



INSTITUT DE RECHERCHE
ET DE DÉVELOPPEMENT
EN AGROENVIRONNEMENT
ИИ УГВОЕИЛІВОИИЕИИ
ET DE DÉVELOPPEMENT

RAPPORT FINAL

ÉVALUATION DU POTENTIEL DE VALORISATION DE RÉSIDUS GRANULÉS DE POMMES DE TERRE À LA FERME POUR LES FILIÈRES FERTILISATION, ALIMENTATION ANIMALE ET ÉNERGIE.

Auteur ou responsable scientifique : LANDRY CHRISTINE, agr., biologiste, Ph.D.

Co-auteurs : M. Marchand-Roy, C. Côté, S. Godbout, D. Cinq-Mars, L. Belzile, R. Hogue.

Collaborateurs : J. Mainguy, M. Paradis, M. Généreux, K. Roseberry, A. Fortin, J. Palacios, P. Brassard, F. Pelletier,
D. Zegan, J-P. Larouche, A. Patry, T. Jeanne et M. Grenier

Rapport présenté à : Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir 2, AAC – MAPAQ.

Date : 1^{er} mars 2017

Projet IRDA # : IA113118

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

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

Notre mission

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

Notre vision

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Évaluation du potentiel de valorisation de résidus granulés de pommes de terre à la ferme pour les filières alimentation animale, fertilisation et énergie

Rapport Final

Présenté à :

Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, Cultivons l'avenir 2, AAC – MAPAQ.

Préparé par :

Christine Landry, agr., bio., Ph.D.
Chercheuse IRDA

Mylène Marchand-Roy, agr., M. Sc.
Professionnelle de recherche, IRDA

Caroline Côté, agr. Ph.D.
Chercheuse, IRDA

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph.D.
Chercheur et professeur associé, IRDA

Dany Cinq-Mars, agr. Ph.D.
Professeur et directeur de prog. U. Laval

Richard Hogue, biologiste, Ph.D.
Chercheur IRDA

Luc Belzile, agroéconomiste, M. Sc.
Chercheur IRDA

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., M. Marchand-Roy, C. Côté, S. Godbout, D. Cinq-Mars, L. Belzile et R. Hogue. 2017. Évaluation du potentiel de valorisation de résidus granulés de pommes de terre à la ferme pour les filières alimentation animale, fertilisation et énergie. Rapport final. IRDA. 109 pages.

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

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Christine Landry, Ph. D., IRDA

ÉQUIPE DE RÉDACTION DU RAPPORT

- Chercheur principal, Christine Landry, Ph. D., IRDA
- Mylène Marchand-Roy, M. Sc., IRDA
- Caroline Côté, Ph. D., IRDA
- Stéphane Godbout, Ph. D., IRDA
- Dany Cinq-Mars, Ph. D., Université Laval
- Luc Belzile, M. Sc., IRDA
- Richard Hogue, Ph. D., IRDA
- Julie Mainguy, B. Sc., IRDA
- Mélissa Paradis, M. Sc., IRDA
- Mylène Généreux, M. Sc., IRDA
- Thomas Jeanne, M. Sc., IRDA
- Joahnn Palacios, M. Sc., IRDA

COLLABORATEURS

- Kathie Roseberry, Tech., IRDA
- Annie Fortin, Tech., IRDA
- Alicia Patry, B. Sc., IRDA
- Frédéric Pelletier, M. Sc., IRDA
- Michèle Grenier, biostatisticienne, IRDA
- Patrick Brassard, étudiant au Doctorat, IRDA
- Dan Zegan, M. Sc., IRDA
- Jean-Pierre Larouche, chimiste, IRDA

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

Christine Landry

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

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

Téléphone : 418 643-2380, poste 640

Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Les auteurs remercient les participants du projet **Les Fermes David et Richard Blais inc.**, **Biopierre**, **Ateliers Tenons-nous**, **Casa Breton** et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA, dont **Hubert Labissonnière**, les **étudiants d'été** et les **ouvriers** agricoles des fermes expérimentales de Deschambault et de St-Lambert. Les remerciements vont également à Madame **Nancy Bolduc** au département des sciences animales, FSAA, de l'Université Laval et à **Patrick Dubé**, responsable du laboratoire d'analyses agroenvironnementale de l'IRDA pour son appui dans le choix des paramètres de caractérisation liées aux analyses du présent projet.

RÉSUMÉ

De 2014 à 2016, 8 500 kg de pommes de terre (Pdt) déclassées ont été rapatriées à la ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault et granulées afin d'explorer diverses voies de valorisation (alimentation animales, fertilisation et énergie). Le projet a démontré que la nature du résidu fait en sorte qu'il est possible de produire en quelques étapes (broyage, pressage, séchage) simples et peu coûteuses, en raison de la nature des équipements utilisés, des granules (Gr) à valeur ajoutée qui conservent leur intégrité. Ainsi, 24h de pressage suivies d'un séchage d'appoint permettent d'atteindre 88% de matière sèche de la fraction solide (FS) de Pdt, conduisant au taux optimal de conversion en Gr de 96%. La durée d'entreposage des Pdt et leur variété ont peu influencé les contenus en nutriments qui sont demeurés stable dans le temps. Les bilans massiques ont montré qu'avec le procédé utilisé, 1 000 kg de Pdt fraîches (20% MS) donnaient 152 kg de Gr (90% MS). Toutefois, une part importante des éléments, solubles, demeurent dans la fraction liquide (FL), exception faite de la matière carbonée, dont une partie soluble appréciable demeure dans la FS. Une amélioration du procédé pour augmenter la part d'éléments demeurant dans la FS serait donc à envisager. D'autant plus que l'azote (N), et donc les protéines, à 62% soluble, est un des éléments les moins récupérés. Ceci diminue la valeur tant fertilisante qu'alimentaire des Gr. Le procédé de granulation a toutefois assuré un contrôle des agents pathogènes *E. coli*, *Salmonella spp.* et *Listeria monocytogenes*, en plus d'inactiver l'agent causal de la gale commune. De plus, granulées, les Pdt se conservent longtemps, occupent 6,2 fois moins d'espace et pèsent 6 fois moins. Elles se manutentionnent donc beaucoup plus facilement. Au niveau de la valorisation agronomique, l'apport de Gr a fait augmenter les populations des familles microbiennes du sol des genres *Arthrobacter* (fonction de dégradation), *Limnobacter* et *Burkholderia* (fonctions bénéfiques au niveau de la rhizosphère). Les Gr ont toutefois généré une immobilisation du N, en partie à cause de la perte du N soluble dans la FL et du fort C/N (74) résultant. Cependant, celle-ci est transitoire car le carbone des Gr est hautement labile et activateur des microorganismes (MOG) du sol. Les Gr se sont aussi avérés une bonne source de potassium (K). Toutefois, le déséquilibre du ratio des cations (K/Ca+Mg) entraîne des carences en Ca. D'autres essais au champ sur le meilleur moment d'application (ex. automne) ou sur l'apport combiné avec des engrais minéraux ou des engrais de ferme sont donc encore nécessaires, de même qu'une mise au point du procédé pour hausser la conservation du N dans les Gr. La valorisation énergétique demande aussi davantage de travaux puisque dans les tests de combustion les Gr ont produit des mâchefers et ont augmenté l'émission de particules. Toutefois, il ressort que les Gr peuvent servir de combustible dans des chaudières à biomasse et la plupart de leurs caractéristiques sont similaires à celles des Gr de bois. La co-granulation bois-granules serait une avenue intéressante. Au final, c'est l'alimentation animale qui s'est avérée la voie la plus prometteuse. Le procédé a fortement concentré la valeur énergétique de source glucidique de la Pdt sous sa forme granulée. Les Gr peuvent dorénavant se substituer au maïs-grain dans l'alimentation des bouvillons. Leur fort contenu en amidon laisse aussi croire qu'il serait possible d'explorer la voie de remplacement des antibiotiques chez le porcelet pour limiter la diarrhée lors du sevrage. Les entreprises porcines avec moulange à la ferme pourraient également bénéficier économiquement de l'ajout de granules dans la ration de leurs animaux. Enfin, sous forme granulée, le produit permet des économies de transport, d'entreposage et de manutention marqués.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	ii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	vi
1 Mise en contexte	1
1.1 Objectifs généraux.....	4
1.1.1 Objectifs spécifiques.....	4
2 Méthodologie	5
2.1 Acquisition des résidus	5
2.2 Procédé de granulation	6
2.2.1 Broyages des résidus	6
2.2.2 Séparation des phases liquide et solide par pressage.....	7
2.2.3 Suivi de l'évolution du taux de matière sèche de la fraction pressée.....	7
2.2.4 Production de granules	9
2.3 Potentiel agronomique des granules	9
2.3.1 Rémanence de la gale commune dans les granules.....	9
2.3.2 Caractérisation des fractions obtenues lors des campagnes de production	11
2.3.3 Essais en champs avec les granules.....	13
2.4 Potentiel alimentaire des granules.....	18
2.4.1 Valeur nutritive.....	18
2.4.2 Potentiel prébiotique et salubrité	18
2.5 Potentiel Énergétique des granules	18
2.5.1 Caractérisation de la biomasse.....	18
2.5.2 Tests de combustion.....	19
2.5.3 Test de pyrolyse.....	22
2.6 Analyses économiques	25
3 Résultats et analyses	26
3.1 Mise au point du procédé de granulation.....	26
3.2 Potentiel agronomique des granules	28
3.2.1 Caractérisation physico-chimique des diverses fractions et des granules.....	28

3.2.2	Rémanence de la gale commune dans les granules.....	36
3.2.3	Valorisation des granules en champs.....	38
3.3	Potentiel alimentaire des granules.....	60
3.3.1	Potentiel nutritif.....	60
3.3.2	Salubrité et potentiel prébiotique.....	65
3.4	Potentiel Énergétique des granules.....	68
3.4.1	Propriétés et paramètres recommandés pour les combustibles.....	68
3.4.2	Caractéristiques de la biomasse : analyse préliminaire.....	70
3.4.3	Test de combustion.....	73
3.4.4	Test de pyrolyse.....	77
3.5	Analyse économique de substitution.....	79
3.5.1	Analyse de substitution.....	79
3.5.2	Économie du coût de transport.....	80
3.5.3	Coût de granulation.....	81
4	Conclusion générale.....	83
	Références.....	87
	Annexe A.....	94
	Annexe B.....	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Périodes de production de granules, variétés et estimés des quantités utilisées de Pdt.	5
Tableau 2. Programme d'échantillonnage de la FS pour l'établissement des courbes de MS pendant les étapes de pressage et de séchage.	8
Tableau 3. Caractérisation (b.s.) du terreau d'empotage du bioessai sur la gale mené en serre.....	11
Tableau 4. Traitements utilisés lors du bioessai en serre sur la gale.	11
Tableau 5. Exemple de caractérisation des différentes fractions obtenues lors des campagnes de granulation..	12
Tableau 6. Caractérisation des sols au printemps 2016 dans les essais N et K avant l'application des traitements.	14
Tableau 7. Besoins nutritifs et traitements comparés de doses de granules et d'engrais minéraux de l'essai N. .	14
Tableau 8. Besoins nutritifs et traitements comparés de doses de granules et d'engrais minéraux de l'essai K. .	14
Tableau 9. Méthodes d'analyse du volet énergétique de la biomasse des granules de Pdt déclassées.	19
Tableau 10. Bilan massique du procédé pour les 6 campagnes de granulation « officielles ».	28
Tableau 11. Contenus et répartition dans les fractions liquide et solide après pressage des éléments sur base sèche de 100 kg (b.s) de bouillie pressée, de l'élément le moins au plus transféré dans la fraction solide.....	29
Tableau 12. Propriétés physico-chimiques de la bouillie, des différentes fractions et des granules sur base fraîche tels qu'ils seraient employés au champ en cas d'épandage.	30
Tableau 13. Composition (b.s.) en ÉTMs des fractions solides des résidus et de divers AEO du Québec.	31
Tableau 14. Teneurs limites (b.s.) en ÉTMs des matières résiduelles fertilisantes (MRF) ¹	32
Tableau 15. Propriétés physico-chimiques (b.h.) des granules selon le temps d'entreposage des Pdt déclassées dans l'entrepôt du producteur.	33
Tableau 16. Relation entre le rapport C/N des résidus organiques et la mise en disponibilité par minéralisation de l'azote.	34
Tableau 17. Ratios d'indicateurs de disponibilité et indice de stabilité biologique (ISB) des divers produits de Pdt déclassées.	34
Tableau 18. Comparaison de certaines propriétés agronomiques (b.s.) des granules de Pdt déclassées avec celles de divers AEO du Québec.	35
Tableau 19. Détection par qPCR du gène Txt AB lié à la pathogénicité de <i>S. scabies</i> dans les échantillons de pelures, de bouillies ou de granules issus des lots de Pdt galées ou saines.	36
Tableau 20. Contenus en éléments des feuilles des plants de Pdt fertilisés avec l'engrais minéral ou les granules et valeurs cibles de suffisance, bioessai en serre, le 10 mars 2016.	37
Tableau 21. Analyses de sol à l'automne 2015 et au printemps 2016 pour le site de l'essai K.	44
Tableau 22. Analyse foliaire des plants d'avoine au stade cible (11 juillet) selon les traitements à l'étude.	47
Tableau 23. Niveau de relation (Test Adonis) entre les diversités bactérienne et eucaryotique et diverses variables étudiées dans le projet.....	60

Tableau 24. Composition des granules de Pdt déclassées (base sèche).....	63
Tableau 25. Résultats d'analyse des diverses fractions de Pdt déclassées (%), sur une base 100 % de matière sèche.....	64
Tableau 26. Composition minérale et valeur max tolérable des granules de Pdt déclassées (base MS).	64
Tableau 27. Caractérisation des souches de <i>Listeria monocytogenes</i> isolées dans les échantillons de broyats....	65
Tableau 28. Contenu en acides phénoliques totaux (b.s.) de diverses céréales (Lullien-Pellerin 2014) et des granules de Pdt déclassées.....	68
Tableau 29. Caractéristiques et éléments problématiques de la biomasse dans les systèmes de combustion.....	69
Tableau 30. Préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006).....	69
Tableau 31. Certification NF 444 (adapté de FCBA 2013).	70
Tableau 32. Propriétés de l'huile pyrolytique exigées par la norme ASTM D7544-09.....	70
Tableau 33. Humidité, pouvoir calorifique, et teneurs en cendres, en carbone, en hydrogène, en oxygène et en azote des biomasses étudiées.	71
Tableau 34. Teneurs en éléments mineurs des biomasses étudiées.	71
Tableau 35. Teneurs en métaux lourds des biomasses étudiées.	71
Tableau 36. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction des préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006).	72
Tableau 37. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction de la certification NF 444 (adapté de FCBA 2013) pour la biomasse agricole.	72
Tableau 38. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction de la certification du bois CANplus (WPAC 2015).....	72
Tableau 39. Résumé des caractéristiques des tests de combustion.....	75
Tableau 40. Caractéristiques du flux au point d'échantillonnage des gaz.	76
Tableau 41. Concentration et émission de particules.....	76
Tableau 42. Taux de production de cendres récupérées au foyer et au descendeur (CF), du cendrier sous l'échangeur (CE) et du cendrier sous la cheminée (CC).	77
Tableau 43. Rendement en biohuile des tests de pyrolyse.....	78
Tableau 44. Seuils de la norme ASTM D7544 et caractéristiques de l'huile pyrolytique de Pdt déclassées et du bois.	79
Tableau 45. Analyse de sensibilité du coût cible de granulation des Pdt déclassées (\$/tonne de granules).	81

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Broyeur Stephan UM 80 et bouillie (Br) de Pdt récupérée.	6
Figure 2. Pressoir à ballon.	7
Figure 3. Emporte-pièce et séchoir.	8
Figure 4. Matrice perforée 6mm et granulateur.	9
Figure 5. Courbes de raréfaction des OTUs pour déterminer le nombre optimal de séquences à utiliser pour évaluer la richesse bactérienne (gauche) et eucaryotique (droite) observée pour l'essai azote (A) et l'essai potassium (B). La valeur moyenne du nombre d'OTUs est déterminée au point d'inflexion de la courbe de raréfaction du traitement correspondant.....	17
Figure 6. Chaudière (Bio-Burner BB-100) dans la salle des tests de combustion de l'IRDA.....	19
Figure 7. Localisation des points d'échantillonnage sur la cheminée.	20
Figure 8. Schéma du pyrolyseur.	23
Figure 9. Système de condensation.....	23
Figure 10. Évolution du taux de matière sèche de la fraction solide de Pdt déclassées pendant le pressage.	27
Figure 11. Évolution du taux de matière sèche de la fraction solide de Pdt déclassées pendant le séchage.	27
Figure 12. Symptômes de carence des plants de Pdt amendés avec des granules (gauche) le 21 mars 2016 et apparence saine des plants le 7 avril 2016 (droite) à la suite des applications de Ca, bioessai en serre.	37
Figure 13. Évaluation de l'incidence des symptômes visuels de la gale commune sur les tubercules récoltés lors du bioessai en serre.....	38
Figure 14. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO ₃ du témoin engrais minéral (NPK) et du traitement ayant reçu la plus forte dose de granules, deux semaines après les semis (7 juin), dans l'essai N en 2016.	39
Figure 15. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO ₃ entre le témoin engrais minéral (NPK) et le traitement ayant reçu la plus forte dose de granules, deux semaines après les semis (7 juin), dans l'essai K en 2016.....	39
Figure 16. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO ₃ en fonction des apports de granules au stade cible de l'avoine (11 juillet), dans l'essai N en 2016.	40
Figure 17. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO ₃ en fonction des apports de granules au stade cible de l'avoine, dans l'essai K en 2016	40
Figure 18. Rendements en grains (noir) et en paille (gris) en fonction des apports de granules à la récolte de l'avoine le 7 septembre, dans l'essai N	41
Figure 19. Prélèvement totaux en N des plants à la récolte d'avoine en fonction des apports de granules, 7 septembre 2016, dans l'essai N.....	42
Figure 20. Charge du sol en N-NO ₃ à la récolte en fonction des apports de granules, 7 septembre 2016, dans l'essai N.....	42
Figure 21. Contenus du sol en K M ₃ et K échangeable (acétate) en fonction de l'apport de granules deux semaines après le semis d'avoine du 24 mai 2016, essai K.....	43

Figure 22. Contenus du sol en K M ₃ en fonction de l'apport de granules au stade cible de l'avoine le 11 juillet 2016, dans l'essai K.....	44
Figure 23. Rendements en grains (noir) et en paille (gris) à la récolte de l'avoine en fonction de l'apport de granules, 7 septembre 2016, essai K.....	45
Figure 24. Prélèvements totaux en K des plants d'avoine à la récolte en fonction de l'apport de granules, 7 septembre 2016, essai K.....	45
Figure 25. Ratio K/(Ca + Mg) des feuilles au stade cible de l'avoine en fonction de l'apport de granules dans l'essai N en 2016.....	47
Figure 26. Ratio K/(Ca + Mg) des feuilles au stade cible de l'avoine en fonction de l'apport de granules dans l'essai K en 2016.....	48
Figure 27. Contenus en Corg soluble du sol au stade cible de l'avoine (11 juillet) en fonction de l'apport de granules dans l'essai N en 2016.....	49
Figure 28. Contenus en Corg soluble du sol au stade cible de l'avoine (11 juillet) en fonction des apports de granules dans l'essai K en 2016.....	49
Figure 29. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine (7 juin), dans l'essai N en 2016.....	50
Figure 30. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine (7 juin), dans l'essai K en 2016.....	51
Figure 31. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants au stade cible de l'avoine (11 juillet), dans l'essai N en 2016.....	51
Figure 32. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants au stade cible de l'avoine (11 juillet), dans l'essai K en 2016.....	52
Figure 33. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine (7 juin), dans l'essai N en 2016.....	52
Figure 34. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants au stade cible de l'avoine (11 juillet), dans l'essai N en 2016.....	53
Figure 35. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants, tous stades confondus de l'avoine (7 juin et 11 juillet), dans l'essai K en 2016.....	53
Figure 36. Richesse bactérienne (nombre d'OTUs) observée en fonction des traitements pour l'essai N (gauche) et l'essai K (droite), à la récolte (N1 à N6) et au printemps (PRT).....	54
Figure 37. Richesse eucaryotique (nombre d'OTUs) observée en fonction des traitements pour l'essai N (gauche) et l'essai K (droite), à la récolte (N1 à N6) et au printemps (PRT).....	55
Figure 38. Analyse en composantes principales présentant les deux premières composantes expliquant les variations de la composition bactérienne des sols des traitements de l'essai N (gauche) et de l'essai K (droite) au printemps et à la récolte.....	56

Figure 39. Analyse en composantes principales présentant les deux premières composantes expliquant les variations de la composition eucaryotique des sols des traitements de l'essai N (gauche) et de l'essai K (droite) au printemps et à la récolte.	56
Figure 40. Proportion relative des <i>Micrococcaceae</i> (haut) et des <i>Burkholderiaceae</i> (bas) en lien avec la présence de granules dans les sols prélevés à la récolte de l'essai N (à gauche) et l'essai K (à droite).	58
Figure 41. Proportion relative des <i>Pezizomycotina</i> (haut) et des <i>Pucciniomycotina</i> (bas) en lien avec la présence de granules dans les sols prélevés à la récolte. L'essai N est à gauche et l'essai K est à droite.	59
Figure 42. Teneur en solanine dans les granules de Pdt déclassées en fonction de la date d'échantillonnage.....	66
Figure 43. Chromatographe en phase liquide à haute performance incluant les courbes standards.	67
Figure 44. Teneurs en acides phénoliques totaux mesurés dans les granules de Pdt déclassées selon la campagne de granulation.	67
Figure 45. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 1 ^{er} test avec le bois.	73
Figure 46. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 2 ^{ème} test avec le bois.	74
Figure 47. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 1 ^{er} test avec les granules de Pdt déclassées.	74
Figure 48. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 2 ^e test avec les granules de Pdt déclassées.	75
Figure 49. Échantillon de mâchefers retrouvés suite à la combustion des granules de Pdt déclassées	77
Figure 50. Teneur en eau des huiles pyrolytiques.....	78

1 MISE EN CONTEXTE

Selon l'étude 2007 d'AGECO sur les préoccupations du secteur maraîcher, 80% des producteurs gèrent des résidus post-récolte et 38% se sont dit énormément préoccupés par les normes environnementales liées à leur gestion (AGECO 2007). Les producteurs de pommes de terre (Pdt) ne font pas exception. En fait, selon le Profil sectoriel de l'industrie horticole du Québec 2012 (ISQ 2012), ce sont eux qui gèrent les plus grandes quantités de résidus à la ferme, soit 65 000 T/an. En comparaison, la culture de la carotte arrive en 2^e place avec 4 000 T de résidus. Cette disparité tient en partie à l'importance des superficies cultivées en Pdt au Québec (17 000 ha). De plus, contrairement à certaines cultures dont le tri s'effectue au champ, laissant les résidus sur place, les Pdt doivent être récupérées en totalité puis triées, générant des quantités supérieures de résidus. Il est de toute façon non souhaitable de laisser des rebuts de Pdt au champ considérant les risques pour l'environnement, la prolifération des maladies et des insectes nuisibles, et de germination de volontaires. Un règlement a d'ailleurs été adopté en 2010 stipulant que pour toute la saison de production, les rebuts de Pdt doivent être éliminés ou gardés dans un endroit fermé ou sous une bâche (MAPAQ 2013). S'ajoutent à ces rebuts, toutes les pertes encourues en cours d'entreposage. Les rebuts s'accumulent donc tout au long de l'année pour donner au final des quantités très importantes.

Les producteurs ont donc l'obligation de disposer de leurs résidus de Pdt de façon sécuritaire. Pour cette raison, il est interdit d'enfouir les résidus à la ferme puisqu'il s'agit de déchets au sens du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles (c. Q-2, r. 19) pris en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2). Seul leur enfouissement sur des sites autorisés par le MDDELCC est permis, mais ceux-ci doivent être accessibles et les coûts de transport et d'enfouissement sont des freins importants à cette mesure. Le compostage avait donc été envisagé, mais la gestion de l'eau s'avère si problématique que cette solution n'apparaît pas adaptée à ce type de résidus. D'autant plus que la hausse de température obtenue lors du compostage est insuffisante et ne permet pas de détruire toutes les formes d'agents pathogènes (RAP 2012). Ainsi, une des seules solutions disponibles en ce moment est l'envoi des résidus chez les producteurs de bovins de boucherie, plus spécifiquement dans les parcs d'engraissement. Toutefois, ceux-ci doivent résider à courte distance (coûts de transport élevés liés au poids en eau) et il demeure que les producteurs de Pdt ne reçoivent aucune rétribution pour ces résidus puisque la valeur alimentaire est peu documentée, à l'image des tourteaux de soya considérés il y a plusieurs années comme un déchet, maintenant devenus la protéine de référence pour l'alimentation animale, et pour lesquels on paie un fort prix.

Tout ceci fait ressortir l'importance de trouver une voie de valorisation pour les rebuts de Pdt puisque, pour l'instant, l'enfouissement ou l'amas au champ demeure l'option la plus facile et économique pour les producteurs. La situation est d'autant plus pressante que le MDDELCC a déposé une nouvelle Politique de gestion des matières résiduelles organiques (MRO) qui prévoit le bannissement complet de leur enfouissement d'ici 2020 (MDDEP 2011). Bien que cette politique ne vise pas directement les producteurs agricoles, ceux-ci sont concernés puisqu'ils sont pointés comme receveurs des MRO des autres entités qui seront assujetties à cette nouvelle politique. Ainsi, dans une optique de cohérence, les producteurs agricoles devraient pouvoir gérer efficacement leurs propres résidus avant de recevoir les MRO de l'extérieur. À cela s'ajoute que les résidus de Pdt se retrouveront en compétition avec les MRO des commerces et industries pour les débouchés existants. Par exemple, il pourrait

devenir plus ardu de fournir les parcs d'engraissement de bovins si on leur propose des résidus alimentaires compétitifs. Ainsi, à ce jour, non seulement la gestion des résidus de Pdt reste un défi, mais la problématique s'amplifiera au fur et à mesure que les quantités de MRO à valoriser seront haussées avec l'application progressive de la nouvelle loi du MDDELCC.

Considérant que le risque phytosanitaire zéro ne pourra jamais être certifié et qu'un problème de perception restera lié au retour de rebus de Pdt sur des terres utilisées pour cette production, leur valorisation devrait viser des voies externes à la ferme de Pdt. Pour hausser la rentabilité des différents débouchés et être durable, le traitement proposé doit également rester au plus simple et utiliser un matériel accessible et peu coûteux. Puisque la valorisation des résidus de Pdt est problématique principalement à cause de leur très fort contenu en eau, le retrait à faible coût de cette dernière pourrait être mis à profit. Une fois l'eau retirée, moins de place serait requise pour l'entreposage. Une fois granulée, le produit tendrait aussi beaucoup moins à se ré-humidifier et se conserverait mieux. Les coûts d'entreposage et de transport seraient aussi grandement diminués. De plus, sa manutention serait grandement facilitée. L'ensemble de ces améliorations contribuerait certainement à augmenter les débouchés de valorisation.

Selon les avenues possibles, et en fonction de la hiérarchie de gestion des MRO du MAPAQ (DAEDD) (1er réduction à la source, 2e amélioration de la mise en marché, 3e alimentation animale, 4e épandage au champ, 5e épandage après traitement et 6e valorisation énergétique, bioproduits), la Pdt granulée pourrait d'abord servir en nutrition animale. La valeur nutritionnelle de la Pdt déclassée est documentée (NRC 2007). Elle contiendrait environ 10% (b.s.) de protéines brutes, peu de fibres, peu de lipides. La valeur énergétique de la Pdt serait tout de même relativement élevée avec 80% d'unités nutritives totales (UTM) ou 1,9 Mcal d'énergie nette d'entretien (ENE) pour les ruminants, provenant principalement de sa teneur importante en amidon. En ce moment, l'envoi des Pdt fraîches déclassées chez les producteurs de bovins est déjà pratiqué. Toutefois, la valeur de cet aliment est diluée à cause de son fort contenu en eau qui entraîne des frais de transport, de manutention, d'entreposage et de gestion généralement assumés par les gestionnaires des parcs d'engraissement. Ceux-ci ne peuvent donc pas se permettre de payer cet aliment. Pour appuyer le développement de cette voie, il est donc primordial d'enlever l'eau des résidus et de mieux documenter sa valeur nutritionnelle, considérant également que les processus de pressage et de granulation proposés dans ce projet pourraient provoquer une diminution de la valeur nutritive de cet aliment potentiel. Parallèlement, le processus de granulation génère de la chaleur qui pourrait venir modifier les propriétés nutritives de la Pdt. Prouver par contre un effet prébiotique et une salubrité serait un avantage non-négligeable pour la voie de valorisation de l'alimentation animale. L'utilisation de facteurs de croissance en production porcine fait l'objet de controverses depuis plusieurs années, tant pour des raisons de santé publique (résistance aux antibiotiques), qu'environnementales (cuivre et zinc). Des solutions alternatives sont donc souhaitées pour en réduire, voire en cesser l'usage (Pettigrew et coll. 2006). La Pdt possède des propriétés pouvant améliorer la santé intestinale et ainsi contribuer à réduire l'usage des antibiotiques, notamment des protéines, l'amidon et les acides phénoliques. Au niveau des protéines, la potamine est intéressante comme alternative aux antibiotiques en raison de ses propriétés antibactériennes pour les microorganismes potentiellement pathogènes pour le porc et/ou l'humain et le gain de poids du porc (Jin et coll. 2008). Pour ce qui est de l'amidon, dont la Pdt est une source très importante, des études ont montré que son ajout à un taux de 7 % dans l'alimentation animale contribue à réduire l'incidence de la diarrhée post-sevrage chez le porc (Bhandari

et coll. 2009). Combiné à un probiotique, l'ajout de féculé de Pdt a aussi contribué à réduire la diarrhée chez des porcs exposés à *E. coli* entérotoxigène (souvent responsable de la diarrhée post-sevrage), tout en augmentant la diversité microbienne intestinale (Krause et coll. 2010). Quant au contenu élevé en polyphénols (Mattila et Kumpulainen 2002), ceux-ci peuvent avoir un effet positif sur la performance et l'immunité du porc (Ying et coll. 2009), ainsi que sur le contrôle de la diarrhée post-sevrage (Tsiloyiannis et coll. 2001). Certains paramètres pouvant avoir des effets négatifs doivent aussi être bien contrôlés. Ainsi, les tubercules vieux ou verdissants peuvent contenir de la solanine, un alcaloïde toxique qui, en grande quantité, pourrait affecter la santé des élevages (Tusnio et coll. 2011). Aussi, les granules ne devront pas être une source de microorganismes potentiellement pathogènes pour l'animal ou l'homme, dans une optique de rentabilité des élevages et de salubrité de la viande.

En second lieu, le produit granulé pourrait être appliqué au champ comme engrais sur des cultures peu sensibles aux maladies et ravageurs de la Pdt. Les granules pourraient être revendus en vrac aux producteurs ou ensachés et vendus dans les grandes surfaces, tel l'Acti-Sol. On sait que la Pdt présente (90% b.s.) beaucoup de potassium (K) (24 kg K/t), d'azote (N) (15 kg N/t) et peu de phosphore (P) (2-3 kg P/t) (Rousselle et coll. 1996). Ceci donnerait aux granules une formulation versatile car plusieurs sols agricoles du Québec présentent des taux de saturation en P qui en limitent l'apport. De plus, cette formulation est intéressante pour la culture de l'avoine, souvent employée en rotation par les producteurs de Pdt et bien présente au Québec en général (82 000 ha). De plus, le contenu élevé probable en carbone (C) très labile des granules (Pdt constituées à 80% (b.s.) de glucides (Rousselle et coll. 1996)) viendra stimuler l'activité des MOG minéralisant le No. Ce C est en effet une grande source d'énergie pour les MOG (McGill et coll. 1986). Étant donné que les MOG sont impliqués dans la nutrition des plantes et la dynamique des nutriments, il se peut aussi que l'application conjointe de C labile et des engrais minéraux haussent l'utilisation de ces derniers.

Enfin, les granules pourraient faire l'objet d'une valorisation énergétique en tant que combustible pour les systèmes de combustion et pour la production d'huile pyrolytique. Cette idée est fort intéressante dans le contexte que diverses biomasses pouvant se trouver sous forme de résidus dans les milieux forestiers et agricoles pourraient être valorisées comme source d'énergie. Dans certains contextes, cela permettrait de remplacer ou de réduire l'utilisation des sources d'énergie non renouvelables et de réduire l'impact environnemental associé lorsque toute la chaîne de valorisation s'effectue dans les règles de l'art. La combustion et la pyrolyse s'avèrent intéressantes pour la valorisation énergétique des résidus agricoles à la ferme.

L'IRDA a déjà réalisé des travaux sur la combustion et la pyrolyse de différentes biomasses, mais jamais des fruits ou des légumes. D'après l'étude de Pienkowski (2010) le pouvoir calorifique de la Pdt à 15 % de teneur en eau pourrait atteindre 12,8 MJ/kg. Quoique inférieur au bois de grande qualité (~ 19 MJ/kg), les résidus de Pdt ont une valeur énergétique intéressante à valoriser. Toutefois, que ce soit en combustion ou en pyrolyse, l'aspect physique et l'homogénéité de l'intrant joue un rôle prépondérant sur le rendement pyrolytique ou la qualité de la combustion. Les résultats des projets en cours dans ce domaine semblent indiquer que la granulation est l'une des clefs de la réussite et ce constat est également en accord avec la vision réglementaire. Ceci est d'autant plus vrai pour la Pdt. En enlevant l'eau, la granulation permettra sa combustion.

