de pyrolyse lorsque nécessaire pour différencier les biochars.

Tableau 6. Quelques photos des biochars



3.2. Méthodes d'analyse des biochars

L'ensemble des méthodes d'analyse des biochars qu'elles soient référées par l'IBI ou l'EBC est teinté de l'industrie de l'énergie à cause de la ressemblance avec le charbon. Certaines démontrent aussi les besoins environnementaux dus aux exigences établies par les gouvernements pour la protection de l'environnement. Les méthodes sont passablement moins influencées par l'industrie forestière quoi que cette industrie soit à l'origine des matières les plus fréquemment utilisées pour fabriquer les biochars. Ces méthodes sont seulement très peu influencées par l'agriculture, même si les biochars sont souvent vus comme des amendements aux sols et comme intrants dans les terreaux. On associe ces influences principalement avec l'historique du biochar.

Notre équipe a tenu à respecter certaines exigences soit de l'IBI, soit de l'EBC et des gouvernements québécois pour les méthodes d'analyse (1) pour répondre aux normes actuellement en vigueur, (2) afin de permettre une comparaison ultérieure avec d'autres études et (3) d'aider notre industrie à situer ses produits internationalement. On a utilisé le plus souvent possible les méthodes ASTM ou des méthodes québécoises certifiées. Comme l'équipe étudie les biochars pour des applications agricoles, forestières ou environnementales locales, on ne s'est pas attardés aux propriétés relatives à l'énergie (BTU, point d'ignition, inflammabilité, etc.). On a, par contre, étudié entre autres, des propriétés non exigées par les standards, mais qui aident à comprendre et prédire le comportement des biochars dans les milieux poreux comme les sols, les terreaux et les résidus miniers.

On a divisé les propriétés des biochars en différentes classes, soit les propriétés de composition générale (Tableau 7), les propriétés physiques (Tableau 8), les propriétés chimiques relatives à la croissance des plantes et à l'environnement (Tableau 9) et les propriétés biologiques indicatrices de risque environnementaux (Tableau 10).

Les paramètres généraux correspondent à des mesures de l'industrie de l'énergie. Elles n'influencent que peu le comportement des biochars dans le sol et dans les terreaux et aident peu à identifier les risques pour l'environnement. Par contre, le type de carbone aide à établir le potentiel de séquestration à long terme, le carbone graphitique étant probablement le plus stable. Les propriétés physiques (Tableau 8) comme la masse volume apparente tapée, la surface spécifique, les caractéristiques relatives à l'eau et à la granulométrie influencent beaucoup le comportement des biochars dans les milieux poreux, en entreposage et lors du transport. De nombreuses propriétés chimiques sont considérées soit parce qu'elles influencent l'efficacité des biochars pour la croissance des plantes (éléments solubles, échangeables, éléments nutritifs), et les propriétés d'échanges des milieux poreux (pH, capacité chaulante) ou parce que les normes environnementales requièrent l'identification des leurs contenus (teneur en métaux lourds, HAP). Les dioxines et furanes ne sont pas présentées dans ce rapport à cause des coûts très élevés de ces analyses (~800\$ ch.). Par contre, on a aussi ajouté deux propriétés indicatrices d'effets potentiellement néfastes sur la biologie comme la préférence des vers de terre et la germination de la laitue (Tableau 10), deux espèces sensibles à la pollution et autres facteurs environnementaux.

3.2.1. Propriétés générales

Les teneurs en cendres et en C, H, N, S correspondent à la teneur totale de ces éléments (Tableau 7). La teneur en carbone total (C_{tot}), organique (C_{org}), inorganique (C_{inorg}) et graphitique (C_{graph}) aide à identifier les formes du carbone dans le biochar. Les différents types de carbone donnent une idée sur leur transformation et sur leur mode de transformation potentielle dans le sol.

Le C_{inorg} correspond principalement au $CaCO_3$. On s'attend à ce que le C_{graph} soit le plus stable dans le sol. Le ratio H/Corg et O/C sont simplement calculés à partir des mesures précédentes. Ils sont présentés parce qu'ils sont obligatoires par différentes instances, mais découlent surtout de l'industrie de l'énergie.

3.2.2. Propriétés physiques

Propriétés hydriques

Ce rapport discute de propriétés physiques des biochars relatives à l'eau (Tableau 8). L'EBC et l'IBI requièrent la déclaration de la teneur en eau gravimétrique (θ_g). L'EBC différencie entre θ_g facile à extraire et hygroscopique fortement reliée aux particules, alors que l'IBI exige seulement la première. On mesure seulement l'eau facilement extractible dans ce rapport, par simplicité et facilité. En fait, θ_g n'affecte pas vraiment le comportement du biochar dans les milieux poreux. S'il est exigé, c'est plutôt pour indiquer à l'acheteur s'il paie pour de l'eau ou pour son pouvoir calorifique. θ_g a, par contre, un impact pour les utilisations comme pour du charbon activé. On a mesuré θ_g entre 70 et 105°C pendant 24 hrs, une méthode adaptée de l'IBI et de l'analyse des sols. On a donc retiré un peu plus d'eau qu'avec la méthode de l'IBI, mais moins qu'avec l'EBC.

Un autre paramètre suggéré, mais non requis par les deux organismes concerne la rétention en eau. Cette rétention met en évidence le comportement du biochar dans les milieux poreux ou en entreposage en cas de problème d'eau. La méthode suggérée par l'EBC donne seulement une idée si le biochar est capable ou pas de sorber de l'eau lorsque complètement submergé. On n'a pas utilisé cette méthode. Comparativement, notre méthode indique la quantité d'eau atmosphérique (absorption de l'humidité de l'air) ou du milieu poreux (remontée capillaire) extraite par le biochar. Pour l'absorption de l'humidité de l'air, on soumet le biochar à une humidité relative (HR) de 80% et on mesure combien d'eau, initialement sous forme vapeur, il a sorbé en 72 hrs. Pour la remontée capillaire, on soumet le biochar à une force de rétention en eau, simulant un sol très mouillé (potentiel matriciel (tension) près de zéro) versus un sol un peu plus sec mais quand même très humide (potentiel matriciel plus négatif). La vitesse d'augmentation de son poids en eau sous différentes tensions se produit par remontée capillaire en sorbant l'eau sous forme liquide. On a sélectionné ces propriétés de biochars parce qu'elles représentent le mieux le comportement des biochars face à l'eau dans son milieu. Il est important de les mesurer puisqu'on donne souvent au biochar la vertu d'aider les sols à retenir l'eau, sans jamais mesurer leur vraie capacité à le faire.

Propriétés relatives à la taille et forme des particules et des pores ainsi qu'à la conductivité électrique

Ces propriétés physiques sont très importantes pour le comportement des biochars dans les sols et les milieux poreux. La masse volumique apparente (ρ_a) inclut les vides intra et inter particulaires (Tableau 8). Elle influence le stockage et le transport. Elle indique le potentiel de changement de densité d'un sol ou d'un terreau lorsque le biochar y est ajouté. Cette donnée est requise par l'EBC, mais pas par l'IBI. Comparativement, la masse volumique réelle (ρ_s) est le rapport masse / volume particulaire excluant le vide inter-particulaire. La ρ_s indique le comportement d'une particule dans un autre milieu, par exemple la flottabilité du biochar lorsque dans l'eau. La porosité totale Θ est calculée selon $\Theta=1-\rho_a/\rho_s$. La surface spécifique totale (SS_{total}) et externe (SS_{ext}) renseigne sur la capacité d'échange, de sorption et de réactivité du biochar. La SS_{total} inclut les sites d'échanges dans les particules et à la surface des particules, alors que SS_{ext} inclut seulement les sites à la surface des particules. La conductivité électrique (CE) indique la capacité à transporter l'électricité. L'IBI et l'EBC l'exigent, mais reconnaissent des méthodes différentes. La CE dépend de sels contenus dans le biochar. On put donc calculer la salinité des biochars avec la CE. La capacité

des plantes à extraire l'eau de leur environnement est non seulement dépendante du potentiel matriciel, mais aussi du potentiel osmotique créé par la salinité.

Une analyse granulométrique par tamisage a été complétée avec deux tamisages successifs pour chacun des échantillons : (1) Un premier tamisage avec une colonne de 8 tamis : 8, 4, 2, 1, 0.50, 0.25 et 0.125 mm; (2) un deuxième tamisage avec un tamiseur à l'ultrason pour séparer les particules de taille inférieure à 0.250 mm. La colonne de tamis comprenait 5 tamis soit : 0.250, 0.106, 0.053, 0.025 mm. L'IBI requière une analyse granulométrique, mais pas aussi complète, alors que l'EBC ne l'exige pas. À partir de ces tamisages, plusieurs paramètres ont été calculés. Le diamètre moyen pondéré (DMP) indique la taille moyenne des particules. Cette information est importante pour connaître le type de machinerie nécessaire pour appliquer le biochar dans le milieu et prédire son comportement une fois appliqué. Le DMP influence par exemple, la rétention en eau et le mélange potentiel avec d'autres ingrédients comme des engrais. À partir de la courbe granulométrique, on peut calculer différents paramètres comme le pourcentage de particules plus fines qu'un certain diamètre comme D10 pour indiquer le pourcentage de particules plus fines que 10% des particules. Ces paramètres servent à calculer l'homogénéité de la taille des particules soit l'indice d'uniformité (IU). Un indice d'uniformité (D95/D10) de faible valeur signifie que les particules ont une taille uniforme. Une distribution très hétérogène de particules peu offrir certains avantages sur des particules de tailles très homogènes souvent obtenues par tamisage, puisque chaque taille de particules peut jouer un rôle différent dans la rétention en eau, la protection des sols contre l'érosion et la décompaction des sols. Dans certains cas, on peut chercher une granulométrie très homogène car on veut un comportement précis. IU est important pour les mélanges d'amendements ou pour fabriquer du terreau et indique si le biochar sera ou non susceptible de se séparer des autres composantes du mélange lors du transport, de la manutention et durant la croissance des plantes.

On a ensuite soumis les biochars à une abrasion avec des billes d'acier. Des mesures de résistance à l'abrasion (RA) mettent en évidence la résistance au bris qu'offre un composé au déplacement de ses particules soumis à l'action de différentes forces. Ce paramètre aide à connaître les effets d'un transport, d'un stockage ainsi que des manipulations des biochars. La granulométrie après l'abrasion a été mesurée selon la méthode décrite ci-dessus. La variation de la taille moyenne des particules (Δ DMP), de l'indice d'uniformité (Δ IU) et de la taille spécifique des particules (Δ Dx) indique le pourcentage de changement. Ces informations ne sont pas requises par aucune norme, mais ne sont pas dispendieuses à produire et répondent à des besoins de connaissances pour l'ensachage, le transport et la manutention.

3.2.3. Propriétés chimiques

Propriétés relatives à l'acidité

On discute de plusieurs propriétés chimiques relatives à la dynamique de l'hydrogène, soit le pH et le pouvoir tampon (PT) (Tableau 9). L'IBI et l'EBC exigent le pH, mais pas avec la même méthode. Ces deux méthodes donnent des résultats quelques peu différents, mais considérant la grande variation de pH entre les biochars, elles ne seront pas tellement différentes pour une étude comparative comme c'est le cas de ce rapport. On a utilisé une méthode similaire à l'IBI dans ce rapport soit une mesure dans l'eau. Le PT n'est exigé ni par un ni par l'autre organisme, mais donne une bonne idée du comportement du biochar dans un milieu ayant un pH différent. Il est nécessaire en agriculture. Les biochars, souvent basiques, peuvent être incorporés dans des milieux beaucoup plus acides comme de la tourbe, des podzols ou des résidus miniers par exemple. On a mesuré le pouvoir tampon jusqu'à l'atteinte d'un pH 7 et d'un pH 4.

Éléments échangeables

La teneur en éléments échangeables (Tableau 9) sert à connaître la disponibilité aux plantes ainsi que l'équilibre nutritionnel des plantes. Habituellement, on se sert de la somme des éléments échangeables N, P, K, Ca et Mg pour calculer la capacité d'échange cationique (CEC) des sols. Considérant que les sols sont soumis aux pluies années après années, on représente leur capacité à retenir les éléments avec leur contenu restant après tout ce temps. On appelle cette propriété CEC. Par contre, dans le cas des biochars, ils n'ont pas été soumis à du lessivage comme c'est le cas des sols. Leur contenu en éléments échangeables, tels que sortis de l'usine, indique seulement leur contenu total sans égard s'ils peuvent être échangés ou pas. Dans ce rapport, on parle donc de la somme des éléments échangeables plutôt que de CEC.

La teneur en éléments solubles sert non seulement à connaître la disponibilité en nutriments pour les plantes lorsque l'eau est présente, mais aussi à déterminer les risques de circulation et de contamination dans l'environnement. Les éléments solubles (K, Ca, Mg, Na, Mn, Fe, Al, Cu, Zn) ont été extraits à l'eau.

Propriétés relatives à la protection de l'environnement

L'IBI et l'EBC exigent la déclaration de la teneur en métaux lourds (Tableaux 9 et 11). En vue de la protection de l'environnement, ces valeurs servent à les classer pour des approbations ou des exclusions d'utilisation. La liste des métaux, les méthodes d'analyse et les maxima acceptés varient entre les organisations. Les maxima acceptés de l'EBC et de l'IBI correspondent généralement aux normes gouvernementales européennes ou américaines. On a mesuré la plupart des métaux (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se et Zn) en plus d'analyser des métalloïdes (Fe et Al) avec les mêmes méthodes que l'IBI. On les comparera, dans un prochain rapport, aux normes québécoises en plus de celles listées dans l'IBI et EBC. On a aussi mesuré les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Tableau 9) selon la méthode standard du centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). Certains HAP sont requis à la fois par l'IBI et l'EBC. On en a analysé d'avantage.

3.2.4. Propriétés biologiques

Outre les propriétés générales en plus de celles physiques et chimiques, une dernière classe de propriétés correspond à des tests suggérés par l'IBI décrits comme relatifs à la toxicité biologique (Tableau 10). On parle de tests d'évitement des vers de terre et de la germination de la laitue dans un mélange de terre et de biochar. Pour ces tests, ni la teneurs en biochar dans les mélanges de terre, ni l'espèce de vers de terre ni la variété de laitue ne sont dictées par l'IBI, mais simplement suggérées.

On a mesuré l'évitement des vers de terres *Eisenia fetida sp.*, une espèce spécialement utilisée pour le vermicompost. Ceux-ci sont déposés au-dessus de la partie médiane de contenants séparés verticalement en deux parties égales pendant 24 hrs. D'un côté, on a mis de la terre à jardin, de l'autre un mélange de terre et de biochar à raison de 10 ou 50% de biochar. La distribution des vers de terre indique la préférence des vers pour la terre ou pour le mélange terre : biochar. Leur préférence dépend de plusieurs facteurs comme la toxicité, le pH, l'abrasion sur leur peau, etc.

Des essais de germination de la laitue (*Lactuca sativa* var. Buttercrunch), tels que suggéré par l'IBI ont aussi été effectués. Des graines ont été semées dans des plats de pétris avec les deux mêmes concentrations de biochars que le test d'évitement des vers de terre soit 10 et 50% dans la même terre pendant 10 j. Le taux de germination de 20 semences a été compté à différents temps et rapporté en pourcentage du nombre de graines ensemencées. Cette information indique si le milieu est propice à la croissance des plantes, la laitue étant une plante sensible à son milieu soit à cause du pH, du déséquilibre nutritionnel ou de contaminants. Les propriétés physiques du milieu comme le taux d'humidité, la densité, le mouvement des gaz ne sont pas testés dans ce type d'essai. Dans ce rapport,

la comparaison de la germination entre les biochars relève donc plutôt des propriétés chimiques des biochars que de leurs propriétés physiques.

Les méthodes sélectionnées sont celles que nous croyons les plus appropriées pour des utilisations agricoles et environnementales en plus de répondre aux différentes exigences du gouvernement québécois et certaines instances internationales.

Tableau 7. Méthodes d'analyse de la composition générale des biochars

Symb.	Nom	Unités	Méthode	Appareil	Référence
Cendres	Teneur en cendres	%	Perte au feu	Four à moufle	Adapté de l'ASTM-D1762-84 et de méthode CAEAQ MA.1010-PAF 1.0
C _{tot}	Teneur en carbone total	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et coll. (2014) et Brewer (2012), LECO (2009)
C _{inorg}	Teneur en carbone inorganique	%	Détermination rapide du carbonate dans les sols	Différentes méthodes et analyses	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
C _{org}	Teneur en carbone organique	%	C _{org} =C _{tot} -C _{inorg}	---	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
C _{graph}	Teneur en carbone graphitique	%	Combustion	Spectroscopie à infrarouge	ASTM D4373-14 et CEAEQ (2009, 2013) et ISO 9686 (2006)
H	Teneur en hydrogène	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et coll. (2014) et Brewer (2012)
O	Teneur en oxygène	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et coll. (2014) et Brewer (2012)
H/C _{org}	Ratio molaire H/C	---	H/C _{org} =H/C _{org}	---	---
O/C	Ratio molaire O/C	---	O/C=O/C	---	---
N	Teneur en azote	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et coll. (2014) et Brewer (2012)
S	Teneur en soufre	%	Combustion totale séchée, analyse élémentaire	LECO Truspect	Adapté de Meng et coll. (2014) et Brewer (2012)

%=pourcentage massique soit $g\ g^{-1} \times 100$.