1.1 OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Faciliter la conservation et l'usage des résidus de Pdt par leur granulation et promouvoir la valorisation de la fraction solide (FS) granulée par l'identification de sa salubrité et de ses propriétés nutritionnelles, fertilisantes ou énergétiques et de la fraction liquide (FL) par sa caractérisation agronomique. Réaliser une analyse économique de substitution de produits concurrents selon les différentes voies de valorisation explorées.

1.1.1 Objectifs spécifiques

- 1) Mesurer les paramètres de pressage et de granulation à utiliser et le temps de séchage requis pour obtenir des granules stables pouvant être entreposés.
- 2) Caractériser la répartition des éléments présents dans la FL et la FS des Pdt.
- 3) Caractériser le contenu en éléments fertilisants, ainsi qu'en amidon et en composés organiques solubles de la FL.
- 4) Caractériser l'impact de la granulation et du séchage sur les éléments de la FS.
- 5) Caractériser les contenus en éléments fertilisants des granules et évaluer en champ l'efficacité des deux éléments les plus présents, probablement N et K sur les rendements d'une culture d'avoine.
- 6) Mesurer l'impact de l'apport de granules sur l'activité biologique des sols.
- 7) Caractériser la valeur nutritionnelle et la salubrité des granules pour le marché animal.
- 8) Déterminer le pouvoir calorifique, les émissions de gaz et de particules, la production de mâchefer et la corrosion lors de la combustion des granules.
- 9) Déterminer le rendement en huile de qualité lors de la pyrolyse des granules.
- 10) Évaluer la valeur économique des granules par une analyse économique de substitution de produits concurrents.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 ACQUISITION DES RÉSIDUS

La granulation des résidus s'est déroulée à la Ferme expérimentale de l'IRDA à Deschambault de juillet 2014 à mars 2016. Les résidus de pommes de terre (Pdt) étaient récupérés directement à l'entrepôt du producteur des Fermes David et Richard Blais inc de l'Île d'Orléans, par bennes de plus ou moins 600 kg, à la fréquence des activités de production de granules. Quelques 8 500 kg de Pdt ont été nécessaires pour produire les quantités de granules nécessaires à toutes les activités liées aux différentes voies de valorisation, dont l'application au champ, demandant de loin la plus importante quantité. Pendant cette période, six campagnes de production (de broyage à granulation) ont été identifiées comme étant « officielles » et caractérisées à chaque étape, pour chaque fraction de produit (bilans de masse et caractérisation physico-chimique). Les moments établis pour les campagnes officielles ont été choisis afin de couvrir un large éventail de temps d'entreposage et de variétés de Pdt, afin de voir si ces paramètres entraînaient des différences de caractéristiques du produit. Le [Tableau 1](#) résume l'ensemble des périodes de production et un estimé de la quantité récupérée de Pdt fraîches chez le producteur à chacune de ces périodes. Les lots de Pdt déclassées étaient entreposés à 10°C avant d'être broyés, pendant une période ne dépassant pas trois semaines. La fraction pressée était entreposée à 4°C pendant un maximum de 24 heures avant d'être séchée. La fraction sèche, plus stable, pouvait être entreposée dans des chaudières, à température ambiante, pour une période variant entre 1 et 14 jours, avant d'être granulée.

Tableau 1. Périodes de production de granules, variétés et estimés des quantités utilisées de Pdt.

Dates	Périodes	Variétés	Quantité (kg)
2014			
18 juillet 2014	Granulation officielle 1 (caractérisation)	Péribonka	135
8 août 2014	Granulation officielle 2 (caractérisation)	Péribonka	135
22 août 2014	Granulation officielle 3 (caractérisation)	Krantz	135
12 novembre 2014	Granulation officielle 4 (caractérisation)	Envol	1 200
1 ^{er} décembre 2014	Production de granules		
2015			
23 janvier 2015	Production de granules	Envol	1 200
10 mars 2015	Granulation officielle 5 (caractérisation)	Peribonka	600
23 mars 2015	Production de granules		
11 mai 2015	Granulation officielle 6 (caractérisation)	Calwithe	600
20 mai 2015	Production de granules		
24 juillet 2015	Production de granules	Krantz	300
21 août 2015	Production de granules	Krantz	1200
2016			
4 février 2016	Production de granules	Canela Russet	1200
22 février 2016	Production de granules	Goldrush	1200
1 mars 2016	Production de granules	Canela Russet	600
10 mai 2016	Mélange et caractérisation des granules des divers lots servant au test de champ	Mélange de variété	NA

2.2 PROCÉDÉ DE GRANULATION

Des projets antérieurs réalisés par l'IRDA sur la gestion des résidus de fruits et de légumes (Landry et coll. 2014; Martin et coll. 2014) ont démontré qu'il était possible d'obtenir des granules à partir d'équipements de base, peu coûteux et facile d'accès. Il est ressorti de ces essais que l'utilisation d'un presseur donnait des résultats supérieurs à ceux obtenus avec une centrifugeuse, beaucoup plus coûteuse, tant pour le taux de matière sèche atteint que pour la faisabilité de granulation. Cette façon de traiter les résidus, simple et utilisant un matériel peu dispendieux, a donc permis d'effectuer des mesures précises visant à asseoir les paramètres optimaux pour la granulation, de sorte à obtenir des granules pouvant se conserver et se valoriser aisément. La connaissance de ces paramètres était effectivement une condition impérative, puisque l'obtention de granules et leur caractérisation est la base pour explorer différentes voies de valorisation du produit. Ainsi, chacune des étapes menant à la fabrication des granules a été notée et ajustée au besoin. Les masses et les volumes de matériel liquide et solide transitant à chacune de ces étapes ont fait l'objet de mesures répétées afin d'obtenir un bilan massique des opérations. La pression d'air à insuffler au ballon du presseur et le temps de pressage ont été déterminés et ajustés suivant plusieurs tests de manière à réduire le taux d'humidité de la matière à un pourcentage qui permettait de granuler efficacement. Le taux de matière sèche requis pour une granulation optimale, c'est-à-dire au meilleur taux de conversion, dureté des granules et dimensions de ceux-ci a également été déterminé. Une fois la qualité voulue atteinte, la production de granules à grande échelle a débuté et la constance de la qualité du produit a été suivie et maintenue.

2.2.1 Broyages des résidus

Les Pdt ont été pesées, puis broyées à l'aide d'un broyeur semi-industriel Stephan UM 80 (Figure 1) loué au Centre de développement des bioproduits Biopterre. La bouillie (Br) était récupérée dans des chaudières de 20 L (Figure 1).



Figure 1. Broyeur Stephan UM 80 et bouillie (Br) de Pdt récupérée.

2.2.2 Séparation des phases liquide et solide par pressage

Les phases solide et liquide de la bouillie étaient séparées au moyen d'un pressoir pneumatique de type pressoir à ballon. Il s'agissait d'un pressoir HP modèle 180, d'une capacité de 180 L (Figure 2). Son diamètre intérieur mesurait 55 cm (21 ½ pouces) et il faisait 84 cm de hauteur (33 pouces). La cuve, perforée de minuscules orifices, contenait une poche du pressage retenant la matière solide. À chaque pressage, le pressoir était rempli avec environ 130 L de broyat. Une fois la cuve remplie, le ballon central était gonflé progressivement au moyen d'un compresseur à air. Tout au long du processus de pressage, la fraction liquide (FL) était récupérée dans des chaudières de 20 L et pesée. À la fin du pressage, la fraction solide récupérée à l'intérieur du pressoir (FS) était entreposée dans des chaudières de 20 L et pesée.



Figure 2. Pressoir à ballon.

2.2.3 Suivi de l'évolution du taux de matière sèche de la fraction pressée

Dans un souci d'amélioration continu, les étapes de pressage et séchage, élaborées lors des premiers projets de granulation (Landry et coll. 2014; Martin et coll. 2014), ont été ré-analysées afin d'établir les temps optimaux de pressage et séchage par l'établissement de courbes de réponse. Des échantillons de FS ont ainsi été prélevés pendant le pressage et le séchage selon le programme présenté au Tableau 2. Aux différents moments prévus pendant le pressage, environ 1 g de matériel était prélevé avec un emporte-pièce à chaque échantillonnage, toujours à la même hauteur dans le pressoir, pour établir le taux de matière sèche (MS) (Figure 3). Pendant le séchage, où la FS était étalée dans de grandes assiettes d'aluminium, des échantillons composites d'environ 2 g ont été prélevés à différents moments et à différents endroits dans le séchoir (Figure 3). Une température de 65 °C a été choisie pour ne pas dénaturer les contenus en éléments comme le N en vue de la valorisation des granules

comme fertilisant ou comme aliment. Une étuve Blue M (modèle EM-606E, Electronic Compagny, Blue Island, Illinois USA) a été utilisée pour le séchage. Pour établir la courbe, les échantillons ont été séchés jusqu'à l'atteinte de 100 % MS. Pendant le séchage, un brassage effectué après 14-16 heures permettait de diminuer le temps de séchage en éliminant l'humidité créée au fond de la panne d'aluminium et en homogénéisant l'échantillon. Si aucun brassage n'était effectué, le temps de séchage pouvait facilement augmenter de 4-6 heures supplémentaires.

Tableau 2. Programme d'échantillonnage de la FS pour l'établissement des courbes de MS pendant les étapes de pressage et de séchage.

Activités	Date	Heures	Échantillons
Broyage	25 juin	7-8h	Échantillon #1 broyat
Pressage	25 juin	8h	Début pressage
		14h	Échantillon #2 FS
		20h	Échantillon #3 FS
	26 juin	8h	Échantillon #4 FS
		14h	Échantillon #5 FS
		20h	Échantillon #6 FS
Séchage	27 juin	8h	Fin pressage Éch. #7
			Échantillon #8 FL
	28 juin	16h	Début séchage
		8h	Échantillon #9 FS
	29 juin	16h	Échantillon #10 FS
		8h	Échantillon #11 FS
		16h	Fin séchage Éch. #12
	30 juin	15h	Donner les échantillons au labo
	2 juillet		Réception des résultats de MS du laboratoire



Figure 3. Emporte-pièce et séchoir.

2.2.4 Production de granules

Un premier essai de granulation a eu lieu à l'Atelier Tenons-nous, situé à Neuville (Québec). Lors de cet essai, il a été convenu que le matériel devait avoir entre 85 et 90 % de matières sèches pour que les granules soient solides et que la granulation s'effectue sans colmatage de la matrice. L'appareil ayant servi à la granulation était un modèle Granulart GRH200 d'une capacité de 50 à 250 kg h⁻¹ équipé d'une matrice perforée à 6 mm de diamètre (Figure 4). La granulation s'effectuait à une pression entre 1500 et 2000 psi. Une fois que la méthode permettant l'atteinte de granules de la qualité souhaitée a été mise au point, les campagnes officielles de granulation ont débuté. Les quatre premières campagnes ont été effectuées avec le granulater de l'Atelier Tenons-Nous. Par la suite, un granulater de même marque (Figure 4) a été installé à la ferme expérimentale de Deschambault et utilisé pour les deux dernières campagnes officielles, ainsi que pour toute la production restante de granules.



Figure 4. Matrice perforée 6mm et granulater.

2.3 POTENTIEL AGRONOMIQUE DES GRANULES

2.3.1 Rémanence de la gale commune dans les granules

Production des granules et détection moléculaire de la gale commune

Pour réaliser le bioessai sur la gale à l'hiver 2016, avant la saison prévue en 3^e année de test au champ, des granules ont été produits à partir de Pdt saines ou fortement galées. Un test de détection moléculaire qPCR a été effectué sur les pelures des Pdt ayant servi à concevoir les lots de granules sains et galeux, leur bouillie respective et les granules en décollant. Les pelures saines ont également été évaluées. Ce test visait à détecter la présence d'ADN de la bactérie *Streptomyces scabies* causant la gale commune de la Pdt. Une quantité homogénéisée de

chaque échantillon de pelures, granules et bouillie, a été extraite avec le kit d'extraction commercial FastDNA SPIN kit for Soil (MP Biomedicals-Solon, États-Unis). La qualité et la quantité des ADN génomiques extraits ont été déterminées par spectrophotométrie avec les mesures d'absorbance à 260 nm et 280 nm et du ratio A260/A280. Un test PCR ciblant le gène de la toxine Thaxtomine (Txt AB) conférant la pathogénicité aux souches de *S. scabies* a été utilisé avec les amorces Txt103 et Txt104 (C. Beaulieu - Université Sherbrooke; *communication personnelle*).

Bioessai en serre

Le bioessai en serre pour évaluer la rémanence dans les granules de *S. scabies* et tester leur potentiel de transmission de la gale à une culture de Pdt a été réalisé du 5 février au 4 mai 2016. Des tubercules de Pdt *Norland* ont été plantés dans des pots de 15,5 L, dans un sol reconstitué de sable (60 %) et de terreau commercial (40 %) (Tableau 3). Le dispositif comprenait 8 traitements (Tableau 4), répétés trois fois, comparant l'apport de granules issus de Pdt très fortement galées (~ 100 %), l'apport de Pdt saines ne présentant aucun symptôme de gale et un témoin sans apport de granules. Dans les traitements avec granules, 313 g de granules ont été mélangés au terreau à l'empotage. Cette quantité correspondait à un équivalent de 150N (besoins de la Pdt) et a été calculé en fonction de la superficie du pot, en supposant que l'on apporterait les granules à la volée au champ. Un second scénario de calcul, en fonction de la superficie occupée par un planton au champ et d'une application en bande a également été envisagé. Or, la quantité de granules à apporter aurait été trois fois plus élevée, à raison de 1kg/pot. Visuellement, la répartition substrat-granule nous semblait disproportionnée et avec beaucoup trop de granules, comparativement à l'effet qui pourrait être obtenu lors d'une application au champ. Ainsi, ce scénario a été écarté, mais un pot supplémentaire amendé avec une quantité trois fois plus élevée de granules a tout de même été fait, à titre comparatif.

Les granules ont été apportés en totalité à la plantation, tel que généralement fait dans le cas de fertilisation au moyen de matière organique. Un inoculum constitué de pelures fraîches de Pdt galées (même Pdt que celles ayant servi à fabriquer le lot de granules galeux) a été également ajouté dans certains pots afin de s'assurer que le substrat n'était pas inhibiteur de la gale et que les conditions étaient propices à son développement. Par souci d'uniformité, des pelures saines ont été ajoutées dans les traitements homologues. Tout au long de l'essai, un suivi hydrique du sol a été effectué afin de maintenir le substrat à tendance plus sec, favorable au développement de *S. scabies*. Tous les traitements ont reçu un mélange d'engrais granulaire permettant de combler les besoins en engrais minéraux des plants, soit un apport de 12,9 g de nitrate d'ammonium calcique (6,02 g à la plantation et 6,88 g au fractionnement), 7,58 g de super triple phosphate et 4,65 g de muriate de potassium. Les conditions en serre ont été maintenues le plus possible à des températures de 18°C la nuit et 22°C le jour, avec un minimum de 14 heures d'ensoleillement. Au terme de 89 jours de croissance, les tubercules rendus à maturité ont été retirés des pots afin de pouvoir évaluer visuellement les symptômes de gale. Les tubercules ont été lavés minutieusement à l'eau courante, séchés, puis évalués par deux observateurs aguerris. Chaque tubercule a été classé selon un degré de sévérité et une intensité des symptômes de la gale. Par la suite, une cote qualitative a été attribuée selon le nombre de tubercules sains ou affectés par classe. De plus, tout au long du bioessai, un dépistage des maladies, insectes et/ou symptômes de carences nutritives a été réalisé lors de visites régulières dans la serre (une à deux fois/semaine).

Tableau 3. Caractérisation (b.s.) du terreau d'empotage du bioessai sur la gale mené en serre.

pH	C	N	N-NH4	N-NO3	P	K	Ca	Mg	Al
	(%)								
6,24	3,01	0,097	0,571	60,6	35,9	81,8	1202	67,3	249

Tableau 4. Traitements utilisés lors du bioessai en serre sur la gale.

Types de granules	Apports de pelures
Pommes de terre galeuses	Pelures saines
Pommes de terre galeuses	Sans pelure
Pommes de terre saines	Pelures galeuses
Pommes de terre saines	Pelures saines
Pommes de terre saines	Sans pelure
Aucune granule	Pelures galeuses
Aucune granule	Pelures saines
Aucune granule	Sans pelure

2.3.2 Caractérisation des fractions obtenues lors des campagnes de production

Pendant les six campagnes officielles de production de granules, des échantillons de toutes les fractions, soient bouillie (Br), fraction solide pressée fraîche (FS), fraction pressée liquide (FL), fraction pressée une fois séchée (FSs) et granules (Gr) ont été prélevés en triplicata à toutes les étapes du processus pour permettre de suivre les changements susceptibles de survenir à chacune d'elles. Les échantillons ont été conservés à 4 °C dans des contenants hermétiques de 500 ml jusqu'à leur analyse (moins de 24h pour Br, FL et FS), à l'exception des granules séchés qui ont été conservés à température pièce au laboratoire sur les énergies en agriculture durable (LEAD) de l'IRDA dans des bacs identifiés. Les granules en surplus ainsi que ceux fabriqués entre les différentes campagnes officielles de production étaient conservés à 10°C dans des sacs de toile étanches.

Pour chacune des fractions, les échantillons suivants ont été prélevés, tel que résumé au [Tableau 5](#):

- À la fin du broyage, trois échantillons de Br ont été prélevés directement dans la cuve du broyeur, à trois endroits et profondeurs différents.
- À la fin du pressage, trois échantillons de FS ont été prélevés dans le presseur, ainsi que trois échantillons de FL dans les chaudières récoltant le liquide pressé.
- Une fois le séchage terminé, la FS a été échantillonnée en triplicata au moment de la sortie de l'étuve. Chacun des échantillons était composé de sous-échantillons prélevés dans les différentes assiettes d'aluminium dans lesquelles la FS avait été étendue.
- Des granules, à la sortie du granulater, en différents temps d'une même séance de granulation.

Comme les granules utilisés pour l'essai au champ de 2016 provenaient de plusieurs lots différents, produits au cours des deux premières années du projet et entreposés, une nouvelle caractérisation physico-chimique, identique à celle réalisée lors de la granulation, a été effectuée sur le mélange final avant leur utilisation au champ.

Tableau 5. Exemple de caractérisation des différentes fractions obtenues lors des campagnes de granulation.

Rep	Broyat (Br)	Fraction solide pressée fraîche (FS)	Fraction liquide (FL)	Fraction solide séchée (FSs)	Granules (Gr)
A	Br-1-A	FS-1-A	FL-1-A (15 min)	FSs-1-A	Gr-1-A
B	Br-1-B	FS-1-B	FL-1-B (3h)	FSs -1-B	Gr-1-B
C	Br-1-C	FS-1-C	FL-1-C (24h)	FSs -1-C	Gr-1-C

Les 15 échantillons prélevés/campagne ont été envoyés au laboratoire de l'IRDA. Les paramètres mesurés englobaient le pH à l'eau (pHeau), le taux de MS à 105 °C et de matières organiques (MO) (Recommended Methods of Manure Analysis, Peters et coll. 2003). Le carbone (C) labile a été mesuré par la méthode du carbone soluble à l'eau (Ceau) de Garcia et coll. (1990). Le carbone total (Ctotal) a été calculé avec la méthode des cendres selon la formule '100-cendres' pour obtenir la quantité de MO, elle-même ensuite divisée par le facteur 2,0 qui est plus juste dans le cas des amendements et engrais organiques (AEO) que le facteur 1,724, utilisé pour les sols (Giroux et Audesse 2004). Le carbone total soluble (Ctot soluble), le carbone organique soluble (Corg. soluble) et le carbone inorganique soluble (Ci soluble) ont été dosés par combustion avec un appareil Shimadzu TOC-LCPN. Le Ctotal est libéré par combustion, le carbone organique (Corg) est mesuré suite à la décomposition du carbone inorganique (Ci) par l'acide chlorhydrique, les deux formes étant mesurées par une cellule infrarouge. Le Ci a été obtenu par la différence entre les deux valeurs. Les formes disponibles de N inorganique ont été déterminées par le dosage des nitrates (N-NO₃) et de l'ammonium (N-NH₄) extrait au KCl 2M (Isaac et Johnson 1976), puis déterminées par colorimétrie automatisée. Le N total (Ntot) a été obtenu par combustion au Leco pour les FS et digéré par Kjeldahl pour la FL puis dosé par colorimétrie automatisée. Le N organique (No) a été estimé par différence entre le Ntot et la somme des N-NO₃ et des N-NH₄. Le C/N a donc été calculé en divisant le C obtenu par la méthode des cendres par le Ntot Kjeldahl pour les liquides et par le C et le N déterminé par combustion au Leco pour le solide. Le P labile a été évalué par le P soluble à l'eau (Peau) (Sissingh 1971) et le P total (Ptot) par digestion à l'acide chlorhydrique et nitrique (Méthode EPA 3051a), suivie d'une détermination par spectrométrie d'émission au plasma. Le P a aussi été extrait au HCl 2,5N (P HCl) (Salomons et Gerritse 1981), puis déterminé par colorimétrie automatisée. Le P HCl contient toutes les formes de P considérées non-résistantes (de la plus labile à modérément labile). Les contenus en K, calcium (Ca) et magnésium (Mg), de même qu'en ÉTMs (Al, Fe, Mn, Zn, Cu) ont été mesurés par digestion à l'acide chlorhydrique et nitrique (Méthode EPA 3051a). Par ailleurs, les Br, FS, FSs et Gr ont été caractérisés au niveau de leur indice de stabilité biologique (ISB). L'ISB est un indicateur de la facilité avec laquelle la MO contenue dans les amendements et les fertilisants organiques sera, ou non, minéralisée. La méthode employée pour réaliser les essais est similaire à celle développée en 2007 au laboratoire du Dr. Parent de l'Université Laval et consiste en une adaptation de la méthode originale AFNOR (XP U44-162) (2005) utilisant un digesteur de fibre (ANKOM 200) de la compagnie ANKOM Technology.

Les paramètres analysés rapportés précédemment ont été choisis car ils permettent de calculer des ratios reconnus pour estimer *a priori* la valeur fertilisante du N, P et K des AEO. À partir de cette analyse, les deux éléments fertilisants les plus intéressants (N et K) pour les essais au champ ont été identifiés, de même qu'une culture pertinente, l'avoine, ainsi que les doses à appliquer.

2.3.3 Essais en champs avec les granules

Traitement et mise en place de l'expérience

Les essais en champ ont été conduits à l'été 2016 à la Ferme expérimentale de Deschambault de l'IRDA, dans une culture d'avoine de la variété *Synextra*. Le sol était un sable loameux. Le [Tableau 6](#) présente les analyses de sol au printemps 2016 pour chacun des sites d'essai. Le dispositif était en blocs complets aléatoires et comprenait 3 répétitions. Les parcelles avaient 3 x 9 m. Chacun des éléments majeurs choisis (N et K) était testé dans un dispositif distinct. Le dispositif N comparait 6 traitements et le dispositif K en comparait 5 ([Tableau 7](#) et [Tableau 8](#)). Tous deux comprenaient un premier traitement témoin non fertilisé pour l'élément testé (0N-PK ou NP-OK) pour connaître la part de cet élément fourni naturellement par le sol. Un second témoin fertilisé en engrais minéraux NPK permettant de comparer les granules avec la fertilisation minérale usuelle (100% NPK) dont l'efficacité est fixée à 100% par défaut même si son taux d'utilisation est inférieur à 100%. Ensuite, trois autres traitements (CEN) de quantités croissantes de granules, servant à produire une courbe de réponse et permettant le calcul des coefficients d'utilisation apparente (CUA) et d'efficacité (CE) des éléments étudiés (N ou K) apportés sous forme de granules. Les quantités de granules à apporter ont été calculées selon des CE estimés *a priori* grâce à la caractérisation physico-chimique. Enfin, un dernier traitement (Combo), présent uniquement dans l'essai N, servant à vérifier s'il existe une synergie d'utilisation entre l'engrais organique et minéral, fertilisé à 80% en engrais minéraux N, mais recevant aussi 20% des besoins en N sous forme de granules. Outre l'élément étudié, les éléments majeurs complémentaires étaient apportés en engrais minéraux. Les besoins en le P étaient toujours comblés à 100%, mais dû à la richesse en K des granules, seulement une partie du K était ajouté sous forme minérale. Les recommandations en NPK du GREF (2010) (CRAAQ 2010a) ont été suivies pour établir les traitements et la fertilisation complémentaire ([Tableau 7](#) et [Tableau 8](#)). L'[annexe A](#) présente un schéma des dispositifs de chacun des essais.

Tableau 6. Caractérisation des sols au printemps 2016 dans les essais N et K avant l'application des traitements.

Paramètres†	Essai N	Essai K
pH _{eau}	6,28	5,80
Matières organiques (M.O.) (%)	4,85	2,48
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	18,6	16,8
N-NH ₄ (kg ha ⁻¹ b.s.)	11,5	4,23
C _{total} (%)	1,83	0,93
N _{tot} (%)	0,15	0,08
C/N	12,5	11,5
Densité apparente (g cm ³ ⁻¹)	1,03	1,14
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)		
P	151	468
K	155	156
Ca	2609	1175
Mg	76	60
Al	3688	3513
P _{M3} /Al _{M3} (%)	4,1	13,3

Tableau 1. Besoins nutritifs et traitements comparés de doses de granules et d'engrais minéraux de l'essai N.

Besoins Avoine (kg/ha)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	60	20	20	
Quantité d'engrais ou de granules utilisés (kg ha ⁻¹)				
Traitements	Granules	27-0-0	0-46-0	0-0-22-11
ON-PK minéral	0	0	43	91
NPK minéral	0	222	43	91
COMBO (20% granules)	3145	178	43	69
CEN 0,85	12952	0	43	0
CEN 0,70	15727	0	43	0
CEN 0,55	20017	0	43	0

Tableau 2. Besoins nutritifs et traitements comparés de doses de granules et d'engrais minéraux de l'essai K.

Besoins Avoine (kg/ha)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	60	20	70	
Quantité d'engrais ou de granules utilisés (kg ha ⁻¹)				
Traitements	Granules	27-0-0	0-46-0	0-0-22-11
NP-OK minéral	0	222	43	0
NPK minéral	0	222	43	318
CEN 0,90	10064	222	43	0
CEN 0,80	11322	222	43	0
CEN 0,70	12940	222	43	0

Selon les traitements, la quantité requise de granules a été appliquée à la main le 10 mai, soit deux semaines avant les semis d'avoine. Immédiatement après l'application, les granules ont été incorporés au vibroculteur. Trois autres passages de vibroculteur, à intervalle d'environ 5 jours, ont été effectués avant les semis, lesquels ont eu lieu le 24 mai. Cette régie d'application pré-semis a été décidée lors d'essais préliminaires conduits en serre. Ces essais préliminaires, non prévus au projet, ont été réalisés afin de maximiser le bon déroulement de l'essai terrain. Les résultats ne sont pas présentés en détail, mais il est ressortit clairement qu'une immobilisation transitoire du N se produisait suivant l'incorporation des granules. Il a ainsi été prévu de leur laisser le temps de se dégrader dans le sol avant d'effectuer les semis. Pour ce qui est des engrais minéraux complémentaires, ceux-ci ont été ajoutés à la main et incorporés dans chacune des parcelles avant le semis. Par ailleurs, les essais préliminaires ont fait ressortir que le fort déséquilibre cationique des granules (K vs Ca) provoquait avec le temps une carence en Ca (voir résultats : section 3.2.2). Deux applications foliaires préventives de Ca ont donc eu lieu en saison, soit le 9 juin (16 JAS – stade 2-3 feuilles) et le 8 juillet (45 JAS – stade juste avant épiaison) dans les parcelles avec granules (incluant le traitement « Combo ») pour contrer ce phénomène et éviter que cet effet antagoniste du K sur l'absorption du Ca et du Mg ne vienne interférer avec l'évaluation de la valeur fertilisante en N et K des granules. L'Oligo-ca 6% a été utilisé et appliqué à une dose de 5 L/ha.

Suivi agronomique

Tout au long de la croissance (du 24 mai au 7 septembre) un suivi agronomique a été réalisé régulièrement (stades phénologiques, carences, maladies, insectes, verse). De plus, deux semaines après les semis (7 juin, un mois suivant l'incorporation des granules), un second échantillonnage de sol a été effectué afin de connaître l'impact à très court terme d'ajout de granules sur les éléments majeurs et mineurs du sol, ainsi que sur l'activité biologique (uréase et respiration microbienne) des traitements ayant reçu les plus fortes doses de granules. Juste avant l'épiaison (le 11 juillet, 47 Échelle Zadocks), des plants entiers ont été prélevés, leur masse sèche (MS) mesurée et leurs contenus en NPK totaux dosés. Les prélèvements (PVL) ont été calculés en multipliant la MS et les contenus en NPK. Le statut nutritionnel en NPK a aussi été évalué par une analyse foliaire. Des sols ont également été prélevés pour doser les formes labiles de N, P, K et C (NO_3 , NH_4 , C_{eau} , P_{eau}), les éléments Mehlich-3 et les taux d'activités biologiques (uréase, respiration microbienne, pouvoir de minéralisation 10 jours et C soluble). À la récolte, les rendements en grains et en paille ont été mesurés, ainsi que leurs contenus en NPK pour calculer les PVL totaux (PVL_{tot}). Enfin, le NO_3 résiduel du sol a été dosé.

Détermination de l'efficacité fertilisante en N et K des granules

Les prélèvements totaux ont permis le calcul des CUA et CE du N et K des granules. Ces coefficients permettent de comparer des produits fertilisants d'origine très diverse et d'établir l'un par rapport à l'autre, leur potentiel comme fertilisant N ou K. Au final, les CE au point d'inflexion de la courbe sont considérés les bons. Les CUA et CE sont calculés selon les formules suivantes (exemple pour le N) (Giroux et coll. 2007) :

$$(1) \text{ CUA engrais minéral (\%)} = \frac{\text{PVL}_{\text{tot}} \text{ N traitement N engrais minéraux} - \text{PVL}_{\text{tot}} \text{ N témoin non fertilisé en N}}{\text{Dose totale en N apportée par l'engrais minéral}}$$

$$(2) \text{ CUA granule (\%)} = \frac{\text{PVL}_{\text{tot N du traitement granules}} - \text{PVL}_{\text{tot N témoin non fertilisé en N}}}{\text{Dose totale en N apportée par le traitement granules}}$$

$$(3) \text{ CE (\%)} = \frac{\text{CUA granule}}{\text{CUA engrais minéral}}$$

Analyses statistiques

Afin de tester les effets des traitements sur chaque variable étudiée, un modèle d'analyse de variance a été appliqué à l'aide de la procédure PROC MIXED de SAS (version 9.4). Le dispositif expérimental et la présence de mesures répétées, s'il y a lieu, ont été tenus en compte dans ces modèles en modélisant la partie aléatoire. Les effets des blocs, des parcelles et l'erreur expérimentale étaient des effets aléatoires. Le facteur traitement, la période et l'interaction traitement × période étaient les effets fixes du modèle. Le facteur période de prélèvement faisait l'objet de mesures répétées qui ont pu être corrélées et les modèles en ont tenu compte. Un test de F a d'abord été appliqué pour les effets fixes afin de déterminer s'ils étaient significatifs. Pour un effet déclaré significatif, des tests de t des différences deux à deux entre les moyennes des niveaux de ce facteur ont été effectués. La validité des modèles a été vérifiée au moyen de graphiques des résidus pour s'assurer de la normalité de leur distribution et de l'homogénéité des variances.

Analyse de diversité microbienne

Des échantillons de sols ont été prélevés au printemps avant l'application des granules dans chacun des blocs (3 échantillons/essai) et à la récolte dans toutes les parcelles (1 échantillon/parcelle) et envoyés au LEM de l'IRDA afin d'étudier l'impact des granules sur la composition des populations microbiennes via une analyse de métagénomique. Les échantillons ont été extraits avec le kit d'extraction commercial FastDNA SPIN kit for Soil (MP Biomedicals-Solon, États-Unis) afin d'évaluer leurs diversités bactérienne et eucaryotique. Cette richesse bactérienne ou eucaryotique est évaluée selon le nombre de séquences identifiables avec une unité taxonomique opérationnelle (OTU « operational taxonomic unit »). Le nombre d'OTU différentes détectées représente donc la richesse bactérienne ou eucaryotique, sans égard au nombre de fois que chaque OTU est détectée dans l'échantillon et sans égard à l'identité taxonomique ni au degré d'homologie des OTUs détectées. Le processus de séquençage à haut débit Illumina MiSeq génère plusieurs milliers de séquences par échantillon et le nombre total de séquences par échantillon peut varier. La richesse microbienne de différents échantillons doit être déterminée en utilisant un nombre commun de séquences à l'ensemble des échantillons comparés. Ce nombre de séquences peut être déterminé à l'aide du point d'inflexion des courbes de raréfaction (Figure 5). L'analyse de la richesse microbienne a été effectuée avec 7 000 séquences par échantillon dans le cas des bactéries et avec 9 000 séquences par échantillon dans les cas des eucaryotes.

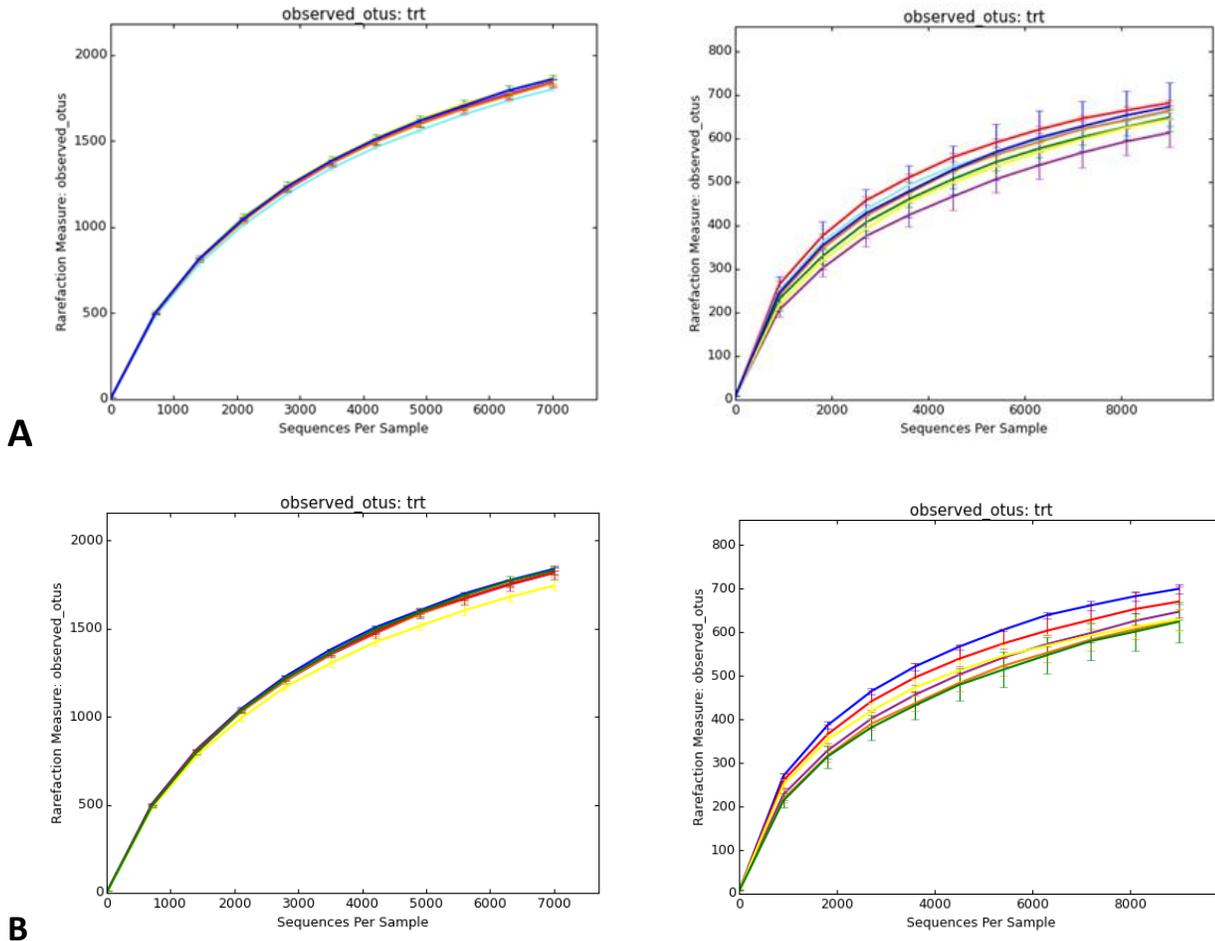


Figure 5. Courbes de raréfaction des OTUs pour déterminer le nombre optimal de séquences à utiliser pour évaluer la richesse bactérienne (gauche) et eucaryotique (droite) observée pour l'essai azote (A) et l'essai potassium (B). La valeur moyenne du nombre d'OTUs est déterminée au point d'inflexion de la courbe de raréfaction du traitement correspondant.

L'amplification de la région V6-V8 du 16SrARN bactérien et du 18SrARN eucaryotique a été réalisée en utilisant les séquences-amorces des régions spécifiques décrites par Comeau et coll. (2011) et en utilisant une approche en deux étapes de PCR (dual-indexed PCR approach) spécialement conçue pour l'analyse avec la plateforme de séquençage haut débit Illumina MiSeq. Les bibliothèques d'amplicons ont été séquencées en format apparié (paired-end) avec une lecture de 300 bases, soit 2 x 300 paires de bases de chaque côté du brin d'ADN sur Illumina MiSeq à la plateforme d'analyses génomiques de l'Institut de biologie intégrative et des systèmes (IBIS) de l'Université Laval (Québec, CA). Le traitement bioinformatique des séquences a été effectué sur la plateforme bioinformatique du laboratoire d'écologie microbienne de l'IRDA et a impliqué différentes stratégies de traitements (QIIME (Caporasso et coll. 2010), R (R Core Team project 2014), STAMP (Parks et coll. 2014) incluant des étapes de validation de qualité, de bases de références et d'indices de mesures de la richesse microbienne et des mesures de comparaison de la diversité microbienne.

2.4 POTENTIEL ALIMENTAIRE DES GRANULES

2.4.1 Valeur nutritive

Pour établir la valeur nutritionnelle animale des granules, pour chacune des six campagnes de granulation officielles, la Br, la FL et les Gr ont été caractérisés pour l'amidon, les lipides totaux et les protéines brutes au laboratoire du Dr. Dany Cinq-Mars de l'Université Laval. Ces paramètres ont été ajoutés à certains déjà caractérisés dans le volet « potentiel agronomique » (Ca, P, Mg, S, K, Na; N_{tot} pour le contenu en protéines; fibres (ADF, NDF) et cendres) pour compléter l'étude de la valeur nutritive des granules.

2.4.2 Potentiel prébiotique et salubrité

Toujours à même les six campagnes de granulations officielles, des échantillons (en triplicata) de Br et de Gr ont été récoltés pour ce volet, maintenus à 4 °C et envoyés dans les 24 heures au Laboratoire d'hygiène et de l'environnement agricole (LHEA) de l'IRDA. Leur contenu en bactéries *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. et *Listeria monocytogenes* ont été évalués. Les populations d'*E. coli* ont été dénombrées en utilisant la méthode de filtration sur membrane MA. 705 – Ec-BCIG 1.0 du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). Les salmonelles ont dans un premier temps été dénombrées par ensemencement direct sur gélose sélective Compass® (Biokar diagnostics, Allonne, France). Une méthode d'enrichissement a aussi été réalisée de façon à détecter la présence de salmonelles même en très faible concentration. Pour ce faire, la méthode MA. 700 – Sal-PA 1.0 du CEAEQ a été utilisée. La présence de *L. monocytogenes* a été détectée en utilisant le milieu gélosé sélectif Confirm' L. mono agar® (Biokar diagnostics, Allonne, France) selon la procédure proposée par le manufacturier. En ce qui a trait aux contenus en polyphénols, les échantillons de granules ont été analysés pour leur contenu en acides vanillique, caféique, chlorogénique, férulique et cinnamique, libres et totaux, de même qu'en solanine totale. L'analyse a été faite par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) au laboratoire d'analyses agroenvironnementales de l'IRDA.

2.5 POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES GRANULES

2.5.1 Caractérisation de la biomasse

Pour réaliser les tests énergétiques, 200 kg de granules ont été retirés de la masse finale totale combinée de toutes les campagnes de production. Un échantillon composite a été constitué et soumis à une analyse physico-chimique au laboratoire de l'IRDA en accord avec les normes établies par l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM). La matière a d'abord été séchée à 105 °C (ASTM, 2008a), puis passée au broyeur mécanique afin d'obtenir une granulométrie homogène et inférieure à 80 mesh (ASTM, 2007a). Les analyses chimiques ont ensuite été réalisées selon différentes méthodes présentées au [Tableau 9](#).

Tableau 9. Méthodes d'analyse du volet énergétique de la biomasse des granules de Pdt déclassées.

Propriété	Technique	Méthode	Norme
Matière sèche	À 105 °C		ASTM E1756-08 (2008a)
C, H	Combustion sèche, CO ₂ infrarouge	IRDA-341	ASTM E777-08 (2008b)
N	Combustion sèche, N ₂ conductivité	IRDA-341	ASTM E778-08 (2008c)
S, P, K, Na, Ca, Mg, Al, Fe, Ni, Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, B, Mn, Mo, Co, Ba, Sr	Digestion HNO ₃ , peroxyde et HCl (95 °C)	IRDA-320	USEPA 3050B (2012)
Si	Digestion NaOH 50 % (95 °C)	IRDA-321	Heckman et Wolf 2011
Cl	Dosage par titrimétrie AgNO ₃	IRDA AS-308	Wallinga et coll. (1995)
Cendres	À 500 °C	IRDA-306	ASTM E1755-01 (2007b)
PCS	Bombe calorimétrique	IRDA-7540	ASTM E711-87 (2004)

2.5.2 Tests de combustion

2.5.2.1 Système de combustion

Le banc d'essais est constitué d'un appareil de combustion Bio-Burner (modèle BB-100, LEI Products, Madisonville, KY, États-Unis) (Figure 6) ayant une puissance de 29 kW. Il a été conçu pour brûler une vaste gamme de produits dans l'optique que son propriétaire puisse utiliser n'importe quel combustible disponible localement. Ainsi, la BB-100 accepte le bois, le maïs, les grains, la paille, les cultures herbacées et les déchets agricoles, en autant que le taux d'humidité du combustible ne dépasse pas 40 % et que le produit respecte certaines dimensions (7,5 cm x 2,5 cm x 1,25 cm).



Figure 6. Chaudière (Bio-Burner BB-100) dans la salle des tests de combustion de l'IRDA.

L'alimentation en combustible, qui se fait à partir d'une trémie adjacente, et l'entrée d'air sont automatiques et régulées électroniquement. L'ordinateur du Bio-Burner permet également de régler manuellement les quantités maximales de ces paramètres. Plusieurs autres facteurs peuvent être spécifiés, tels que la température dans la chambre de combustion et la vitesse d'évacuation des cendres. La BB-100 comprend un échangeur de chaleur où l'eau qui y circule peut servir au chauffage du bâtiment par le biais du système de plancher chauffant. S'il n'y a pas de demande en eau chaude, la chaleur de l'eau est évacuée à l'extérieur du bâtiment par un radiateur. L'effluent gazeux produit par le Bio-Burner est évacué sur le dessus de l'appareil par la bride de sortie du cyclone servant à la précipitation des cendres volantes. Pour diriger les fumées à l'extérieur du bâtiment, un conduit de 4,5 m de long est installé au bout de la bouche d'évacuation jusqu'au travers du toit du bâtiment (Figure 7). La cheminée est une série de conduits circulaires à double paroi en acier de 150 mm de diamètre (D) munis de portes d'échantillonnage permettant d'installer les instruments nécessaires pour caractériser les émissions. Ainsi, à partir de la bride d'évacuation il y a : deux sondes d'échantillonnage de gaz (l'une servait à mesurer l'O₂ et l'autre, les gaz de combustion), le montage pour le prélèvement des particules, un anémomètre et un opacimètre (Figure 7).

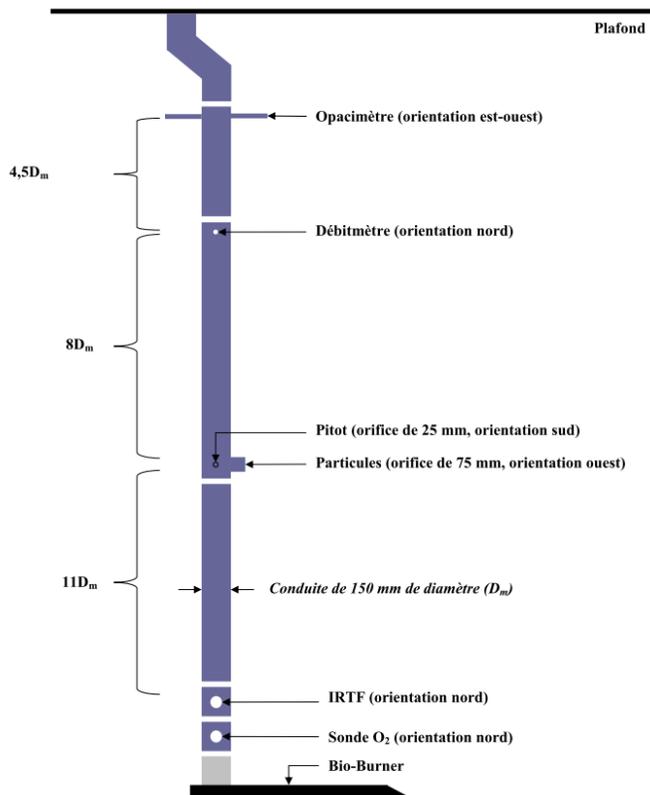


Figure 7. Localisation des points d'échantillonnage sur la cheminée.

Pendant les essais de combustion, les paramètres mesurés par les divers équipements du banc d'essais et enregistrés par deux systèmes d'acquisition (CR10X, Campbell Scientific, Edmonton, AB, Canada) comprennent :

- La température (thermomètre) et l'humidité relative (hygromètre) de l'air ambiant dans la salle de combustion
- Les températures de la chambre de combustion, de l'effluent gazeux à l'entrée de la cheminée et de l'eau circulant à l'intérieur des tubes de l'échangeur de chaleur, enregistrées par l'ordinateur interne du BB-100
- La température, dans le conduit d'évacuation des fumées, fournie par un thermocouple de type T installé près de la sonde d'échantillonnage des gaz
- Le débit (débitmètre T-MINOL-130, Minol USA, Addison, TX, États-Unis) et la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur (thermocouples de type T)
- La masse de biomasse restante dans la trémie par des cellules de charge installées sous les pieds de la trémie (RL 1800, Rice Lake Weighing Systems, Rice Lake, WI, États-Unis)
- La concentration de particules mesurée selon la Méthode 5 établie par l'United States Environmental Protection Agency (USEPA 2012), modifiée pour les faibles débits et une conduite de diamètre < 300 mm, qui nécessite une ligne de prélèvement pourvue d'un appareil d'échantillonnage (XC-563 Digital Meter Console, Apex Instruments, Fuquay-Varina, NC, États-Unis)
- La concentration des gaz de combustion (CO₂, N₂, et O₂) analysée à l'aide d'un chromatographe de gaz (Varian 3600, Varian Inc, Walnut Creek, CA États-Unis)
- L'opacité des gaz de combustion évaluée par un analyseur optique (EMS750, Environmental Monitor Service, Yalesville, CT, États-Unis)
- Le débit des gaz dans la cheminée mesuré à l'aide d'un débitmètre (Model GF90, Fluid Components Intel., San Marcos, CA, États-Unis) fixé sur la cheminée

L'échantillonnage des particules en suspension générées lors de la combustion a été exécuté en s'inspirant de la Méthode 5 de l'USEPA (2016). Les matières particulaires sont prélevées directement dans le flux gazeux à un débit modulé en temps réel pour que la vitesse de circulation des fumées à l'entrée de la ligne de prélèvement soit la même que celle du gaz qui circule au point de prélèvement (isocinétisme). Les particules ont été prélevées en un seul point considérant le très faible débit des gaz. Les données d'échantillonnage ont été relevées aux 5 à 10 min et le prélèvement a été effectué assez longtemps pour obtenir un volume d'au moins 0,75 m³ de gaz. Ainsi, pratiquement chaque essai s'est déroulé sur une période d'environ 2 h. À la fin des expériences, le filtre (masse initiale mesurée) permettant de capturer les particules de chaque test était pesé. La différence était additionnée à la masse de particules récupérées de l'intérieur du matériel se trouvant avant le filtre (porte-filtre, sonde et buse) du résidu pour obtenir la masse totale de particules. Connaissant le volume de gaz prélevé sur une base sèche et normalisé à une température de 25 °C et à une pression de 101,3 kPa, cela permettait d'exprimer le résultat en termes de concentration (mg/Nm⁻³), laquelle était ensuite corrigée à un taux d'oxygène commun. Par exemple, pour un taux d'oxygène de 7 %, la formule suivante a été utilisée :

$$C_{\text{corrigée}} = C_{\text{mesurée}} \times \frac{20,9-7,0}{20,9-(O_2)_{\text{mesuré}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

où $C_{\text{corrigée}}$ et $C_{\text{mesurée}}$ représentent respectivement la concentration corrigée à 7 % d'O₂ et celle mesurée au point d'échantillonnage à un certain taux d'O₂ mesuré (%). Les émissions de particules étaient ensuite exprimées en g/h.

2.5.2.2 Protocole des essais

Au total, quatre tests de combustion ont été effectués, deux utilisant les granules de Pdt et deux utilisant des granules de bois à titre de témoin. Des granules de bois du commerce ont été utilisés (Maximum, Groupe LG Inc., Saint-Félicien, QC). Selon le fabricant, il s'agit de granules de bois franc, sans additifs et de qualité de type supérieure. Dû à la durée requise pour effectuer un test de combustion, chaque test s'est exécuté en une journée différente. Pour chaque jour d'expérimentation, la trémie était remplie d'environ 20 kg de biomasse et par la suite, remplie au besoin au cours du test. Il est à noter que le démarrage de la chaudière pour le réchauffement de la chambre de combustion se fait au propane. Une fois la biomasse enflammée (à ~590 °C), une période d'attente était encore nécessaire (jusqu'à ~800 °C) avant de fermer l'alimentation du propane et partir le mélangeur de la chambre de combustion. Par la suite, les paramètres de combustion de la chaudière étaient ajustés dans l'optique d'atteindre une température de combustion constante. Cette période variait d'une à trois heures. Les données résultantes après cette période ont été prises en considération pour l'analyse. De plus, les cendres résultantes à la cheminée, à l'échangeur et au foyer à la fin des tests ont été récupérées et pesées séparément le lendemain du test de combustion.

2.5.3 Test de pyrolyse

2.5.3.1 Banc d'essai

Un réacteur de pyrolyse à vis sans fin (brevet CA 2830968) a été développé par l'IRDA en collaboration avec le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). L'unité de pyrolyse (Figure 8) a été installée au Laboratoire sur les énergies en agriculture durable (LEAD) de l'IRDA (Deschambault, QC, Canada). Le pyrolyseur comprend une trémie, une vis d'alimentation horizontale, une vis verticale traversant un bloc chauffant de 25,4 cm de long, un réservoir pour la récupération du biocharbon et un système de condensation pour récupérer la biohuile. Pour la pyrolyse, la biomasse est placée dans la trémie d'alimentation. Une vis horizontale positionnée sous la trémie achemine le matériel dans la chambre de réaction à vis verticale (tube en acier de 2,54 cm de diamètre). La vitesse de rotation des vis peut être commandée individuellement par des moteurs réducteurs contrôlant ainsi le débit d'alimentation et le temps de résidence du matériel dans la chambre de réaction. La puissance thermique est fournie par deux éléments chauffants de 1 500 Watts insérés dans un bloc de cuivre autour du tube dans la zone de réaction. Des thermocouples sont installés dans ce bloc pour enregistrer la température à la paroi extérieure du tube et pour commander les éléments chauffants. À la sortie de la chambre de réaction à vis verticale, le produit solide de la pyrolyse (charbon) tombe dans le réservoir (31,4 cm de haut et 16,8 cm de diamètre). Un pot (15,2 cm de long) est placé dans le réservoir pour récupérer le charbon accumulé. L'accès au réservoir se fait par une bride au fond. De plus, les particules fines sont séparées du gaz par un déflecteur intérieur (10,2 cm de diamètre et 10,5 cm de long) placé à la sortie du réacteur. Le gaz est alors évacué par une ouverture dans la partie supérieure du réservoir et il est dirigé vers le système de condensation (Figure 9). Ce dernier est composé de trois condenseurs, soit un ballon et deux barboteurs en verre. Le ballon était à température ambiante, le premier barboteur était immergé dans un bain de glace à 0 °C, et le deuxième était immergé dans de l'acétone refroidie

par de la glace carbonique au CO_2 maintenue entre -20 et -30 °C. Lorsque le gaz traverse ce système de condensation, une quantité de condensat s'accumule dans chacun des condenseurs.

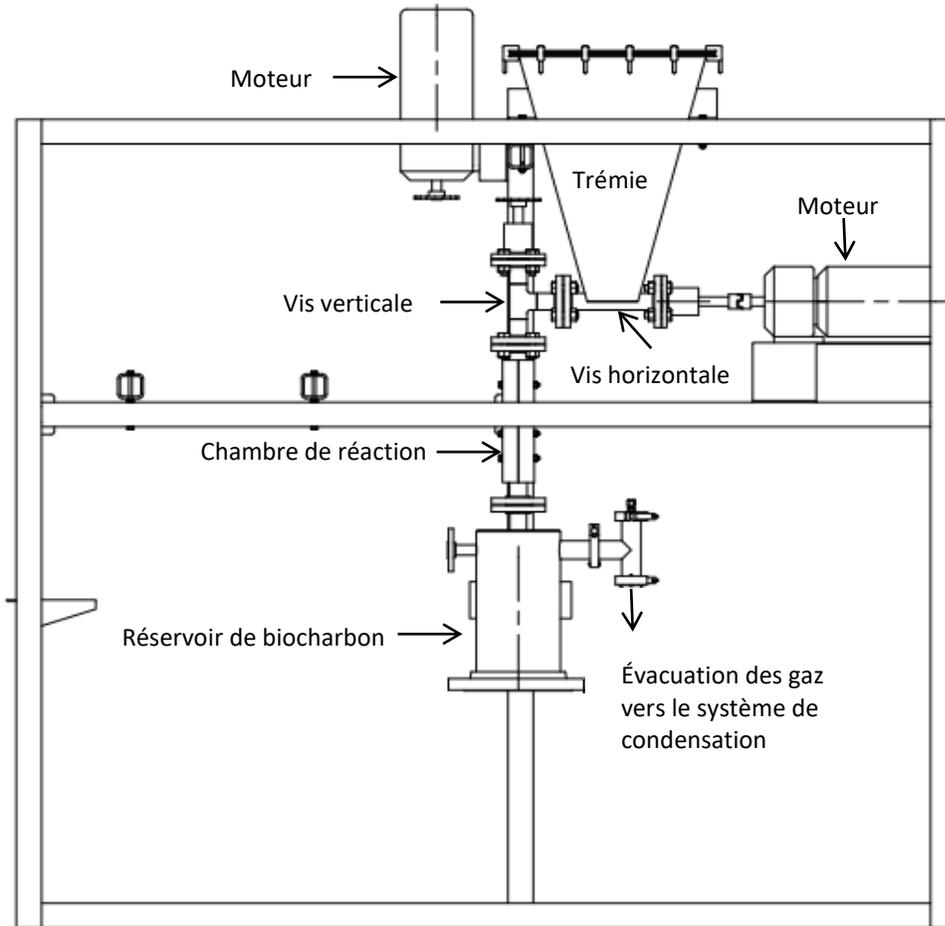


Figure 8. Schéma du pyrolyseur.



Figure 9. Système de condensation.

L'unité de pyrolyse est conçue afin d'empêcher l'entrée d'oxygène dans le système. Chaque bride est munie avec des joints de graphite à haute température (150 psi). Pour chaque réaction, l'air dans le système est purgé avec du N₂ qui est injecté dans la trémie. Alors que le flux de N₂ assure que la réaction de pyrolyse se produise dans un environnement sans oxygène, il aide également à évacuer les gaz de pyrolyse.

2.5.3.2 Protocole expérimental et analyses

Les granules de Pdt et de bois ont été broyés et tamisés à une granulométrie de 1 à 3,7 mm. Une expérience factorielle complète a ensuite été réalisée à quatre températures de la chambre de réaction (425, 500, 575 et 650 °C) et deux temps de résidence de la biomasse dans la chambre de réaction (45 et 60 s), tandis que les autres conditions opérationnelles ont été maintenues constantes (débit d'alimentation : 0,5 kg/h et débit de N₂ : 5 L/min).

Les rendements en biohuile (Eq. 2), ainsi qu'en biocharbon (Eq. 3) et en gaz (Eq. 4) ont été calculés (sur une base en biomasse humide) selon les équations suivantes:

$$\text{Rendement}_{\text{bio-huile}} (\%m) = \frac{m_{B1} + m_{B2} + m_{B3}}{m_f} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Rendement}_{\text{biocharbon}} (\%m) = \frac{m_{\text{Biocharbon}}}{m_f} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Rendement}_{\text{gas}} (\%m) = \frac{m_f - m_{\text{Biocharbon}} - m_{B1} - m_{B2} - m_{B3}}{m_f} \quad (\text{Eq. 4})$$

Où m_{B1} , m_{B2} et m_{B3} est la masse de biohuile recueillie dans le premier, deuxième et troisième condenseur, respectivement, $m_{\text{biocharbon}}$ est la masse de biocharbon recueillie, et m_f est la masse de biomasse pyrolysée.

Les biohuiles collectées dans le deuxième condenseur de chaque test ont été soumises à une analyse réduite afin de sélectionner celle ayant la meilleure qualité pour la soumettre à une analyse complète. L'analyse réduite a consisté à mesurer la teneur en eau (analyse de Karl-Fisher) et la teneur en solides de pyrolyse. L'analyse complète comporte les paramètres méthodes de mesure spécifiés par la norme ASTM D7544-09 (pH, pouvoir calorifique supérieur, densité, teneur en soufre, teneur en cendres et point d'éclair). La viscosité cinématique et le point d'écoulement (des analyses exigées par la norme) n'ont pas été déterminés. À des fins de comparaison, une huile pyrolytique a été produite à partir de granules de bois broyés et tamisés (granulométrie de 1 – 2.4 mm). Différentes températures (450, 500, 550, 600 et 650 °C) ont été testées alors que les autres paramètres ont été gardés constants (temps de résidence de 60 s, débit de biomasse de 1,3 kg h⁻¹ et débit de N₂ de 5 L min⁻¹). La biohuile dont le rendement a été le plus élevé a été soumise à une analyse complète.

2.6 ANALYSES ÉCONOMIQUES

La méthode retenue pour l'analyse économique se présente en trois grandes étapes. Tout d'abord, il faut effectuer une analyse de substitution, ce qui implique de décider de la base de substitution. Dans le cas des voies de valorisation énergétique et de fertilisation, ces bases sont respectivement le pouvoir calorifique et la valeur fertilisante. Dans le cas de la valorisation alimentaire, la base de substitution est la valeur nutritionnelle des granules. Le deuxième élément à considérer est l'économie des coûts de transport puisque le procédé de granulation consiste à la base à réduire la teneur en eau de la matière traitée, principale composante de son poids, tout en conservant et concentrant au mieux ses éléments de valorisation. L'hypothèse retenue ici est que le coût de transport pour l'entreprise est réduit pour transporter la même quantité d'énergie alimentaire. D'autres coûts pourraient être pris en compte lors de travaux futurs. Ils sont cependant difficiles à chiffrer et ne sont donc pas considérés dans cette étude. Par exemple, la plus grande facilité de manutention, la réduction des pertes due à l'acquisition d'une longue durée de conservation et la réduction marquée de l'espace d'entreposage nécessaire. Finalement, la troisième étape consiste à calculer un coût cible de granulation. Ce coût est en fait un maximum à ne pas dépasser pour anticiper une faisabilité de la technologie. Évidemment, certains éléments d'incertitude gravitent autour du calcul d'un coût cible. Pour cette raison, une analyse de sensibilité est présentée à la dernière étape de l'analyse.

3 RÉSULTATS ET ANALYSES

3.1 MISE AU POINT DU PROCÉDÉ DE GRANULATION

Le but de ce projet n'était pas de développer une chaîne optimisée de production industrielle de granules. Il visait cependant à démontrer qu'il est aisé de broyer, séparer, sécher et granuler les pommes de terre (Pdt) déclassées. Le procédé qui a été utilisé, similaire à ceux développés dans le cadres de projets antérieurs à l'IRDA (Landry et coll. 2014; Martin et coll. 2014), a cependant pu être amélioré et a permis à l'aide d'appareils simples et d'utilisation peu coûteuse, d'obtenir des informations très utiles pour le développement futur d'une chaîne de production commerciale, en plus de démontrer la qualité des granules pouvant être produits.

L'étape du broyage a démontré que le produit est très facile à réduire en bouillie, sans ajout d'eau. Un simple broyage de 20 secondes à basse vitesse, suivi de 20 secondes à haute vitesse, permettait d'obtenir la qualité ciblée, soit des particules de taille régulière, ni trop fines ni trop grossières, permettant de maximiser la capture de la matière solide lors de l'étape de séparation. Ensuite, un maximum de 125 L de broyat pouvait être mis dans le presseur (capacité de 180L) sinon des débordements pouvaient survenir. Pour obtenir les 125 L, six broyages de Pdt étaient nécessaires (moyenne de 21 kg Pdt/broyage – MVA de 0,98 kg/L). Le suivi de l'évolution du taux de MS (%) dans le presseur a par la suite montré que l'application d'une pression de 2 bars pendant 24 heures permettait d'atteindre le taux de MS possible maximal avec cet équipement, soit ~50 % (Figure 10).

Comme cette siccité n'est pas optimale pour la granulation, un séchage d'appoint était nécessaire. Pour favoriser le séchage, la FS pressée était remise dans le broyeur, à basse vitesse pendant 20 secondes, afin de détruire les gros agrégats. De premiers essais de granulation à l'atelier Tenons-Nous ont en effet confirmé qu'un taux de MS entre 85-90 % était requis pour éviter des pertes disproportionnées. En dessous de cet intervalle, les risques de colmatage de la matrice étaient fréquents, alors qu'au-dessus, une partie importante de la matière était perdue sous forme de poussières. Au départ du projet, le suivi de l'évolution du séchage dans l'étuve a montré qu'un séchage de 16-20 heures à 65°C permettait d'atteindre la siccité souhaitée pour la granulation (Figure 11). Compte tenu de l'équipement disponible, il a cependant été fréquent de ne pas atteindre l'intervalle de MS souhaité, que ce soit à cause de la difficulté de sécher jusqu'au cœur des agrégats ou à cause de l'emplacement des assiettes d'aluminium dans les zones de séchage sous-optimal de l'étuve. Au fil des campagnes, avec l'expérience et l'adaptation du matériel, une amélioration importante du taux de conversion bouillie-granules a toutefois été atteinte. Ainsi, le Tableau 10 présente l'évolution du bilan de masse pour chacune des six campagnes de granulation officielles, mais ce sont les bilans des deux dernières campagnes qui sont à considérer. Les taux de conversion de la fraction solide séchée (FSs) en granules ont été optimaux lorsque la siccité de la FSs était précisément de 87-88 %. Ainsi, pour toutes les campagnes de productions de granules suivant les deux dernières campagnes officielles, une balance à humidité (Metler Toledo HB43-Halogen) a été utilisée pour détecter précisément lorsque la FSs atteignait 87-88 % MS.

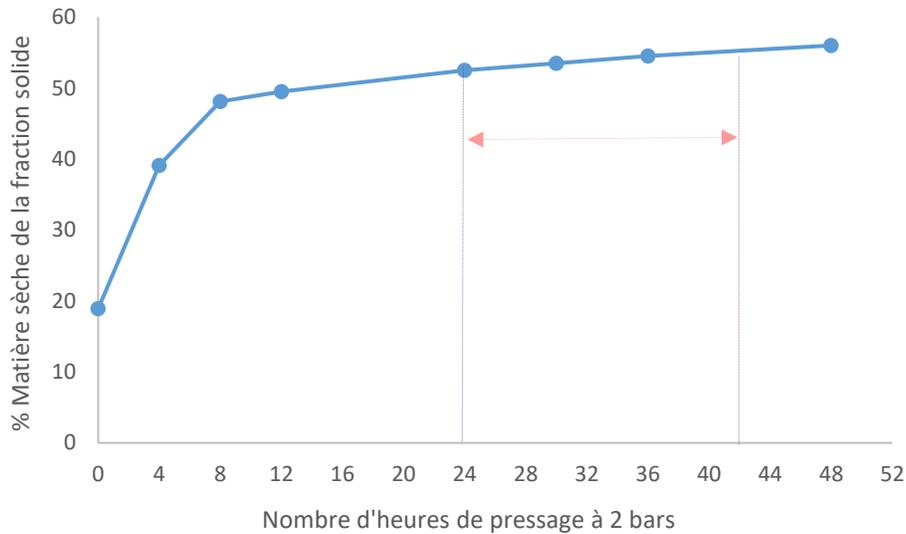


Figure 10. Évolution du taux de matière sèche de la fraction solide de Pdt déclassées pendant le pressage.

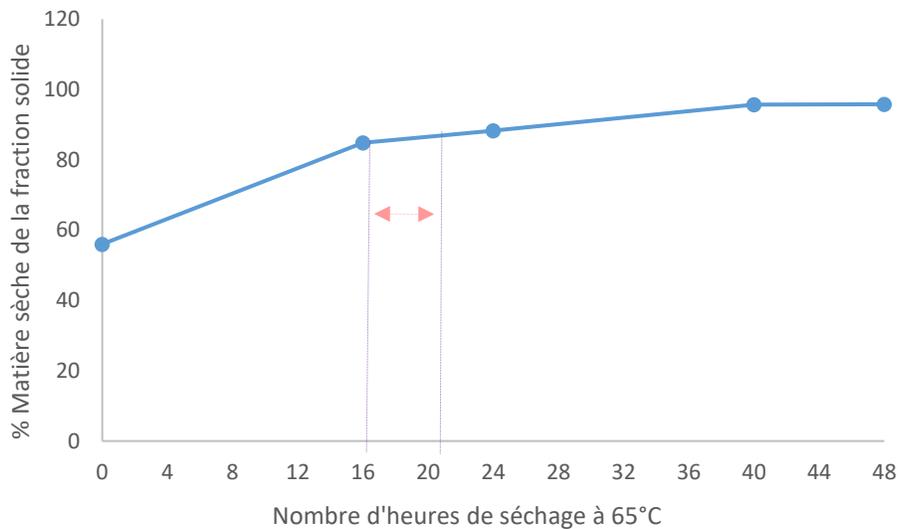


Figure 11. Évolution du taux de matière sèche de la fraction solide de Pdt déclassées pendant le séchage.