Tableau 8. Méthodes d'analyse des propriétés physiques

Symb.	Nom	Unités	Méthode	Appareil	Référence
Densité et porosité					
ρ_a	Masse volumique apparente	g cm^{-3}	Densité tapée après 3 chutes de 0.15 m	Cylindre	Adapté de ISO 5311 :1992
ρ_s	Masse volumique réelle	g cm^{-3}	Pycnomètre au gaz	AccuPyc 1330 Micromeritics	ASTM B923-10
Θ	Porosité totale	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	$\Theta=1-\rho_a/\rho_s$	---	Flint et Flint (2002)
SS_{tot}	Surface spécifique totale	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	BET multi-points	Surface Area and Porosity Analyzer (Micromeritics TriStar 3000)	ASTM D6556-10
SS_{ext}	Surface spécifique externe	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	BET multi-points	Surface area analyzer	ASTM D6556-10
Propriétés hydriques					
CE	Conductivité électrique	dS m^{-1}	A l'eau	Radiomètre, Copenhague	Rajkovich et coll. (2011), TMECC 4.11 (2001), IBI (2012)
θ_g	Teneur en eau massique	%	Séchage au four à 105°C et 70°C	Four à moufle	Adapté de ASTM D1762-84
θ_{q_x}	Paramètres de régression du taux de sorption d'eau par remontée capillaire soumis à une tension x	$\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Tension à -0.05, -0.25, -0.50, -0.75, -1.00, et -1.40 m	Table de tension, régression non linéaire	Adapté de Allaire et Parent (2004b)
θ_x	Sorption totale d'eau pendant 72 h sous différentes tensions x	%	Tension à -0.05, -0.25, -0.50, -0.75, -1.00, et -1.40 m	Table de tension, régression non linéaire	Adapté de Allaire et Parent (2004b)
Taille et forme des particules					
DMP	Diamètre moyen pondéré	mm	Granulométrie avec tamiseur standard et à ultrason	Tamiseur standard RX-29, Ro-Tap, W.S. Tyler et tamiseur ultrason	Adapté de Gee et Or (2002) pour le tamisage, Nimmo et Perkins (2002) pour DMP
Dx	Diamètre de x% des particules les plus fines	mm	Courbe granulométrique	---	Adapté de Gee et Or (2002) et Nimmo et Perkins (2002) pour le tamisage et pour DMP, et adapté de ASTM D2862-10 pour DMP
IU	Index d'uniformité	---	D95/D10	---	Allaire et Parent (2003, 2004a), CFI (2001)
RA	Résistance à l'abrasion	mm	Abrasion avec billes d'acier rotatives	RX-29 Ro-Tap (W.S. Tyler, Mentor, Ohio, USA)	Paré et coll. (2009), adapté de Kiekens et coll. (1999), Kemper et Roseneau (1986)
ΔD_x	Changement de Dx après abrasion	mm	$\Delta D_x = \Delta x_{\text{avant}} - \Delta x_{\text{après}}$ abrasion	---	---

%=pourcentage massique soit $\text{g g}^{-1} \times 100$. Pour θ_{q_x} , les courbes de remontée capillaire, ont été complétées avec les réplicats et l'équation $y=m \ln(x)+b$, y =sorption d'eau $\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, x =tension (-m) et b =asymptote $\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$

Tableau 9. Méthodes d'analyse des propriétés chimiques

Nomenclature	Nom	Unités	Méthode	Appareil	Référence
Relatives à l'acidité					
pH _{H2O}	pH à l'eau	---	pH à l'eau	pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et coll. (2011), AGDEX (1989)
PT _{pH4}	Pouvoir tampon à pH 4	meq HCl	Extraction HCl 1 N	Électrode potentiométrique couplée à un pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et coll. (2011), AGDEX (1989)
PT _{pH7}	Pouvoir tampon à pH 7	meq HCl	Extraction HCl 1 N	Électrode potentiométrique couplée à un pH-mètre (VWR SB20)	Rajkovich et coll. (2011), AGDEX (1989)
CaCO _{3eq}	Équivalence de chaulage	%	1 M HCl	ICP-AES	Rayment et Higginson (1992)
Relatives aux plantes					
P _{ex}	Teneur en P échangeable	cmol (+) Kg ⁻¹	Acide formique à 2%	Spectrophotomètre	Wang et coll. (2012), Rajan et coll. (1992), AOAC (2005)
K _{ex} , Ca _{ex} , Mg _{ex} , Na _{ex}	Teneur en éléments échangeables (nutriments)	cmol (+) Kg ⁻¹	Extraction CaBr ₂ -NH ₄ Cl	ICP Optima 4300DV Perkin-Elmer	Amacher et coll. (1990)
Ex _{tot}	Somme des éléments échangeables	cmol (+) Kg ⁻¹	Calcul	---	---
P _{sol}	Teneur en phosphore soluble	mg L ⁻¹	Extraction à l'eau	ICP-AES	Enders et Lehmann (2012), IBI (2012)
K _{sol} , Ca _{sol} , Mg _{sol} , Na _{sol} , Mn _{sol} , Fe _{sol} , Al _{sol} , Cu _{sol} , Zn _{sol}	Teneur en éléments solubles à l'eau (macro-nutriments et micro-nutriments: métalloïdes)	mg L ⁻¹	Extraction à l'eau	ICP Optima 4300DV Perkin-Elmer	AGDEX 533 (1989)
Relatives à l'environnement					
P, Cu, Zn, As, Cd, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se	Teneur en éléments totaux (métaux lourds, micro et macronutriments)	mg Kg ⁻¹	Méthode modifiée des cendres	ICP-AES	Enders et Lehmann (2012), IBI (2012)
Teneur en HAP : Acénaphène, acénaphthylène, anthracène, benzo(a)anthracène, benzo(a)pyrène, benzo(b)pyrène, benzo(b+j+k)fluoranthène, benzo(c)phénanthrène, benzo(g,h,i)pérylène, chrysène, dibenzo(a,h)anthracène, dibenzo(a,i)pyrène, dibenzo(a,h)pyrène, dibenzo(a,l)pyrène, diméthyl-7,12benzo(a) anthracène, fluoranthène, fluorène, indénol(1,2,3-cd)pyrène, méthyl-3 cholanthrène, naphthalène, phénanthrène, pyrène, méthyl-1 naphthalène, méthyl-2 naphthalène, diméthyl-1,3 naphthalène, triméthyl-2,3,5 naphthalène		mg Kg ⁻¹	Extraction dicholorméthane	GC/MS-SIM	CAEAQ MA.400-HAP.1.1., ISO 17025 et G34

% = pourcentage massique soit g g⁻¹ x 100.

Tableau 10. Méthodes d'analyse des propriétés biologiques

Nomenclature	Nom	Unités	Méthode	Appareil	Référence
Vers _x	Pourcentage des vers de terre (<i>Eisenia fetida sp.</i>) qui ont choisi le mélange contenant du biochar à x% de biochar dans la terre à jardin	%	Barquettes de terre séparées en deux côtés, terre et terre+biochar, 20°C	---	IBI (2012), ISO 17512-1 (2008), Major (2009)
Laitue _{yj-x}	Taux de germination de la laitue (<i>Lactuca sativa var. Buttercrunch</i>) au jour y dans un mélange de x% de biochar dans la terre à jardin	%	Plats de pétri en chambre de croissance à 22°C:16 hres jour /15°C: 8 heures nuit. Pas de brumisation.	Chambre à environnement contrôlé	IBI (2012), OECD (1984), ISO 17126 (2005), Van Zwieten et coll., (2010)

Tableau 11. Comparaison des analyses de ce rapport avec celles des analyses suggérées par l'IBI (2012) et l'EBC (2012)

Paramètre	Allaire et coll.	IBI	EBC
Propriétés générales			
Cendres	Donnée	Requise	Requise
C	C _{tot.} et C _{org}	C _{tot} requise	C _{org} requise
H/Corg	Donnée	Requise	Requise
O/C	Donnée	Requise	Non requise
Propriétés physiques			
ρ _a	Donnée	Requise	Non requise
ρ _s , Θ	Donnée	Non requise	Non requise
SS	Donnée	Requise	Optionnelle
CE	Donnée	Requise	Requise
θ _g	Donnée	Requise	Requise
θ _{q_x}	Donnée	Optionnelle	Non requise
Granulométrie	Plusieurs paramètres	Non requise	Requise
RA	Donnée	Non requise	Non requise
Propriétés chimiques			
pH _{H2O}	pH _{H2O}	Requis, pH _{CaCl2}	Requis, pH _{H2O}
PT	Donnée	Non requise	Non requise
CaCO _{3equ}	Donnée	Non requise	Requise
Éléments échangeables	Données	Non requise	CEC suggérée
Éléments solubles	Données	Non requise	Non requise
Métaux lourds et métalloïdes	Données	Requise	Requise
HAP	Données	Requise	Requise
BCP	Non mesurée	Requise	Requise
PCDD	Non mesurée	Requise	Requise
Propriétés biologiques			
Vers	Donnée	Non requise	Suggérée
Laitue	Donnée	Non requise	Requise

IBI : International Biochar Initiative. EBC : European Biochar Certificate. N.B. La plupart des analyses requises par IBI et EBC n'utilisent pas les mêmes méthodes de mesure. Celles mesurées par notre équipe, mais non listées dans ce tableau indique qu'elles ne sont pas obligatoires ou suggérées ni par une ni par l'autre des organisations.

4. Résultats et discussion

4.1. Propriétés générales

Dans l'industrie de l'énergie, les cendres sont inutiles, voir un résidu indésirable. Un biochar contenant plus de cendres est généralement moins efficace énergétiquement. Par contre, dans le cas d'une application au sol pour la croissance végétale, on peut considérer les cendres comme un amendement en minéraux. Ils sont désirés lorsque les contenus en métaux lourds ne dépassent pas les normes environnementales. Certains font d'ailleurs des applications agricoles de cendres seulement. Par contre, la teneur en cendres indique moins de carbone. Dans le cas d'un apport au sol pour la séquestration du carbone ou comme amendement organique, on cherche le biochar contenant le moins de cendres et le plus de carbone possible.

Le pourcentage de cendres des biochars varie énormément entre 1 et 54% du poids sec (Tableau 12). Ceux qui contiennent le moins de cendres ont été fabriqués avec du bois mou résineux (Airex-Rés-427 et 454) et le Coco-1000, un charbon activé, alors que celui qui en contient le plus a été fabriqué par Wood Ash (Wood-Ash-1500). Il est normal d'en contenir beaucoup puisque cette compagnie est une usine de cogénération qui brûle toutes sortes de matériaux qui contiennent en autres de contaminants comme du sable. Ces cendres sont vendues comme telle et contiennent du biochar. Les biochars faits avec du phragmite, du chou et celui fait avec du lisier de porcs contiennent plus de 18% de cendres. Ceux qui contiennent le plus ou le moins de cendre ne correspondent pas à ceux qui montrent le plus de variation dans leur teneur en cendres. Les plus variables sont les BQ-Érable-500-3 et ceux d'Airex fabriqués de sciure de résineux. Le BQ-Érable-300-3 est plutôt variable puisqu'il est fait de résidus de charbonnerie qui tombent lors de la manutention du bois comme des fragments de charbon, des écorces et du sable. Ces résidus varient selon la saison.

La plupart des biochars rencontrent les normes de l'EBC, soit plus de 50% de C_{tot} , sauf celui fabriqué pour de les cendres qui en contient que 30% (Tableau 12) et ceux fabriqués avec la technologie Airex avec du bois recyclé (Airex-BR-315 et 426). Seul le charbon activé fait avec de la noix de coco (Coco-1000) en contient plus de 90%. Il faut noter le BQ-Érable-500-1 en contient environ 80%. Les coefficients de variation (CV) du C_{tot} sont tous très faibles. Proportionnellement au C_{tot} , C_{graph} est en général plus élevé avec le bois dur, suivi du bois mou non résineux et du bois mou résineux (Figure 1). Le C_{graph} est le plus stable dans le temps. Les biochars activés (Nuchar-1000 et Coco-1000) en contiennent le plus puisque C_{graph} augmente généralement avec la température de pyrolyse. BQ-Érable-500-1 en contient aussi plus de 70% (Tableau 12). Le C_{inorg} est beaucoup moins présent que C_{graph} , mais peut être intéressant pour un effet chaulant puisque ce dernier correspond principalement au $CaCO_3$. Le bois recyclé se démarque par sa teneur à 9% (Airex-BR-315), alors que ceux faits de phragmite en contiennent que très peu. C_{org} varie entre 1.5 pour le BP-Saule-450-2014 et 45% pour le BP-Feuille-400. Relativement au C_{tot} , la variation entre les biochar est moins grande entre les biochars de bois dur que les autres. BP-Saule-450-2014 se démarque par le plus haut ratio H/C_{org} à cause de la faible teneur en C_{org} . Les bois d'érable tendent à donner des valeurs relativement élevées de H/C_{org} ainsi que les biochars fabriqués à 500°C. Les biochars d'érable ont tendance à donner des ratios O/C_{tot} plus faibles (Tableau 12), alors que les matières non ligneuses ont tendance à donner des valeurs passablement plus élevées. Toutefois, les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec Airex-BR-315 et 426 suivis de Wood-Ash-1500. Ces tendances seront évaluées ultérieurement avec des analyses statistiques et des corrélations.

4.2. Propriétés physiques

La masse volumique apparente (ρ_a) de tous les biochars est très faible, soit près de celle de la tourbe (Tableau 13). Les valeurs les plus élevées proviennent des biochar fabriqués avec du bois d'eucalyptus (B-Eu-300) et de la phragmite (BP-Phragmite-500), alors que les biochars produits dans le laboratoire expérimental (I-..) tendent à donner les valeurs les plus faibles. Des valeurs faibles sont excellentes pour une utilisation dans les terreaux ou pour décompacter les sols, mais ils coûtent plus cher à transporter et ensacher. La granulométrie influence ces valeurs de ρ_a . Les masses volumiques réelles (ρ_s) ont tendance à se ressembler et se rapprocher de la tourbe ou de la matière organique du sol (Tableau 13). Seulement deux biochars se démarquent soit le Wood-Ash-1500 puisqu'il contient beaucoup de cendre et le biochar Coco-1000. Basées sur ρ_a et ρ_s , les valeurs de P tendent aussi vers des valeurs un peu plus élevées que la tourbe blonde. Aucune valeur ne peut causer problème pour des applications aux sols, en productions maraîchères, horticoles ou en pépinière ni pour la filtration d'eau. Ceux fabriqués dans le four expérimental tendent à avoir une plus grande porosité à cause de leur granulométrie grossière. La conductivité électrique CE varie peu entre les biochars exceptés ceux fabriqués dans le laboratoire expérimental avec des résidus maraîchers (I-Patates-300-24, I-Chou-300-48, I-Poireau-300-48). Les deux fabriqués par Pyrovac et Airex avec de la sciure de bois de résineux ont tendance à avoir de plus faibles CE. L'espèce et la température de pyrolyse semblent influencer la valeur. Il n'y a aucun biochar dont la salinité pourrait causer problème aux plantes lorsque mélangé au sol à moins d'être utilisés pour des cultures en serre où la salinité augmente rapidement (biochars maraîchers).

Les propriétés hydriques varient grandement entre les biochars (Tableau 14). Elles sont beaucoup influencées par la granulométrie, la porosité interne et externe aux particules ainsi qu'à la surface de tension ce qui les rend hydrophiles ou hydrophobes à différents teneurs en eau. La teneur en eau initiale θ_g dépend surtout de la méthode de pyrolyse et de la méthode d'entreposage. Par conséquent, cette valeur est peu utile pour une utilisation dans les sols. Par contre, elle est importante pour la manipulation. Wood-Ash-1500 contient la plus haute teneur en eau, en partie parce qu'il contient plus des cendres (très sorbantes), mais aussi parce qu'il a été entreposé à l'air. La remontée capillaire révèle que certains biochars sorbent très rapidement l'eau liquide disponible autour d'eux (Fig. 2). Par exemple, le Nuchar-1000 et le Wood-Ash-1500 sorbent dès qu'ils entrent en contact avec le milieu humide. Comparativement, le Pyr-Rés-475 et le I-Chou-300-48 sorbent beaucoup d'eau, mais surtout lorsque le sol est trempé. Ils ont plus de difficulté lorsque le sol est seulement humide. Par ailleurs, d'autres biochars restent relativement secs même dans des conditions très mouillées comme c'est le cas de BQ-Érable-500-1 et Airex-Rés-27. Après 72 hrs, Wood-Ash-1500 peut sorber 150 et 420% de son poids en eau sous des tensions de -1.5 m (humide) et -0.05 m (détrempé). Le Nuchar-1000 sorbe aussi passablement avec 275% suivi du BP-Saule-450-2014 avec 137% dans le milieu presque à saturation (-0.05 m), alors qu'Airex-Rés-427 ne sorbe que 12%. Puisqu'il faut une plus grande force pour extraire l'eau d'un milieu plus sec, les taux de sorption ne sont pas aussi élevés avec une tension de -1.5 m qu'avec -0.05 m. L'ordre des plus sorbants au moins sorbants change entre les tensions. Par exemple, le BP-Saule-450-2014 qui se trouve parmi ceux qui sorbent le plus en conditions mouillées se retrouve parmi ceux qui sorbent le moins en condition humide (un peu plus sec). Ce comportement ressemble à celui de la tourbe. C'est donc dire que tous les biochars ne sont pas capable de sorber l'eau comme le dit la littérature. Certains ont une hydrophobicité, un peu comme la tourbe lorsqu'elle est sèche.