Globalement, la majorité de la production de granules aura été réalisée suivant les six campagnes officielles, i.e. avec l'efficacité atteinte lors des deux dernières campagnes. Au final, 32 campagnes de broyage, ayant utilisé 5826 kg de Pdt fraîches, auront été effectuées pour une production totale de 806 kg de granules. Bien que les analyses détaillées aient été réalisées sur les campagnes officielles, la mesure des bilans massiques complets a tout de même été maintenue pour 27 des 32 campagnes de production de granules. La moyenne de ces bilans permettent de conclure que 3 729 kg de Pdt fraîches permettent de produire 565 kg de granules. Autrement dit, une tonne de Pdt fraîches à 20% de siccité produisent en moyenne 152 kg de granules à 90 % de MS. Ceci

correspond à un taux de conversion Pdt à granules de 15 %. À titre indicatif, la production de 565 kg de granules aura également généré 2 240 kg (i.e. 2 240 L) de liquide, ce qui n'est pas négligeable en termes de gestion.

Tableau 10. Bilan massique du procédé pour les 6 campagnes de granulation « officielles ».

Dates	Pdt ¹		Bouillie (Br)			Fraction Solide (FS)			FL			FS sèche (FSs)			Granules (GR)			Taux de conversion		
	MF ²	MF	MS ³	MF	MS	MF	MS	MF	MF	MS	MF	MF	MS	MF	MS	Pdt à Br	Br à FL	FSs à GR	Pdt à GR	
	Kg	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	Kg	Kg	%	Kg	Kg	%	Kg	%	%	%	%	
14 juill. 14	275	244	20	50	78	52	40	166	49	81	40	13	88	12	89	68	27	5		
4 août 14	273	245	20	50	86	52	45	159	49	88	43	27	92	25	90	65	55	10		
18 août 14	291	254	20	50	89	52	47	165	51	88	45	31	92	29	87	65	62	11		
1 déc. 14	194	179	21	37	57	51	29	122	35	81	28	19	88	16	92	68	53	10		
23 mar. 15	148	137	24	32	49	49	24	88	27	88	23	25	90	22	93	64	93	17		
20 mai 15	143	132	21	28	46	50	23	86	24	87	21	23	89	21	93	65	96	16		
Moyenne⁴	146	135	23	30	48	50	24	87	26	88	22	24	90	22	93	65	95	17		

¹ Pdt :

² MF : Masse fraîche

³ MS : Matière sèche

⁴ Moyenne des deux dernières campagnes.

3.2 POTENTIEL AGRONOMIQUE DES GRANULES

3.2.1 Caractérisation physico-chimique des diverses fractions et des granules

La caractérisation sur base sèche des éléments des diverses fractions montre que la majorité des éléments tendent à demeurer dans la FL, exception faite de la matière carbonée qui se retrouve principalement dans la FS (Tableau 11). Ainsi, considérant que pour 100 kg (b.s.) de bouillie, 85 kg se retrouvera dans la FS et 15 kg dans la FL, il ressort que 29 %, 36 % et 26 % du N, P et le K totaux, respectivement, sont demeurés dans la FS, le restant étant dans la FL. L'aluminium se retrouve également dans la FS à un taux anormalement élevé. Toutefois, cela est dû à une contamination, probablement par la cuve du pressoir, puisque la bouillie ne contient que des traces de cet élément. Il serait donc important de cibler et contrôler ce point de contamination dans le futur.

Deux faits importants s'imposent donc dès cette étape en ce qui a trait à la voie fertilisante de valorisation. Premièrement, il apparaît clairement que la FL issue du pressage est riche en nutriments. Puisque le projet portait sur la valorisation de la FS, les diverses voies de valorisation du liquide n'ont pas été explorées. Toutefois, ces résultats démontrent qu'il sera très pertinent de s'y pencher. Deuxièmement, la voie de valorisation sous forme d'engrais organique granulé gagnerait beaucoup suivant la conception d'un procédé limitant la perte de nutriments vers la FL, surtout du N à 62% soluble, pour enrichir davantage les granules. Ceci éviterait aussi de générer une FL qui pourrait nécessiter des installations d'entreposage et une gestion additionnelle dû à sa charge en nutriments.

Tableau 11. Contenus et répartition dans les fractions liquide et solide après pressage des éléments sur base sèche de 100 kg (b.s) de bouillie pressée, de l'élément le moins au plus transféré dans la fraction solide.

Éléments ¹	Bouillie (Br)	Fraction liquide (FL)	Fraction solide (FS)	FS/Br	FL/Br
	kg/100 kg de MS	kg/15 kg de MS	kg/85 kg de MS		
B total	2,14	0,73	0,00	0%	34%
N-NO ₃	0,01	0,01	0,00	3%	64%
Mg soluble	0,08	0,09	0,00	6%	112%
P soluble	0,14	0,12	0,02	13%	88%
N soluble	1,01	1,13	0,16	16%	111%
C Organique soluble	5,79	6,31	1,11	19%	109%
K soluble	1,94	1,68	0,43	22%	87%
Mg total	0,12	0,09	0,03	26%	74%
K total	2,21	1,60	0,58	26%	73%
N organique	1,55	1,07	0,44	28%	69%
N total Kejdhal	1,67	1,17	0,48	29%	70%
Zn total	2,60	1,87	0,83	32%	72%
Na soluble	0,00	0,00	0,00	34%	96%
N-NH ₄	0,12	0,10	0,04	36%	85%
P total	0,22	0,13	0,08	36%	57%
Mn total	0,00	0,00	0,00	43%	48%
Ca total	0,04	0,02	0,02	50%	48%
Cu total	0,00	0,00	0,00	51%	32%
Cendres	0,64	0,41	0,36	57%	65%
Na total	0,00	0,00	0,00	68%	64%
Fe total	0,04	0,01	0,03	72%	21%
Ca soluble	0,01	0,01	0,00	74%	168%
M.O.	93,8	9,54	82,7	88%	10%
C Organique	46,9	4,77	41,4	88%	10%
C inorganique soluble	0,01	0,05	0,09	614%	363%
Al total ²	0,07	0,01	49,2	74042%	18%

¹Moyenne des valeurs des 6 campagnes officielles. ² Contamination par les appareils.

Quoiqu'il en soit, sur base humide tels qu'employés (Tableau 12), étant donné le retrait de l'eau, les granules présentent quand même des concentrations beaucoup plus intéressantes que la bouillie fraîche pour la presque totalité des éléments fertilisants et du C. Ainsi, leur taux de MS passe de 21 % à 90 %. Du coup, leurs contenus en N, P et K augmentent, respectivement, de 1,6, 2,2 et 1,4 fois. Le Ca et le Mg sont aussi augmentés de 2,9 et 1,4 fois, respectivement. L'épandage d'une tonne de granules à 90% de MS apporte donc 437 kg de Corg et 5,5, 1,0 et 6,4 kg de N, P et K totaux, respectivement. Point important, il ne s'agit pas de quantités efficaces de ces éléments mais de quantités totales. Un coefficient d'efficacité doit donc être appliqué pour calculer le N, P et K disponibles apportés à la culture (voir section 3.2.3).

Tableau 12. Propriétés physico-chimiques de la bouillie, des différentes fractions et des granules sur base fraîche tels qu'ils seraient employés au champ en cas d'épandage.

Éléments ¹	Unité (b.h.)	Bouillie fraîche	Fraction liquide	Fraction solide	Fraction solide séchée	Granules
M.S.	%	21,1	4,93	52,5	85,3	89,7
pH		5,10	5,39	5,03	4,94	5,02
M.O.	kg/t	197	31,3	511	831	874
C Organique	kg/t	99	15,7	255	415	437
C Organique soluble	kg/t	12,2	20,7	6,88	15,1	69,9
C inorganique soluble	kg/t	0,03	0,17	0,54	0,01	0,003
Cendres	%	1,35	1,36	2,25	2,31	1,79
N total Kejdhal	kg/t	3,51	3,85	2,98	5,11	5,45
N soluble	kg/t	2,13	3,70	0,98	2,40	2,32
N organique	kg/t	3,26	3,52	2,71	4,66	4,99
N-NH ₄	kg/t	0,25	0,33	0,26	0,45	0,46
N-NO ₃	kg/t	0,02	0,02	0,002	0,002	0,006
P total	kg/t.	0,47	0,42	0,50	0,96	1,01
P soluble	kg/t ou mg/L	0,29	0,40	0,11	0,28	0,35
K total	kg/t	4,65	5,27	3,55	6,16	6,44
K soluble	kg/t ou mg/L	4,08	5,53	2,63	4,41	4,16
Ca total	kg/t	0,074	0,055	0,11	0,19	0,21
Ca soluble	kg/t ou mg/L	0,013	0,034	0,028	0,009	0,013
Mg total	kg/t	0,25	0,29	0,19	0,33	0,36
Mg soluble	kg/t ou mg/L	0,16	0,28	0,03	0,06	0,08
Na total	kg/t	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
Na soluble	kg/t ou mg/L	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004
Al total ²	kg/t	0,14	0,04	304	464	491
B total	kg/t	4,51	2,40	0,01	0,01	0,01
Cu total	kg/t	0,002	0,001	0,003	0,004	0,005
Fe total	kg/t	0,09	0,03	0,19	0,30	0,33
Mn total	kg/t	0,004	0,003	0,005	0,01	0,01
Zn total	kg/t	5,47	6,15	5,11	8,56	10,7

¹Moyenne des valeurs des 6 campagnes officielles. ² Contamination par les appareils.

Dans une optique de développement durable, il demeure aussi essentiel d'être sensibilisé au devenir des éléments traces métalliques (ETMs) dans les sols agricoles puisqu'un enrichissement excédant la capacité de rétention du milieu récepteur pourrait provoquer de la phytotoxicité pour les cultures et hausser les risques de pollution diffuse dans l'environnement. Certains ETMs, utiles au bon développement des cultures (ex. cuivre (Cu), zinc (Zn) ou bore (B)) sont également intéressants du point de vue de la nutrition. À ce niveau, les contenus en ETMs des granules sont comparés au [Tableau 13](#) à ceux d'autres amendements et engrais organiques (AEO) sur le marché. Les granules de Pdt y présentent globalement les plus faibles valeurs en ETMs, toutes très en-dessous des critères de valorisation C1 et C2 du MDDELCC ([Tableau 14](#)). Les composts, entre autres, présentent des valeurs jusqu'à des centaines de fois plus élevées. Sur la base du respect préconisé, mais non réglementé, du non dépassement d'apport de 1 kg et 3 kg /ha/an de Cu et de Zn, respectivement, les teneurs en ETMs des granules laisseraient une

grande flexibilité d'utilisation. En effet, il faudrait épandre 200 tonnes/ha (b.h.) de granules pour atteindre l'apport limite de 1 kg/ha/an de Cu. Comme cette quantité fournirait 1 000 kg/ha de N_{tot}, il est facile de constater qu'elle est très loin des quantités qui seraient recommandées en fonction des besoins en N des cultures. Seul le contenu en aluminium (Al) est plus élevé. Toutefois, il s'agit d'une contamination provenant très fortement de la cuve du pressoir et qui n'est donc pas propre aux produits.

Tableau 13. Composition (b.s.) en ÉTM des fractions solides des résidus et de divers AEO du Québec.

AEO ¹	MS ²	Al	Cu	Fe	Mn	Zn
	---- % ----	-----	-----	mg kg ⁻¹	-----	-----
Boues de stations mécanisées ³	-	-	402	-	-	398
Boues d'étangs ³	-	-	680	-	-	689
Boues de fosses septiques ³	-	-	246	-	-	418
Boues mixtes de papetières ⁴	32	-	49	2547	247	81
Boues mixtes de papetières ⁵	29	-	23	2897	87	79
Boues mixtes de papetières ⁶	60	-	8	371	471	557
Boues mixtes de papetières ⁷	40	2200	46	1800	68	154
Boues mixtes de papetières ⁷	41	5700	53	1100	44	140
Boues de désencrage ⁶	53	-	103	252	133	108
Boues mixtes de papetières ⁸	40	-	114	1228	186	79
Fumier de bovins laitiers ⁹	20	-	55	1855	238	209
Fumier de bovins de boucherie ⁹	24	-	50	1891	226	129
Fumier de bovins ³	-	-	36	-	-	156
Fumier de moutons ⁹	30	-	27	4371	353	148
Fumier de volailles ⁹	52	-	125	1681	528	468
Fumier de volailles ³	-	-	192	-	-	399
Lisier de porcs ⁹	3,5	-	400	2000	1429	1571
Lisier de porcs en croissance ³	-	-	839	-	-	1475
Lisier de porcs – croissance ¹⁰	3,5	607	751	1908	491	1301
Lisier de porcs – maternité ¹⁰	2,6	766	307	2261	498	1916
Lisier de porcs – pouponnière ¹⁰	2,3	1293	1595	3707	690	12 759
Compost de résidus ménagers ¹¹	62	-	256	11962	243	634
Compost de résidus ménagers ¹¹	65	-	108	5343	334	325
Compost de résidus ménagers ¹¹	62	-	201	6880	469	575
Granules de pommes de terre déclassées	90	548	0,006	0,37	0,01	12

¹ AEO : Amendements et engrais organiques

² Masse sèche sur base humide.

³ Adapté de Perron et Hébert (2007b).

⁴ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2001). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

⁵ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003b). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

⁶ Adapté de Simard et coll. (1998)

⁷ Adapté de Arfaoui et coll. (2001).

⁸ Adapté de N'Dayegamiye (2006). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁹ Adapté de Tran et coll. (1996).

¹⁰ Adapté de Seydoux et coll. (2005). Pour les porcs en croissance, la valeur représente la moyenne des valeurs C-2.

¹¹ N'Dayegamiye et coll. (2005).

Tableau 14. Teneurs limites (b.s.) en ÉTMs des matières résiduelles fertilisantes (MRF)¹.

Contaminants	Unités	Teneurs limites	
		Catégorie C1 ⁽¹⁾	Catégorie C2 ^(1,2)
Éléments considérés essentiels ou bénéfiques aux plantes ou aux animaux (base sèche)			
Arsenic	mg/kg.	13	41
Cobalt	mg/kg.	34	150
Chrome	mg/kg.	210	1000
Cuivre	mg/kg.	400	1000 ⁽³⁾
Molybdène	mg/kg.	5	20
Nickel	mg/kg.	62	180
Sélénium	mg/kg.	2.0	14 ⁽³⁾
Zinc	mg/kg.	700	1850
Contaminants stricts			
Cadmium	mg/kg.	3.0	10
Mercuré	mg/kg.	0.8	4
Plomb	mg/kg.	150	300
Dioxines et furannes	ng EQT/kg ⁽⁴⁾	17	50 ⁽⁵⁾

⁽¹⁾Pour être considérés de catégorie C1, tous les paramètres doivent respecter les critères C1. Pour être considérés de catégorie C2, tous les paramètres doivent respecter les critères C2 et au moins un paramètre doit excéder le critère C1. Si on n'exige pas d'analyse pour un contaminant chimique selon le tableau 6.1, la teneur est réputée être inférieure à la limite C1. La classification se base généralement sur la valeur moyenne des analyses réalisées au cours des 12 derniers mois.

⁽²⁾La limite de charge des résidus C2 est de 22t (b.s.)/ha/5ans, sauf exception. Certains résidus hors catégorie peuvent être épandus. Les ACM hors catégorie peuvent notamment être épandus s'ils respectent les critères de la norme NQ 0419-090. Ces teneurs limites sont pondérées par le pouvoir neutralisant (PN). Plus le PN est élevé, moins la dose agronomique d'ACM sera élevée.

⁽³⁾La teneur limite est portée à 1500mg Cu/kg et à 25 mg Se/kg pour les résidus avec >2.5% P2O5 b.s. et pour tous les biosolides municipaux. Une teneur élevée en P réduira la charge de MRF apposée au sol.

⁽⁴⁾Équivalents toxiques internationaux (ETI) de l'OMS. Les analyses ne sont pas requises dans plusieurs cas.

⁽⁵⁾Une MRF contenant entre 51 et 100 ng EQT/kg de dioxines et de furannes peut faire l'objet d'un recyclage non agricole.

¹ Adapté de Hébert (2008).

Comme les Pdt sont déclassées à la récolte, ainsi que tout au long de l'année pendant l'entreposage chez le producteur, un autre volet exploré lors de la caractérisation des fractions produites a été la variation de la composition en éléments des granules selon la durée d'entreposage et les variétés de Pdt granulées. Le suivi à 1, 5, 7 et 10 mois d'entreposage ([Tableau 15](#)), au cours desquels des tubercules de cinq cultivars différents ont été reçus ([Tableau 15](#)), démontre que ces aspects ont peu d'impact sur la majorité des nutriments des granules, la plupart étant demeurés stable dans le temps. Seul le rapport C/N, très important en agronomie, diminue après le premier mois. Toutefois, cette variation, est due à une valeur plus élevée en N_{tot} dans les granules produits après 1 mois, les contenus en C restant similaires. La variation du C/N dépend donc plutôt de la variété déclassée à ce moment qu'à l'entreposage lui-même puisqu'avec le temps, il n'est pas connu que le N_{total} augmente dans les produits entreposés. D'ailleurs, les granules à un mois ont été faits à partir du cultivar *Envol*, lequel ne se retrouve pas par la suite dans les autres granules caractérisés.

Tableau 15. Propriétés physico-chimiques (b.h.) des granules selon le temps d'entreposage des Pdt déclassées dans l'entrepôt du producteur.

Éléments	Unités (b.h.)	Temps entreposage (mois) ¹			
		1	5	7	10
M.S.	%	87,50	89,87	89,30	90,58
pH		5,2	5,2	5,1	4,9
M.O.	kg/t	852,25	883,99	870,68	879,51
C _{total}	kg/t	406,30	401,00	389,33	397,33
C Organique soluble	kg/t	69,18	65,52	56,47	76,09
C/N		96,93	70,50	67,00	70,07
Cendres	%	2,22	1,46	2,24	2,65
N _{total}	kg/t	4,00	5,69	5,81	5,71
N _{total} Kejdhal	kg/t	4,22	5,95	5,53	5,66
N-NH ₄	kg/t	0,11	0,27	0,33	0,67
N-NO ₃	kg/t	0,006	0,007	0,006	0,005
N _{organique}	kg/t	4,11	5,68	5,20	4,98
P _{total}	kg/t	1,04	0,97	0,93	1,04
P _{soluble}	kg/t	0,29	0,32	0,28	0,41
K _{total}	kg/t	6,13	6,41	6,62	6,50
K _{soluble}	kg/t	2,87	3,83	3,44	4,95

¹ Les cultivars utilisés étaient à 1mois l'Envol, à 5 mois la Péribonka, à 7 mois la Calwithe et à 10 mois un mélange de Péribonka et Krantz.

Enfin, certains ratios d'éléments sont de bons indicateurs de disponibilité des nutriments et aide à interpréter la caractérisation physico-chimique des AEOs. Tout d'abord, le ratio C/N des granules est considéré élevé (Tableau 16; CRAAQ 2010a). Avec un C/N entre 60 et 100, ils devraient être immobilisants, avec une disponibilité prédite de N de très faible à négative (Tableau 16; CRAAQ 2003). Ceci, d'autant plus que 92% du N est sous forme organique et devra donc être minéralisé pour devenir disponible à la culture. Toutefois, le rapport C/N est basé sur les contenus totaux en C et N et ne tient pas compte de leur nature biochimique, et donc de leur résistance à la minéralisation. Ainsi, l'indice de stabilité biologique (ISB), qui tient compte de chacun des pools de C d'un AEO selon son taux de résistance à la minéralisation (Linères et Djakovitch 1993; Robin 1997) indique qu'avec leur valeur très basse de 11,5 (Tableau 17), le C des granules se minéralisera facilement et rapidement. Selon Linères (2002), cet ISB se positionne donc dans la même catégorie que les déjections de volailles (8 à 15%), très loin de celui des écorces et de la tourbe (entre 50 et 100). Toutefois, un dernier paramètre, qui n'est dosé ni par le C/N, ni par l'ISB, est à considérer. En effet, le ratio N soluble/N_{tot} indique que seulement 42 % du N_{tot} des granules est sous forme soluble, donc directement disponible (N inorganique soluble) ou facilement minéralisable (N organique soluble), puisque le N soluble a eu tendance à s'écouler dans la FL. La majeure partie du N_{tot} (~ 60%) des granules est donc plus résistante à la dégradation. Au global, l'apport des granules au champ devrait occasionner une immobilisation du N (C/N élevé), mais celle-ci devrait être transitoire étant donné la labilité du C (faible ISB), mais comme leur contenu en N soluble est faible les granules devraient se comporter davantage comme un bon activateur microbien que comme source de fertilisant azoté.

En ce qui a trait au P, il y en a peu. Les granules ne sont donc pas une bonne source de P. Toutefois, cela peut être plutôt intéressant, considérant la richesse en P des sols rencontrée en plusieurs endroits du Québec et la richesse en P de plusieurs autres AEOs offerts sur le marché (Tableau 18). Avec leur ratio N/P élevé de 5, les besoins en N des cultures pourraient être comblés sans être limités par l'apport de P. Enfin, le K devrait être plutôt disponible mais présente l'inconvénient d'un très fort ratio K/(Ca+Mg), comparativement à d'autres AEO (Tableau 18). Une attention particulière devra donc être apportée à la fertilisation en K, Ca et Mg puisque l'absorption du K et du Ca et Mg sont antagonistes. De fortes déficiences en Ca ont d'ailleurs été observées lors des essais préliminaires en serre (section 3.2.2).

Tableau 16. Relation entre le rapport C/N des résidus organiques et la mise en disponibilité par minéralisation de l'azote.

C/N	Niveau de minéralisation	Disponibilité de l'azote
< 10	Forte minéralisation	Élevée à très élevée
10-20	Bonne minéralisation	Bonne à élevée
20-60	Faible minéralisation	Faible à très faible
60-100	Faible immobilisation	Très faible à négative
> 100	Forte immobilisation	Négative

Adapté de CRAAQ (2003).

Tableau 17. Ratios d'indicateurs de disponibilité et indice de stabilité biologique (ISB) des divers produits de Pdt déclassées.

Ratios	Unité	Bouillie fraîche	Fraction liquide	Fraction solide	Fraction solide séchée	Granules
C/N		28,18	.	71,55	74,2	74,1
N-NO ₃ + N-NH ₄ / N total		0,08	0,09	0,09	0,09	0,08
N organique (No) / N total	%	92,5	90,9	91,4	91,2	91,7
N soluble / N total	%	60,3	95,8	32,8	46,9	42,6
P soluble aqueux / P total		0,55	0,77	0,24	0,29	0,30
P soluble / P total		0,62	0,95	0,21	0,29	0,35
N total / P total		8	9	6	5	5
K soluble / K total		0,9	1,0	0,7	0,7	0,6
Ca soluble / Ca total		0,18	0,62	0,26	0,05	0,06
Mg soluble / Mg total		0,65	0,97	0,17	0,19	0,22
K / (Ca + Mg)		14,2	15,4	11,7	11,8	11,3
ISB	%	12,0	.	12,2	11,3	11,5
Soluble	%	95,3	.	94,5	93,8	96,0
Hemicellulose	%	1,86	.	2,13	2,84	1,21
Cellulose	%	1,55	.	2,12	2,32	2,18
Cell. Brute	%	1,95	.	2,28	2,52	1,99
Lignine	%	1,28	.	1,21	1,06	0,59
C org. soluble/C total		0,12	1,34	0,03	0,04	0,16

Tableau 18. Comparaison de certaines propriétés agronomiques (b.s.) des granules de Pdt déclassées avec celles de divers AEO du Québec.

Produits organiques	MS ¹	MO	C _{total}	N _{tot}	P _{tot}	K	Ca	Mg	C/N	$\frac{N-NH_4}{N_{tot}}$	$\frac{N}{P}$	$\frac{K}{(Ca+Mg)}$
	----- % -----									N _{tot} (%)		(Ca+Mg)
----- kg T ⁻¹ -----												
Boues mixtes de papetières ²	29	78	391	27	4	1,4	28	0,8	14	4	7	0,05
Boues mixtes de papetières ³	40	78	389	18	5	1,7	26	1	22	9	7	0,06
Boues mixtes de papetières ⁴	33	82	410	29	5	1,5	23	12	14	-	6	0,04
Boues mixtes de papetières ⁵	19	90	450	45	3	1,4	-	-	10	-	15	-
Boues primaires de papetières ⁶	44	65	325	1,5	0,3	0,5	53	1	217	-	4	0,01
Boues secondaires de papetières ⁷	2	74	370	55	6	5,4	9	2	7	-	9	0,50
Boues de stations mécanisées ⁸	21	66	330	44	17	2,5	15	4	9	9	3	0,13
Boues d'étangs ⁸	5,0	42	210	22	20	1,7	27	6	10	13	1	0,05
Lisier de porcs – croissance ⁹	3,5	72	359	100	23	50	24	12	4	56	4	1,39
Lisier de porcs – maternité ⁹	2,6	73	363	110	33	47	45	14	3	64	3	0,81
Lisier de porcs – pouponnière ⁹	2,3	60	302	112	30	76	34	14	3	54	4	1,60
Fumier de veaux ⁵	39	80	399	37	8	20	-	-	29	5	5	-
Fumier de bovins ⁴	18	82	410	26	8	17	11	5	16	-	3	0,27
Fumier de bovins de boucherie ¹⁰	29	77	387	20	7	11	-	-	19	16	3	-
Fumier de bovins laitiers ¹⁰	16	87	435	32	5	21	-	-	14	31	6	-
Fumier composté bovins boucherie ⁵	38	81	403	59	11	28	-	-	18	12	5	-
Fumier poulettes ¹¹	76	80	398	46	20	24	42	6	9	13	2	0,50
Fumier poules pondeuses ¹¹	83	65	325	33	19	21	84	5	10	10	2	0,24
Composts de fumier ¹²	45	50	250	10	7	7	44	4	25	11	1,4	1,50
Composts de résidus verts ¹²	50	50	250	9	3	5	30	4	28	7	3	0,15
Compost de résidus ménagers ¹³	62	87	436	18	2	6	24	3	24	2	9	0,22
Compost de résidus ménagers ¹³	65	76	380	12	2	6	31	2	32	0,1	6	0,18
Compost de résidus ménagers ¹³	62	74	368	11	3	7	80	3	33	-	4	0,08
Granules de Pdt déclassées	90	97	398	6,1	1,1	7	0,2	0,4	74	0,1	5	11,3

¹ Masse sèche sur base humide.

² Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2003b). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 3).

³ Adapté de N'Dayegamiye (2006). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁴ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2004b).

⁵ Adapté de Giroux et coll. (2007). Valeurs moyennes des teneurs rapportées pour les boues de papetières (n = 2).

⁶ Adapté de Hébert et Beaulieu (2002).

⁷ Adapté de Beauchamp et coll. (1998).

⁸ Adapté de Perron et Hébert (2007a).

⁹ Adapté de Seydoux et coll. (2005). Pour les porcs en croissance, la valeur présentée est la moyenne des valeurs C-2.

¹⁰ Adapté de N'Dayegamiye et coll. (2004a).

¹¹ Adapté de Seydoux et coll. (2007).

¹² Analyses des produits en vrac de GSI Environnement. Composts de résidus verts no. 212002 et compost de fumier no. 201002.

¹³ N'Dayegamiye et coll. (2005)

3.2.2 Rémanence de la gale commune dans les granules

Détection moléculaire de la gale commune dans les produits testés.

Pour réaliser le bioessai, des granules de Pdt ont été produits à partir de Pdt saines et galées. La présence ou l'absence de gale a été validée par détection moléculaire qPCR. Tous les échantillons issus de Pdt galées ont été détectés TxtAB positifs et tous les échantillons issus de Pdt saines étaient négatifs (Tableau 19). L'analyse moléculaire a aussi confirmé que l'ADN des microorganismes responsables de la gale commune est encore détectable, même une fois le processus de granulation terminé.

Tableau 19. Détection par qPCR du gène Txt AB lié à la pathogénicité de *S. scabies* dans les échantillons de pelures, de bouillies ou de granules issus des lots de Pdt galées ou saines.

Type	Lot Pdt galées	Lot Pdt saines
Pelures de pommes de terre	Positif	Négatif
Bouillies de pommes de terre	Positif	Négatif
Granules de pommes de terre	Positif	Négatif

3.2.2.1 Croissance des plants de pommes de terre du bioessai

À partir de la 5^e semaine de croissance, de plus en plus de symptômes, non liées à la gale, ont commencé à apparaître sur les feuilles des plants de Pdt ayant reçu des granules. Les symptômes les plus marqués étaient dans le pot comparatif contenant 3 fois plus de granules que les autres. Dans tous les cas, une chlorose des jeunes feuilles, accompagnée d'un repli des folioles vers le haut, étaient observés (Figure 12), ce qui indique une carence en Ca (Yara 2017), confirmée par les analyses foliaires révélant un déséquilibre au niveau des éléments K, Ca et Mg (Tableau 20). Les plants amendés avec une quantité appropriée de granules, ainsi que ceux fertilisés avec l'engrais minéral, ont présenté des contenus en K comparables, tous à l'intérieur des valeurs cibles. Par contre, les contenus en Ca et Mg des plants avec apports de granules étaient tous sous les valeurs cibles. Dans le pot comparatif ayant reçu 3x la quantité recommandée de granules, le contenu en K devenait aussi sous le seuil de suffisance et le Ca diminuait encore davantage. Par contre, le Mg ne subissait pas de baisse additionnelle. Il semble donc que l'apport de granules nuit principalement à l'absorption du Ca par antagonisme avec le K. Les cations monovalents (K⁺) sont en effet absorbés préférentiellement aux cations divalents (Ca²⁺). L'absorption des cations divalents est donc d'autant plus restreinte que le ratio K/(Ca+Mg) est élevé. Les granules, avec un ratio K/(Ca+Mg) très déséquilibré de 11, ont donc déséquilibré les ratios dans les plants amendés avec granules (valeurs de 5 à 9,8) et engendré des carences en Ca.

Afin de contrer cet effet antagoniste et assurer la continuité du bioessai, des applications foliaires et au sol de Ca ont donc été effectuées pour tous les plants. Ainsi, le 18 mars, du Calstik (13 % Ca) a été appliqué en pulvérisation foliaire au taux de 3 L/ha et le 21 mars, la solution d'une demi-dose (1,5 L/ha) a été appliquée directement au sol. Enfin, une dernière application en pulvérisation foliaire (3 L/ha) a eu lieu le 24 mars, mais seulement pour les

plants ayant été amendés avec des granules. Ces interventions ont permis une résorption de tous les symptômes (Figure 11) comme on peut le voir sur les plants au 7 avril 2016, qui avaient alors des feuilles pleinement déployées.

Tableau 20. Contenus en éléments des feuilles des plants de Pdt fertilisés avec l'engrais minéral ou les granules et valeurs cibles de suffisance, bioessai en serre, le 10 mars 2016.

Traitements	N _{tot}	P	K	Ca	Mg	K/(Ca+Mg)
	----- (%) -----					
Témoin NPK	7,0	0,7	4,7	1,2	0,4	3,0
Granules	3,7	0,5	5,0	0,8	0,2	5,0
Granules (x3)¹	4,4	0,7	4,1	0,2	0,2	9,8
Cible²	5 à 6	0,3 à 0,5	4,5 à 6,0	1,0 à 1,7	0,3 à 0,5	

¹ Pot comparatif avec 3 fois la dose recommandée de granules.

² Valeurs cibles de suffisance pour la Pdt (GREF 2010).



Figure 12. Symptômes de carence des plants de Pdt amendés avec des granules (gauche) le 21 mars 2016 et apparence saine des plants le 7 avril 2016 (droite) à la suite des applications de Ca, bioessai en serre.

3.2.2.2 Transmission de la gale par les granules

Les tubercules qui se sont développés dans le substrat amendé avec des granules de Pdt hautement infectées par la gale ont présenté très peu de symptômes de gale commune, à l'image du témoin amendé avec des granules saines et de celui sans granule. Les traitements qui sont ressortis significativement différents par rapport à l'ensemble des autres traitements sont ceux où l'inoculum actif de la gale avait été ajouté au substrat (Figure 13). Ce résultat était attendu puisqu'il était primordial de s'assurer que le substrat utilisé n'était pas inhibiteur de gale. Ainsi, bien que les granules issus de Pdt galées soient ressortis positifs à la gale (section 3.2.2), la maladie ne s'est pas exprimée pendant le bioessai. Il y a donc de fortes chances que le processus de granulation permette de

détruire la viabilité de l'agent causal de la gale puisqu'aucun tubercule n'a été affecté de façon significativement différente du témoin.

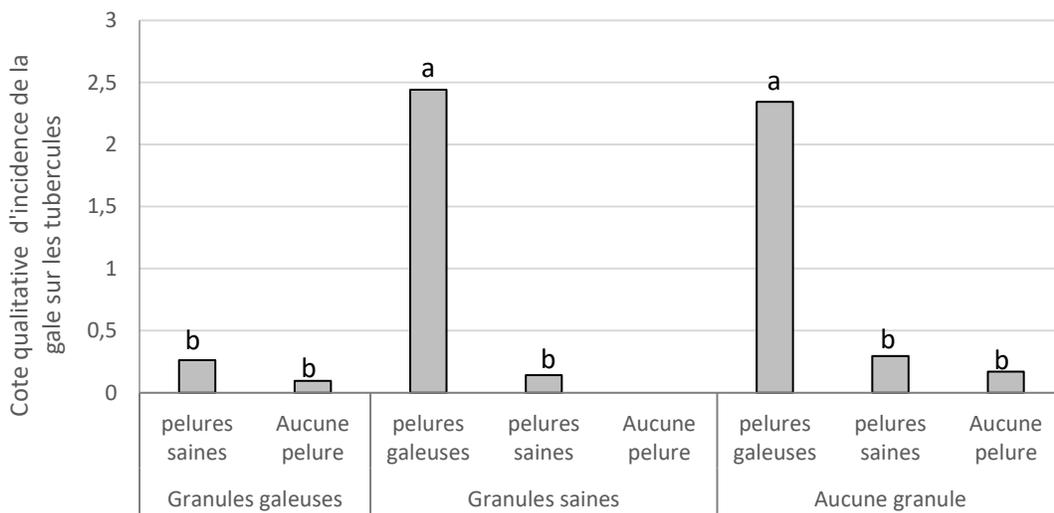


Figure 13. Évaluation de l'incidence des symptômes visuels de la gale commune sur les tubercules récoltés lors du bioessai en serre (Trt : $P = 0,003$). Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

3.2.3 Valorisation des granules en champs

Efficacité de l'azote des granules

Les analyses de sol, réalisées deux semaines après les semis (7 juin) (4 semaines après l'application des granules), révèlent que l'apport de granules a entraîné une immobilisation du N, comme le démontre le pouvoir de minéralisation négatif mesuré tant dans l'essai N que l'essai K (Figure 14 et Figure 15), comparativement au témoin fertilisé avec l'engrais minéral NPK. L'effet était plus marqué dans l'essai N, probablement parce qu'aucun engrais N minéral n'a été ajouté dans les parcelles avec granules de ce dispositif et également parce que la quantité de granules apportée (20 T/ha) était près de deux fois celle apportée (13 T/ha) dans le dispositif sur le K. L'immobilisation se voit quand même dans l'essai K, où 100% du N a été apporté sous forme d'engrais minéral. Il est à noter également que le dégagement en NO_3 du sol de l'essai K pour le témoin NPK est inférieur dans l'essai K en comparaison de l'essai N (Figure 14 et Figure 15), ce qui peut s'expliquer par le contenu en MO du sol de l'essai N qui était de près de deux fois celui du sol de l'essai K (Tableau 6).

Le fait qu'il y eu immobilisation du NO_3 du sol même en présence de la dose recommandée d'engrais minéral N indique que l'impact immobilisant des granules est important. D'autant plus que l'immobilisation perdure encore à cette date, malgré le fait que les granules sont au champ depuis 4 semaines, dont 2 semaines avant semis, et que le sol ait été travaillé 4 fois afin de stimuler leur minéralisation et ainsi tenter de contrer l'immobilisation du N constatée lors du bioessai et pressentie selon leur caractérisation biochimique (C/N élevé, N_{tot} soluble faible).

Une étude sur le moment d'épandage le plus pertinent serait donc à conduire si l'application au champ des granules était envisagée. Par exemple, en appliquant les granules en automne, la phase immobilisante pourrait être terminée faisant en sorte que lorsque la culture entame sa croissance, le cycle soit plutôt rendu au relâchement de N, ou à tout le moins à un effet azoté neutre, mais un effet carboné positif sur l'activité biologique. D'ailleurs, tel que suggéré sur la base de l'ISB, l'effet immobilisant semble transitoire puisqu'à partir du stade cible de l'avoine, la nouvelle évaluation du pouvoir de minéralisation du sol montre des valeurs positives de libération de NO_3^- (Figure 16 et Figure 17). Dans l'essai N, les traitements ne présentent aucune différence significative ($P = 0,3089$) de libération du N-NO_3^- . Dans l'essai K, l'effet des traitements est significatif ($P = 0,0432$), mais seule la plus forte dose de granules génère statistiquement moins de N-NO_3^- que le témoin NPK minéral.

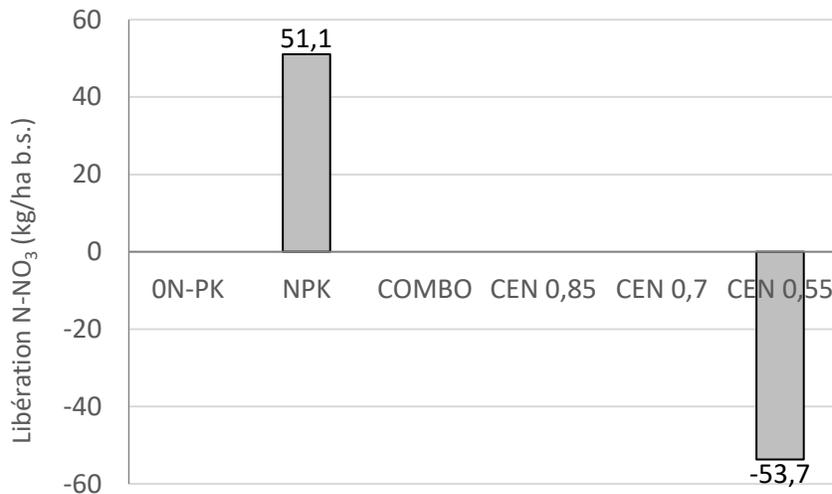


Figure 14. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO_3^- du témoin engrais minéral (NPK) et du traitement ayant reçu la plus forte dose de granules, deux semaines après les semis, 7 juin 2016, essai N.

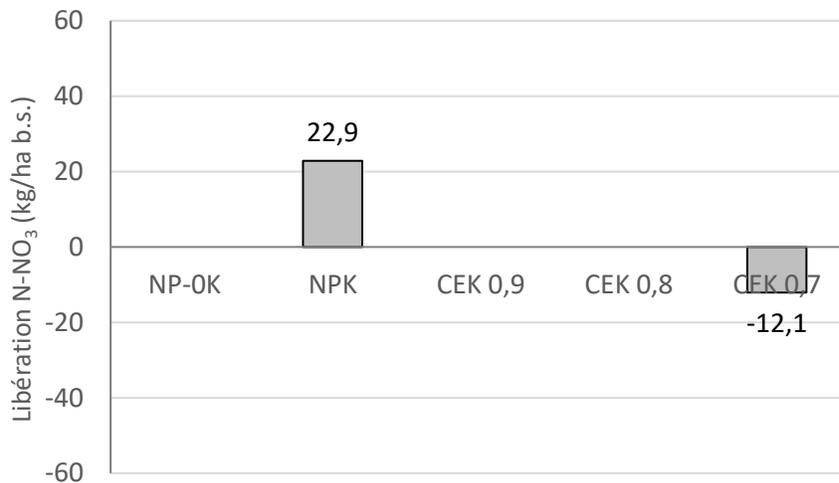


Figure 15. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO_3^- entre le témoin engrais minéral (NPK) et le traitement ayant reçu la plus forte dose de granules, deux semaines après les semis, 7 juin 2016, essai K.

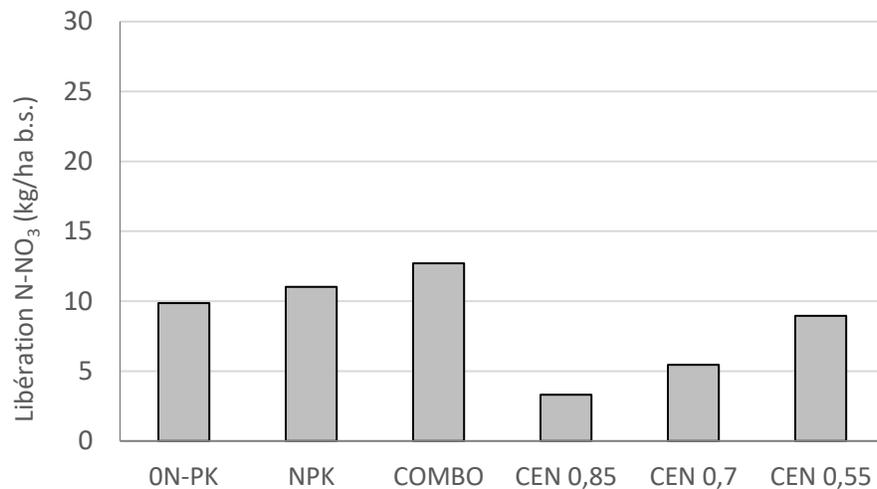


Figure 16. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO₃ en fonction des apports de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai N ($P = 0,3089$).

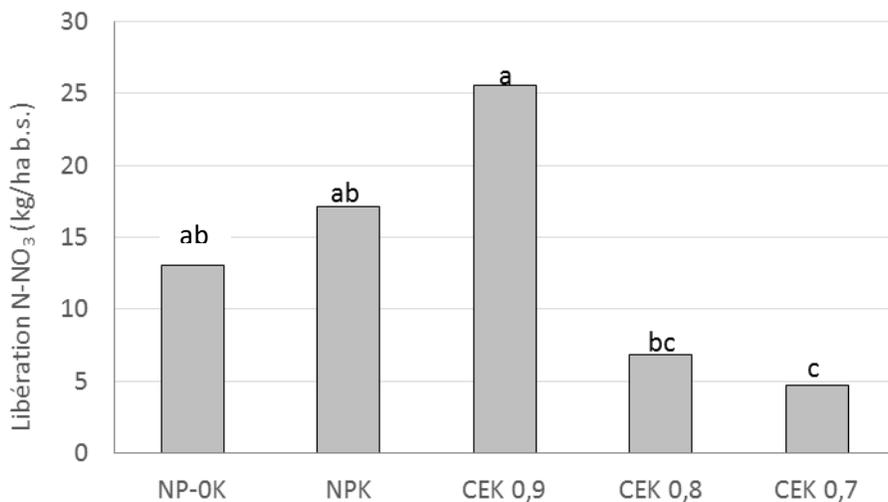


Figure 17. Pouvoir de minéralisation du sol en N-NO₃ en fonction des apports de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai K ($P = 0,0432$). Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil $P \leq 0,1$.

L'immobilisation du N mesurée en début de saison a occasionné des retards de croissance qui se sont traduits en rendements en paille et en grains inférieurs dans les traitements avec granules, comparativement au témoin NPK (Figure 18). De la même manière, des baisses significatives de prélèvements totaux (paille + grains) en N par les plants et une charge en N-NO₃ du sol à la récolte inférieure ont été mesurés pour les traitements avec granules

comparativement au témoin NPK et au « Combo » (Figure 19 et Figure 20). Ainsi, dans l'essai N, seul le traitement « Combo », ayant reçu 20 % du N sous forme de granules et la balance sous forme d'engrais N minéral, a donné des rendements, des prélèvements et une charge en N-NO₃ du sol à la récolte, comparables au témoin minéral NPK. Conséquemment, tous les CUA et CE du N se sont avérés négatifs à toutes les doses de granules testées. Les granules à court-moyen terme n'ont donc pas de valeur fertilisante azotée et davantage de tests sur le moment d'application ou les combinaisons engrais minéraux/granules ou autres AEOs/granules seront nécessaires si leur épandage était toujours envisagé. Il serait aussi très pertinent de vérifier l'arrière-effet de leur application pour voir si en 2^e année, le processus s'inverse et si la matière résiduelle fournit du N.

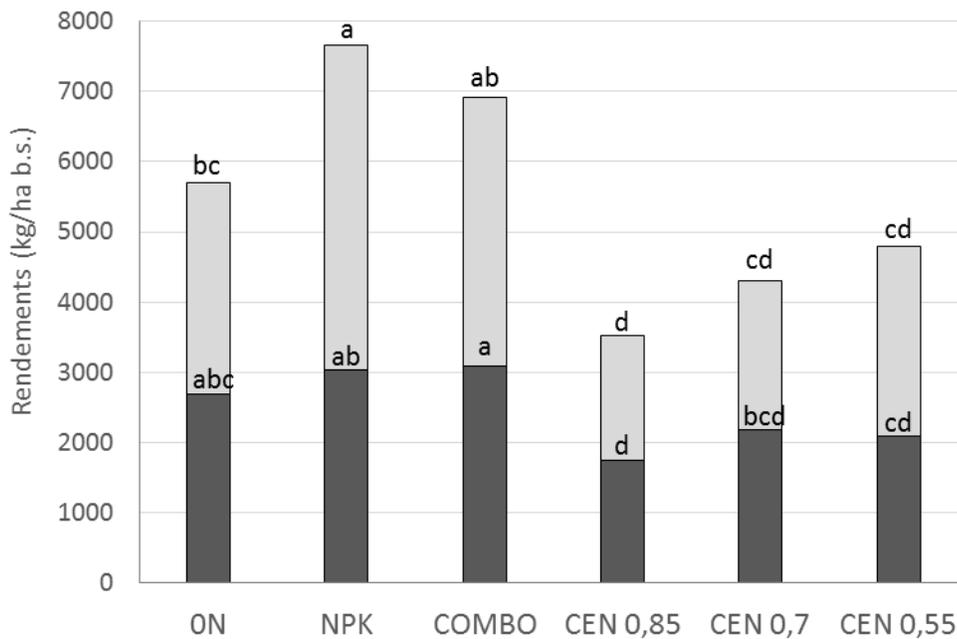


Figure 18. Rendements en grains (noir) ($P = 0,0459$) et en paille (gris) ($P = 0,0003$) en fonction des apports de granules à la récolte de l'avoine, 7 septembre 2016, essai N. Les résultats n'ayant pas les mêmes lettres sont significativement différents au seuil $P < 0,1$.

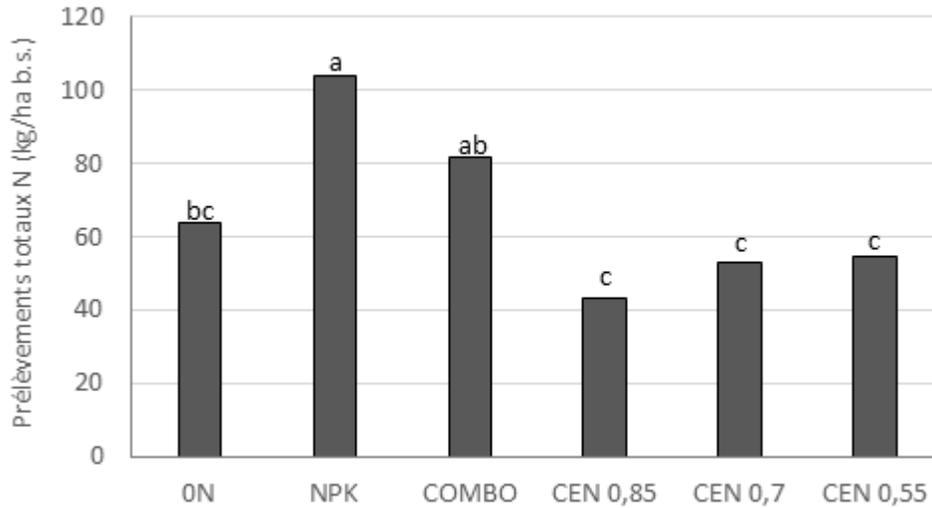


Figure 19. Prélèvement totaux en N des plants à la récolte d'avoine en fonction des apports de granules, 7 septembre 2016, essai N (Effet trt à $P = 0,0005$, Interaction à $P = 0,0809$). Les résultats n'ayant pas les mêmes lettres sont significativement différents au seuil $P \leq 0,1$.

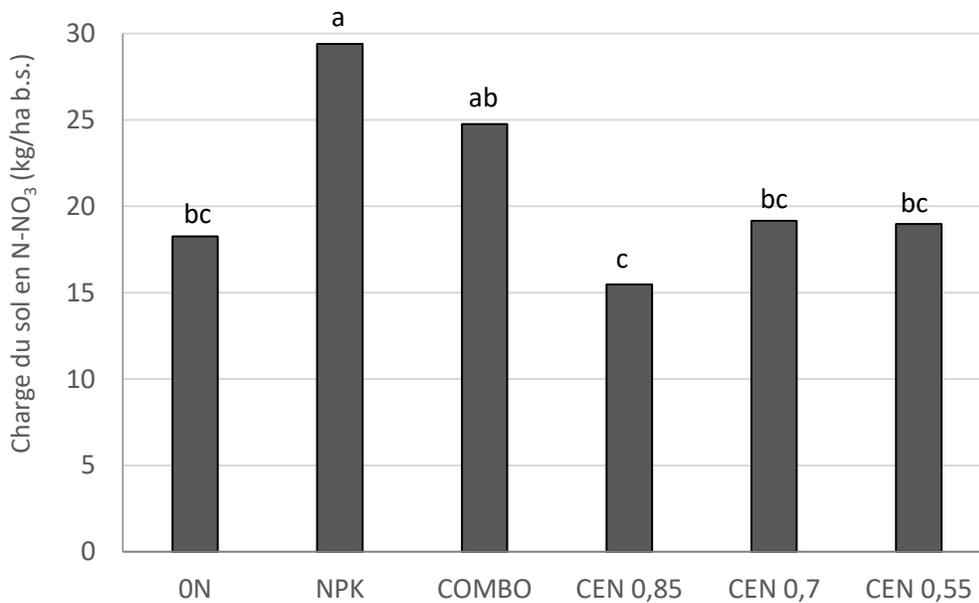


Figure 20. Charge du sol en N-NO₃ à la récolte en fonction des apports de granules, 7 septembre 2016, essai N. ($P = 0,0411$). Les résultats n'ayant pas les mêmes lettres sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

Efficacité du potassium des granules

L'analyse des contenus du sol en K disponible mesurés deux semaines après les semis d'avoine (7 juin) (Acétate et Mehlich-3) ou au stade cible (Mehlich-3) démontrent que les sols amendés avec les granules contenaient autant de K que celui du témoin NPK minéral (Figure 21 et Figure 22). Dans la littérature (CRAAQ 2010a), le CE du K des amendements est généralement équivalent à 1. De plus, 60 % du contenu en K des granules est sous forme soluble, contre 42 % dans le cas du N (Tableau 12). Par ailleurs, les rendements en paille et en grains ont été comparables pour tous les traitements à l'étude (Figure 23). Ainsi, même le traitement n'ayant pas reçu de fertilisation en K (NP-OK) a produit des rendements comparables aux autres, incluant le traitement minéral NPK. De même, les prélèvements totaux en K par les plants à la récolte ont tous été équivalents (Figure 24). Tout ceci est problématique puisque pour établir un CE, il faut obtenir une réponse de la culture à l'élément étudié. Il n'est donc pas possible de calculer de CE du K des granules puisque la richesse naturelle du sol en K a été capable à elle seule de combler tous les besoins, venant du coup masquer l'effet des engrais minéraux et organiques (Tableau 21). Un nouvel essai sera donc nécessaire dans un sol beaucoup plus pauvre que celui qui a servi à conduire l'essai en 2016. À noter que l'analyse de sol de l'automne 2015 (Tableau 21), servant à sélectionner un site, présentait bel et bien la pauvreté en K nécessaire. Toutefois, lors du second échantillonnage de ce même site au printemps 2016, les résultats indiquaient plutôt que celui-ci était classé riche en K et nécessitait uniquement des apports de 0 à 20 kg de K_2O/ha et non les 70 kg K_2O/ha prévus initialement (CRAAQ 2010a). Néanmoins, les mesures prises suggèrent que le K des granules est disponible et que des apports de granules comme source de K, en combinaison avec du N minéral, pourraient être envisageables sans nuire aux rendements, quoique cela soit de peu d'utilité (Figure 18). De plus, il faut rapporter qu'il y a eu plus de verse dans les parcelles du témoin NPK minéral. Il se peut donc que ses rendements et ses prélèvements en K soient sous-estimés (Figure 23 et Figure 24).

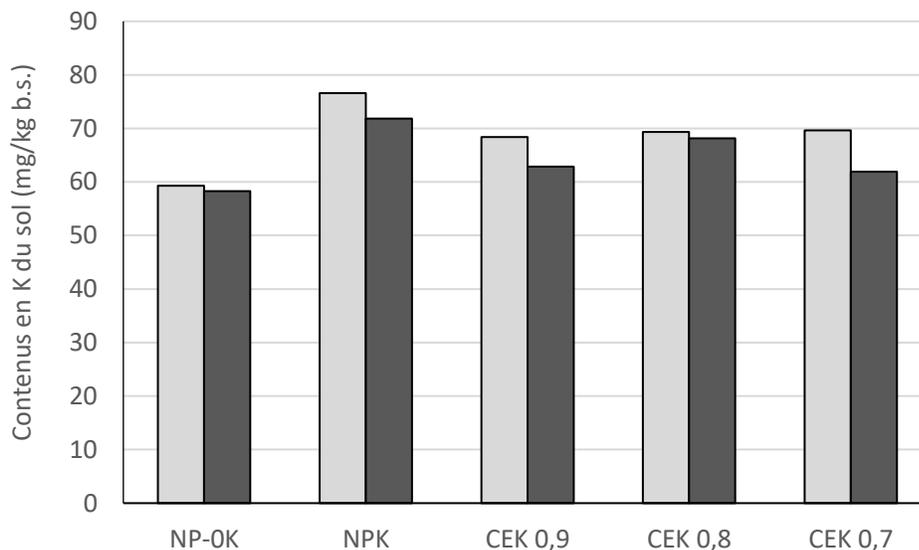


Figure 21. Contenus du sol en K M₃ ($P = ns$) et K échangeable (acétate) ($P = ns$) en fonction de l'apport de granules deux semaines après le semis d'avoine, 24 mai 2016, essai K.

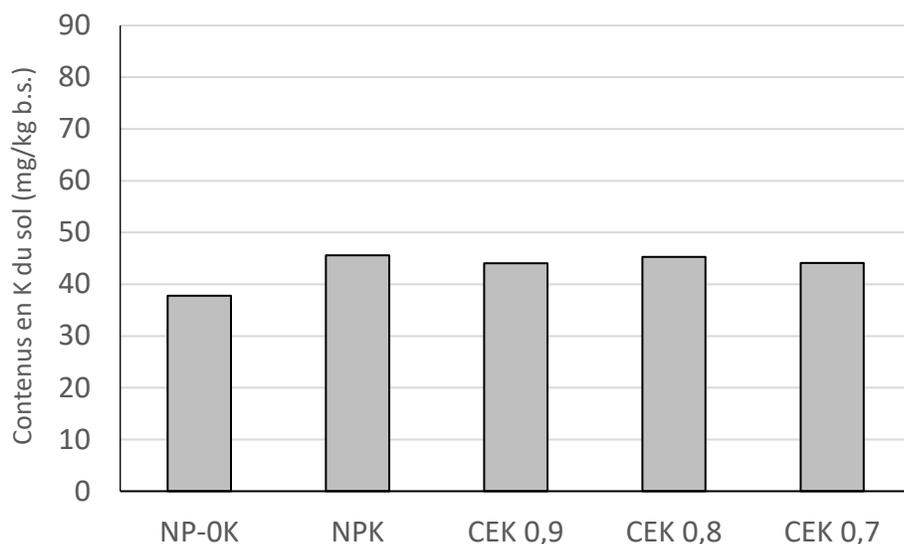


Figure 22. Contenus du sol en K M₃ en fonction de l'apport de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai K ($P = 0,1269$; seul CEK 0,9 différent de NP-OK).

Tableau 21. Analyses de sol à l'automne 2015 et au printemps 2016 pour le site de l'essai K

Paramètres	2015	2016
pH _{eau}	5,76	5,80
Matières organiques (M.O.) (%)	.	2,48
N-NO ₃ (kg ha ⁻¹ b.s.)	.	16,8
N-NH ₄ (kg ha ⁻¹ b.s.)	.	4,23
C _{total} (%)	0,83	0,93
N _{tot} (%)	0,07	0,08
C/N	11,9	11,5
Densité apparente (g cm ³ ⁻¹)		1,14
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)		
P	410	468
K	90	156
Ca	1109	1175
Mg	47	60
Al	3143	3513
P _{M3} /Al _{M3} (%)	13,0	13,3

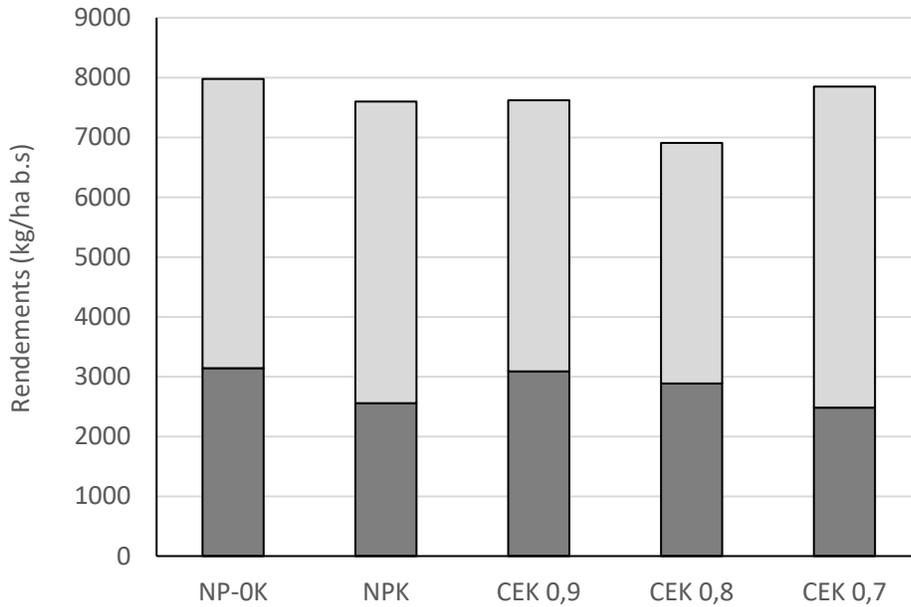


Figure 23. Rendements en grains (noir) ($P = ns$) et en paille (gris) ($P = ns$) à la récolte de l'avoine en fonction de l'apport de granules, 7 septembre 2016, essai K.

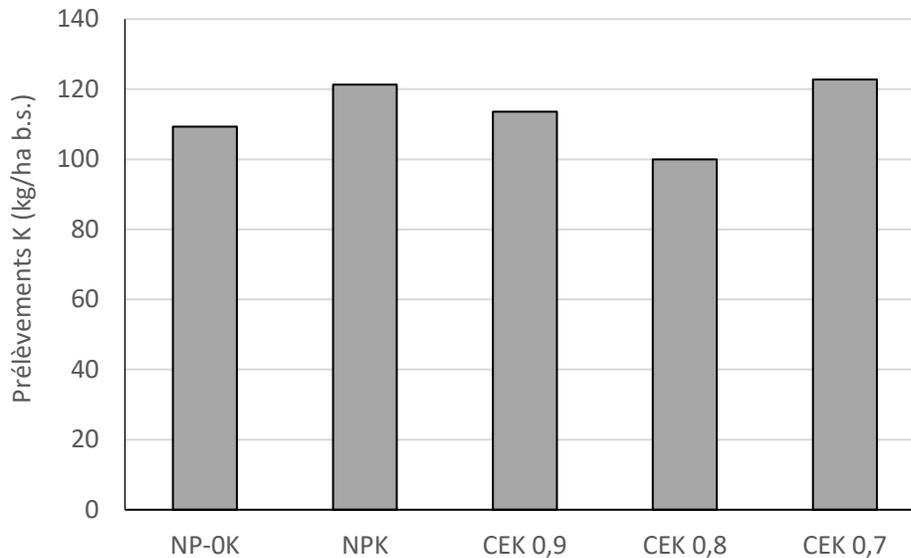


Figure 24. Prélèvements totaux en K des plants d'avoine à la récolte en fonction de l'apport de granules, 7 septembre 2016, essai K ($P = 0,0438$, interaction date x engrais à $P = 0,0650$, seul CEK 0,8 est différent de CEK 0,7 à $P = 0,0992$).

L'analyse foliaire du 11 juillet (stade cible) (Tableau 22) vient appuyer l'ensemble des conclusions tirées des analyses de sol et des rendements obtenus. L'apport de granules a fait fortement diminuer le contenu en N et K des feuilles, tant dans l'essai N (effet sur le N à $P = 0,0007$, effet sur le K à $P = 0,0394$) que l'essai K (effet sur le N à $P = 0,0016$, effet sur le K à $P = 0,0002$). Dans l'essai N, les plants fertilisés aux granules présentent tous des teneurs foliaires en N similaires, sans impact des doses de granules. Celles-ci sont donc 1,2 fois inférieures à celles des plants non fertilisés en N et 1,5 fois inférieures à celle des plants fertilisés avec l'engrais N minéral. La présence des granules a donc grandement nuit à la nutrition azotée des plants, même si les teneurs demeurent dans les valeurs de suffisance. Dans l'essai K, l'effet négatif est moins marqué mais toujours très significatif, que ce soit en comparaison du traitement minéral NPK ou du témoin NP-OK. Et cela, malgré le même apport de N sous forme minérale dans tous les traitements. De plus, la quantité de granules a fait une différence, l'impact étant plus marqué avec l'élévation des doses. Au global, selon les résultats des deux essais, l'effet immobilisant ressort donc comme étant très fort.

L'apport de granules (Tableau 22) a aussi modifié les teneurs foliaires en Ca et Mg des plants, ce qui s'est traduit par une modification significative du ratio $K/(Ca + Mg)$ (essai N à $P = 0,0467$, essai K à $P = 0,0235$) (Figure 25 et Figure 26), et cela malgré les applications préventives de Ca faites au champ suivant le déséquilibre cationique observé lors du bioessai en serre et pressenti selon la caractérisation physico-chimique des granules. L'effet a été beaucoup plus marqué dans le dispositif sur le N, que dans celui sur le K, probablement parce que les granules ont été apportés en plus grandes quantités (13-20 t/ha dans le dispo N vs 10-13 t/ha dans le dispo K). Dans le dispositif sur le N, il n'y avait aucune différence entre les doses de granules et leur ratio était en moyenne 2,7 fois plus élevé que celui du témoin NPK minéral. Dans le dispositif K, le déséquilibre augmente avec l'accroissement des doses de granules. Ainsi, seul le ratio de la plus forte dose était supérieur (1,24 x) à celui du témoin NPK minéral. Par contre, dans les deux dispositifs, les ratios $K/(Ca + Mg)$ de tous les traitements avec granules étaient supérieurs à la valeur référence de 2,75 indiquant habituellement une absorption déficiente de Ca et de Mg (Giroux et Lemieux 2000). Toutefois, les contenus en Ca et Mg sont demeurés dans l'intervalle des valeurs cibles pour l'avoine (0,2-0,5% et 0,15-0,50% respectivement), ce qui signifie que les plants n'étaient pas carencés. La situation aurait cependant pu être fort différente dans un sol moins bien pourvu en Ca et Mg, ou plus riche en K. De futurs essais avec des granules devraient donc toujours prendre en compte cet aspect et ajuster la recommandation de fertilisation en Ca et Mg adéquatement afin d'équilibrer le ratio $K/(Ca + Mg)$, surtout pour la culture des fourrages afin d'éviter la fièvre du lait ou la tétanie d'herbage.

Tableau 22. Analyse foliaire des plants d'avoine au stade cible (11 juillet) selon les traitements à l'étude.

Traitements	N _{tot}	P	K	Ca	Mg	K/(Ca + Mg)
----- (%) -----						
Essai N						
ON - PK	3,2	0,3	2,1	0,61	0,23	2,8
NPK	4,1	0,3	1,7	0,73	0,27	1,8
Combo	3,7	0,3	2,1	0,63	0,23	2,6
CEN 0,85	2,7	0,3	2,7	0,41	0,17	4,8
CEN 0,7	2,7	0,3	2,8	0,42	0,17	4,9
CEN 0,55	2,9	0,3	2,7	0,47	0,16	4,6
Essai K						
NP - OK	4,0	0,3	1,9	0,69	0,27	2,0
NPK	4,2	0,3	2,2	0,63	0,26	2,5
CEK 0,9	3,8	0,3	2,2	0,64	0,22	2,7
CEK 0,8	3,7	0,3	2,4	0,58	0,22	2,9
CEK 0,7	3,6	0,3	2,4	0,58	0,21	3,1
Cible¹	2 à 2,7	0,2 à 0,4	1,5 à 3,0	0,2 à 0,5	0,15 à 0,5	

¹ Valeurs cibles de suffisance pour l'avoine (GREF 2010).

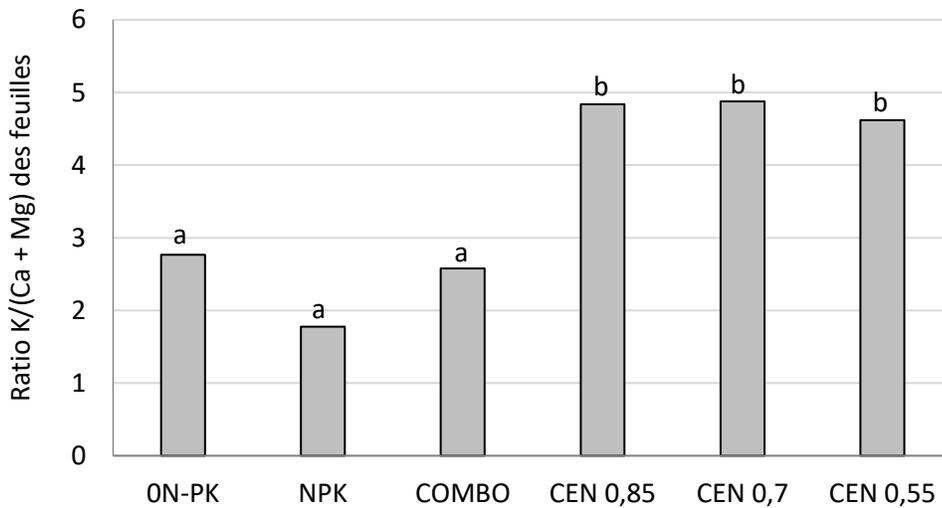


Figure 25. Ratio K/(Ca + Mg) des feuilles en fonction de l'apport de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai N ($P = 0,0467$). Les valeurs n'ayant pas les mêmes lettres sont significativement différentes au seuil ($P \leq 0,10$).