Comparativement à la sorption de l'eau liquide dans un milieu humide, la sorption de l'humidité de l'air réfère à la vapeur d'eau. La granulométrie est importante pour la sorption de l'eau liquide, mais l'est beaucoup moins pour la vapeur d'eau. Les propriétés de surface le sont plus.

Nuchar-1000 sorbe plus de 100% de son poids en eau sous forme vapeur pendant 72 hrs. Il est suivi de très loin par I-Patate-300-24 avec environ 15% et des deux biochars fabriqués par Pyrovac avec 12 et 13%. Il sera important d'ensacher les biochars dont le taux de sorption de l'humidité de l'air est élevé. Il faudra aussi faire attention lors d'application au champ par temps très humide.

Le Nuchar-1000 est le plus fin, suivi par ceux fabriqués par Biopterre avec la technologie Abri-Tech (Tableau 15). Des biochars aussi fins ont tendance à produire beaucoup de poussière nuisible pour les travailleurs et sont très salissants. Des biochars si fins ne peuvent pas être mélangés directement avec des engrais composés sauf si chaque particule d'engrais contient tous les nutriments. Lorsque mélangés avec d'autres ingrédients comme pour fabriquer des terreaux, ils peuvent être lessivés et diminuer la vitesse de drainage ou colmater les trous de drainage. Les plus grossiers concernent ceux fabriqués à partir de résidus maraîchers et BQ-Érable-500-1. Ces derniers sont trop grossiers pour être mélangés aux engrais et incorporés aux sols. Les autres ont une granulométrie intéressante tant pour une application aux sols qu'en terreaux. L'uniformité de la granulométrie varie beaucoup d'un biochar à l'autre (Fig. 3), tout dépend de la matière première, du tamisage en pré-conditionnement ou après la pyrolyse. La courbe granulométrique démontrée à la figure 3 est très étendue avec une grande hétérogénéité de la taille des particules comme c'est le cas de Award-Érable-700 et Leaf-Érable-350. Le BQ-Érable-500-1 donne l'exemple d'une granulométrie homogène. Selon l'utilisation, une granulométrie homogène peut être souhaitable alors que d'autres cas requièrent une granulométrie hétérogène. Toutefois, on cherche généralement à ce que cette granulométrie reste la même avec le transport, la manutention, etc. Ceux déjà tamisés et les plus fins ont subi les forces de rupture et sont généralement plus résistants (ΔDMP, Tableau 15), mais ce n'est pas toujours vrai. Outre les grosses particules de biochar des produits maraîchers qui se brisent beaucoup, Leaf-Érable-350 et BQ-Érable-500-1 se brisent significativement.

Tableau 12. Propriétés générales des biochars

Biochar	Cendre		C _{tot}		C _{graph}	C _{inorg}	C _{org}	H		O		H/C _{org}	O/C _{Tot}
	%	CV	%	CV	%	%	%	%	CV	%	CV	---	---
Bois dur													
Leaf-Érable-350	11.9	8.4	68.0	1.6	57.8	1.71	8.5	2.35	3.5	9.6	2.6	0.28	0.14
BQ-Érable-500-1	5.10	19.3	79.5	0.4	71.7	1.17	6.7	2.57	0.4	10.0	4.1	0.39	0.13
BQ-Érable-500-2	12.5	2.5	68.2	0.9	53.5	2.50	12.2	2.41	3.2	13.1	3.5	0.20	0.19
BQ-Érable-500-3	12.2	38.5	69.4	0.5	48.4	0.74	20.2	2.68	1.8	10.0	3.7	0.13	0.14
Award-Érable-700	14.2	2.7	65.4	1.5	51.7	2.00	11.7	1.89	5.6	10.2	0.4	0.16	0.16
B-Eu-300	10.0	3.1	56.2	0.4	24.9	3.46	27.8	3.26	2.6	27.4	1.2	0.12	0.49
Nuchar-1000	5.40	3.1	77.4	0.7	66.8	0.49	10.2	0.97	1.3	11.0	0.8	0.10	0.14
Bois mou résineux													
BP-Rés-400	13.8	2.2	66.3	0.3	42.2	1.73	22.3	3.63	2.1	16.2	12.9	0.16	0.24
BP-Rés-500	10.7	9.0	72.0	0.4	60.0	1.09	10.9	2.70	2.1	11.0	1.5	0.25	0.15
Airex-Rés-427	1.38	19.0	69.8	0.2	29.8	2.08	37.9	3.41	1.9	17.4	5.1	0.09	0.25
Airex-Rés-454	1.56	23.3	74.9	0.2	60.3	NA	14.5	2.98	0.8	10.8	3.7	0.21	0.14
Pyr-Rés-475	8.13	8.5	61.4	0.4	42.1	1.07	18.3	2.82	1.8	20.8	0.5	0.15	0.34
Pyr-Rés-475-vieilli	9.91	18.6	60.2	1.4	40.2	1.14	18.9	2.45	5.3	21.0	2.1	0.13	0.35
Airex-BR-315	NA	NA	43.5	2.8	10.7	9.17	23.7	4.99	2.7	33.1	1.6	0.21	0.76
Airex-BR-426	NA	NA	45.2	0.5	16.0	3.47	25.7	3.35	0.6	23.3	2.9	0.13	0.52
I-BR-300-24	19.2	NA	60.5	0.7	25.5	1.35	33.6	3.18	1.1	22.1	0.5	0.09	0.37
I-BR-300-48	10.7	25.7	52.4	0.2	36.9	1.49	14.0	1.86	0.2	20.5	0.3	0.13	0.39
I-BR-300-48-3èm	NA	8.6	54.7	0.9	22.8	2.64	29.2	2.69	0.9	22.3	11.8	0.09	0.41
Bois mou non résineux													
BP-Saule-400	11.1	1.1	67.4	1.4	23.7	5.31	38.4	3.58	2.2	16.2	1.5	0.09	0.24
BP-Saule-450-2013	9.80	1.1	NA	1.6	NA	NA	NA	2.77	1.2	16.0	1.0	NA	NA
BP-Saule-450-2014	11.6	0.2	70.2	1.4	67.5	1.28	1.5	2.51	9.5	14.5	2.4	1.72	0.21
BP-Saule-500	12.2	4.57	71.5	0.2	61.6	0.96	8.9	2.62	1.1	13.7	0.9	0.29	0.19
BP-Saule-550	9.56	9.14	NA	1.3	NA	NA	NA	2.41	1.5	10.5	1.1	NA	NA
BP-Feuillu-400	7.26	0.89	71.8	1.5	24.6	2.54	44.7	4.03	3.3	17.0	0.5	0.09	0.24
BP-Feuillu-500	10.5	3.05	69.6	0.5	59.9	0.42	9.2	2.62	1.2	11.9	1.1	0.28	0.17
Coco-1000	1.11	9.84	91.5	0.2	84.8	0.85	5.8	0.10	0.0	3.2	0.4	0.02	0.04
Matières non ligneuses													
BP-Phragmite-400	26.3	2.19	57.0	0.4	21.2	0.89	35.0	3.04	2.3	14.1	0.5	0.09	0.25
BP-Phragmite-500	28.6	3.55	56.3	1.7	43.2	0.48	12.6	2.45	5.3	14.7	12.4	0.19	0.26
I-Patate-300-24	9.88	4.69	62.8	1.8	24.8	1.32	36.8	4.28	3.4	20.6	1.8	0.12	0.33
I-Chou-300-48	20.0	2.49	55.4	0.2	21.8	3.21	30.4	4.16	2.1	20.8	1.2	0.14	0.38
I-Poireau-300-48	18.1	1.66	54.7	0.1	10.1	3.21	41.5	4.30	0.2	18.8	1.4	0.10	0.34
B-Maïs-300	5.28	1.22	68.8	0.7	37.7	1.32	29.7	3.83	2.1	14.7	0.2	0.13	0.21
Autres													
Wood-Ash-1500	54.9	5.26	30.0	3.0	25.0	1.79	3.2	0.21	45.3	15.2	15.2	0.06	0.51
IRDA-Lisier-500	21.7	8.49	52.4	0.4	23.5	3.88	25.1	3.06	0.1	19.3	1.1	0.12	0.37

CV=coefficient de variation (%) Les propriétés qui n'ont pas de CV n'ont pas été répétées.

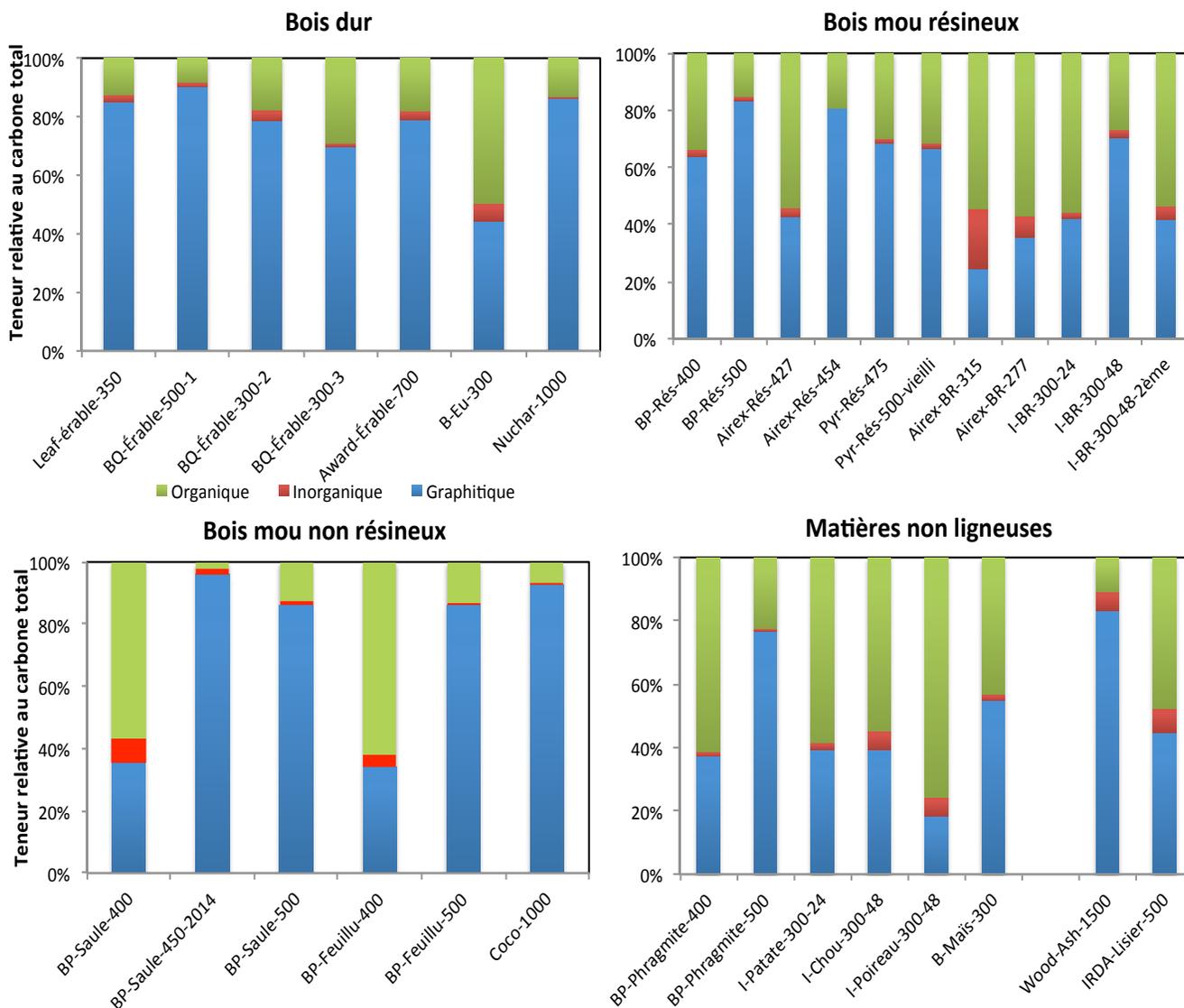


Figure 1. Teneurs relatives en différents types de carbone dans les biochars (vert : C_{org} , rouge : C_{inorg} , bleu : C_{graph})

Tableau 13. Propriétés physiques générales des biochars

Biochar	ρ_a	CV	ρ_s	CV	Θ	CV	CE	CV
	$g\ cm^{-3}$		$g\ cm^{-3}$		$m^3\ m^{-3}$		$dS\ m^{-1}$	
Bois dur								
Leaf-Érable-350	0.39	2.36	1.68	0.54	0.77	0.73	0.33	27.7
BQ-Érable-500-1	0.26	1.60	1.53	1.06	0.83	0.39	0.44	20.9
BQ-Érable-500-2	0.33	2.27	1.66	0.33	0.80	0.65	1.43	38.7
BQ-Érable-500-3	0.29	2.80	1.54	0.31	0.81	0.61	0.38	0.85
Award-Érable-700	0.35	3.44	1.77	1.57	0.80	0.49	0.48	34.2
B-Eu-300	0.46	1.26	1.63	0.77	0.72	0.19	0.68	0.97
Nuchar-1000	0.28	0.29	1.78	0.44	0.85	0.05	0.65	54.2
Bois mou résineux								
BP-Rés-400	0.39	0.44	1.45	0.41	0.73	0.31	0.40	1.64
BP-Rés-500	0.42	1.22	1.52	0.32	0.72	0.40	0.62	1.06
Airex-Rés-427	0.21	1.51	1.48	0.75	0.86	0.29	0.10	13.2
Airex-Rés-454	0.19	2.44	1.48	0.44	0.87	0.39	0.11	3.01
Pyr-Rés-475	0.30	2.14	1.55	0.28	0.80	0.47	0.13	23.3
Pyr-Rés-475-vieilli	0.31	3.23	1.54	0.60	0.80	0.77	0.15	0.01
Airex-BR-315	0.28	1.12	1.48	0.59	0.81	0.40	0.72	2.28
Airex-BR-426	0.26	10.7	1.52	1.83	0.83	1.89	0.88	3.72
I-BR-300-24	0.18	1.93	1.66	2.58	0.89	0.34	1.41	2.21
I-BR-300-48	0.18	3.03	1.63	2.87	0.89	0.74	1.57	4.64
I-BR-300-48-2ème	0.18	3.24	1.62	1.19	0.89	0.54	0.74	12.7
Bois mou non résineux								
BP-Saule-400	0.34	1.97	1.46	0.29	0.77	0.55	0.37	33.6
BP-Saule-450-2013	0.31	2.28	1.57	0.88	0.80	0.64	1.20	32.5
BP-Saule-450-2014	0.36	3.37	1.51	0.21	0.76	1.11	0.73	36.4
BP-Saule-500	0.32	0.75	1.51	1.71	0.79	0.64	0.50	0.66
BP-Saule-550	0.31	6.07	1.61	1.40	0.81	1.41	2.09	12.1
BP-Feuillu-400	0.39	0.96	1.41	0.28	0.72	0.27	0.28	5.40
BP-Feuillu-500	0.40	1.29	1.53	0.69	0.74	0.71	0.44	1.30
Coco-1000	0.32	1.71	2.11	0.15	0.85	0.27	0.34	9.61
Matières non ligneuses								
BP-Phragmite-400	0.39	0.91	1.54	0.20	0.75	0.33	0.32	1.01
BP-Phragmite-500	0.42	1.08	1.59	0.31	0.74	0.49	0.33	1.99
I-Patate-300-24	0.13	12.1	1.25	0.46	0.90	1.43	3.61	32.6
I-Chou-300-48	0.18	3.26	1.39	0.32	0.87	0.49	4.81	12.6
I-Poireau-300-48	0.17	0.77	1.38	1.07	0.88	0.28	3.10	40.6
B-Maïs-300	0.33	1.91	1.62	1.15	0.79	0.21	0.25	2.27
Autres								
Wood-Ash-1500	0.31	6.46	2.74	28.42	0.88	3.32	0.86	35.5
IRDA-Lisier-500	0.33	1.51	1.59	0.73	0.79	0.47	1.53	29.0

CV=coefficient de variation (%). Les valeurs des surfaces spécifiques arriveront bientôt.

Tableau 14. Propriétés physiques des biochars relatives à l'eau

Biochar	θ_g		Remontée capillaire						Sorption de HR		
	%	CV	Courbe de régression			θ_x		$\theta_{-0.05\text{ m}}$		θ_x	
			m g g ⁻¹ h ⁻¹	b g g ⁻¹ h ⁻¹	R ² ---	$\theta_{-1.4\text{ m}}$ %	CV	%	CV	%	CV
Bois dur											
Leaf-Érable-350	2.42	0.46	-0.0006	0.005	0.92	15.5	8.3	23.5	18.3	5.90	1.9
BQ-Érable-500-1	2.04	0.60	-0.0004	0.004	0.90	13.8	18.0	21.3	12.1	5.98	6.2
BQ-Érable-500-2	1.04	0.33	-0.0056	0.029	0.86	23.3	32.3	43.8	17.0	6.14	0.4
BQ-Érable-500-3	4.19	3.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.24	1.9
Award-Érable-700	2.42	0.25	-0.0005	0.005	0.94	14.9	15.9	23.0	16.2	5.93	3.3
B-Eu-300	5.19	10.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.14	6.4
Nuchar-1000	6.44	2.24	-0.0072	0.055	0.61	86.3	8.3	275	0.6	102.8	1.7
Bois mou résineux											
BP-Rés-400	0.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.67	1.8
BP-Rés-500	0.16	200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.04	3.4
Airex-Rés-427	5.64	0.06	-0.0004	0.003	0.97	7.7	0.4	12.3	10.4	6.11	5.4
Airex-Rés-454	3.41	5.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.79	2.1
Pyr-Rés-475	5.98	2.0	-0.0098	0.047	0.94	6.8	51.5	121	32.4	12.44	1.2
Pyr-Rés-475-vieilli	7.86	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	13.17	0.5
Airex-BR-315	0.76	18	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9.90	6.4
Airex-BR-426	0.77	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.94	1.5
I-BR-300-24	3.19	5.4	-0.0012	0.007	0.97	10.0	9.4	21.1	11.6	8.42	6.1
I-BR-300-48	5.94	32	-0.0061	0.029	0.89	5.7	9.4	14.5	10.0	8.65	1.8
I-BR-300-48-2ème	2.23	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	7.04	11.4
Bois mou non résineux											
BP-Saule-400	1.17	9.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.72	1.6
BP-Saule-450-2013	0.73	NA	-0.0059	0.033	0.78	20.0	55.8	40	4.3	NA	NA
BP-Saule-450-2014	0.56	8.51	-0.0098	0.048	0.88	6.5	66.1	137	20.4	5.62	7.7
BP-Saule-500	0.4	82	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	7.62	8.0
BP-Saule-550	0.70	NA	-0.0059	0.032	0.88	15.9	41.6	124	7.0	NA	NA
BP-Feuillu-400	0.01	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.29	0.5
BP-Feuillu-500	0.22	173	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.58	2.4
Coco-1000	2.95	1.70	-0.0039	0.031	0.62	43.5	58.9	149	1.2	NA	NA
Matières non ligneuses											
BP-Phragmite-400	0.0	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5.71	1.6
BP-Phragmite-500	0.0	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.20	2.6
I-Patate-300-24	1.00	8.40	-0.0028	0.018	0.97	24.4	5.8	64.2	3.8	14.58	11.3
I-Chou-300-48	0.80	16.4	-0.0069	0.039	0.98	39.8	9.4	106	10.0	11.12	2.2
I-Poireau-300-48	1.36	9.16	-0.0013	0.020	0.95	28.7	14.8	64.7	30.1	12.75	4.0
B-Mais-300	5.07	3.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6.17	0.7
Autres											
Wood-Ash-1500	16.8	6.64	-0.0224	0.127	0.92	150.7	130.4	420	93.8	5.89	6.7
IRDA-Lisier-500	2.48	1.1	-0.0011	0.009	0.88	19.4	16.8	41.8	16.7	9.25	12.1

CV=coefficient de variation (%). Les courbes de remontée capillaire ont été complétées avec les répliques pour calculer l'équation $y=m \ln(x)+b$, y =sorption d'eau g g⁻¹ h⁻¹, x =tension (-m) et b =asymptote g g⁻¹ h⁻¹. Il n'y a donc pas de CV pour m et b . La sorption indique le pourcentage de la masse initiale sèche absorbée en eau durant 72 heures sous différentes tensions (-1.4 m : humide, -0.05 m très mouillé). L'absorption de l'humidité de l'air (sorption HR) est la masse d'eau sous forme vapeur sorbée par masse de biochar après 72 hrs sous une HR de 80% à 22°C.

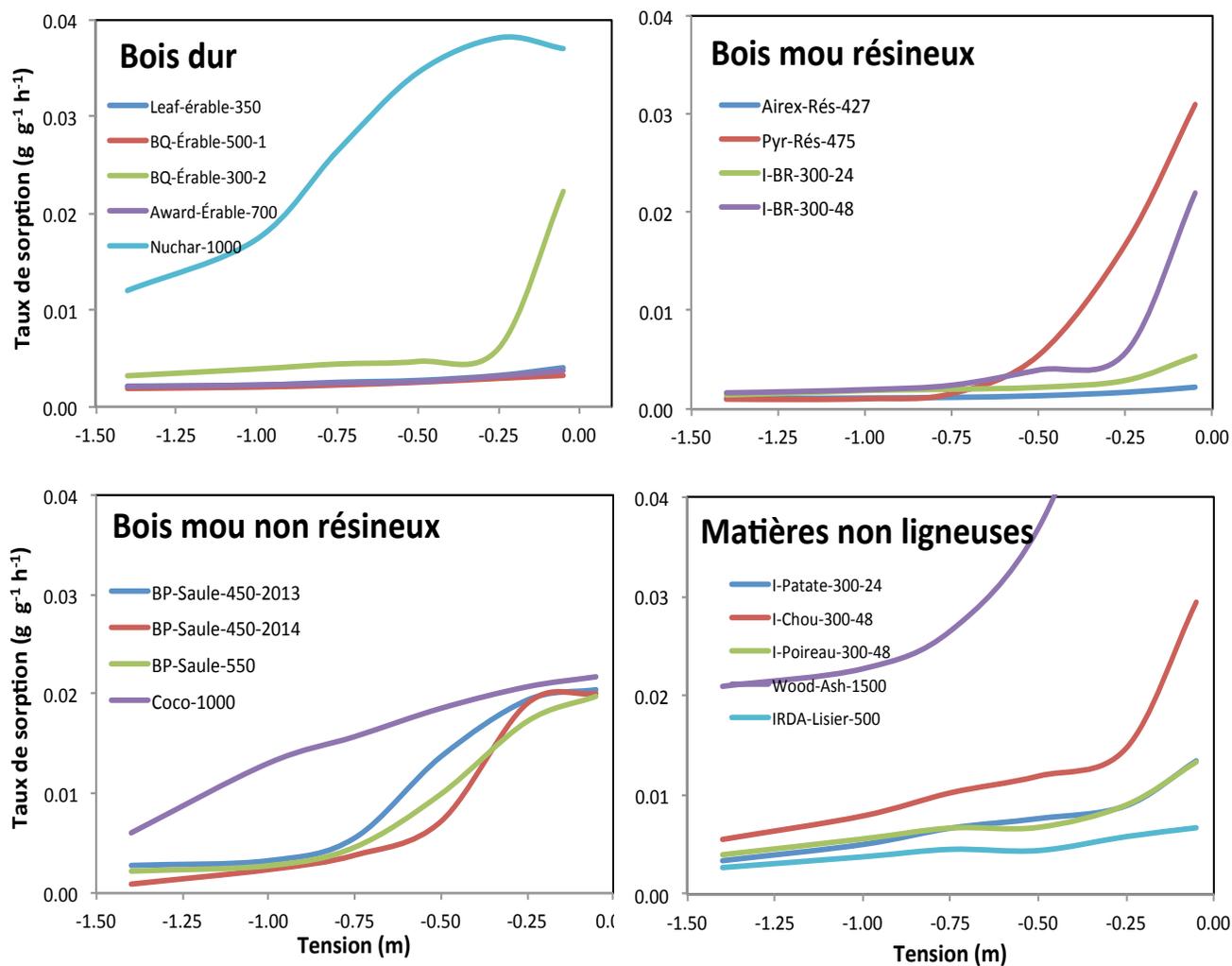


Figure 2. Remontée capillaire des différents biochars sous une tension de -0.05 m (très mouillé) à -1.5 m (humide)

Tableau 15. Propriétés physiques des biochars relatives à la granulométrie et à la résistance à l'abrasion

Biochar	DMP		Tel que reçu				Après abrasion			
	mm	CV	IU (D60/D10)		IU (D95/D10)		ΔDMP		ΔIU (D60/D10)	
			--	CV	--	CV	mm	CV	--	
Bois dur										
Leaf-Érable-350	1397	8.89	6.34	10.27	19.22	18.06	-280	-46.4	25.7	
BQ-Érable-500-1	6107	0.62	1.60	0.54	2.33	0.10	-655	-24.0	7.46	
BQ-Érable-500-2	287	5.34	2.20	13.59	2.95	15.06	-14.8	-182	2.32	
BQ-Érable-500-3	2191	3.46	2.06	0.73	3.37	4.08	NA	NA	NA	
Award-Érable-700	1242	11.95	6.42	9.92	21.93	9.01	-93.7	-190	23.6	
B-Eu-300	138	5.06	8.30	70.58	22.93	59.65	NA	NA	NA	
Nuchar-1000	171	14.39	1.89	9.04	2.86	27.14	-3.50	-645	3.47	
Bois mou résineux										
BP-Rés-400	189	1.97	2.74	3.15	5.39	3.89	NA	NA	NA	
BP-Rés-500	204	3.43	2.20	14.04	3.18	16.48	NA	NA	NA	
Airex-Rés-427	961	7.02	3.91	5.10	19.66	5.92	-62.0	-332	19.2	
Airex-Rés-454	884	4.98	4.09	3.41	10.42	8.01	NA	NA	NA	
Pyr-Rés-475	1302	4.71	5.45	1.67	21.27	3.49	-96.8	-144	24.8	
Pyr-Rés-475-vieilli	1543	4.38	6.93	4.96	22.47	2.95	NA	NA	NA	
Airex-BR-315	901	1.89	4.82	1.43	10.66	0.88	NA	NA	NA	
Airex-BR-426	1210	4.46	14.91	2.10	47.44	8.13	NA	NA	NA	
I-BR-300-24	1837	7.29	4.98	8.71	11.13	12.84	-71.7	-5.52	13.2	
I-BR-300-48	1814	3.67	5.47	6.70	12.13	6.78	-150	-18.0	17.2	
I-BR-300-48-2ème	1592	2.28	4.88	5.76	11.75	7.93	NA	NA	NA	
Bois mou non résineux										
BP-Saule-400	194	1.89	2.23	8.04	3.03	9.39	NA	NA	NA	
BP-Saule-450-2013	192	0.52	1.71	0.75	2.20	0.99	4.37	15.7	2.10	
BP-Saule-450-2014	202	2.88	1.75	8.14	2.53	9.05	5.62	112	2.31	
BP-Saule-500	194	1.21	2.06	3.45	2.74	3.87	NA	NA	NA	
BP-Saule-550	202	2.28	1.72	0.72	2.22	0.94	-3.83	-126	2.10	
BP-Feuillu-400	226	6.75	2.69	4.74	6.10	9.98	NA	NA	NA	
BP-Feuillu-500	236	2.60	1.78	0.81	3.67	2.02	NA	NA	NA	
Coco-1000	197	0.15	1.65	0.19	2.11	0.26	0.11	398	2.10	
Matières non ligneuses										
BP-Phragmite-400	198	5.13	2.27	10.26	3.12	12.94	NA	NA	NA	
BP-Phragmite-500	203	3.12	1.80	8.64	2.34	10.35	NA	NA	NA	
I-Patate-300-24	6017	1.73	49.42	6.03	58.95	5.50	-1062	-5.40	109.6	
I-Chou-300-48	2102	4.16	3.63	0.70	9.26	1.54	-402	-11.6	15.5	
I-Poireau-300-48	2594	16.10	3.62	7.00	9.38	12.39	-853	-35.8	21.8	
B-Maïs-300	253	1.11	2.47	8.03	6.70	8.05	NA	NA	NA	
Autres										
Wood-Ash-1500	1214	0.39	12.33	30.39	88.39	30.73	-60.7	-22.6	68.3	
IRDA-Lisier-500	1014	30.22	3.64	10.19	18.94	36.48	-123	-23.8	24.3	

CV=coefficient de variation (%).

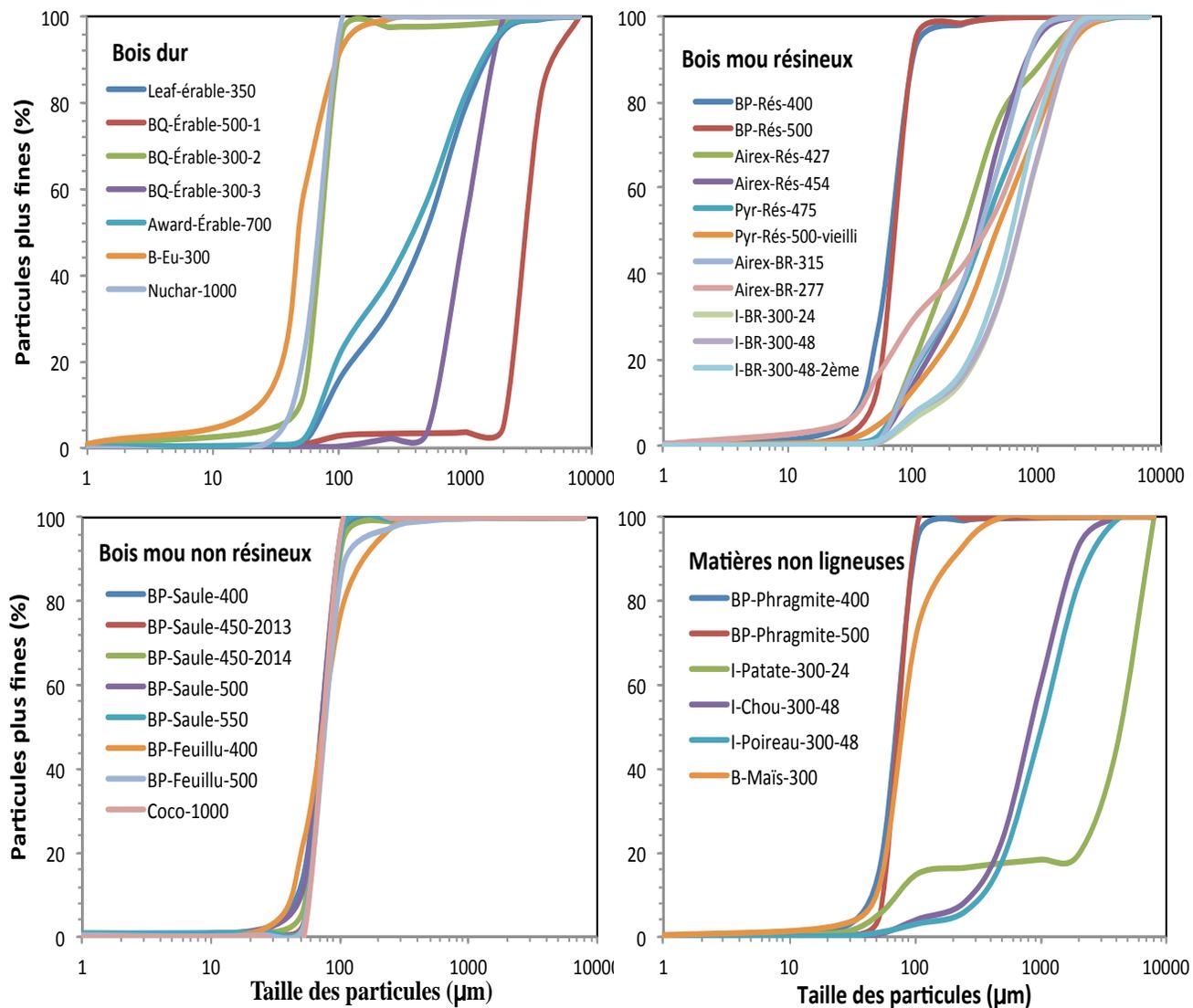


Figure 3. Courbes granulométriques cumulatives des différents biochars

4.3. Propriétés chimiques

Les pH varient entre 4.8 pour le Nuchar-1000 et 10.4 pour le Wood-Ash-1500, donc relativement acide à très basique (Tableau 16). Toutefois, ces deux biochars ne sont pas standard, le premier a été activé, alors que le deuxième contient surtout des cendres. Il est utilisé comme agent chaulant. Les biochars de bois dur ont tendance à avoir des pH plutôt basique entre 7.5 et 8.5, alors que ceux de bois mou résineux ont tendance à être un peu plus neutre, voir même légèrement acides. Les bois mous non résineux et les autres matières tendent aussi à être relativement basique avec des pH supérieurs à 7.5, particulièrement pour ceux produits avec des résidus maraîchers ayant des pH de plus de 9.