¹ CRAAQ 2013

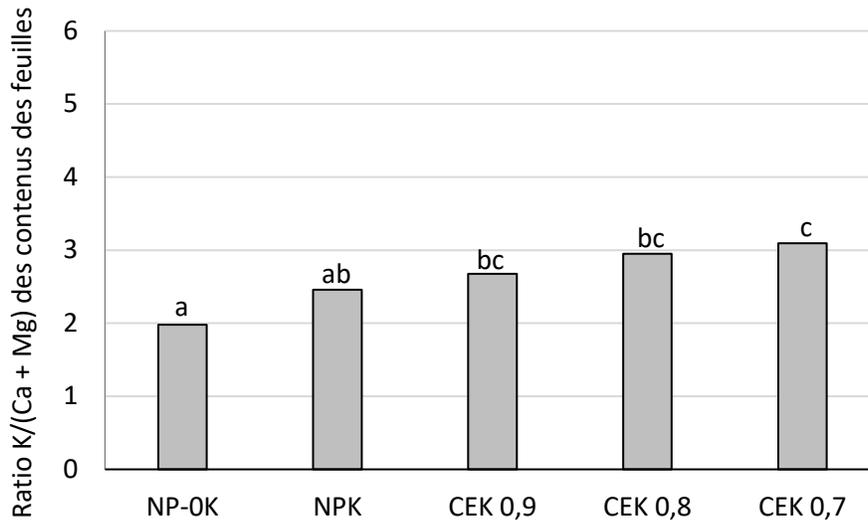


Figure 26. Ratio K/(Ca + Mg) des feuilles en fonction de l'apport de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai K ($P = 0,0235$). Les valeurs n'ayant pas les mêmes lettres sont significativement différentes au seuil ($P \leq 0,1$).

Potentiel des granules comme activateur de sol

Les granules sont une source concentrée de Corg (Tableau 12). Ils apportent en moyenne 437 kg de Corg/T, dont 16 % (70 kg/T) sous forme soluble (Tableau 12). Ce point est important car la fraction soluble est une source labile de C, très facilement minéralisable, qui a une action rapide dans le sol sur le taux d'activité des microorganismes dont le C est la principale source d'énergie. Elle est donc particulièrement intéressante d'un point de vue agronomique pour ses effets courts termes directs sur l'accroissement de la biomasse et de l'activité microbienne et indirectement sur le cyclage des nutriments dont ils sont responsables. Toutefois, les contenus en Corg soluble du sol n'ont été modifiés statistiquement par l'apport de granules que dans l'essai K (Figure 27 et Figure 28). Le taux de MO du sol deux fois plus élevé dans le dispositif N, comparativement à celui du dispositif K, explique probablement l'absence de différence dans ce dispositif malgré des apports plus élevés de granules. Ainsi, dans l'essai K, les sols ayant reçu des granules contiennent de 1,14 à 1,30 fois plus de Corg soluble que le sol du témoin minéral. De plus, les contenus en Corg soluble de l'essai K sont corrélés avec les rendements en grains avec une $R^2 = 89$ (voir rendements essai K : Figure 23). Ce résultat démontre l'importance du C labile en lien avec les rendements et ressort probablement à cause du faible taux de MO du site K.

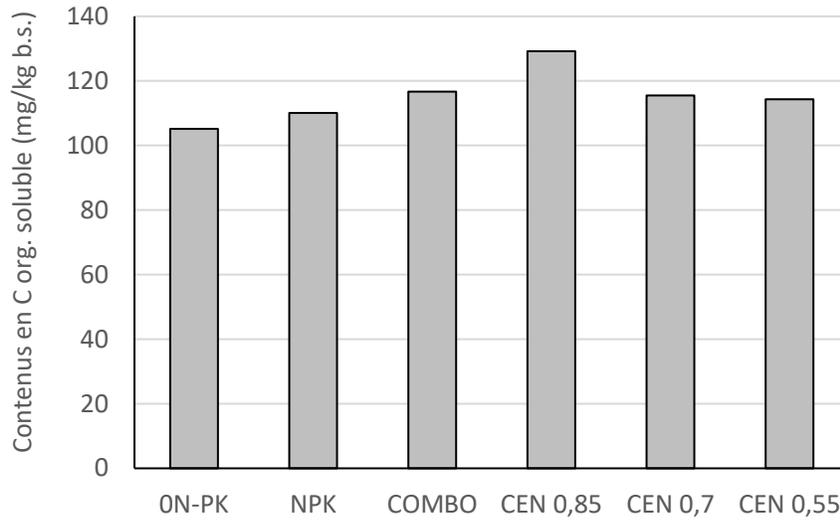


Figure 27. Contenus en Corg soluble du sol en fonction de l'apport de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai N. ($P = ns$).

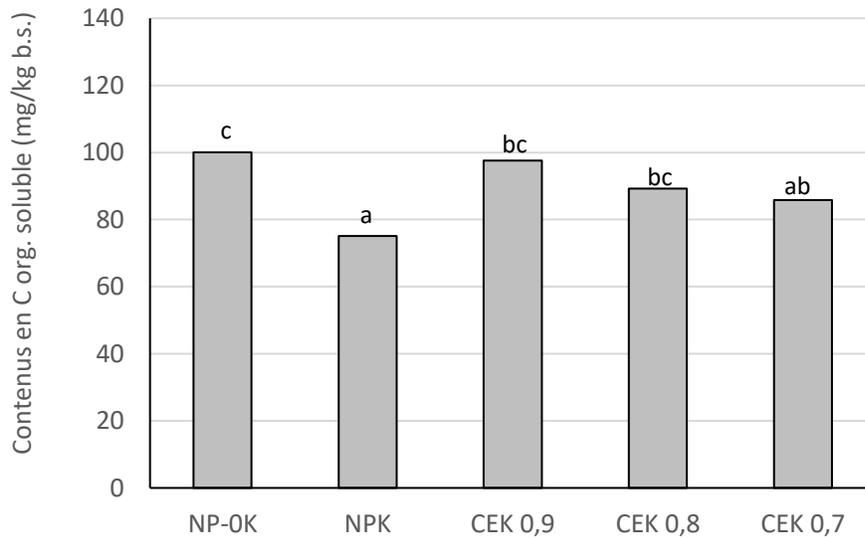


Figure 28. Contenus en Corg soluble du sol en fonction des apports de granules au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai K. ($P = 0,0320$). Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,10$).

D'autres paramètres également associés à l'activité microbienne des sols ont été affectés significativement par l'apport de granules, soit le taux respiratoire, i.e. le dégagement de CO₂ par les microorganismes du sol (Figure 29 à Figure 32) et le taux d'activité enzymatique uréase, responsable de la minéralisation du N organique (Figure 33 à Figure 35). Pour les deux paramètres, l'impact des granules a été plus grand dans l'essai N, recevant des doses beaucoup plus élevées de granules que celles de l'essai K (13-20 T/ha vs 10-13 T/ha). En ce qui a trait à la respiration du sol, en début de saison (quatre semaines après l'application des granules), celle-ci était 3,5 fois plus importante en présence de granules dans les deux dispositifs (Figure 29 et Figure 30), en comparaison du traitement NPK (mais plus élevé dans le dispositif N que K). Au stade cible de l'avoine (11 juillet), la respiration du sol était encore de 2,0 à 2,7 fois (effet croissant avec les doses) et 1,8 fois (aucun effet de dose) plus importante en présence de granules dans les dispositifs N et K, respectivement (Figure 31 et Figure 32), comparativement au traitement NPK. En ce qui a trait à l'uréase, l'apport de granules a également haussé son taux d'activité, tant dans l'essai N (effet traitement à $P = 0,0163$) que l'essai K (effet traitement à $P = 0,0597$), aux deux dates étudiées, comparativement aux traitements d'engrais minéraux (Figure 33 à Figure 35). Par contre, l'accroissement des doses de granules était sans effet dans les deux dispositifs, à toutes les dates. Ainsi, en moyenne, les traitements fertilisés avec granules seulement pour le N avaient une activité uréase 1,6 et 1,3 fois plus élevée que celle du témoin NPK, 2 semaines post-semis et au stade cible, respectivement. Dans l'essai K, cette différence était de 1,3 fois, quelle que soit la date (effet période = n.s.).

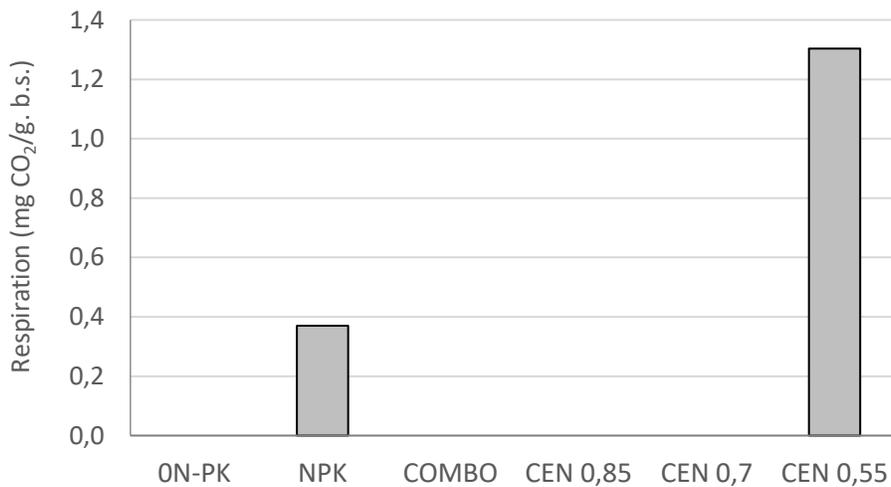


Figure 29. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine, 7 juin 2016, essai N.

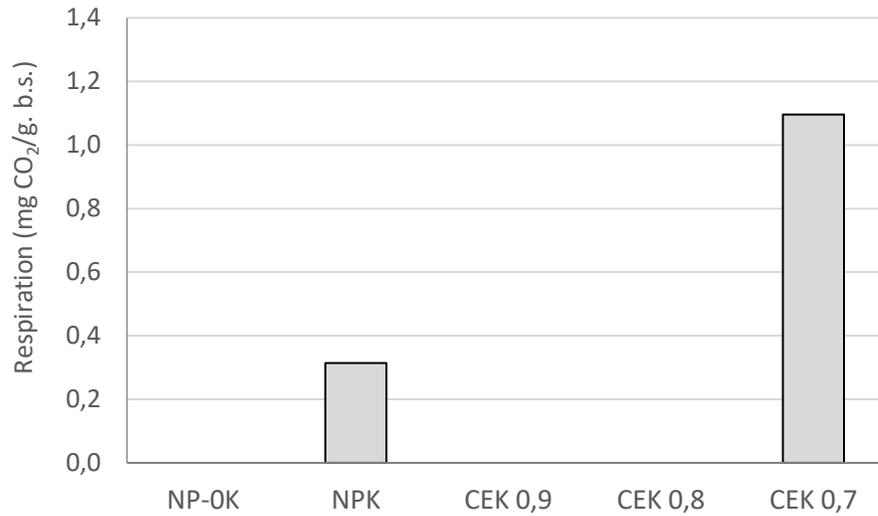


Figure 30. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine, 7 juin 2016, essai K.

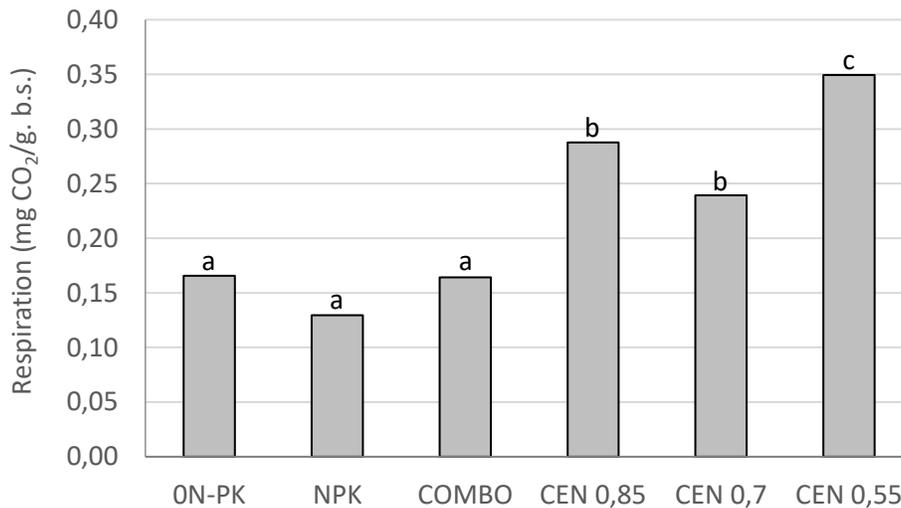


Figure 31. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai N. Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

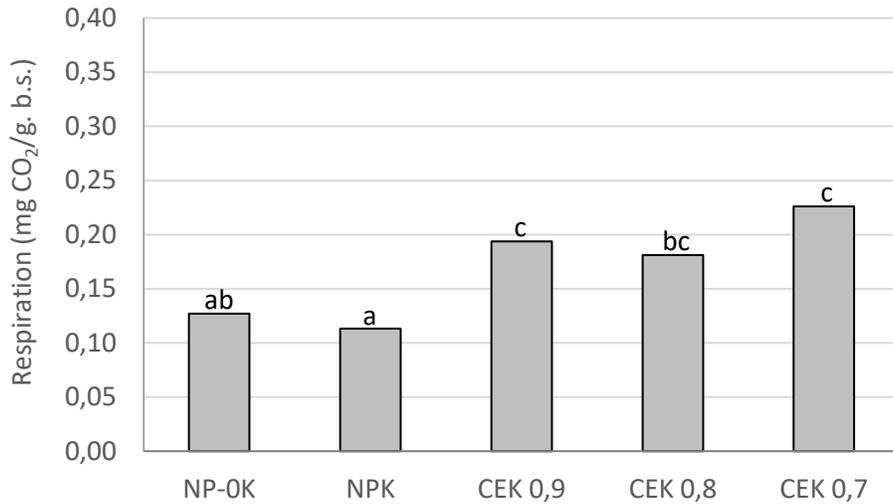


Figure 32. Taux respiratoire de la biomasse microbienne du sol selon l'apport de fertilisants au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai K. Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil $P \leq 0,1$.

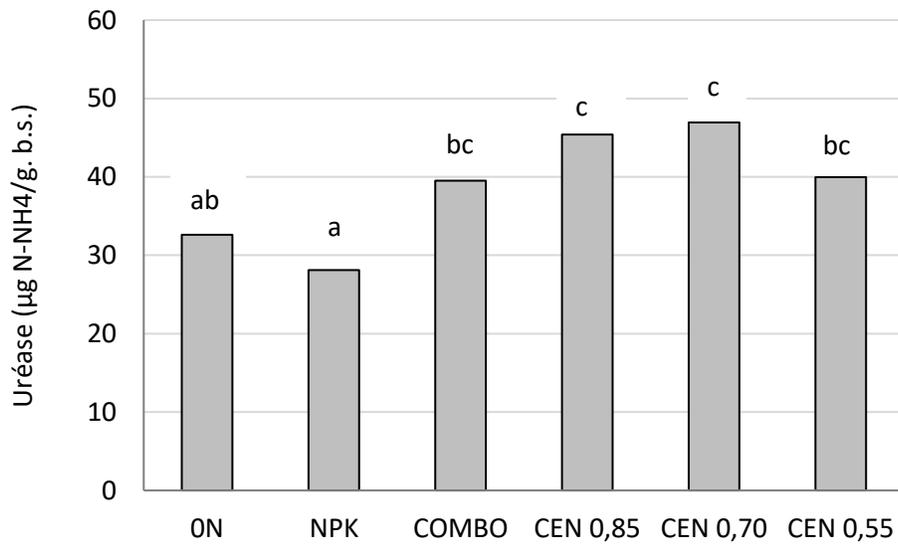


Figure 33. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants, 2 semaines après les semis d'avoine, 7 juin 2016, essai N. Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

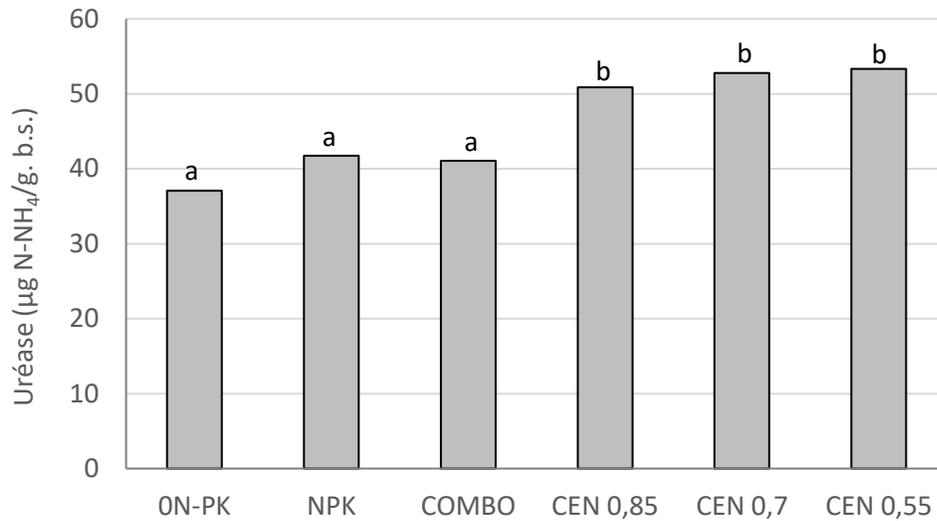


Figure 34. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants au stade cible de l'avoine, 11 juillet 2016, essai N. Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

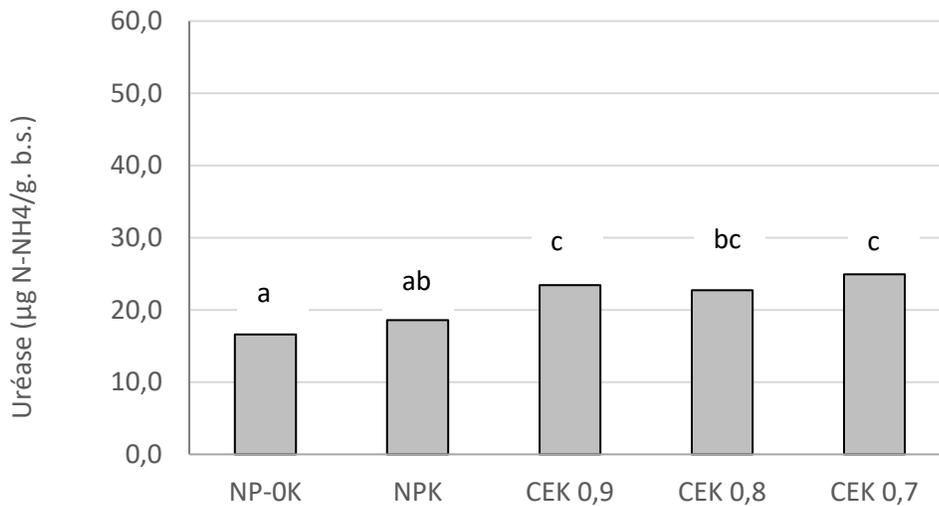


Figure 35. Activité uréase du sol en fonction des apports de fertilisants, tous stades confondus (effet période = n.s.) de l'avoine, 7 juin et 11 juillet 2016, essai K. Les résultats n'ayant pas la même lettre sont significativement différents au seuil ($P \leq 0,1$).

Évaluation de la richesse microbienne des sols amendés ou non de granules

Les analyses de « operational taxonomic unit » (OTU) des échantillons de sol de l'essai N et de l'essai K révèlent que la richesse bactérienne est moins importante dans les sols au printemps (PRT_N; PRT_K) (avant application des granules) (nombre OTU plus faible) que dans les sols échantillonnés à la récolte (7 septembre) (Figure 36). Le peuplement progressif du sol par les racines pendant la saison de croissance a probablement permis un accroissement du nombre d'OTUs en multipliant le nombre de niches écologiques distinctes disponibles au peuplement. De plus, il ressort qu'aucun des traitements n'a permis de modifier significativement la richesse bactérienne, aussi bien dans le sol de l'essai N que pour celui de l'essai K. Ainsi, que le sol ait été non fertilisé en N ou K, selon le dispositif, et qu'il ait reçu des engrais minéraux ou sous forme de granules, n'a fait aucune différence. Dans le cas de la richesse eucaryotique (Figure 37), une situation inverse s'observe. Celle des sols prélevés au printemps est aussi élevée que celle de plusieurs des sols prélevés à la récolte. De plus, le type de fertilisation a fait une différence. Pour l'essai N, le traitement témoin ON-PK présente une richesse eucaryotique plus élevée que celle du sol des traitements Combo et CEN 0,55. Pour l'essai K, le traitement témoin minéral NPK présente une richesse eucaryotique significativement plus élevée que celle du sol des traitements CEN 0,70 et PRT-K (Figure 37). Par contre, la dose comme telle de granules n'influence pas significativement la richesse eucaryotique.

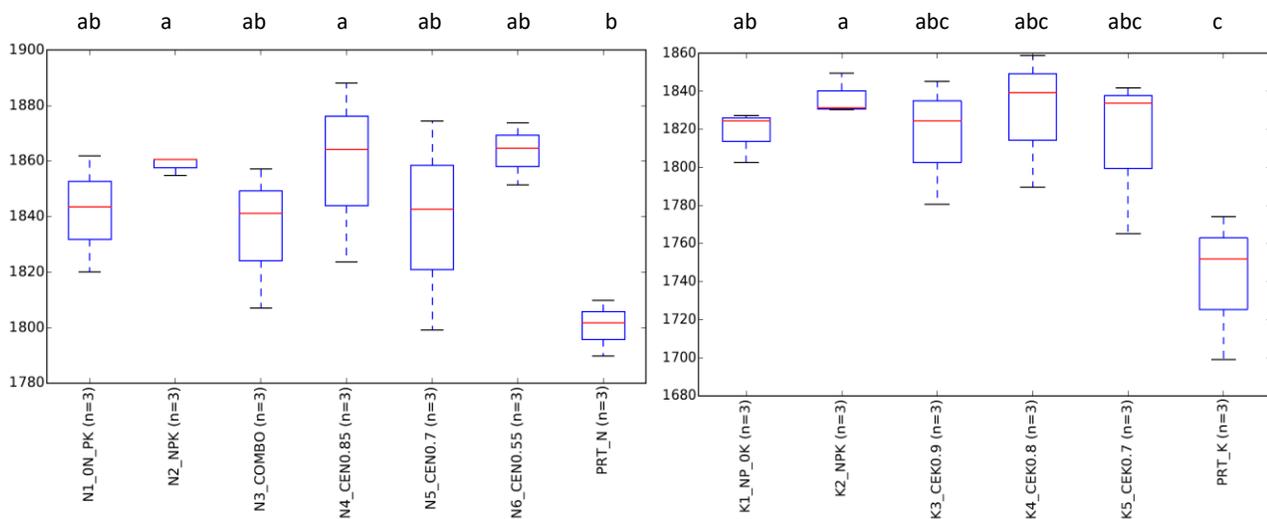


Figure 36. Richesse bactérienne (nombre d'OTUs) observée en fonction des traitements pour l'essai N (gauche) et l'essai K (droite), à la récolte (N1 à N6) et au printemps (PRT). Le niveau de signification statistique est $P < 0,1$.

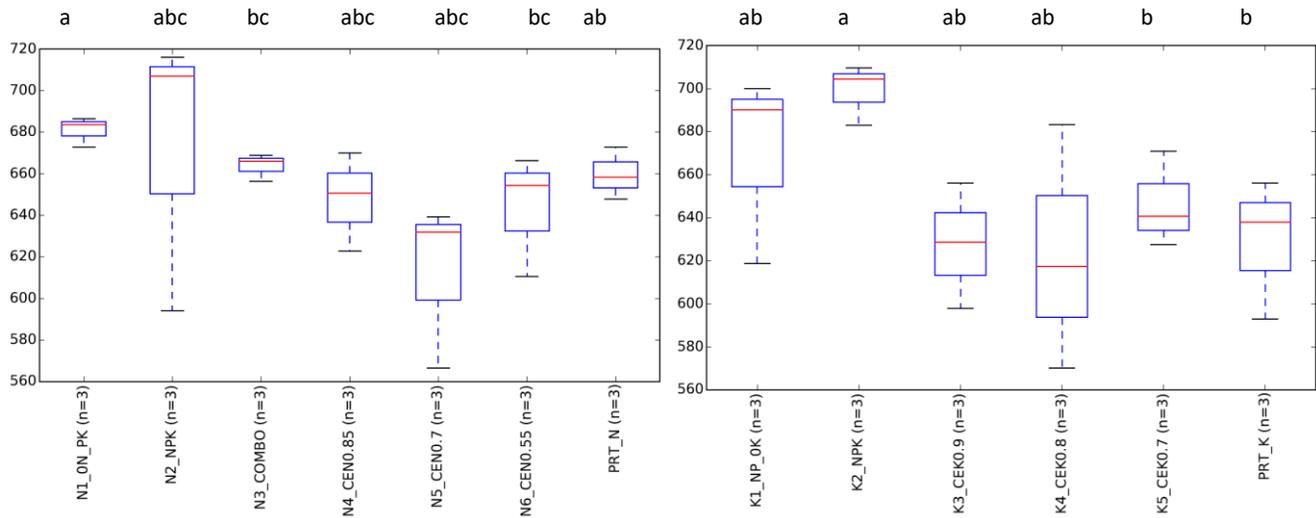


Figure 37. Richesse eucaryotique (nombre d'OTUs) observée en fonction des traitements pour l'essai N (gauche) et l'essai K (droite), à la récolte (N1 à N6) et au printemps (PRT). Le niveau de signification statistique est $P < 0,1$.

Évaluation de la composition taxonomique microbienne et eucaryotique

Comparaison de la diversité microbienne

La comparaison de la diversité de la composition bactérienne et eucaryotique a été effectuée de manière indépendante pour les deux essais, car une analyse préliminaire a montré que la diversité de la composition microbienne des sols de chacun des essais était différente. Les analyses en composantes principales (PCoA) (Figure 38 et Figure 39) montrent que des regroupements peuvent être faits selon les traitements appliqués. Au niveau bactérien, on observe pour chacun des essais que la diversité de la composition bactérienne des sols au printemps est différente de la composition bactérienne des sols prélevés à la récolte, tel que nous l'avons observé pour la richesse bactérienne (Figure 36 et Figure 38). Les traitements sans granule (NPK, ON_PK ou NP_OK) peuvent également se regrouper et se distinguent de la composition bactérienne des sols ayant reçus des granules (8,6% de la variabilité; $P = 0,013$ pour l'essai N et 12,9% de variabilité; $P = 0,002$). Par contre, la dose comme telle de granules n'a pas induit de différence au sein de la diversité de la composition des bactéries dans les sols prélevés à la récolte dans les deux essais, tel que cela avait été observé pour la richesse bactérienne (Figure 36 et Figure 38). Au niveau eucaryotique, les sols avec présence de granules présentent aussi des compositions eucaryotique significativement différentes (14,5% de la variabilité; $P = 0,015$ pour l'essai N et 45% de variabilité; $P = 0,001$) (Figure 39), avec également une absence d'effet de la dose de granules (Test Adonis non significatif aussi bien pour les bactéries que pour les eucaryotes).

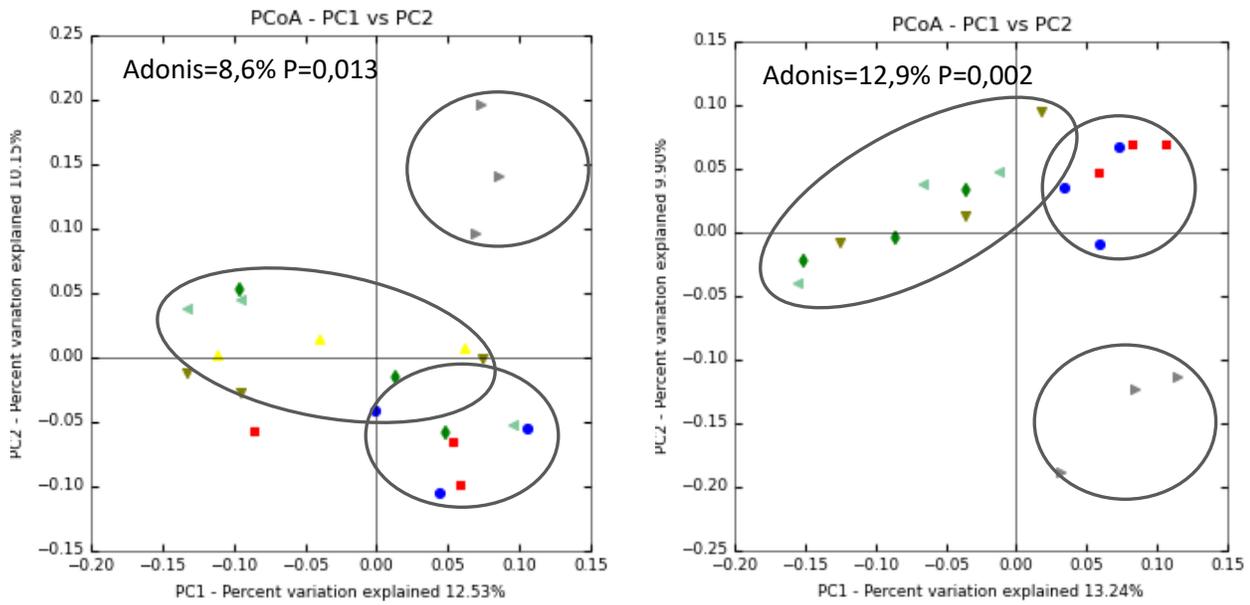


Figure 38. Analyse en composantes principales présentant les deux premières composantes expliquant les variations de la composition bactérienne des sols des traitements de l'essai N (gauche) et de l'essai K (droite) au printemps et à la récolte. (NPK=bleu; ON_PK ou NP_OK=rouge; Printemps=gris; COMBO= jaune; Dose croissante de CEN ou CEK=dégradé de vert).

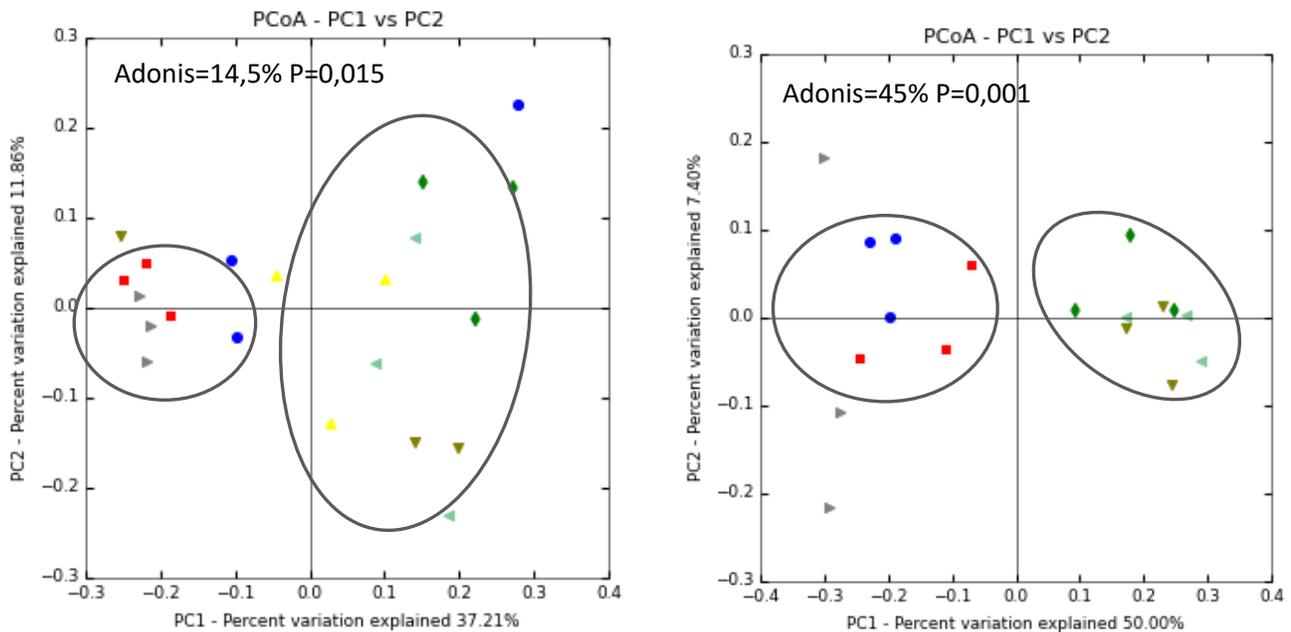
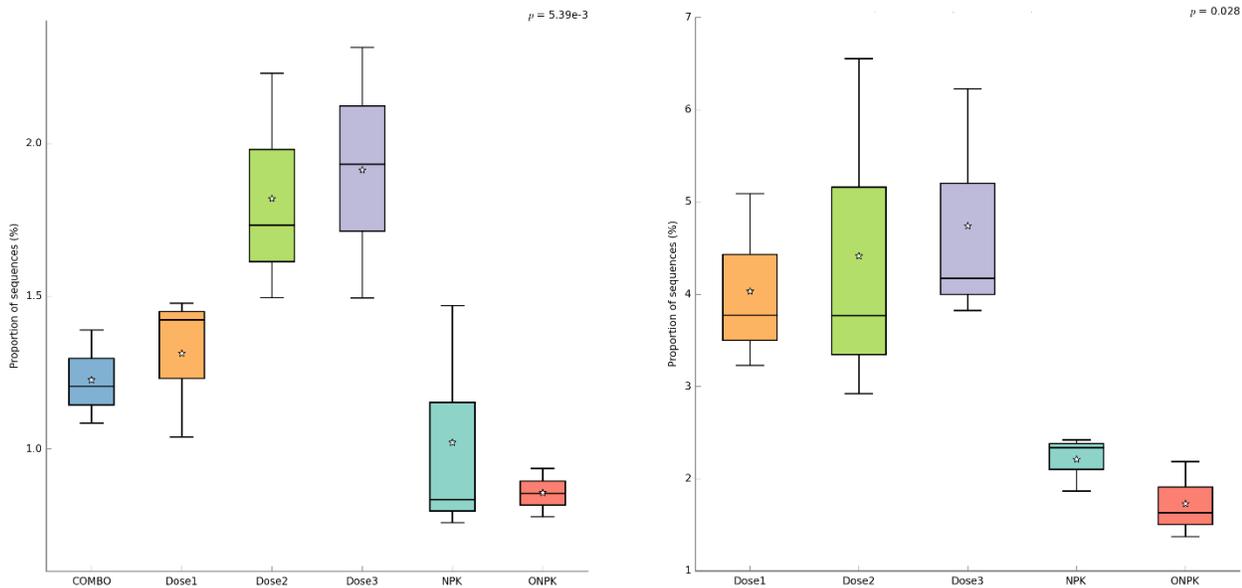


Figure 39. Analyse en composantes principales présentant les deux premières composantes expliquant les variations de la composition eucaryotique des sols des traitements de l'essai N (gauche) et de l'essai K (droite) au printemps et à la récolte. (NPK=bleu; ON_PK ou NP_OK=rouge; Printemps=gris; COMBO= jaune; Dose croissante de CEN ou CEK=dégradé de vert).