Les biochars ayant des pouvoirs tampons (PT) les plus importants sont encore le Wood-Ash-1500, le BQ-Érable-500-2, suivi de I-Chou-300-48 pour atteindre un pH 4 avec des CV importants. Ce sont sensiblement les mêmes qui ont les meilleurs PT pour atteindre un pH 7. Malgré qu'on lit souvent dans la littérature que les biochars ont un excellent PT, notre gamme de biochars indique que certains biochars en ont que très peu comme Air-Rés-427 et 454 et Nuchar-1000. Dans le cas de Nuchar-1000, c'est normal de requérir moins d'acide pour descendre à pH 4 puisqu'il y est presque déjà. Par conséquent, il ne requière aucun acide pour descendre à pH 7 comme tous ceux dont leur $\text{pH} \leq 7$. Par conséquent, malgré que la majorité des pH des biochars soit basique, la plupart d'entre eux n'ont que peu de pouvoir tampon. Ils vont très rapidement changer de pH en contact avec des éléments plus acides comme la tourbe ou la matière organique en décomposition.

Comme l'azote (N) se volatilise généralement lors de la pyrolyse, on retrouve des concentrations très faibles de N dans les biochars. Les biochars ne peuvent donc pas être considérés comme des engrais azotés. Ceux faits à partir de produits maraîchers (I-Patates-300-24, I-Chou-300-48, I-Poireau-300-48) en contiennent 2 à 8% (Tableau 17) et le biochar de lisier de porcs (IRDA-Lisier-500) environ 4.5%. La grande taille des particules à pyrolyser et la basse température lors de la pyrolyse des résidus maraîchers favorisent une plus grande rétention de l'azote. Comparativement, quelques biochars contiennent passablement de P total. Le biochar IRDA-Lisier-500 a la plus forte teneur puisqu'il est reconnu que le lisier de porcs québécois contient beaucoup de P. C'est pourquoi on applique autant de lisier dans les champs agricoles. Le Nuchar-1000 suit de près avec $18\,682 \text{ mg Kg}^{-1}$ alors que le Coco-1000 et I-BR-300-48 en contiennent très peu. Certains biochars peuvent donc être utilisés comme un amendement de P aux plantes (ex: sols, terreaux), alors que les autres peuvent être privilégiés lorsqu'on veut éviter la problématique du P dans l'environnement. Le contenu en soufre (S) est faible dans presque tous les biochars, mais il pourrait être suffisant comme amendement aux plantes en tant que micro-nutriment. I-BR-300-48 en contient légèrement plus avec 5.7%. Les teneurs en N et S ne peuvent donc pas causer des restrictions d'application des biochars en environnement. Comparativement dans le cas du P, certains biochars pourraient se voir restreindre certaines applications comme pour la filtration de l'eau ou une forte dose répétée dans des champs agricoles.

Les teneurs en macro et micro-éléments échangeables sont donnés au Tableau 18. Ils varient grandement d'un biochar à l'autre. En règle générale, les biochars contiennent plusieurs ou tous les nutriments ce qui fait qu'ils peuvent être considérés comme amendement aux plantes pour les micro-nutriments, sans dépasser la plupart des normes. Les biochars de produits maraîchers ont le plus fort contenu en potassium (K), alors que les biochars de bois de recyclage (Airex-BR-315 et 426, I-BR) ont les plus faibles teneurs. La teneur en Ca varie aussi beaucoup, les biochars de bois recyclés ayant tendance à en contenir légèrement plus. On ne voit pas de tendance spécifique pour le Mg. Pour ce qui est du sodium (Na) les biochars de bois recyclés, ceux de cogénération (Wood-Ash-1500) et fait de lisier (IRDA-Lisier-500) en contiennent d'avantage. Le Nuchar-1000 et le I-Chou-300-48 se démarquent par leur forte teneur en Na. Ces hautes teneurs pourraient causer problèmes aux plantes lorsqu'appliqués en grandes concentrations comme dans les terreaux. Par contre, le Na est facilement lessivable et ne resterait pas dans le biochar si on leur appliquait beaucoup d'eau comme on le fait

pour les cultures en serre et en pépinière. La somme des éléments échangeables varie entre $6.43 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ pour Airex-Rés-427 à plus de $120 \text{ cmol}^+ \text{ Kg}^{-1}$ pour les biochars faits de résidus maraîchers, ce qui offre une gamme intéressante pour la croissance des plantes et pour des applications environnementales.

La teneur en métaux lourds varie tout autant que celui des éléments solubles et échangeables. Par contre, le mercure (Hg) n'a pas été détecté. C'est pourquoi il n'est pas listé dans le tableau 20. Seulement 6 biochars contiennent de l'As. Airex-BR-315 en contient davantage, car il a été fabriqué de bois recyclés, donc contenant probablement des vieilles peintures et traitements. On a détecté le Cadmium (Cd) dans 10 des 34 biochars, mais en faible quantité. Le cobalt (Co) est présent dans la majorité des biochars en quantité relativement faible. Seuls BP-Phragmite-400 et IRDA-Lisier-500 en contiennent davantage soit plus de 15 mg kg^{-1} . On a mesuré le Cr dans presque tous les biochars. BP-Saule-450-2013 en contient le plus, suivi des biochar de phragmite et de Airex-BR-277. Les autres en contiennent peu. Dans le cas du cuivre (Cu), il a été détecté partout. Le biochar fabriqué à partir de lisier de porcs en contient beaucoup soit 556 mg Kg^{-1} puisque les porcs reçoivent du Cu et du zinc (Zn) dans leur alimentation et que plus de 99% de leur ration est excrété. Le molybdène (Mo) se retrouve dans 3 biochars seulement et ce, en faible quantité. Seulement 4 biochars ne contiennent pas de nickel (Ni). Les biochars faits de phragmite et le BP-Saule-450-2013 en contiennent le plus. Plus de la moitié des biochars n'ont pas de plomb (Pb). Parmi ceux qui en contiennent, tous les biochars faits de bois recyclés (Airex-BR-351 et 426 et I-BR-300-24 et 300-48) en ont davantage avec plus de 45 mg Kg^{-1} probablement à cause de l'ancienne peinture et autres traitements du bois. Seulement 8 biochars montrent un contenu en Se détectable. Airex-BR-426 en contient le plus suivi de BP-Phragmite-500. Le Zn se retrouve dans tous les biochars. Tous les biochars de saule ont tendance à en contenir considérablement ainsi que celui faits de lisier de porcs. On n'en a pas détecté dans les deux biochars activés soit Nu-char-1000 et Coco-1000. Les matières non ligneuses en contiennent peu ainsi que la plupart de ceux fabriqués de bois mous résineux.

Seulement 6 biochars sont disponibles à ce jour pour les contenus en HAP (Tableau 22). Des données supplémentaires arriveront bientôt. Parmi ces 6 biochars, seul le BP-Saule-450 dépasse une des normes et sera donc déclassé complètement pour des applications au champ. Trois autres soit BQ-Érable-500-1, Wood-Ash-1500 et I-Poireau-300-48 seront classés B selon le critère du MDDELCC (1998).

L'ensemble de ces valeurs chimiques seront comparés aux normes environnementales et classées pour le Québec et selon l'IBI et l'EBC. Les contenus des biochars en macro et micro-nutriments seront aussi interprétés pour les plantes ultérieurement.

Tableau 16. Propriétés chimiques des biochars relatives à l'acidité

Biochar	pH _{H2O}		PT _{pH4}		PT _{pH7}	
	---	CV	M _{eq} HCl	CV	M _{eq} HCl	CV
Bois dur						
Leaf-Érable-350	8.58	0.88	0.59	13.06	0.03	0.01
BQ-Érable-500-1	7.56	0.67	0.21	4.42	0.01	0.01
BQ-Érable-500-2	8.89	0.58	1.57	3.01	0.10	20.41
BQ-Érable-500-3	7.78	0.61	0.26	2.41	0.05	4.42
Award-Érable-700	8.39	7.38	0.95	8.59	0.05	0.01
B-Eu-300	8.08	0.66	0.19	7.64	0.04	6.15
Nuchar-1000	4.80	0.49	0.06	6.80	NA	NA
Bois mou résineux						
BP-Rés-400	8.56	0.06	0.27	0.88	0.08	3.01
BP-Rés-500	9.75	0.10	1.54	0.76	0.74	1.59
Airex-Rés-427	5.50	0.45	0.02	20.41	NA	NA
Airex-Rés-454	7.21	0.43	0.06	8.08	0.01	0.01
Pyr-Rés-475	5.97	1.81	0.21	17.82	NA	NA
Pyr-Rés-475-vieilli	6.37	2.07	0.27	5.24	NA	NA
Airex-BR-315	6.86	0.07	0.26	1.84	NA	NA
Airex-BR-426	7.71	0.12	0.60	0.00	0.08	0.01
I-BR-300-24	6.09	0.67	0.19	1.61	NA	NA
I-BR-300-48	5.64	1.06	0.13	31.70	NA	NA
I-BR-300-48-2ème	6.11	1.23	0.29	12.56	NA	NA
Bois mou non résineux						
BP-Saule-400	8.10	0.17	0.32	0.00	0.07	0.01
BP-Saule-450-2013	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Saule-450-2014	9.56	1.13	0.63	3.72	0.12	9.39
BP-Saule-500	8.99	1.20	0.96	1.77	0.34	5.31
BP-Saule-550	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Feuillu-400	7.64	0.31	0.12	2.02	0.01	0.01
BP-Feuillu-500	8.78	2.15	1.03	2.28	0.31	5.69
Coco-1000	8.91	0.06	0.22	7.78	0.06	4.16
Matières non ligneuses						
BP-Phragmite-400	7.55	0.06	0.21	1.14	0.04	0.01
BP-Phragmite-500	7.72	0.42	0.15	4.88	0.03	4.04
I-Patate-300-24	9.29	0.18	0.78	6.02	0.20	0.01
I-Chou-300-48	9.94	2.31	1.38	9.09	0.37	4.11
I-Poireau-300-48	9.45	0.05	1.05	0.00	0.24	4.88
B-Maïs-300	7.69	0.40	0.64	0.37	0.10	2.28
Autres						
Wood-Ash-1500	10.42	0.90	2.20	6.43	0.23	36.42
IRDA-Lisier-500	9.69	0.51	1.17	17.61	0.11	10.88

CV=coefficient de variation (%).

Tableau 17. Teneurs en certains éléments totaux

Biochar	N_{total}		P_{total}		S_{total} %
	%	CV	mg Kg ⁻¹	CV	
Bois dur					
Leaf-Érable-350	0.63	3.50	1043	0.7	3.35
BQ-Érable-500-1	0.55	0.35	550	5.0	0.00
BQ-Érable-500-2	0.57	3.16	1453	3.2	3.64
BQ-Érable-500-3	0.77	1.75	NA	NA	0.00
Award-Érable-700	0.58	5.57	806	22.3	1.51
B-Eu-300	0.47	2.56	1659	3.0	0.00
Nuchar-1000	0.33	1.30	18682	6.2	3.58
Bois mou résineux					
BP-Rés-400	1.23	2.14	1110	27.4	0.00
BP-Rés-500	1.28	2.11	NA	NA	0.00
Airex-Rés-427	0.31	1.88	221	45.3	3.90
Airex-Rés-454	0.21	0.84	NA	NA	0.00
Pyr-Rés-475	0.48	1.76	755	24.3	3.73
Pyr-Rés-475-vieilli	0.49	5.28	NA	NA	0.00
Airex-BR-315	0.47	2.66	NA	NA	0.00
Airex-BR-426	0.46	0.60	NA	NA	0.00
I-BR-300-24	0.71	1.11	241	NA	3.99
I-BR-300-48	0.93	0.22	72	63.4	5.83
I-BR-300-48-2ème	0.89	0.86	NA	36.6	0.00
Bois mou non résineux					
BP-Saule-400	1.00	2.17	756	8.0	0.00
BP-Saule-450-2013	1.08	1.21	1699	65.8	3.14
BP-Saule-450-2014	0.95	9.45	1033	9.2	2.88
BP-Saule-500	1.06	1.09	NA	NA	NA
BP-Saule-550	1.16	1.45	1620	11.7	3.28
BP-Feuillu-400	0.94	3.30	1415	4.0	0.00
BP-Feuillu-500	0.98	1.18	NA	NA	NA
Coco-1000	0.27	0.00	169	4.3	2.56
Matières non ligneuses					
BP-Phragmite-400	1.19	2.26	1383	7.7	0.00
BP-Phragmite-500	1.15	5.28	NA	NA	NA
I-Patate-300-24	2.92	3.43	10544	5.1	3.54
I-Chou-300-48	3.73	2.14	9348	7.1	5.72
I-Poireau-300-48	5.71	0.24	7029	0.3	1.41
B-Mais-300	0.88	2.14	1780	2.0	0.00
Autres					
Wood-Ash-1500	0.32	45.3	2676	14.5	2.69
IRDA-Lisier-500	4.49	0.07	22796	2.9	3.91

Tableau 18. Teneurs des biochars en macro et microéléments échangeables (relatives aux plantes)

Biochar	K		Ca		Mg		Na		Total cmol ⁺ Kg ⁻¹
	cmol ⁺ Kg ⁻¹	CV							
Bois dur									
Leaf-Érable-350	7.30	7.84	9.04	5.98	2.17	7.79	2.10	5.69	20.61
BQ-Érable-500-1	2.75	19.83	4.63	50.35	0.45	15.33	0.44	10.14	8.27
BQ-Érable-500-2	18.42	0.66	23.35	0.69	11.14	0.75	2.15	2.31	55.06
BQ-Érable-500-3	6.27	5.68	11.08	3.38	1.30	4.08	0.16	6.54	18.81
Award-Érable-700	8.10	4.07	13.90	9.41	2.23	8.32	2.04	2.18	26.27
B-Eu-300	7.54	32.77	14.73	16.16	1.02	34.45	0.96	31.26	24.24
Nuchar-1000	0.40	3.46	1.44	1.30	0.18	0.65	33.52	28.81	35.54
Bois mou résineux									
BP-Rés-400	15.27	1.60	9.91	1.97	1.48	2.45	0.79	2.98	27.46
BP-Rés-500	13.36	21.54	8.93	15.08	1.25	16.97	0.71	18.14	24.25
Airex-Rés-427	4.59	1.19	1.31	4.04	0.03	15.81	0.50	7.68	6.43
Airex-Rés-454	3.56	4.60	3.45	7.48	0.64	7.89	0.20	4.07	7.85
Pyr-Rés-475	10.93	95.70	63.47	92.27	6.62	97.40	1.62	7.35	82.63
Pyr-Rés-475-vieilli	10.27	14.67	47.16	3.81	4.12	2.28	0.57	2.15	62.12
Airex-BR-315	2.84	0.47	21.21	6.04	1.57	2.31	2.33	2.11	27.96
Airex-BR-426	3.45	9.26	19.89	10.76	0.82	9.19	2.93	10.29	27.09
I-BR-300-24	2.87	1.58	25.56	2.47	0.94	5.90	4.86	2.80	34.22
I-BR-300-48	3.98	7.51	23.53	38.05	1.01	25.25	5.43	7.33	33.96
I-BR-300-48-2ème	2.41	3.15	15.43	5.79	0.53	3.19	3.43	2.46	21.79
Bois mou non résineux									
BP-Saule-400	10.85	4.24	17.17	1.93	1.22	2.37	0.52	4.23	29.76
BP-Saule-450-2013	31.99	9.72	17.44	7.42	2.61	9.95	4.33	2.06	56.36
BP-Saule-450-2014	24.39	2.63	10.76	0.31	1.28	2.06	0.49	1.72	36.92
BP-Saule-500	27.31	1.06	21.37	3.60	1.66	3.03	0.52	3.02	50.86
BP-Saule-550	28.48	8.62	6.07	10.08	1.15	12.02	3.50	5.46	39.20
BP-Feuille-400	4.80	2.32	8.93	1.08	0.96	0.56	0.26	4.12	14.95
BP-Feuille-500	16.49	2.89	17.88	1.53	1.19	1.71	0.56	2.87	36.13
Coco-1000	7.84	0.48	2.18	2.36	1.14	1.46	0.90	0.33	12.05
Matières non ligneuses									
BP-Phragmite-400	10.83	3.41	13.54	0.93	0.99	1.99	1.36	2.17	26.72
BP-Phragmite-500	12.00	1.42	5.98	0.86	0.62	0.69	1.52	1.12	20.11
I-Patate-300-24	117.38	2.57	0.39	1.35	1.71	1.33	0.43	1.53	119.90
I-Chou-300-48	138.51	1.14	21.47	0.97	6.17	3.04	18.63	1.46	184.77
I-Poireau-300-48	137.41	1.10	14.40	4.08	6.96	3.34	1.22	1.30	159.98
B-Maïs-300	26.47	6.79	0.81	2.29	0.78	4.75	0.50	6.50	28.55
Autres									
Wood-Ash-1500	28.40	10.59	62.83	4.05	2.24	9.46	4.60	7.71	98.07
IRDA-Lisier-500	30.87	7.09	8.16	7.14	4.72	11.99	6.49	8.94	50.24

CV=coefficient de variation (%)

Tableau 19. Teneurs en macro et microéléments solubles des biochars (relatives au transport de contaminants et aux plantes)

Biochar	K		Ca		Mg		Na		Mn		Fe		Al		Cu		Zn	
	mg kg ⁻¹ X 10 ⁴	CV	mg kg ⁻¹ X 10 ⁴	CV	mg kg ⁻¹ X 10 ³	CV	mg kg ⁻¹ X 10 ²	CV	mg kg ⁻¹ CV									
Bois dur																		
Leaf-Érable-350	5.1	15	0.76	6.4	1.7	13.1	0.85	9.3	31	14	66	24	161	21	6.1	58	2.0	45
BQ-Érable-500-1	4.0	43	1.3	90	3.7	104	0.28	78	170	63	22	41	140	7.9	4.1	14	0.6	43
BQ-Érable-500-2	1.	2.0	2.4	1.5	13	1.8	0.81	1.6	140	5.9	6	26	164	2.4	3.4	30	1.3	15
BQ-Érable-500-3	4.9	2.1	1.8	2.5	4.1	0.8	0.69	15	74	1.9	15	11	19	14	6.4	14	2.2	19
Award-Érable-700	4.7	3.6	0.94	12	0.17	7.6	0.65	1.4	5.0	12	23	12	351	5.8	3.2	39	0.3	62
B-Eu-300	2.2	2.0	0.99	4.5	4.8	1.6	4.5	1.0	30	7.6	68	29	35	11	8.6	22	1.8	29
Nuchar-1000	1.0	8.9	0.04	68			137	1.5	1.8	56	1032	0.9	678	0.9	8.6	41	7.8	21
Bois mou résineux																		
BP-Rés-400	6.5	1.8	0.76	2.3	3.7	1.2	3.6	1.3	22	2.9	27	5.3	18	24	4.9	76	1.4	0.01
BP-Rés-500	13	0.4	0.58	4.8	1.7	5.5	3.5	1.4	7.4	57	16	2.1	108	7.3	2.6	18	1.8	11
Airex-Rés-427	0.5	1.1	0.02	51.	0.057	63.9	0.009	9.6	6.2	14	46	2.5	44	3.4	6.3	44	3.2	29
Airex-Rés-454	1.1	0.6	0.46	1.8	1.1	1.1	0.59	7.9	81	29	12	35	7.4	35	2.7	18	1.3	44
Pyr-Rés-475	2.3	129	0.46	128	0.83	125	0.24	51	95	108	42	17	155	13	2.6	17	0.8	55
Pyr-Rés-475-vieilli	1.6	2.9	0.59	2.4	1.2	2.9	1.8	9.9	110	43	45	33	11	25	6.4	30	3.7	32
Airex-BR-315	1.9	5.1	8.2	1.1	3.3	3.2	18	3.0	187	5.1	30	8.4	23	20	15	59	2.5	17
Airex-BR-426	2.2	0.9	6.0	5.0	4.4	4.3	15	1.2	543	2.0	93	6.1	52	6.1	17	16	14	6.3
I-BR-300-24	0.3	1.1	18	7.0	3.1	4.9	9.4	1.4	261	4.9	11	2.4	4.7	13	19	14	37	8.0
I-BR-300-48	1.0	11	12	25	3.4	4.3	40	8.0	426	17	344	13	287	31	14	34	69	39
I-BR-300-48-2ème	0.2	49	7.4	18	1.4	1.1	5.8	95	215	35	14	137	17	120	21	51	21	78
Bois mou non résineux																		
BP-Saule-400	5.9	1.4	2.8	1.3	4.3	1.7	2.7	0.7	72	11	25	8.2	7.7	40	9.8	28	5.3	14
BP-Saule-450-2013	8.6	13	0.96	6.6	1.5	9.7	0.88	14	5.1	95	17	6.0	65	1.2	3.6	5.2	0.8	12
BP-Saule-450-2014	11	2.6	0.78	1.1	3.1	3.8	2.1	2.6	11	17.4	10	9.0	217	29	4.1	19	4.8	13
BP-Saule-500	9.3	0.3	2.1	1.5	3.4	1.4	1.6	3.9	15	6.2	16	5.2	4.9	28	7.4	74	3.3	4.2
BP-Saule-550	14	1.5	0.15	3.9	1.1	2.3	1.2	0.4	1.1	18	7	19	148	2.5	3.8	19	0.9	12
BP-Feuille-400	3.0	9.7	1.4	7.6	3.0	9.3	1.5	8.0	51	10	18	7.0	3.9	7.0	7.9	31	4.6	19
BP-Feuille-500	8.1	3.3	1.5	5.8	2.6	7.9	2.5	8.7	5.6	12	11	16	4.9	13	5.7	47	7.7	18
Coco-1000	4.5	0.7	0.02	14	0.05	7.5	4.8	1.0			5	2.9	4.7	4.0	2.8	8.1	4.4	37
Matières non ligneuses																		
BP-Phragmite-400	3.5	0.3	1.2	1.3	2.6	0.7	4.9	2.0	99	1.7	18	18	3.7	36	5.0	63	1.7	28
BP-Phragmite-500	4.2	2.0	0.76	2.7	1.4	0.9	5.8	2.4	167	1.9	29	8.9	1.6	127	7.3	72	4.6	37
I-Patate-300-24	50	2.0	0.09	10	1.1	2.5	0.93	3.3	9.8	10	176	15	377	1.5	105	2.3	31	19
I-Chou-300-48	0	1.3	1.3	6.6	3.9	8.1	867	0.6	6.3	11	234	5.3	1489	6.1	27	17	15	4.5
I-Poireau-300-48	94	3.1	0.66	3.6	3.2	2.4	5.2	2.0	31	4.0	712	3.5	1507	1.6	38	20	41	6.8
B-Maïs-300	14	2.1	0.05	47	0.82	10.5	2.4	0.8	16	35	194	6.1	124	13	15	27	13	12
Autres																		
Wood-Ash-1500	14	13	0.89	9.2	0.29	30.0	22	0.01	44	28	139	25	6294	3.6	12	25	11	17
IRDA-Lisier-500	24	4.7	1.4	0.4	14	1.1	44	6.7	27	31	100	6.2	2.1	80	29	29	13	6.2

Tableau 20. Teneurs totales des biochars en métaux et métalloïdes (relatives à l'environnement)

Biochar	As		Cd		Co		Cr		Cu	
	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV
Bois dur										
Leaf-Érable-350	0.0	0	5.33	9	0.00	0	3.42	29	19.7	13
BQ-Érable-500-1	0.0	0	0.67	141	0.00	0	5.21	50	10.3	40
BQ-Érable-500-2	0.0	0	2.99	1	1.33	71	3.48	18	21.7	8
BQ-Érable-500-3	0.0	0	0.00	0	0.26	141	0.65	0	6.1	20
Award-Érable-700	0.0	0	5.33	18	0.67	141	3.48	7	21.3	19
B-Eu-300	0.0	0	0.00	0	3.52	5	1.19	4	9.5	7
Nuchar-1000	0.0	0	0.00	0	0.00	0	3.36	5	4.2	29
Bois mou résineux										
BP-Rés-400	0.0	0	0.00	0	3.35	14	6.35	27	17.0	5
BP-Rés-500	0.0	0	0.00	0	0.00	0	6.21	6	13.5	6
Airex-Rés-427	0.0	0	0.00	0	0.00	0	3.72	39	12.7	10
Airex-Rés-454	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	3.4	20
Pyr-Rés-475	0.0	0	0.00	0	0.00	0	6.39	16	15.3	11
Pyr-Rés-475-vieilli	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	9.4	30
Airex-BR-315	2.5	141	0.00	0	1.70	54	3.81	46	10.5	13
Airex-BR-426	72.1	84	0.00	0	2.69	17	22.6	61	54.9	49
I-BR-300-24	60.8	9	0.16	141	5.53	34	14.5	13	70.7	29
I-BR-300-48	40.6	40	0.00	0	1.66	39	4.89	71	24.1	46
I-BR-300-48-2ème	27.0	84	0.00	0	0.00	0	1.30	62	41.3	111
Bois mou non résineux										
BP-Saule-400	18.9	21	1.17	3	7.08	6	17.7	14	86.4	1
BP-Saule-450-2013	0.0	0	3.24	17	2.33	20	33.0	49	72.0	12
BP-Saule-450-2014	0.0	0	0.43	4	4.34	4	6.91	18	27.8	2
BP-Saule-500	0.0	0	0.00	0	0.00	0	5.88	16	20.0	3
BP-Saule-550	0.0	0	1.78	32	1.00	141	23.1	28	74.7	25
BP-Feuillu-400	0.0	0	0.00	0	1.70	4	4.10	8	11.1	1
BP-Feuillu-500	0.0	0	0.00	0	0.26	141	5.14	5	26.8	24
Coco-1000	0.0	0	0.00	0	0.82	19	1.50	1	15.0	6
Matières non ligneuses										
BP-Phragmite-400	0.0	0	0.00	0	12.99	6	20.8	7	27.7	7
BP-Phragmite-500	0.0	0	0.00	0	1.61	5	22.3	6	23.5	11
I-Patate-300-24	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	29.8	25
I-Chou-300-48	0.0	0	0.00	0	1.33	7	0.00	0	6.0	6
I-Poireau-300-48	0.0	0	0.00	0	1.07	11	0.42	9	12.9	6
B-Maïs-300	0.0	0	0.00	0	1.38	8	0.22	6	6.1	5
Autres										
Wood-Ash-1500	0.0	0	0.40	35	9.84	7	3.57	11	57.8	26
IRDA-Lisier-500	0.0	0	0.00	0	15.89	1	1.37	12	556	2

Hg n'a pas été détecté. CV=coefficient de variation.

**Tableau 21. Teneurs totales des biochars en métaux et métalloïdes (relatives à l'environnement)
(suite)**

Biochar	Mo		Ni		Pb		Se		Zn	
	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV	mg kg ⁻¹	CV
Bois dur										
Leaf-Érable-350	0.00	0	7.00	12	1.97	141	0.0	0	289	0
BQ-Érable-500-1	0.00	0	4.67	36	1.56	141	0.0	0	29.3	15
BQ-Érable-500-2	0.00	0	9.33	22	4.90	141	0.0	0	185	6
BQ-Érable-500-3	0.00	0	2.66	24	0.00	0	16.0	23	26.5	29
Award-Érable-700	0.00	0	6.33	7	7.12	50	0.0	0	301	21
B-Eu-300	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	18.0	8
Nuchar-1000	2.74	9	2.67	29	0.00	0	0.0	0	0.0	0
Bois mou résineux										
BP-Rés-400	0.00	0	34.9	12	0.00	0	0.0	0	54.2	2
BP-Rés-500	0.00	0	23.0	5	0.00	0	14.0	5	73.9	4
Airex-Rés-427	0.00	0	4.67	20	0.00	0	0.0	0	27.0	18
Airex-Rés-454	0.00	0	1.51	141	0.00	0	0.0	0	13.1	11
Pyr-Rés-475	0.00	0	8.33	34	4.37	71	0.0	0	195	12
Pyr-Rés-475-vieilli	0.00	0	4.50	35	0.00	0	19.9	27	63.3	31
Airex-BR-315	0.00	0	6.70	38	66.6	35	9.1	10	40.0	45
Airex-BR-426	0.00	0	23.6	12	184	13	27.5	45	130	15
I-BR-300-24	0.00	0	22.4	123	180	82	0.0	0	149	96
I-BR-300-48	0.00	0	2.03	34	51.0	76	0.0	0	151	116
I-BR-300-48-2ème	0.00	0	1.96	40	45.1	40	0.0	0	20.4	10
Bois mou non résineux										
BP-Saule-400	0.00	0	40.2	7	207	2	0.0	0	290	1
BP-Saule-450-2013	0.00	0	63.3	3	1.71	141	0.0	0	379	10
BP-Saule-450-2014	0.00	0	38.7	3	0.00	0	0.0	0	151	4
BP-Saule-500	0.00	0	22.0	3	1.54	141	11.5	2	136	5
BP-Saule-550	0.00	0	43.0	17	0.00	0	0.0	0	455	8
BP-Feuillu-400	0.00	0	12.5	4	0.00	0	0.0	0	55.3	5
BP-Feuillu-500	0.00	0	35.1	3	0.00	0	13.0	2	87.5	7
Coco-1000	0.00	0	4.39	5	0.00	0	0.0	0	0.0	0
Matières non ligneuses										
BP-Phragmite-400	1.19	12	51.6	2	4.58	4	0.0	0	42.2	14
BP-Phragmite-500	0.00	0	67.8	1	5.75	8	25.7	4	93.2	2
I-Patate-300-24	0.00	0	1.95	48	15.4	4	0.0	0	30.7	5
I-Chou-300-48	0.00	0	1.90	10	0.00	0	0.0	0	6.6	21
I-Poireau-300-48	0.00	0	0.42	141	0.00	0	0.0	0	47.7	5
B-Maïs-300	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	139	4
Autres										
Wood-Ash-1500	0.00	0	0.00	0	6.68	14	0.0	0	81.9	23
IRDA-Lisier-500	3.28	2	0.00	0	0.00	0	0.0	0	326	5

Tableau 22. Teneurs en HAP de certains biochars (relatives à l'environnement)

HAP	Critères		Biochars						
	MDDELCC (A)	MDDELCC (B)	BQ-Érable-500-1	Pyr-Résineux-500	BP-Saule-450-2014	I-BS-300-48	Wood-Ash-1500	I-Poireau-300-48	I-Poireau-300-48
Acénaphène	0.1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Acénaphylène	0.1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.5	<0.1	<0.1
Anthracène	0.1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(a)anthracène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(a)pyrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(e)pyrène		1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(b+j+k)fluoranthène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(c)phénanthrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Benzo(g,h,i)pérylène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Chrysène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dibenzo(a,h)anthracène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dibenzo(a,i)pyrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dibenzo(a,h)pyrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Dibenzo(a,l)pyrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Diméthyl-7,12 benzo(a)anthracène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fluoranthène	0.1	10	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fluorène	0.1	10	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Méthyl-3 cholanthrène	0.1	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Naphtalène	0.1	5	1.5	<0.1	2.0	<0.1	3.5	<0.1	0.4
Phénanthrène	0.1	5	0.3	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Pyrène	0.1	10	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Méthyl-1 naphtalène	0.1	1	0.5	<0.1	0.7	<0.1	0.2	<0.1	0.1
Méthyl-2 naphtalène	0.1	1	0.6	<0.1	1.0	<0.1	0.1	<0.1	<0.1
Diméthyl-1,3 naphtalène	0.1	1	0.3	<0.1	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Triméthyl-2,3,5 naphtalène	0.1	1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1

Jaune : ceux qui dépassent la limite A, Rouge : ceux qui dépassent la limite B

4.4. Propriétés biologiques

Deux seules propriétés biologiques ont été mesurées (Tableau 23, Figs. 4-7). Dans l'ensemble, les vers de terre ne veulent pas vivre dans la terre contenant du biochar activé (Nu-char-1000 et Coco-1000) quelque soit la concentration. De tous les biochars, ils préfèrent ceux fabriqués de matières non ligneuses surtout lorsque la terre contient seulement 10% de biochar et ce, même s'ils ont le choix avec la terre à jardin seule (Fig. 4). Lorsque la terre contient 50% de biochar, ils choisissent plutôt ceux de bois dur, sinon ils préfèrent rester dans la terre à jardin seule.

Les données de la germination de la laitue dans les mélanges de terre et de biochar ne sont pas complètes. D'autres données viendront durant l'été. Parmi ceux mesurés, la germination se produit dans tous les biochars. Par contre, la vitesse et le taux de germination varient. À 10% de biochar dans la terre, seul IRDA-Lisier-500 et deux biochars de produits maraîchers retardent la germination de quelques jours. Mais à 10 jours, elles sont toutes germées. Par contre à 50% de biochar, la germination de toutes les matières non ligneuses a été retardée ainsi que le taux de germination, sauf pour le Wood-Ash-1500. On observe peu de différences dans la germination de la laitue dans les autres mélanges avec 50% biochar à part pour BQ-Érable-300.

Par conséquent, on considère que les biochars ne sont pas toxiques pour l'activité biologique. Par contre, ils peuvent causer des problèmes en concentration extrêmement élevée comme c'est le cas de nos essais avec 50% de biochar. L'interprétation des résultats sera complétée plus tard.

5. Conclusion et travaux futurs

Les valeurs moyennes, minimales et maximales rencontrées pour la majorité des propriétés sont données aux tableaux 24 à 26. Ce document est important pour la liste des méthodes d'analyse ainsi que pour montrer la très grande variété des propriétés physico-chimiques des biochars retrouvés au Québec. Il sert aussi à situer chaque entreprise parmi la gamme de biochars retrouvés au Québec et à comparer avec certains biochars vendus sur le marché mondial. On peut, à partir de ces données évaluer comment une même méthode de pyrolyse donne des biochars différents avec des matières différentes (ex : tous le Airex comparés entre eux et tous les BP comparés entre eux), comment une même matière donne des biochars très différents lorsque soumis à des méthodes de pyrolyse différentes (ex : tous les bois durs d'érables comparés entre eux, les BP d'une même matière comparés entre les deux températures de fabrication), et le potentiel de différentes matières pour la pyrolyse.