Groupes microbiens en lien avec la présence des granules dans les sols

Une analyse détaillée de l'ensemble des groupes microbiens a été réalisée afin de comparer la proportion de chaque famille bactérienne et de chaque groupe eucaryotique extraits des sols amendés ou non avec des granules. Certains groupes microbiens ont été identifiés significativement plus abondants dans les sols ayant reçus des granules. La Figure 40 illustre que les familles bactériennes des *Micrococcaceae* et de *Burkholderiaceae* sont plus abondantes lorsque le sol est amendé en granules. Dans le cas de l'essai N, pour lequel les doses de granules variaient de 3 à 20 T/ha, on observe une augmentation graduelle de la proportion de ces familles bactériennes avec la dose de granules ($P = 0,005$ et $P = 0,03$ respectivement). Les proportions de ces familles bactériennes varient cependant moins dans les sols amendés de l'essai K puisque les doses variaient de 10 à 13 t/ha, mais demeurent significativement plus abondantes ($P = 0,028$ et $P = 0,066$ respectivement), les principaux genres identifiés parmi les *Burkholderiaceae* sont les *Burkholderia* et les *Limnobacter* qui présentent des espèces bactériennes pouvant être impliquées dans plusieurs fonctions bénéfiques au niveau de la rhizosphère. Pour les *Micrococcaceae*, le principal genre identifié est le genre *Arthrobacter* qui est impliqué dans plusieurs fonctions de dégradation.



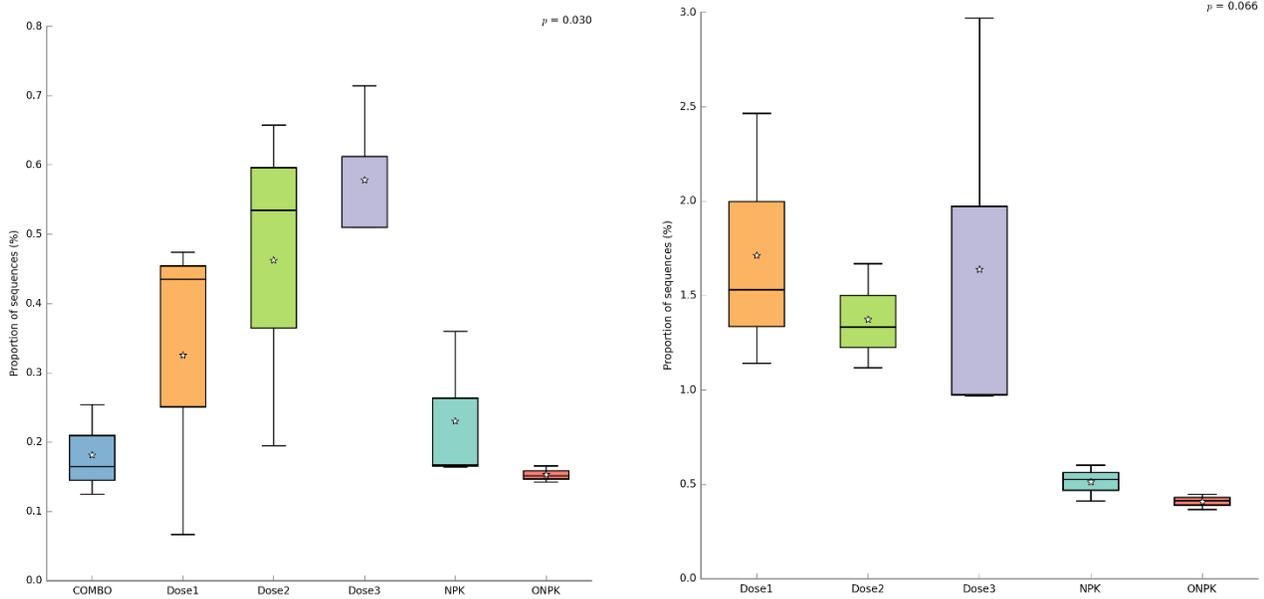


Figure 40. Proportion relative des *Micrococcaceae* (haut) et des *Burkholderiaceae* (bas) en lien avec la présence de granules dans les sols prélevés à la récolte de l'essai N (à gauche) et l'essai K (à droite).

La Figure 41 illustre que parmi les groupes eucaryotiques, les groupes fongiques *Pezizomycotina* et *Pucciniomycotina* sont plus abondants lorsque le sol est amendé en granules. Dans le cas des *Pucciniomycotina*, cet effet positif est uniquement significatif pour l'essai N ($P = 0,009$) où l'effet de la plus grande variation des doses de granules est également plus marqué. Dans le cas des *Pezizomycotina*, l'effet positif est significatif pour l'essai N ($P = 0,086$) et pour l'essai K ($P < 0,001$). Pour le groupe des *Pezizomycotina*, on retrouve essentiellement des *Eurotaiales* et des *Sordariales* et pour le groupe des *Pucciniomycotina*, ce sont essentiellement des *Attractiellales*. D'autres groupes eucaryotiques ont été observés à la baisse dans les sols amendés de granules, notamment des arthropodes et certains groupes de SAR (*Stramenopiles*, *Alveolates*, et *Rhizaria*). Ce groupe inclus notamment des protozoaires, des oomycètes et autres organismes unicellulaires.

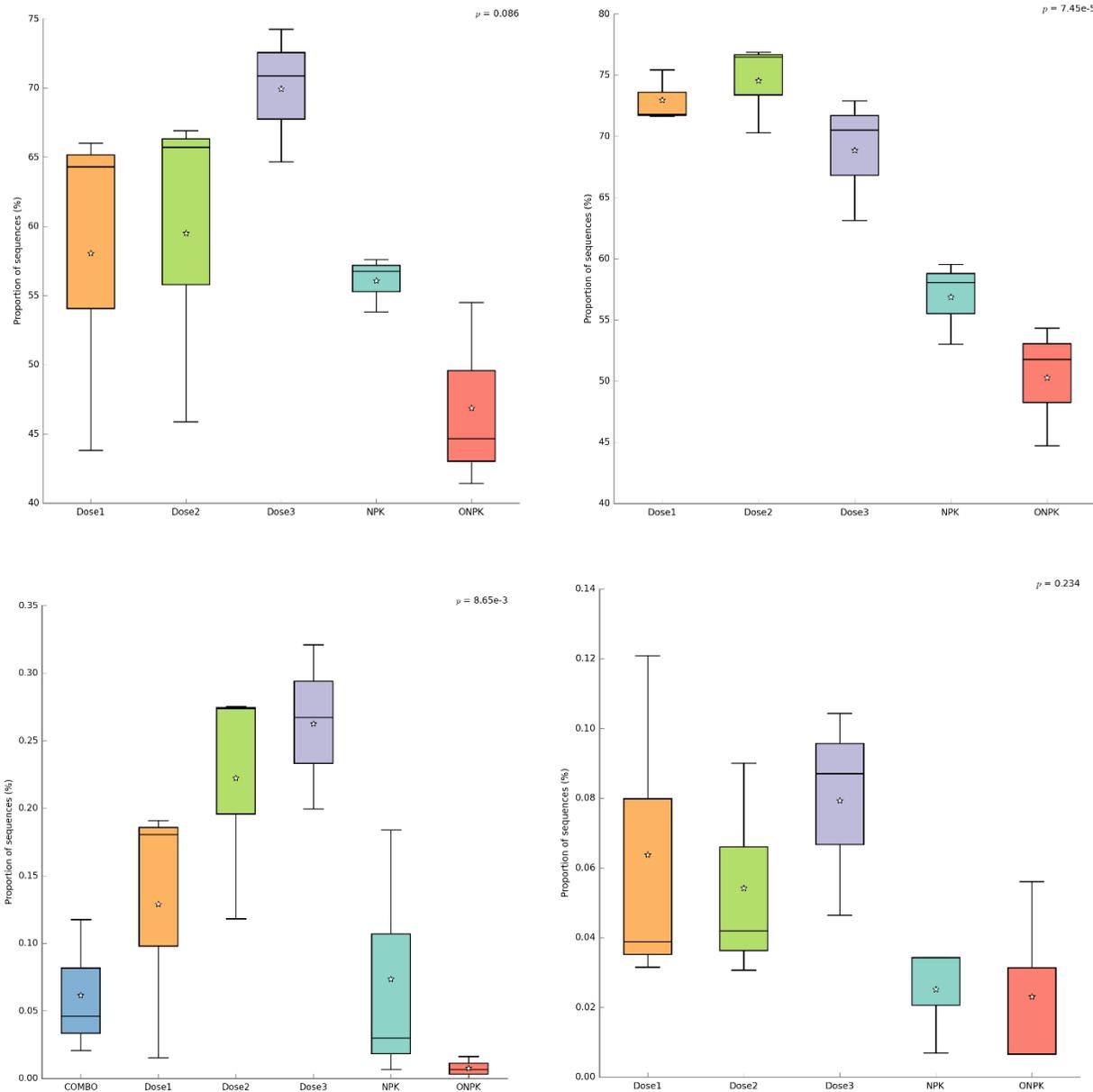


Figure 41. Proportion relative des *Pezizomycotina* (haut) et des *Pucciniomycotina* (bas) en lien avec la présence de granules dans les sols prélevés à la récolte. L'essai N est à gauche et l'essai K est à droite.

Relations entre les variables physico-chimiques, agronomiques et environnementales

On observe au [Tableau 23](#), qu'il existe un lien important entre la variabilité de la composition microbienne (bactérienne et eucaryotique) et la mesure d'activité de l'uréase dans les sols. La respiration microbienne explique moins de variabilité que l'uréase et elle est plus significative dans le cas des eucaryotes ($P < 0,05$). Le C tot soluble

et Corg soluble sont également en lien étroit avec la composition microbienne des sols. Concernant les variables agronomiques de rendements, seul le rendement en paille est en lien étroit avec la composition microbienne. Ces explications de la variabilité, dans un contexte de sol sableux, montrent qu'il est possible de relier la diversité de la composition de la fraction biologique des sols avec des variables plus intégratrices comme l'activité de l'uréase ou la matière organique soluble du sol. Cette chaîne microbienne aurait un impact sur la biomasse végétale produite, tel le rendement en paille.

Tableau 23. Niveau de relation (Test Adonis) entre les diversités bactérienne et eucaryotique et diverses variables étudiées dans le projet.

Variables	Diversité bactérienne		Diversité eucaryotique	
	r ²	p	r ²	p
Rendement en grains	0,059	0,040	0,050	0,102
Rendement en paille	0,144	0,001	0,093	0,010
Respiration microbienne	0,064	0,031	0,092	0,003
Uréase	0,248	0,001	0,164	0,001
Ctot soluble	0,173	0,001	0,114	0,001
Corg soluble	0,164	0,001	0,096	0,005

3.3 POTENTIEL ALIMENTAIRE DES GRANULES

3.3.1 Potentiel nutritif

La caractérisation des granules d'un point de vue nutritif est présentée au [Tableau 24](#) et comparée à une valeur référence, celle du maïs. L'analyse des fractions Br, FL et Gr a permis de confirmer que la protéine, beaucoup plus faible dans les granules comparativement au produit broyé avant le pressage, se retrouve bel et bien dans la FL. En effet, tel qu'on peut le voir au [Tableau 25](#), on constate que la FL, lorsqu'on l'étudie sur une base de 100% MS possède près de 50% de protéine. Ceci nous permet de conclure que dans la Pdt, la majorité de la protéine qui s'y trouve est constituée de protéine soluble. Bien que cette confirmation soit intéressante dans l'alimentation des ruminants avec de la Pdt entière ou broyée, l'avenue de la solubilité de la protéine ne sera pas discutée ici puisque le but du présent projet était de se pencher sur les granules de Pdt. Ces derniers contiennent donc plus d'amidon que la fraction broyée avant pressage. Les granules en alimentation animale vont donc consister en un apport énergétique de source glucidique.

Au niveau porcin, l'inclusion de Pdt est documentée depuis longtemps. Whittemore (1977) dans sa revue, rapporte que la protéine de la Pdt contient des inhibiteurs de protéase ce qui affecte la digestibilité de la Pdt crue. Ces facteurs antinutritionnels sont par contre dénaturés et donc inactivés à la cuisson. Dans les granules de Pdt, la majorité de la fraction protéine susceptible de contenir les inhibiteurs de protéase, est transférée dans la FL. De plus, le processus de granulation produit de la chaleur qui pourrait être suffisante pour inactiver les possibles facteurs antinutritionnels restants. Évidemment, cela n'était pas l'objectif de ce projet et d'autres études seraient nécessaires pour préciser tout cela.

L'énergie métabolisable pour le porc, de la Pdt déshydratée se situe à 3581 kcal/kg de MS (NRC 1982). Bien que le projet n'ait pas permis la mesure énergétique des granules de Pdt en alimentation porcine, il est probable que la valeur rapportée plus haut pour les Pdt déshydratées soit très proche de celle se retrouvant dans les granules du présent projet.

Par ailleurs, des études plus récentes rapportent des effets bénéfiques de l'utilisation de l'amidon de Pdt chez le porc. Lösel et Claus (2005) ont rapporté des effets bénéfiques de l'incorporation de 30 à 40 % d'amidon de Pdt crue particulièrement dans la dernière semaine d'engraissement. Les effets bénéfiques rapportés ont trait à une réduction des odeurs désagréables dégagées lors de la cuisson de la viande. Chez le porcelet, l'incorporation de 7 % d'amidon de Pdt dans la ration post-sevrage diminuait les diarrhées lors de cette période (Bhandari et coll. 2009). Les auteurs ont démontré qu'il était possible de remplacer les antibiotiques dans les aliments de sevrage utilisés pour prévenir la diarrhée post-sevrage par un aliment non médicamenteux. Les consommateurs accordent de plus en plus d'importance à une utilisation plus restreinte des antibiotiques en production animales. Nous avons donc deux avenues possibles de l'utilisation des granules de Pdt dans l'alimentation porcine comme aliment fonctionnel au niveau intestinal. Évidemment, nos granules ne contiennent pas que de l'amidon et on ne peut dire à ce stade-ci jusqu'à quel point l'amidon a subi une cuisson lors de la granulation. Cependant, des recherches ultérieures nous permettraient de vérifier si les granules de Pdt, que nous sommes en mesure de produire, ont des propriétés nutraceutiques telles que rapportés ci-haut. Dans de tels cas, il serait possible de valoriser ce résidu en lui donnant une valeur ajoutée supérieure à sa valeur nutritionnelle proprement dite.

Au niveau des ruminants, on rapporte une énergie nette d'entretien de 1,91 Mcal/kg (NRC 1982). Des études chez la vache laitière (Eriksson et coll. 2004) ont rapporté une baisse de consommation volontaire de matière sèche de 900 g par jour, lorsque les vaches recevaient 20 % de leur ration de concentrés en Pdt crue. Les auteurs ont exploré la possibilité de la MS de l'ensilage ou de la ration totale servie pour expliquer cette observation, mais n'ont pas été en mesure de faire un lien réel avec leurs résultats de recherche. Serait-il possible que les inhibiteurs de protéase dans la Pdt crue aient affecté les microbes du rumen? C'est une hypothèse qui n'a pas été évaluée dans cette étude. Au niveau des granules, tel que mentionné plus haut, la protéine est très majoritairement soluble et coule dans la FL. On se retrouve alors avec un produit sec d'une part et d'autre part un produit qui a chauffé un peu pour dénaturer possiblement des facteurs antinutritionnels résiduels et cette cuisson même partielle peut aussi favoriser une utilisation différente dans le microbiote du rumen. Des études plus poussées pourraient permettre de vérifier ces hypothèses.

Chez les veaux, Whittemore (1977) dans sa revue rapporte des fèces plus liquides avec l'inclusion de Pdt crue dans leur ration. La Pdt cuite selon cet auteur possède l'énergie à une teneur comparable au maïs et ne semble pas poser la problématique intestinale de l'ingrédient cru. Encore ici, dû à notre procédé de fabrication des granules, il est possible que le problème de légère diarrhée rapporté par Whittemore (1977) chez les veaux ne s'applique pas à la situation. Des études ultérieures permettraient de vérifier cette hypothèse.

Au niveau des bovins de boucherie en parcs d'engraissement, Nelson et coll. (2000) ont incorporé des Pdt ensilées dans des rations pour bouvillons, soit à base de maïs ou d'orge. Bien qu'ils n'ont pas rapporté de baisse de performance jusqu'à un taux d'incorporation de 20% de la matière sèche de la ration, un taux d'incorporation de 10% de Pdt semble être optimal pour les performances de gain et de consommation alimentaire. Après l'abattage

de ces animaux, la qualité des carcasses n'a pas été influencée par l'incorporation de Pdt dans les rations (Nelson et coll. 2000). Toutefois, au niveau de la qualité de la viande produite, l'incorporation de Pdt dans les rations a produit certains effets bénéfiques, tels que rapporté par un jury expert de dégustation (Bushboom et coll. 2000), mais non rapportés par un jury composé de consommateurs non experts. Dans ces études, on a utilisé toujours des Pdt complètes dont la composition diffère des granules produits du présent projet, tel que discuté plus haut. Toutefois, comme nous sommes en présence d'un produit sec qui se manipule facilement et qui contient de l'amidon probablement partiellement cuit, il serait hypothétiquement possible de l'introduire dans des rations pour bouvillons en croissance et finition à un taux d'incorporation d'au moins 10 % sans avoir d'impact négatif sur la croissance ou la viande ultimement issue de ces animaux. À cet égard, voici un exemple facile à calculer. Si on a des animaux qui consomment 10 kg de matière sèche et que l'on incorpore 10% de granules dans la ration, on a donc 1 kg de granules par bouvillon par jour. Si on considère un parc de 1000 animaux, donc une consommation de 1000 kg (1 tonne) par jour. Sur cette base, les parcs d'engraissement peuvent donc constituer une avenue intéressante pour une utilisation de masse, telle qu'illustrée dans l'exemple précédent. Il ne semble toutefois pas possible d'espérer une valeur ajoutée détectable par le consommateur suite à l'utilisation de Pdt dans l'alimentation des bouvillons d'abattage (Bushboom et coll. 2000).

En résumé, en ce qui a trait à l'alimentation animale, les granules de Pdt possèderaient une valeur énergétique de source glucidique, comparable à celle du maïs, avec toutefois une valeur protéique d'un peu moins de la moitié de celle du maïs. Rapidement, l'incorporation de grandes quantités de granules de Pdt pourraient être incorporées dans les rations pour bouvillons d'abattage. Ceci pourrait permettre un débouché rapide pour écouler de grandes quantités. Il faut cependant rester conscient que les parcs d'engraissements cherchent constamment des produits à faibles coûts et qu'aucune valeur ajoutée aux granules ne pourrait être envisageable dans ce contexte. L'incorporation des granules de Pdt dans d'autres catégories ou espèces animales pourrait permettre d'obtenir une valeur ajoutée, le porcelet étant probablement l'avenue la plus prometteuse dans ce sens, pour remplacer les antibiotiques. Toutefois, des études supplémentaires restent essentielles pour explorer cette voie.

Enfin, au niveau de la composition minérale ([Tableau 26](#)), toutes les valeurs moyennes sont sous les seuils maximaux tolérables recommandés. Par contre, quelques résultats révèlent des valeurs atteintes par certains échantillons au-delà des seuils (valeurs maximales, [Tableau 26](#)). Observations faites pour l'aluminium et pour le fer. Ces données méritent une exploration plus approfondie des causes. Il est probable que ces niveaux soient occasionnés par l'équipement expérimental utilisé. Un contrôle des points critiques devrait être envisagé pour éviter que des niveaux trop élevés de métaux rendent le produit impropre à la consommation animale.

Tableau 24. Composition des granules de Pdt déclassées (base sèche).

Nutriment	unités	min	max	moyenne sur 15 analyses	patate entière	Maïs
PB (Nx6,25)	%	2,6	4,0	3,4	10,5	9,4
ADF	%	2,4	3,2	2,7	5,0 ¹	3,4
NDF	%	3,1	5,9	4,0	3,1-3,4 ²	9,5
Cendres	%	1,6	3,1	2,5	4,3 ³	1,5
UNT rum. ⁴	%			89,1	82,0	85
ED rum ⁴	Mcal/kg			3,76	3,51	3,69
EM rum ⁴	Mcal/kg			3,35	3,09	3,27
EN ⁴	Mcal/kg			2,06	1,98	1,96

¹<http://www.gov.mb.ca/agriculture/livestock/production/beef/print,extending-livestock-feed-supplies-section-three.html#3>

²Bach et al. 2012 Euphytica. 187 :77-86

³Gumul et al. 2011. Acta Sci. Pol., Technol. Aliment. 10 : 73-81

⁴ valeurs énergétiques pour les bovins calculés avec les équations de NRC 2001 et 1989

Tableau 25. Résultats d'analyse des diverses fractions de Pdt déclassées (%), sur une base 100 % de matière sèche.

Nutriments	broyée avant pressage ¹	fraction liquide ²	granule ³	Pdt entière	Maïs
Matière sèche (%)	18,2	5,1	90,5		
Protéine (Nx6,25) (%)	9,2	47,8	3,6		
Lipides (%)	0,2	0,44	0,3		
Amidon (%)	65,1	3,23	74,7		
UNT rum ⁴			89,1	82,0	85,0

¹Moyenne de 17 analyses

²Moyenne de 16 analyses

³Moyenne de 18 analyses

⁴Valeur énergétique pour les bovins calculés avec les équations de NRC 2001 et 1989

Tableau 26. Composition minérale et valeur max tolérable des granules de Pdt déclassées (base MS).

Nutriments	unités	min	max	moyenne sur 15 analyses	Maximum tolérable ¹
Calcium	%	0,01	0,03	0,02	1,5
Phosphore	%	0,1	0,1	0,1	0,7
Magnésium	%	0,03	0,05	0,04	0,6
Potassium	%	0,6	0,7	0,65	2,0
Cuivre	mg/kg	3,5	7,2	4,6	40 ²
Fer	mg/kg	65	724	304	500
Manganèse	mg/kg	7,1	24	12	2000
Zinc	mg/kg	7,3	14,5	10,8	500 ³
Aluminium	mg/kg	50	1152	445	1000
Bore	mg/kg	8,5	15,3	12,0	150

¹ NRC (2005)

²valeur bovin; ovin plus sensible, max 15ppm

³ valeur bovin; ovin plus sensible, max 300ppm

3.3.2 Salubrité et potentiel prébiotique

Aucun microorganisme pathogène n'a été détecté dans les 18 échantillons de granules et les populations d'*E. coli* étaient sous la limite de détection pour tous les échantillons. Pour ce qui est de la bouillie, de faibles populations d'*E. coli* ont été dénombrées dans trois échantillons sur dix-huit (variant entre 9 et 18 UFC/g), les autres échantillons étant sous la limite de détection. *Salmonella* spp. n'a été trouvée dans aucun échantillon. Par contre, la présence de *Listeria monocytogenes* a été observée dans tous les échantillons de bouillie analysés. Après confirmation de l'identification des bactéries, une caractérisation des souches a permis de vérifier si elles sont reliées entre elles ou si elles ont différentes origines. Le sérotypage et sérogroupage des souches ont été réalisés au laboratoire de la Chaire de recherche en salubrité des viandes de l'Université de Montréal. Les résultats sont présentés au [Tableau 27](#). Il n'y a pas de lien entre les sérotypes retrouvés et les campagnes de granulation, puisque des sérotypes différents ont été détectés lors d'une même campagne.

Tableau 27. Caractérisation des souches de *Listeria monocytogenes* isolées dans les échantillons de broyats.

Granulation	Dates de prélèvement	Sérogroupe	Sérotypes
1	2014-07-14	IIa	1/2a
	2014-07-14	IIa	1/2a
	2014-08-04	IVb	4b/4e
	2014-08-04	IVa	4c
	2014-08-18	IIa	1/2a
	2014-08-18	IIa	1/2a
2	2014-12-01	IIa	1/2a
	2014-12-01	IIa	1/2a
	2015-03-22	IIa	1/2a
	2015-03-22	IIa	1/2a
	2015-05-19	IIa	1/2a
	2015-05-19	IVa	4c

Ces résultats indiquent que le procédé de granulation, par les températures et les conditions de séchage rencontrées, assure un contrôle des microorganismes à l'étude. Un suivi de la température au niveau de la matrice perforée du granulateur a entre autres montré que la matière était chauffée à 100°C pendant les quelques secondes où elle traverse la matrice. Par contre, des pratiques réduisant les risques de contamination croisée lors du processus de transformation doivent être prises par les utilisateurs afin de ne pas contaminer les granules. Des bonnes pratiques de fabrication telles que la désinfection régulière des installations doivent être observées. Des mesures de protection individuelle de base telles que le port de lunettes de sécurité et de gants pourraient également être proposées afin de protéger la santé des travailleurs.

Finalement, le contenu en solanine a été mesuré dans tous les échantillons (n=18) et un contenu moyen de 0,134 mg/kg de granules a été mesuré. La [Figure 42](#) présente la variabilité des résultats selon la date d'échantillonnage. À titre comparatif, Pedersen et Lindberg (2004) considèrent une diète à faible taux de glycoalcoïdes, dont la solanine est le principal représentant chez la Pdt, lorsque la teneur totale en solanine du produit de Pdt ajouté à

la ration est sous 50 mg/kg. Ces auteurs ont d'ailleurs conclu que l'ajout de ces Pdt à la ration de porcs (sous forme de protéines) à hauteur de 10 % n'avait pas eu d'impact sur le taux de conversion de ceux-ci. Toujours à titre comparatif, Santé Canada a régi la teneur maximale que les tubercules de Pdt devaient contenir en solanine, dans une optique de santé humaine. Ainsi, toutes les Pdt vendues au Canada ne doivent pas contenir plus de 200 mg/kg (Santé Canada 2017) de glycoalcaloïdes totaux. Bien que les granules produits dans le cadre de ce projet en contiennent beaucoup moins, il est possible que le contenu de granules produits avec des tubercules verdis soit davantage important. Une attention particulière devrait donc être portée lors de l'entreposage des Pdt afin que celles-ci ne soient pas exposées à la lumière.

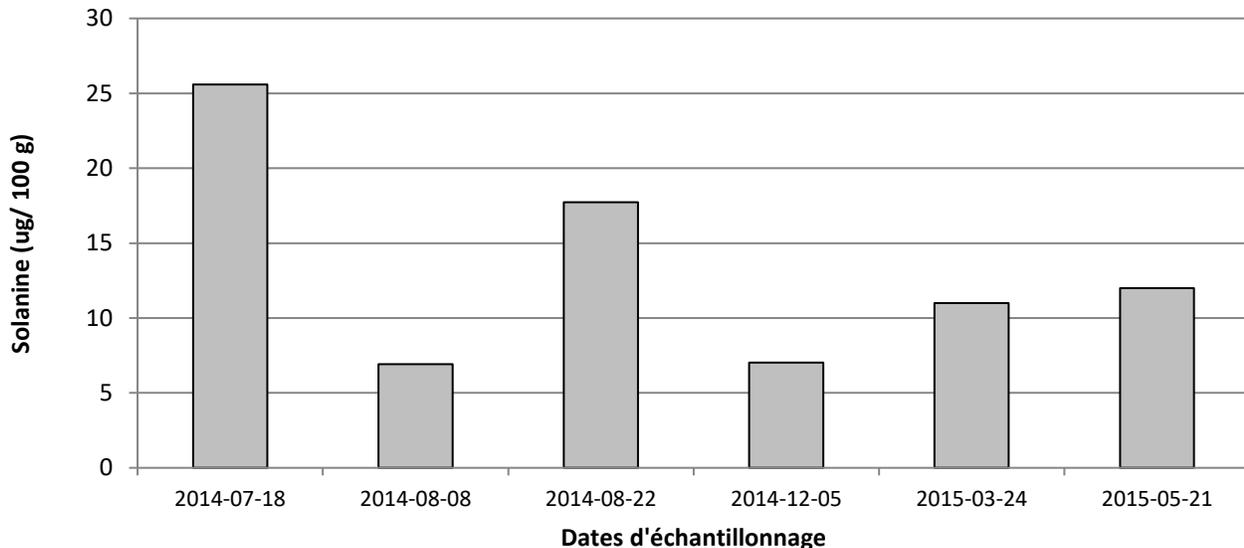


Figure 42. Teneur en solanine dans les granules de Pdt déclassées en fonction de la date d'échantillonnage.

Potentiel prébiotique

Les échantillons de granules ont été analysés pour cinq acides phénoliques pertinents (n=18), soit les acides vanillique, caféique, chlorogénique, férulique et cinnamique. Ces acides sont reconnus comme pouvant avoir un potentiel prébiotique, c'est-à-dire qu'ils amélioreraient la santé des individus en jouant un rôle positif sur leur flore intestinale. Lors de l'analyse, les pics propres à chaque acide (lignes colorées) correspondaient bien aux pics générés par les molécules standards (ligne pointillée), confirmant ainsi leur identification (Figure 43). Parmi les composés mesurés, c'est l'acide férulique qui a été retrouvé en plus grande concentration dans les échantillons (Figure 44), ce qui a également été rapporté par Adom et Liu (2002) pour le maïs et diverses céréales. L'acide chlorogénique n'a pas été détecté dans les échantillons, ayant été dégradée en acide caféique lors de l'hydrolyse.

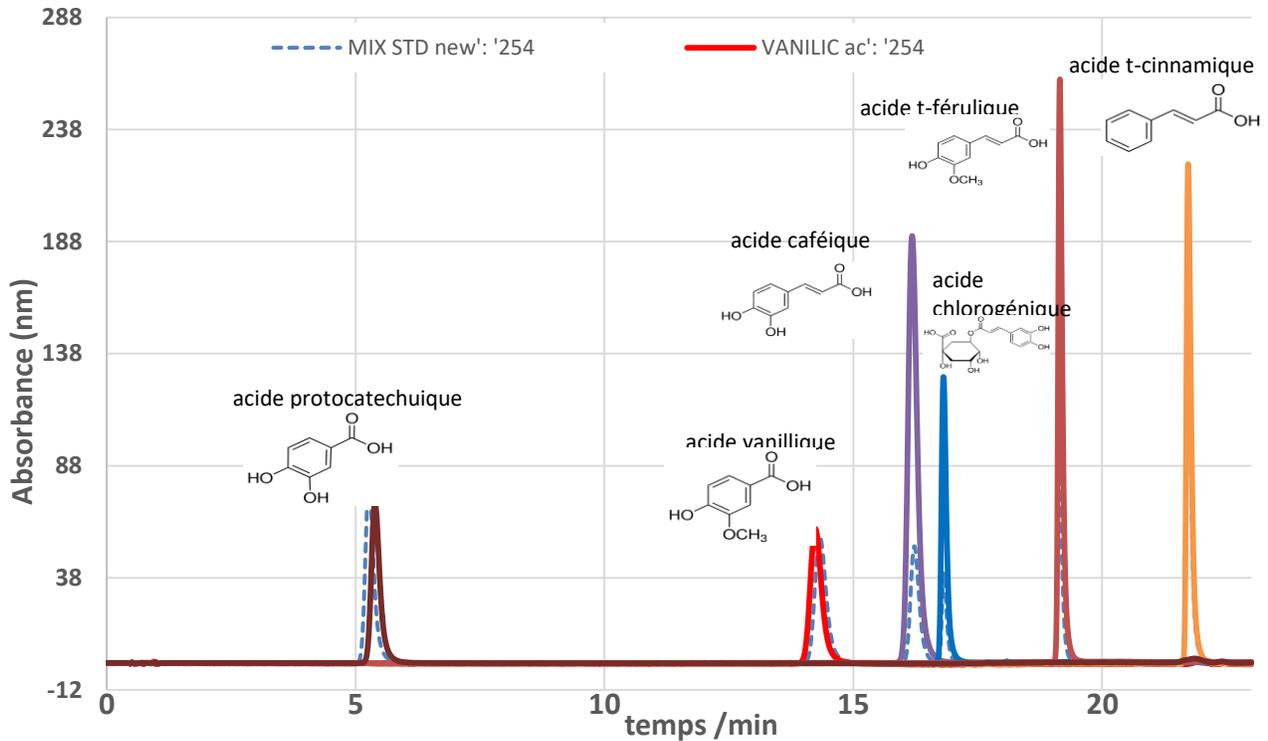


Figure 43. Chromatographe en phase liquide à haute performance incluant les courbes standards.