L'interprétation de ces résultats tant qu'à la classification des biochars et leurs utilisations potentielles en agriculture et en environnement feront l'objet de chapitres de thèse de doctorat de notre équipe. La description et la corrélation des propriétés relatives à la structure et aux différents carbones des biochars en lien avec la méthode de pyrolyse, le lessivage des éléments feront l'objet d'études particulières de notre équipe. Les corrélations entre les méthodes de pyrolyse et l'ensemble des propriétés feront aussi l'objet d'analyses statistiques de l'équipe. Par ailleurs, l'effet de certains biochars sur la croissance est étudié par notre équipe sur une variété de plantes différentes et de conditions variées (champ, serre, pépinière, mines, bandes riveraines). Des publications en découleront. Plusieurs documents seront disponibles au courant de l'année 2015, alors que d'autres le seront en 2016.

Tableau 23. Proportions des vers de terre qui ont choisi le mélange de terre contenant 10% comparativement à la terre à jardin seule, et contenant 50% de biochar ainsi que le taux de germination de la laitue après 3 et 6 jours dans les mêmes mélanges (relatives à leur toxicité)

Biochar	Vers de terre				Laitue			
	10% biochar		50% biochar		10% mass. biochar		50% mass biochar	
	%	CV	%	CV	3 jrs	6 jrs	3 jrs	6 jrs
Bois dur								
Leaf-Érable-350	63.3	19.7	60.0	13.6	78.3	95.0	61.7	86.7
BQ-Érable-500-1	76.7	24.6	79.6	9.7	83.3	90.0	26.7	73.3
BQ-Érable-500-2	46.7	20.2	56.7	22.0	70.0	93.3	3.3	75.0
BQ-Érable-500-3	63.3	26.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Award-Érable-700	50.0	43.2	56.3	23.8	68.3	88.3	66.7	93.3
B-Eu-300	56.7	8.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nuchar-1000	0.0	0.0	0.0	0.0	81.7	91.7	73.3	90.0
Bois mou résineux								
BP-Rés-400	36.7	56.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Rés-500	43.3	28.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Airex-Rés-427	40.0	20.4	33.3	28.3	73.3	88.3	85.0	93.3
Airex-Rés-454	53.3	23.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Pyr-Rés-475	NA	NA	33.3	14.1	80.0	91.7	51.7	93.3
Pyr-Rés-475-vieilli	30.0	27.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Airex-BR-315	70.0	11.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Airex-BR-426	76.7	6.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
I-BR-300-24	56.7	8.3	40.0	NA	78.3	95.0	58.3	93.3
I-BR-300-48	26.7	46.8	26.7	0.00	85.0	90.0	51.7	93.3
I-BR-300-48-2ème	66.7	14.1	NA	17.7	NA	NA	NA	NA
Bois mou non résineux								
BP-Saule-400	40.0	0.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Saule-450-2013	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Saule-450-2014	33.3	51.0	60.0	0.00	83.3	95.0	70.0	91.7
BP-Saule-500	56.7	30.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Saule-550	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Feuillu-400	36.7	46.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Feuillu-500	66.7	25.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Coco-1000	NA	NA	0.0	0.0	86.7	93.3	33.3	90.0
Matières non ligneuses								
BP-Phragmite-400	30.0	0.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA
BP-Phragmite-500	13.3	93.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA
I-Patate-300-24	72.3	17.7	70.0	11.7	73.3	95.0	0.0	25.0
I-Chou-300-48	90.0	0.0	0.0	0.0	45.0	90.0	0.0	0.0
I-Poireau-300-48	73.3	17.0	38.2	30.3	66.7	88.3	0.0	16.7
B-Mais-300	46.7	10.1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Autres								
Wood-Ash-1500	NA	NA	3.3	141	88.3	98.3	48.3	88.3
IRDA-Lisier-500	80.0	10.2	13.3	93.5	61.7	95.0	0.0	45.0

CV=coefficient de variation.

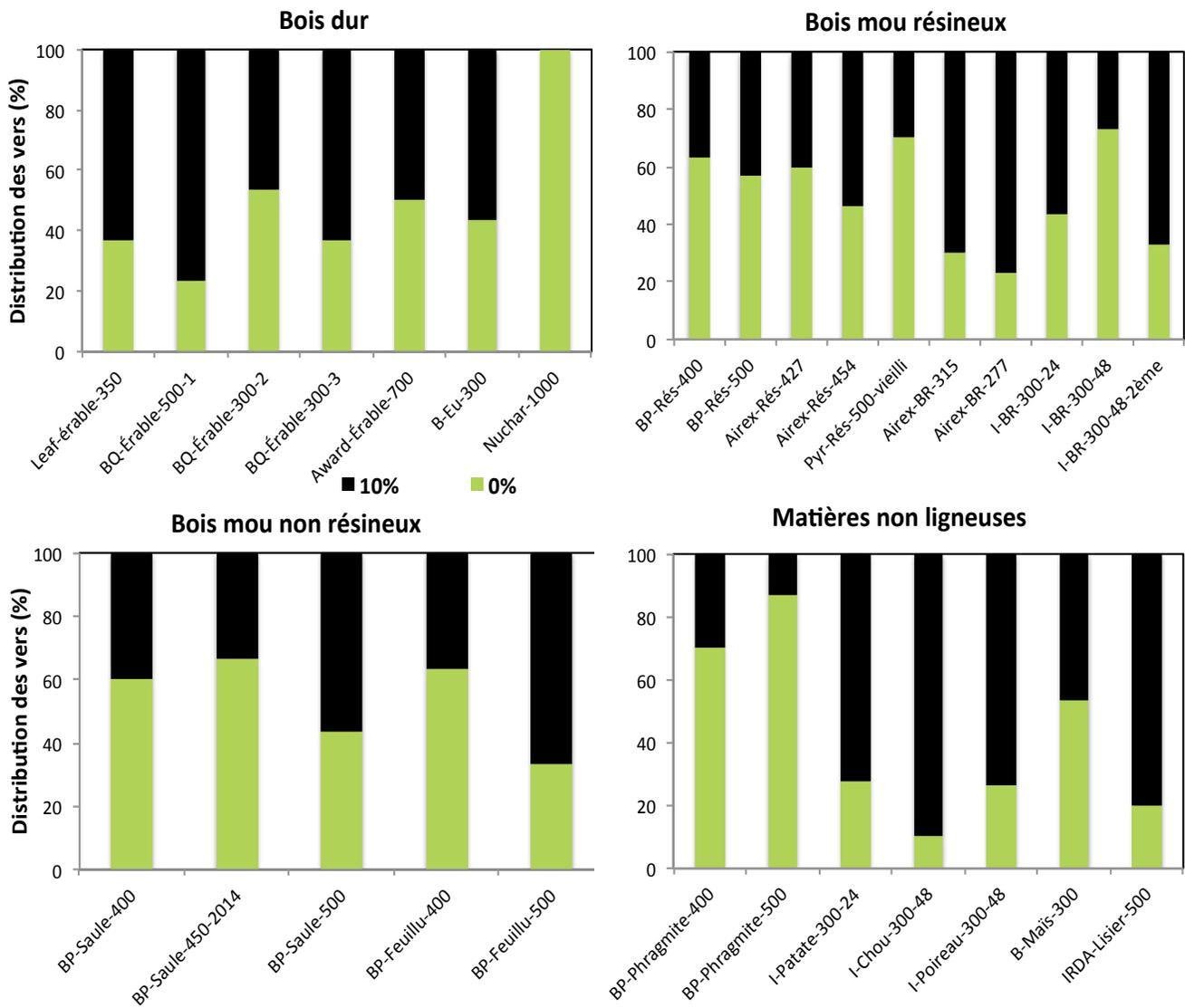


Figure 4. Préférence des vers de terre pour la terre à jardin seule (0% de biochar) ou la terre contenant 10% volumique de biochar

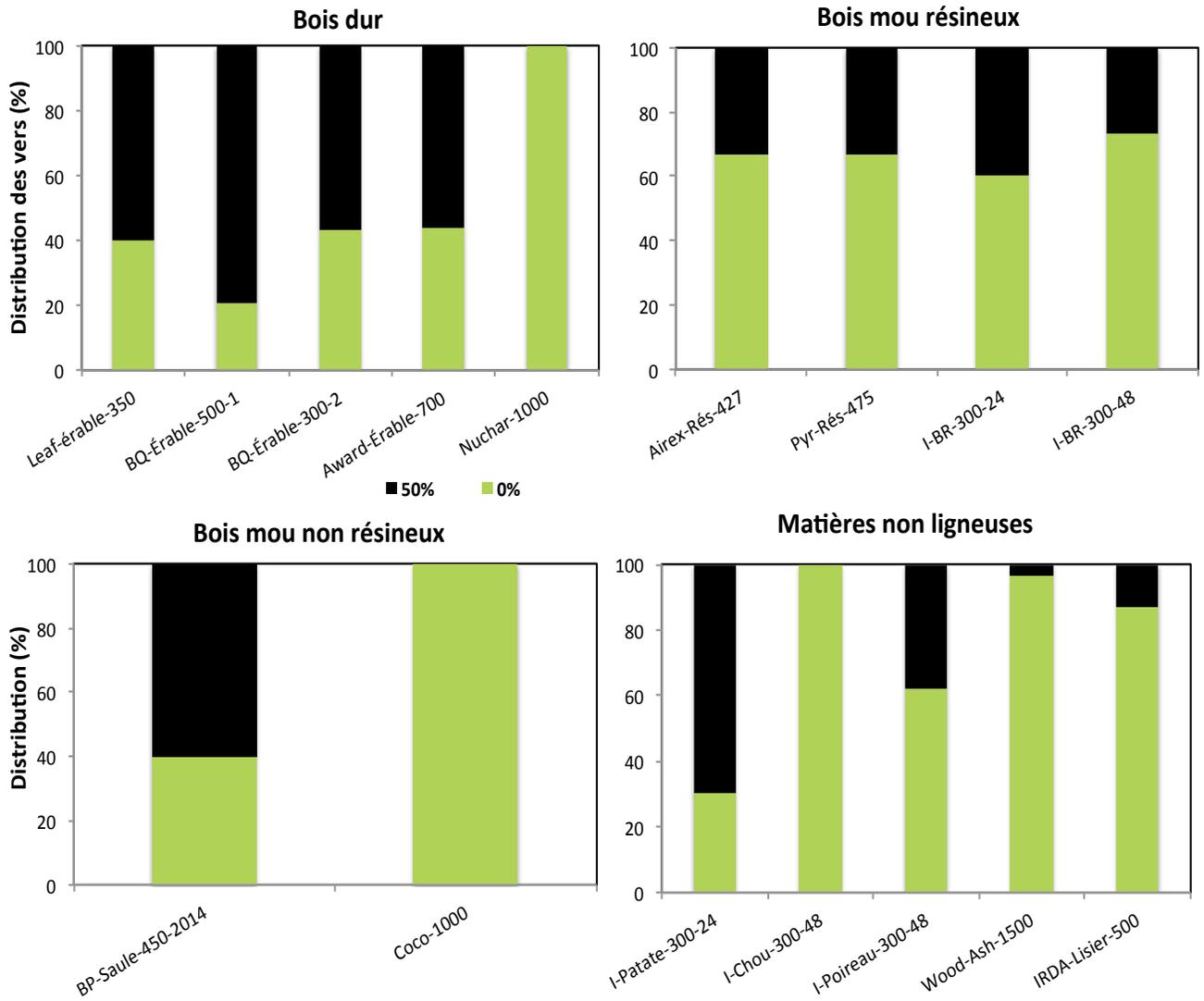


Figure 5. Préférence des vers de terre pour la terre à jardin seule (0% de biochar) ou la terre contenant 50% de biochar

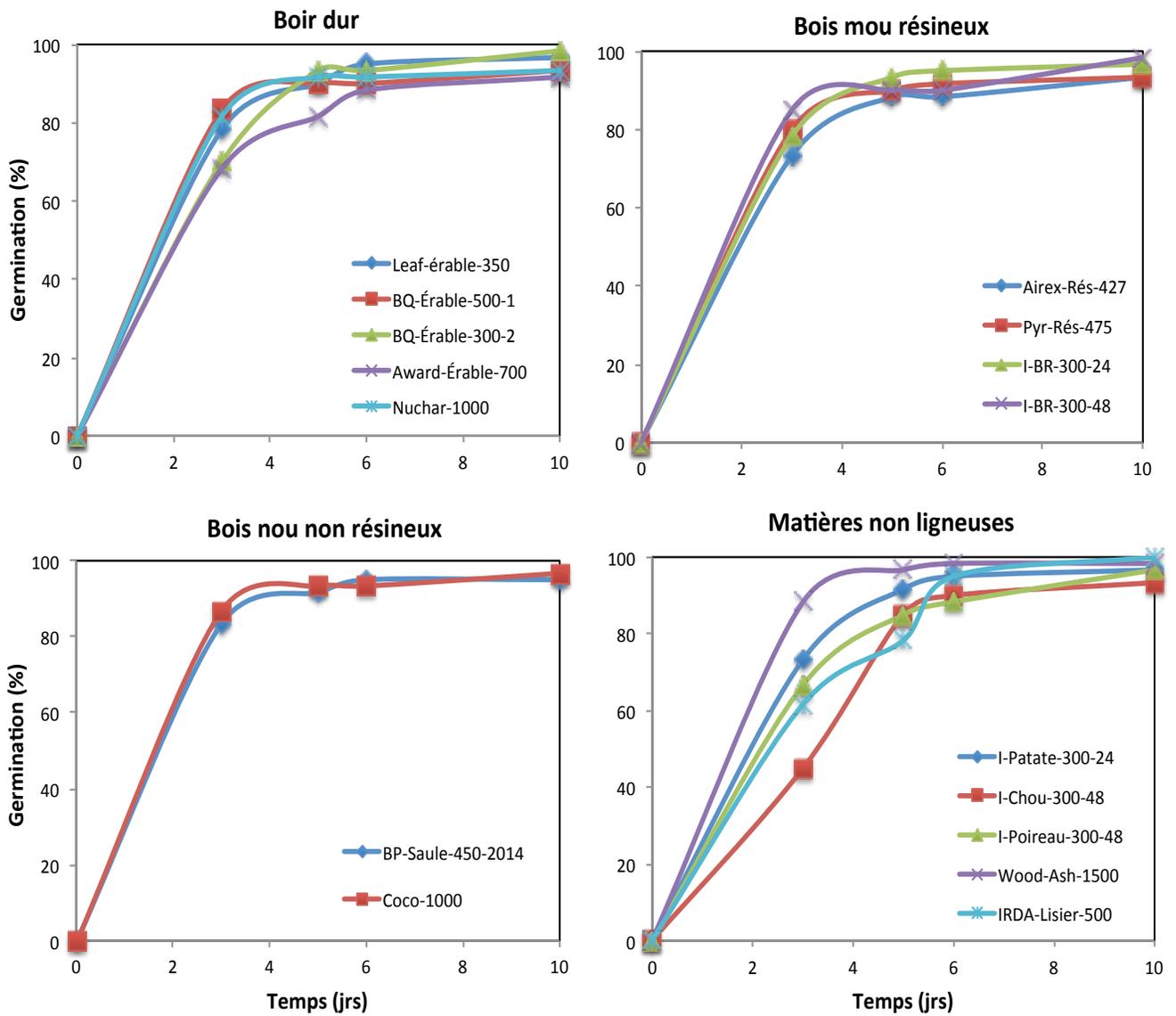


Figure 6. Taux de germination de la laitue dans la terre à jardin amendée de 10% de biochar

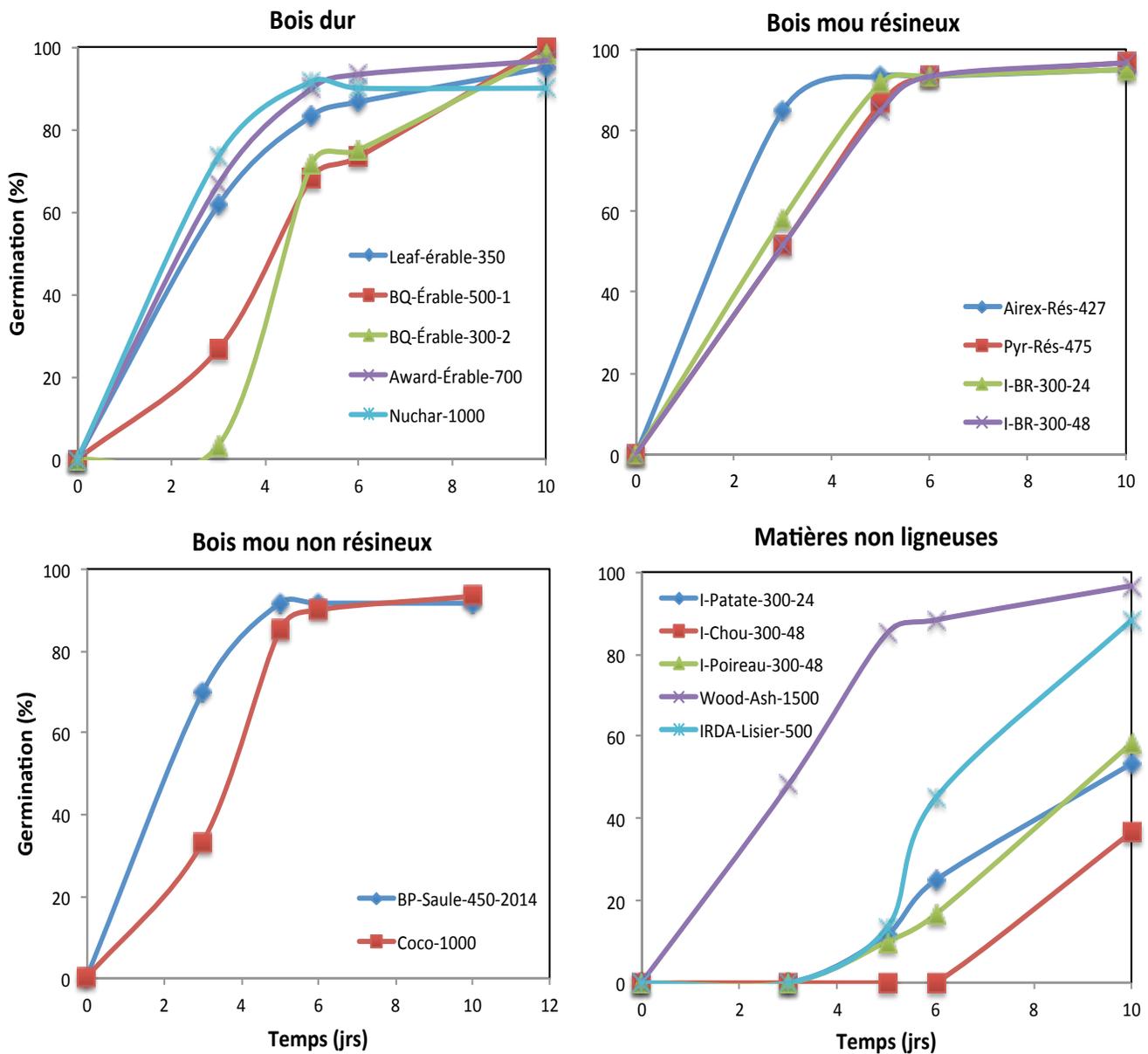


Figure 7. Taux de germination de la laitue dans la terre à jardin amendée de 50% de biochar

Tableau 24. Résumé des propriétés générales et physiques des biochars

Propriété	Unités	Min	Max	Moyenne
Propriétés générales				
Cendres	%	1.11	54.9	13.1
C _{tot}	%	23	91.5	63.3
C _{graph}	%	10.1	84.8	40.3
C _{inorg}	%	0.4	9.2	2.1
C _{org}	%	1.5	44.5	20.9
H	%	0.1	5	2.8
O	%	3.2	33.1	16.2
H/C _{org}	---	0.02	1.7	0.2
O/C _{tot}	---	0.04	0.76	0.28
Propriétés physiques				
ρ _a	m ³ m ⁻³	0.13	0.46	0.3
ρ _s	m ³ m ⁻³	1.25	2.74	1.6
Θ	m ³ m ⁻³	0.72	0.9	0.81
CE	dS m ⁻¹	0.1	4.81	0.94
θ _g	% massique	0	9.3	2.4
Remontée capillaire, m	g g ⁻¹ h ⁻¹	-0.0224	0.0004	-0.0051
Remontée capillaire, b	g g ⁻¹ h ⁻¹	0.003	0.127	0.03
θ _{-1.4}	% massique	5.7	130	30.8
θ _{-0.05}	% massique	12.3	419	100
HR-q90	% massique	5.24	102	10.7
DMP	μm	138.18	6106	1153
IU (D95/D10)	--	2.1	109.6	21.4
DDMP	μm	-1062	5.62	-218

Tableau 25. Résumé des propriétés chimiques des biochars

Propriété	Unités	Min	Max	Moyenne
Propriétés relatives à l'acidité				
pH _{H2O}	---	4.8	10.4	7.79
PT ₄	meq	0.02	2.2	0.58
PT ₇	meq	0.01	0.74	0.14
Contenu de base				
N _{Total}	%	0.2	5.1	1.2
P _{total}	mg Kg ⁻¹	4.58	207	42.5
S _{total}	%	0	5.8	3.3
Éléments échangeables				
K	cmol ⁺ Kg ⁻¹	0.4	138	22.9
Ca	cmol ⁺ Kg ⁻¹	0.39	63.5	16.1
Mg	cmol ⁺ Kg ⁻¹	0.03	11.1	2.14
Na	cmol ⁺ Kg ⁻¹	0.16	33.5	3.25
Echg. tot	cmol ⁺ Kg ⁻¹	6.43	185	44.4
Éléments solubles				
K	mg kg ⁻¹	975	1 045 879	127 815
Ca	mg kg ⁻¹	86	184 223	23 146
Mg	mg kg ⁻¹	52.8	14 260	2 977
Na	mg kg ⁻¹	90	137 185	12 718
Mn	mg kg ⁻¹	1.11	747	119
Fe	mg kg ⁻¹	4.88	1 032	107
Al	mg kg ⁻¹	1.6	6 294	368
Cu	mg kg ⁻¹	2.58	105	12.8
Zn	mg kg ⁻¹	0.3	68.7	9.77
Métaux et métalloïdes totaux				
As	mg kg ⁻¹	0	72.1	6.53
Cd	mg kg ⁻¹	0	5.33	0.63
Co	mg kg ⁻¹	0	15.9	2.42
Cr	mg kg ⁻¹	0	33	6.96
Cu	mg kg ⁻¹	3.42	556	41.7
Mo	mg kg ⁻¹	0	3.28	0.21
Ni	mg kg ⁻¹	0	67.8	16.2
Pb	mg kg ⁻¹	0	207	23.2
Se	mg kg ⁻¹	0	27.5	4.02
Zn	mg kg ⁻¹	0	455	120

Tableau 26. Résumé des propriétés biologiques des biochars

Ratio de biochar	Temps	Min	Max	Moyenne
Vers de terre				
10%	1 jr	0.0	90	51.6
50%	1 jr	0.0	79.63	35.68
Laitue				
10%	3 jrs	45	88.3	75.2
	6 jrs	88.3	98.3	92.4
50%	3 jrs	0.0	85	39.4
	6 jrs	0.0	93.3	71.8

6. Références

- Agrinova (2013) Valorisation agronomique des digestats de méthanisation, Recherche documentaire. Centre collégiale de transfert de technologie. p. 22. http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/Synth%C3%A8se_recherche_documentaire_vfinale.pdf (consulté en janvier 2015).
- Ahmed S, Hammond J, Ibarrola R, Shackley S, Haszeldine S (2012) The potential role of biochar in combating climate change in Scotland: An analysis of feedstocks, life cycle assessment and spatial dimensions. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55: 487-505.
- Allaire SE, Baril B, Vanasse A, Lange SF, Mackay J, Smith DL (2015) Carbon dynamic under switchgrass produced in a loamy soil amended with biochar. *Canadian Journal of Soil Science*. DOI : 10.4141/cjss-2014-042.
- Allaire SE, Parent LE (2003) Size guide number and Rosin–Rammler approaches to describe particle size distribution of granular organic-based fertilisers. *Biosystems Engineering* 86 :503-509. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2003.08.009.
- Allaire SE, Parent LE (2004a) Physical properties of granular organic-based fertilisers, Part 1 : Static properties. *Biosystems Engineering* 87: 78-87.
- Allaire SE, Parent LE (2004b) Physical properties of granular organic-based fertilisers, Part 2 : Dynamic properties related to water. *Biosystems Engineering* 87: 225-236.
- ASTM (2010) Standard Test Method for Metal Powder Skeletal Density by Helium or Nitrogen Pycnometry, ASTM B923-10. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010. www.astm.org. DOI: 10.1520/B0923-10.
- ASTM (2010) Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon, ASTM D2862-10.USA: 2010 <http://www.astm.org/Standards/D2862.htm> (consulté en janvier 2015).
- ASTM (2012) Standard test method for carbon black – Total and external surface area by nitrogen adsorption. ASTM D6556-10. 5 p.
- ASTM (2013) Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM D1762-84. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org. DOI: 10.1520/D1762.
- ASTM (2013) Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils, ASTM D4373-02. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. www.astm.org. DOI: 10.1520/D4373-02.
- Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles JL, Harris E, Robinson B, Sizmur T (2011) A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution* 159: 3269-3282.
- Biederman LA, Harpole WS (2013) Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy* 5:202-214.
- Blake GR, Hartge KH (1986) Bulk Density, p. 363-375, *In* Klute A (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph no. 9, 2nd ed. American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Brewer CE (2012) Biochar characterization and engineering. Graduate Thesis and Dissertations. Iowa State University. Paper 12284.
- Brewer CE, Hu YY, Schmidt-Rohr K, Loynachan TE, Laird DA, Brown RC (2012) Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. *Journal of environmental quality* 41: 1115-1122.
- Cayuela ML, Van Zwieten L, Singh BP, Jeffery S, Roig A, Sánchez-Monedero MA (2014) Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 191: 5-16.
- CEAEQ (2003) Détermination de la matière organique par incinération : Méthode de perte de feu (PAF) MA. 1010 – PAF 1.0. Centre d'expertise en Analyse Environnementale du Québec. Ministère de l'Environnement du Québec, 2003, 9 p. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs35531>.
- CEAEQ (2009) Protocole pour la validation d'une méthode d'analyse en chimie, DR-12-VMC. Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec. Québec, 9 juin 2009. 29 p. http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/accreditation/pala/dr12vmc_protocole_val_chimie.pdf.

- CEAEQ (2011) Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : Dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse. MA. 400 – HAP 1.1, Rév. 4. Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2011, 27 p.
- CEAEQ (2013) Détermination du carbone et du soufre : méthode par combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge, MA.310-CS 1.0, Rév.3. MDDEFPP. 8 p. <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA310CS10.pdf>
- CEF (2015) Au Coeur de l'arbre, Et si le pétrole pourrait des arbres? <http://www.aucoeurdelarbre.ca/fr/textes-thematiques/textes-thematiques-details.php?id=12&flash=-1>. (consulté en avril 2015).
- CFI (2001) Bulk Blend. Quality Control Manual. Canadian Fertilizer Institute, Ontario, Canada.
- CQVB (2011) Le biochar : Outil pour la gestion des résidus de biomasse et la fertilité des sols. Biotendance. Conseil de Production Végétale du Québec. 12 p. <http://www.cqvb.qc.ca/> (consulté en janvier 2015).
- Crane-Droesch A, Abiven S, Jeffery S, Torn MS (2013) Heterogeneous global crop yield response to biochar: A meta-regression analysis. *Environmental Research Letters* 8: 044049.
- Dutta B, Raghavan V (2014) A life cycle assessment of environmental and economic balance of biochar systems in Quebec. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 5: 1-11. <http://link.springer.com/article/10.1007/s40095-014-0106-4/fulltext.html> (consulté en janvier 2015).
- EBC (2012) Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Certificate. Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 4.8 of 13th December 2013. <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/ebc-guidelines.pdf> (consulté en janvier 2015).
- Egger M, Smith GD, Phillips AN (1997) Meta-analysis: Principles and procedures. *BMJ* 315: 7121: 1533-1537.
- Enders A, Lehmann J (2012) Comparison of wet digestion and dry ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43: 1042–1052.
- Flint LE, Flint AL (2002) Porosity. In: Dane JH, Topp GC (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, p. 241-254.
- Galgani P, van der Voet E, Korevaar G (2014) Composting, anaerobic digestion and biochar production in Ghana. Environmental-economic assessment in the context of voluntary carbon markets. *Waste Management* 34 : 2454-2465.
- Gariépy MC, Lacroix C (2013) Portrait de la production porcine québécoise. Centre de Développement du porc du Québec. (<http://www.cdpq.ca/getattachment/Information-sur-le-secteur-porcin/Indicateurs-de-performance/Portrait-de-la-production-porcine-quebecoise.pdf.aspx>) (consulté en janvier 2015).
- Gomez-Eyles JL, Beesley L, Moreno-Jimenez E, Ghosh U, Sizmur T (2013) The potential of biochar amendments to remediate contaminated soils. Science Publishers: Enfield, NH. DOI: 10.13140/2.1.1074.9448.
- Hammond J, Shackley S, Sohi S, Brownsort P (2011) Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy* 39: 2646-2655.
- Hossain MK, Strezov V, Chan KY, Ziolkowski A, Nelson PF (2011) Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92:223-228. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/eur24099.pdf.
- Huang IB, Keisler J, Linkov I (2011) Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment* 409: 3578-3594.
- Ibarrola R, Shackley S, Hammond J (2012) Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste Management* 32: 859-868.
- IBI (2012) Standardized definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. International Biochar Initiative. IBI-STD-01. 47 p.
- ISO (2006) Direct reduced iron - Determination of carbon and/or sulfur-High-frequency combustion method with infrared measurement, ISO 9686:2006. 14 p. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9686:ed-2:v1:en>.
- ISO (2013) Fertilizers- Determination of bulk density (tapped). ISO 5311:1992 <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5311:ed-3:v1:en>.
- Jeffery S, Bezemer TM, Cornelissen G, Kuyper TW, Lehmann J, Mommer L, et coll. (2015) The way forward in biochar research: Targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenergy* 7: 1-13. DOI/10.1111/gcbb.12132/pdf.

- Jeffery S, Verheijen FG, Van Der Velde M, Bastos AC (2011) A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems Environment* 144: 175-187.
- Jeffrey et coll. 2013. The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins. *GCB Bioenerg.* Doi/10.1111/gcbb.12132/pdf
- Keleb E, Vermeire A, Vervaeet C, Remon JP (2004) Extrusion granulation and high shear granulation of different grades of lactose and highly dosed drugs: A comparative study. *Drug Development and Industrial Pharmacy.* 30 :679-691. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15285342>. (Consulté en janvier 2015).
- Kemper WD, Rosenau RC (1986) Aggregate stability and size distribution. p. 425- 442. In *Methods of Soil Analysis*, Klute A (ed.). ASA-SSSA. Madison, WI, USA.
- Kiekens F, Cordoba-Diaz M, Remon JP (1999) Influence of chopper and mixer speeds and microwave power level during the high-shear granulation process on the final granule characteristics. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 25: 1289-1293.
- LECO (2009) Determinator instruction manual SC 632 Carbon / Sulfur, Version 1.4 X. August 2009.
- Lee JW, Hawkins B, Day DM, Reicosky, DC (2010) Sustainability: The capacity of smokeless biomass pyrolysis for energy production, global carbon capture and sequestration. *Energy Environmental Science* 3: 1695-1705.
- Lehmann J, Gaunt J., Rondon M (2006) Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–A review. *Mitigation and adaptation strategies for global change* 11: 395-419.
- Liu et coll. 2013b. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: a meta analysis. *PLOS ONE* 8: e54779
- Liu X, Zhang A, Ji C, Joseph S, Bian R, Li L, et coll. (2013). Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions–A meta-analysis of literature data. *Plant and Soil* 373: 583-594
- Major J (2009) A guide to conducting biochar trials. *International Biochar Initiative.* 30 p.
- MAPAQ (2009) Plan d'action ministériel du développement durable 2009-2013. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation du Québec. 19 p. www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/planactiondevdurable.pdf (consulté en janvier 2015).
- MDDELCC (1998) *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés: Annexe 2 : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines* (http://www.mddecc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_2.htm. Consulté en avril 2015).
- Meng CP, Hanif AHM, Wahid SA (2014) Short-term field decomposition and physico-chemical transformation of *Jatropha* pod biochar in acidic mineral soil. *Open Journal of Soil Science* 4: 226-234.
- Montanarella L, Lugato E (2013) The application of biochar in the EU: Challenges and Opportunities in *Agronomy*, 3: 462-473.
- OECD (1984) Guideline for testing of chemicals “ Terrestrial Plants, Growth test” 208. Organisation for Economic Co-Operation and Development. 6 pages. <http://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-assessment/1948285.pdf>
- Paré MC, Allaire SE, Khiari L, Nduwamungu C (2009) Physical properties of organo-mineral fertilizers. *Canadian Biosystems Engineering* 51: 3.21-3.27.
- Philibert A, Loyce C, Makowski D (2012) Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 72-82.
- Rajkovich S, Enders A, Hanley K, Hyland C, Zimmerman AR, Lehmann J (2011) Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* 48:271-284.
- Recyc-Québec (2014) Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Gouvernement du Québec, Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Bibliothèque et Archives Canada. 32 p. http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Bilan_2012_accessible.pdf. (consulté en janvier 2015).
- Roberts KG, Gloy BA, Joseph S, Scott NR, Lehmann J (2009) Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology* 44: 827-833.
- Sohi S, Krull E, Lopez-Capel E, Bol R (2010) A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105:47-82.

- Sparrevik M, Field JL, Martinsen V, Breedveld GD, Cornelissen G (2013) Life cycle assessment to evaluate the environmental impact of biochar implementation in conservation agriculture in Zambia. *Environmental Science and Technology* 47:1206-1215.
- Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan KY, Downie A, Rust J, Joseph A, Cowie A (2010) Effect of biochar from slow pyrolysis of papermills waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327:235-246.
- Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, Van der Velde M, Diafas I (2010) Biochar application to soils – A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149 p.
- Zhang W, Wang X, Wang S (2013) Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: a meta-analysis. *PLOS One* 8: 2. DOI : 10.1371/journal.pone.0054779.