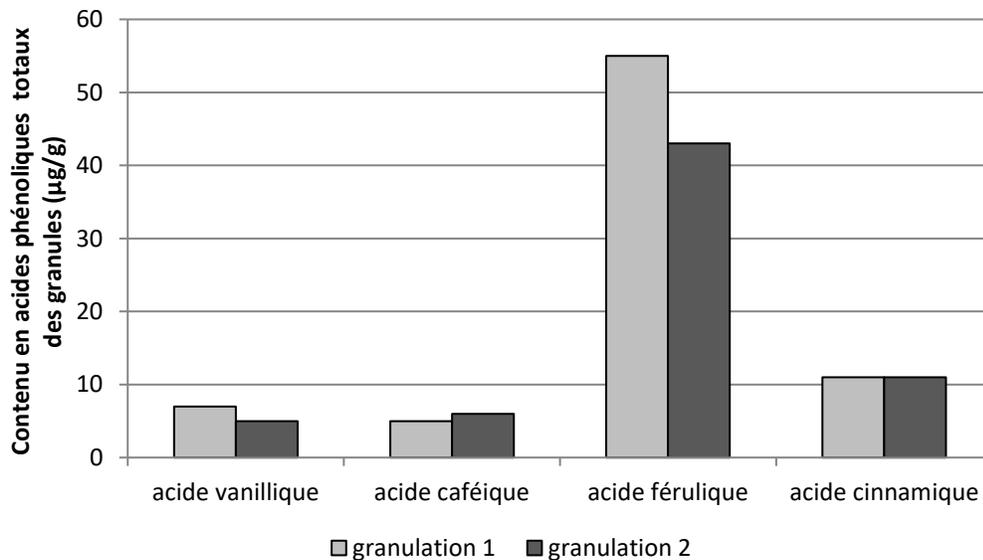


Figure 44. Teneurs en acides phénoliques totaux mesurés dans les granules de Pdt déclassés selon la campagne de granulation.

Le [Tableau 28](#) présente à titre comparatif les fourchettes de concentrations en acides phénoliques totaux rapportées par Lullien-Pellerin (2014) dans des céréales et celles mesurées dans les granules de Pdt. L'étude d'Adom et Liu (2002) a comparé les contenus en acides phénoliques totaux de maïs, blé, avoine et riz, et a rapporté que le maïs contenait les concentrations les plus élevées. Le contenu en acides phénoliques mesuré durant le projet de recherche est moins élevé dans les granules que dans les aliments conventionnels. Par contre, ceux-ci représentent une source différente de protéines (ex. potamine) et apportent aussi de l'amidon, deux composés ayant fait leurs preuves pour améliorer la santé des porcs.

Tableau 28. Contenu en acides phénoliques totaux (b.s.) de diverses céréales (Lullien-Pellerin 2014) et des granules de Pdt.

	Blé	Orge	Avoine	Seigle	Granules
Acides phénoliques totaux* (mg/g)	0,20 - 1,10	0,10 – 0,60	0,35 – 0,90	0,20 – 1,10	0,07

*Les types d'acides phénoliques mesurés dans les céréales ne sont pas indiqués dans l'étude, et il est possible qu'ils ne soient pas les mêmes que pour les granules de pommes de terre. Les données sont présentées à titre indicatif seulement.

3.4 POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DES GRANULES

3.4.1 Propriétés et paramètres recommandés pour les combustibles

Bien que la combustion est une des techniques les plus connues et maîtrisées parmi les systèmes de transformation de la biomasse en énergie, il y a encore plusieurs incertitudes lorsqu'il s'agit d'utiliser une biomasse autre que le bois. En effet, souvent, les biomasses agricoles ont des caractéristiques physico-chimiques problématiques pour les systèmes de combustion. Celles-ci sont liées à des problèmes aussi bien de nature technique qu'environnementale, notamment aux émissions plus importantes de particules et de gaz polluants ou toxiques, à la production de cendres en plus grande quantité et à la formation plus fréquente de mâchefers et de corrosion ([Tableau 29](#)). D'ailleurs, cela explique la position gouvernementale au Québec exprimée par le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA 2011) limitant l'utilisation de ces biomasses.

Quant à la pyrolyse, son développement comme système de valorisation énergétique de la biomasse est en plein essor. Cette technologie permet l'obtention d'une huile pyrolytique (ou biohuile) étant de grand intérêt dû à son potentiel énergétique (pouvoir calorifique d'autour de 18 MJ/L) et sa composition en produits chimiques de grande valeur (Agrinova 2009). Il existe quelques systèmes de chauffage industriel alimentés à la biohuile et des recherches sont en cours pour traiter ce produit afin qu'il soit utilisable dans les moteurs diesel. Ainsi, la production d'une biohuile à partir de granules de Pdt serait de grand intérêt.

Tableau 29. Caractéristiques et éléments problématiques de la biomasse dans les systèmes de combustion

Caractéristiques ou éléments	Problèmes liés
	Dû à des hautes teneurs
Humidité	Réduction du pouvoir calorifique net Réduction de la durabilité de stockage
Cendres	Manipulation, utilisation et élimination des quantités importantes de cendres résiduelles Formation d'aérosols et émissions de particules
N	Émissions de NOx
Cl	Corrosion, émissions de HCl et de PCDD/F
S	Corrosion et émissions de SOx
K	Corrosion, formation de mâchefers et d'aérosols
Na	Corrosion, formation de mâchefers et d'aérosols
Métaux lourds	Formations d'aérosols et utilisation ou élimination des cendres résiduelles
	Dû à des faibles teneurs
PCS, PCI	Réduction de l'apport énergétique
Ca	Formation de mâchefers
Mg	Formation de mâchefers

PCDD/F : éléments toxiques généralement appelés dioxines et furanes. PCS et PCI : Pouvoir calorifique supérieur et inférieur, respectivement. Adapté de Obernberger et coll. 1998 et 2006 et van Loo et Koppejan 2008).

Pour les systèmes de combustion, afin de limiter les problématiques qu'engendrent les biomasses, plusieurs études et normes ont mené à l'établissement de valeurs limites pour certaines propriétés. Dès 1998, Obernberger émet des valeurs limites à respecter pour les teneurs en N, S, Cl, K, Na, Ca et Mg (Tableau 30). Par la suite, avec l'émergence des restrictions sur les émissions à la cheminée, plusieurs gouvernements européens ont mis sur pied des cadres de certification de la biomasse afin de promouvoir une utilisation responsable à l'égard de la qualité de l'air et de la santé de la population. C'est le cas de la France qui propose plusieurs classes de qualité pour le bois et les produits agricoles (Tableau 31)².

Pour la pyrolyse, la norme ASTM D7544-12 spécifie les caractéristiques des biocombustibles liquides de pyrolyse destinés à être utilisés dans les brûleurs industriels. Le Tableau 32 compile ces caractéristiques.

Tableau 30. Préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006).

Élément	N	S	Cl	K	Na	Ca	Mg
Unité	(% b.s.)			(% dans les cendres)			
Limite 1*	< 0,6	< 0,1	< 0,1	< 7	< 0,6	15-35	> 2,5
Limite 2*		< 0,2	< 0,3				

*La limite 1 est pour éviter de la corrosion et des émissions de HCl et la limite 2 pour éviter les émissions de SO_x et de PCDD/F

² Au Canada, la Wood Pellet Association of Canada a repris les valeurs de la certification Européenne ENplus pour créer une certification pour le bois sous l'appellation CANplus.

Tableau 31. Certification NF 444 (adapté de FCBA 2013).

Type de biomasse		Bois			Agricole	
		HP	QS	QI	HP	QI
Teneur en eau	% b.h.	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 11	≤ 15
PCI	MJ/kg	≥ 16,5	≥ 16,5	≥ 15,4	≥ 15,8	≥ 14,9
Densité apparente	kg/m ³	≥ 600	≥ 600	≥ 650	≥ 650	≥ 650
Durabilité mécanique	%	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 95	≥ 95	≥ 92
Particules fines ^a	%	≤ 1	≤ 1	≤ 3	≤ 2	≤ 3
Cendres	% b.s.	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3	≤ 5	≤ 7
TD	°C				≥ 1000	≥ 800
Cl	% b.s.	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,3
N	% b.s.	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1,5	≤ 2
S	% b.s.	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,2	≤ 0,2
As	mg/kg b.s.	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cu	mg/kg b.s.	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 40	≤ 40
Cr	mg/kg b.s.	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cd	mg/kg b.s.	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Hg	mg/kg b.s.	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Ni	mg/kg b.s.	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 15	≤ 15
Pb	mg/kg b.s.	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zn	mg/kg b.s.	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 60	≤ 60

b.h. : base humide. b.s : base sèche. HP : haute performance. PCI : pouvoir calorifique inférieur. QI : qualité industrielle. QS : qualité supérieure. TD : température de déformation. ^a < 3,15 mm après production à la sortie de l'usine.

Tableau 32. Propriétés de l'huile pyrolytique exigées par la norme ASTM D7544-09.

	Teneur en eau	pH	Teneur en solides	PCS	Viscosité cinématique à 40 °C	Densité à 20 °C	Soufre	Cendres	Point d'éclair	P.É
	(%)	-	(%)	(MJ/kg)	(mm ² /s)	(g/ml)	(%)	(%)	(°C)	(°C)
Exigence de la norme ASTM D7544	≤ 30	Déclarer	≤ 2,5	≥ 15	≤ 125	1,1 – 1,3	≤ 0,05	≤ 0,25	≥ 45	≤ -9

PCS : Pouvoir calorifique supérieur, P.É : Point d'écoulement

3.4.2 Caractéristiques de la biomasse : analyse préliminaire

Selon les caractéristiques présentées au [Tableau 33](#), les granules de Pdt et ceux de bois commercial sont sensiblement similaires. Les teneurs en C, H, O et N sont pratiquement égales. La teneur en humidité des granules de Pdt est légèrement supérieure (9,9 %) à celle des granules de bois (5,9 %), et le pouvoir calorifique supérieur est légèrement plus faible (14,7 et 17,8 MJ/kg_{b,h}). La plus grande différence a été dans la teneur en cendres, étant plus importante dans les granules de Pdt. Cela permet d'entrevoir que les granules de Pdt peuvent être brûlés assez facilement par le système de combustion, mais la production de cendres et de particules sera plus importante par rapport à la combustion des granules de bois.

Tableau 33. Humidité, pouvoir calorifique, et teneurs en cendres, en carbone, en hydrogène, en oxygène et en azote des biomasses étudiées.

Biomasse	Humidité (% b.s.)	PCS (MJ/kg _{b.h.})	PCI (MJ/kg _{b.h.})	Cendres	C (% b.s.)	H (% b.s.)	O	N
Granules de pomme de terre	9,9	14,7	13,1	2,45	44,1	6,9	56,8	0,519
Granules de bois	5,9	17,8	16,3	0,61	50,5	6,55	48,5	0,132

PCS : Pouvoir calorifique supérieur; PCI : Pouvoir calorifique inférieur

En revanche, au niveau de la teneur en éléments mineurs, les deux biomasses sont très différentes. D'un côté les teneurs en S, Cl, K, P, Mg, Al et Fe sont beaucoup plus élevées dans les granules de Pdt par rapport à celles du bois, et d'un autre côté, les teneurs en Na et en Ca sont beaucoup plus faibles (Tableau 34). Selon ces résultats et d'après le résumé présenté au Tableau 29, les granules de Pdt auraient un potentiel à produire de la corrosion et des émissions de SO_x, de HCl et de PCDD/F. De plus, malgré la teneur favorable en Na (faible) et en Mg (haute) pour empêcher la formation de mâchefers, cet effet est contré par les teneurs problématiques en K (haute) et en Ca (faible). Enfin, les teneurs en métaux lourds des biomasses sont sensiblement similaires (Tableau 35).

Tableau 34. Teneurs en éléments mineurs des biomasses étudiées.

Biomasse	S	Cl	K	Na	P (mg/kg _{b.s.})	Ca	Mg	Al	Fe
Granules de pomme de terre	469	494	6448	6,08	1134	198	326	265	340
Granules de bois	45,0	35,1	635	60,5	27,8	1181	171	19,9	20,7

Les valeurs des Tableaux 33 à 35 ont été comparées aux préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006), de la certification NF 444 (FCBA 2013) et de la certification du bois CANplus (WPAC, 2015) (Tableaux 36 à 38, respectivement). Un code de couleur a été instauré afin de discerner rapidement le respect ou non des différents critères :

- **Vert** : le premier seuil est respecté ;
- **Bleu** : le second seuil est respecté (si applicable) ;
- **Orangé** : le troisième seuil est respecté (si applicable) ;
- **Rouge** : le ou le(s) seuil(s) est (sont) dépassé(s).

Tableau 35. Teneurs en métaux lourds des biomasses étudiées.

Biomasses	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
	(mg/kg _{b.s.})					
Granules de pomme de terre	9,88	3,35	7,89	0,37	0,1	0,81
Granules de bois	1,19	1,21	12,4	0,66	0,08	0,13

Tableau 36. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction des préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006).

Éléments	N	S	Cl
Unités	(% b.s.)		
Granules de pomme de terre	0,519	0,047	< 0,05
Granules de bois	0,132	0,005	< 0,004

Tableau 37. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction de la certification NF 444 (adapté de FCBA 2013) pour la biomasse agricole.

Propriétés ou éléments	Humidité	PCI	Cendres	N	S	Cl	Cu	Cr	Cd	Ni	Pb	Zn
Unités	(% b.h.)	(MJ/kg _{b,h})	(% b.s.)	(mg/kg _{b,s})								
Biomasse agricole qualité HP	≤ 11	≥ 15,8	≤ 5	≤ 1,5	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 40	≤ 10	≤	≤ 15	≤ 10	≤ 60
Biomasse agricole qualité QI	≤ 15	≥ 14,9	≤ 7	≤ 2	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 40	≤ 10	0,5	≤ 15	≤ 10	≤ 60
Granules de pomme de terre	9,9	13,1	2,45	0,519	0,047	0,05	3,35	0,81	0,10	9,88	0,37	7,89
Granules de bois	5,9	16,3	0,61	0,132	0,005	< 0,004	1,21	0,13	0,08	1,19	0,66	12,4

Tableau 38. Évaluation des propriétés des biomasses en fonction de la certification du bois CANplus (WPAC 2015).

Propriétés ou éléments	Cendres	N	S	Cl	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
Unités	(% b.s.)				(mg/kg _{b,s})					
Bois HP	< 0,7	< 0,3	< 0,03	< 0,02						
Bois QS	< 1,5	< 0,5	< 0,03	< 0,02	< 10	< 10	< 100	< 10	< 0,5	< 10
Bois QI	< 3,0	< 0,5	< 0,08	< 0,05						
Granules de pomme de terre	2,45	0,519	0,047	0,049	9,88	3,35	7,89	0,37	0,10	0,81
Granules de bois	0,61	0,132	< 0,01	< 0,004	1,19	1,21	12,4	0,66	0,08	0,13

Notes : HP : haute performance; QI : qualité industrielle; QS : qualité supérieure.

En bref, il est possible d'observer que les caractéristiques des granules de bois ont respecté tous les paramètres évalués. Dans le cas des granules de Pdt, les préconisations d'Obernberger et coll. (1998, 2006) ont été respectés, mais certaines limites de la norme NF 444 et de la CANplus n'ont pas été atteintes. Pour la NF 444, le pouvoir calorifique inférieur des granules de Pdt serait trop faible (13,1 < 14,9 MJ/kg_{b,h}), et pour la CANplus, la teneur en N serait sensiblement trop haute (0,52 > 0,5 %). De plus, dans cette dernière norme, les teneurs en cendres, en S et en Cl des granules de Pdt ont respecté uniquement le troisième seuil, soit de la catégorie « Qualité industrielle » (le moins exigeant).

À la lumière de ces résultats, les granules de Pdt peuvent être utilisés comme combustible dans les systèmes de combustion, mais le risque de présenter des inconvénients est élevé. Premièrement, pour fournir la même quantité d'énergie, la biomasse de granules utilisée sera plus grande que pour les granules de bois. Deuxièmement, la manipulation, l'utilisation et l'élimination de quantités plus importantes de cendres résiduelles

sera une conséquence de la teneur élevée en cendres des granules de Pdt. De plus, étant donné que les cendres contenues dans la biomasse contribuent à la formation d'aérosols et de particules lors de la combustion, les émissions de ces éléments à la cheminée seront plus importantes. Troisièmement, il pourrait y avoir des émissions importantes de gaz nocifs et polluants. Enfin, il pourrait se former des mâchefers dans la chambre de combustion.

3.4.3 Test de combustion

Le test de combustion permet de vérifier certains des constats présentés lors de l'évaluation des granules de Pdt à la section précédente. Aux [Figures 45 à 48](#) il est possible de voir clairement les deux stades typiques d'un test de combustion. Le premier, le démarrage de la chaudière, identifié par des variations importantes de certains paramètres (par exemple, l'opacité de la fumée, le taux d'oxygène et la température dans la chambre de combustion). Ensuite, le stade de stabilisation de la combustion. Cette période a été identifiée entre des accolades dans chaque figure. Les données enregistrées à l'intérieur de ces périodes sont celles prises en considération pour l'analyse et la comparaison. Le [Tableau 39](#) résume les principales caractéristiques des tests de combustion.

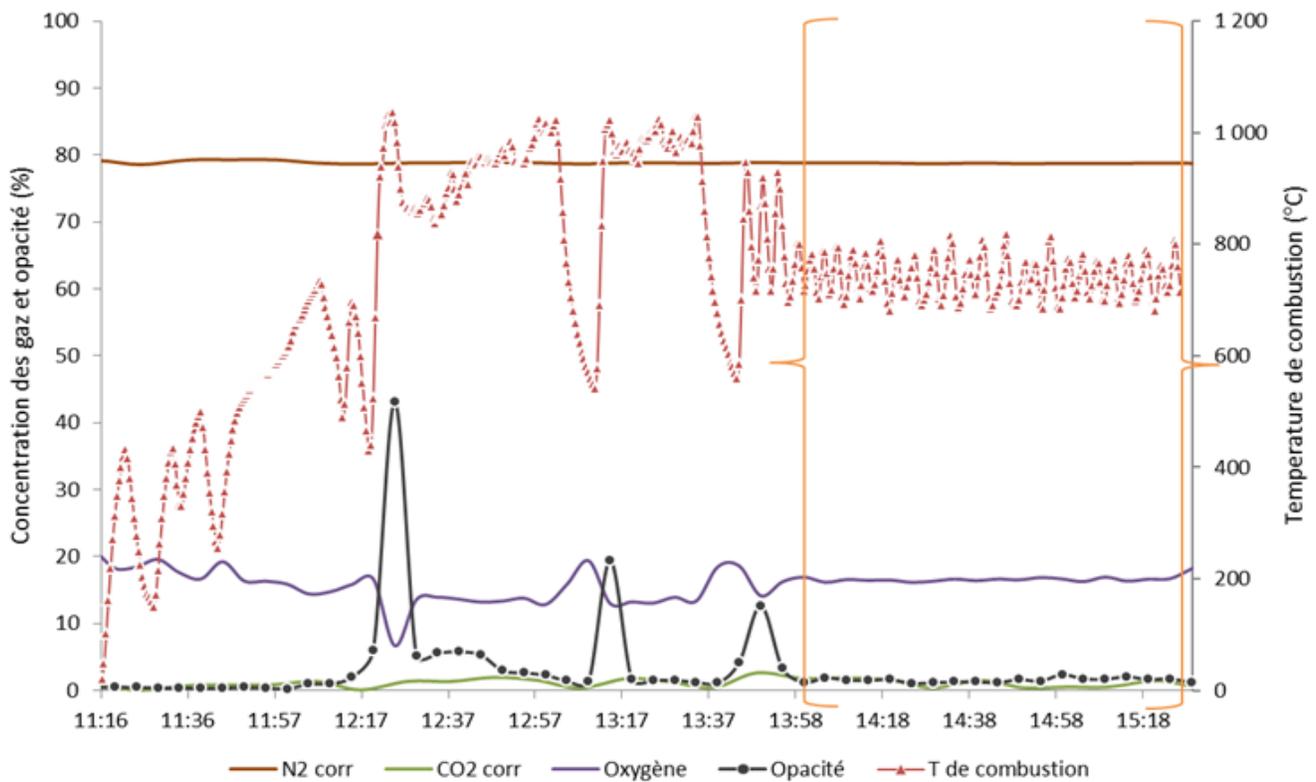


Figure 45. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 1^{er} test avec le bois.

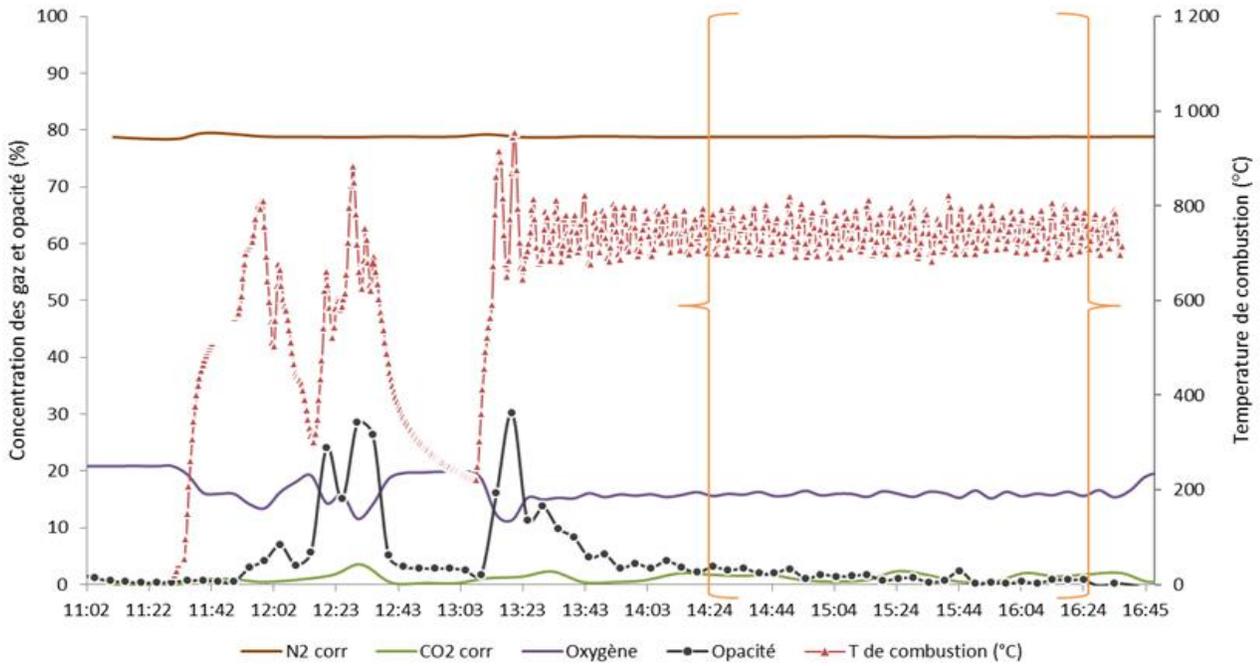


Figure 46. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 2^{ème} test avec le bois.

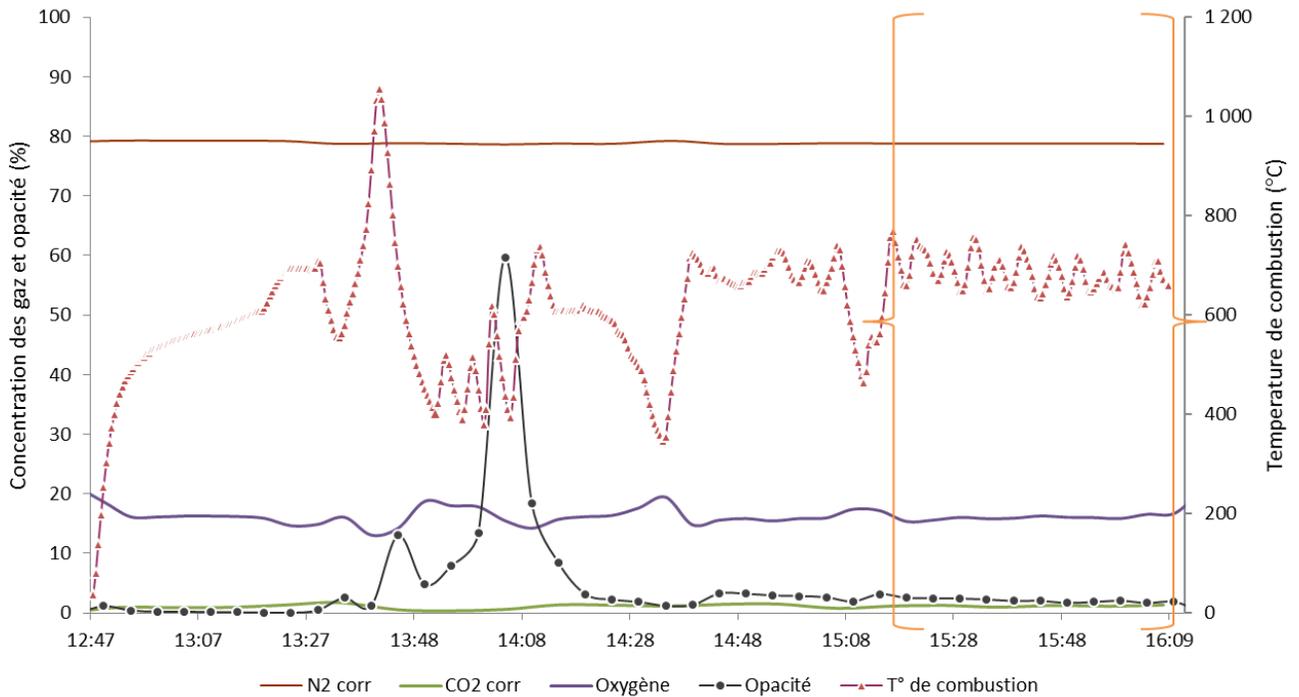


Figure 47. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 1^{er} test avec les granules de Pdt déclassées.

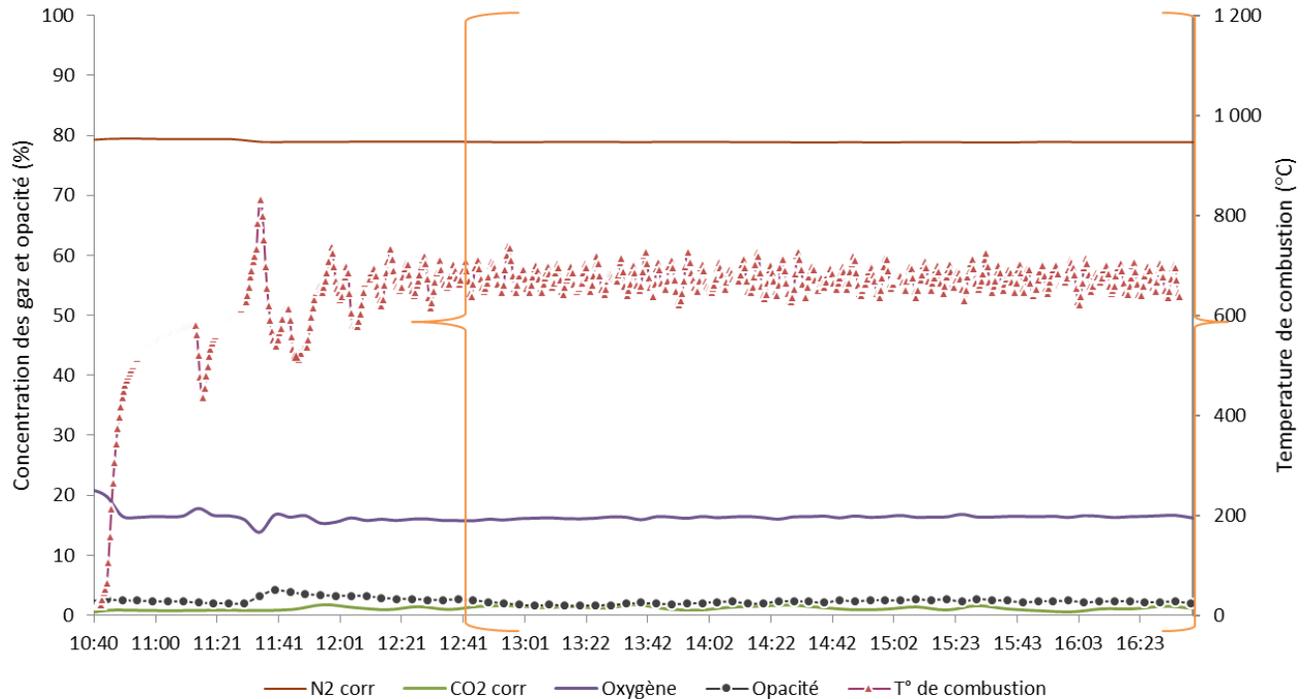


Figure 48. Concentrations des gaz, opacité et température de combustion du 2^e test avec les granules de Pdt déclassés.

Tableau 39. Résumé des caractéristiques des tests de combustion.

Biomasse	Période considérée	Granules de bois			Granules de Pdt		
		Test 1	Test 2	Moyenne	Test 1	Test 2	Moyenne
Durée (h)	Totale	4,2	5,7	4,9	3,4	6,3	4,8
	Stable	1,5	2,1	1,8	0,8	4,3	2,6
Biomasse brûlée (kg)	Totale	19,3	22,9	21,1	19	41	30,0
	Stable	6,4	9,4	7,9	6,9	30,5	18,7
Taux de combustion (kg/h)	Totale	4,6	4,0	4,3	5,6	6,5	6,1
	Stable	4,3	4,4	4,3	8,2	7,0	7,6
Température moyenne dans la chambre de combustion (°C)	Stable	740	745	743	689	674	681
Puissance moyenne de la biomasse brûlée (kW/30 s)	Stable	22,6	23,1	32,9	34,1	29,1	31,6
Puissance utile moyenne transmise à l'eau (kW/30 s)	Stable	13,4	12,4	14,9	15,8	15,8	15,8
Efficacité (%)	Stable	59,3	53,6	56,4	46,2	54,3	50,2

Selon les graphiques et le [Tableau 39](#), les granules de Pdt ont performé de façon très similaire et presque aussi bien que les granules de bois. Les principales différences remarquées pour les granules de Pdt par rapport aux granules de bois sont l'efficacité légèrement plus faible (50,2 % versus 56,4 %, respectivement) et le taux de

combustion plus élevée (7,6 versus 4,3 kg/h, respectivement). Ces différences sont respectivement liées à la teneur en humidité plus élevée et au plus faible pouvoir calorifique des granules de Pdt.

Les caractéristiques des flux de gaz à la cheminée durant la combustion des deux biomasses sont très similaires (Tableau 40). L'opacité, étant un des paramètres les plus importants, a été légèrement supérieure (2,2 %) à celle des granules de bois (1,4 %).

Tableau 40. Caractéristiques du flux au point d'échantillonnage des gaz.

Paramètre Unité	T chm (°C)	V chem m/s	O ₂	N ₂ (%)	CO ₂	Opacité (%)
Granules Bois – test 1	162	1,81	16,5	78,8	1,12	1,6
Granules Bois – test 2	169	0,87	15,9	78,8	1,32	1,2
Moyenne	165	1,34	16,2	78,8	1,22	1,4
Granules Pdt – test 1	208	0,88	16,0	78,8	1,16	2,1
Granules Pdt – test 2	195	0,81	16,3	78,9	1,21	2,2
Moyenne	201	0,85	16,1	78,8	1,19	2,2

T chm : température des gaz dans la cheminée ; V chem : Vitesse des gaz dans la cheminée ; Pdt : Pomme de terre

Les différences les plus remarquables ont été trouvées au niveau de la concentration et l'émission des particules (Tableau 41). En effet, la concentration des particules dans le flux de la combustion des granules de Pdt a été en moyenne de 587 mg/Nm³ à 7 % d'O₂ produisant une émission de 9,54 g/h, tandis que la concentration et l'émission de particules de la combustion des granules de bois ont été 138,7 mg/Nm³ et 2,77 g/h, respectivement. Au Québec, l'émission limite de particules pour une chaudière de cette capacité utilisant du bois est de 150 mg/Nm³ à 7 % d'O₂. Ainsi, lorsque les granules de bois respecteraient la norme, ce ne serait pas le cas pour la combustion des granules de Pdt. La limite est dépassée de pratiquement quatre fois. Possiblement, un appareil plus performant, équipé d'une deuxième chambre de combustion ou d'un système de dépoussiérage plus performant permettrait de réduire la concentration des particules suffisamment pour respecter la limite.

Tableau 41. Concentration et émission de particules.

Paramètres	Unités	Concentration (mg/Nm ³ , à 7% d'O ₂)	Émission (g/h)
Bois – test 1		-	-
Bois – test 2		139	2,77
Moyenne		139	2,77
Pomme de terre – test 1		-	-
Pomme de terre – test 2		587	9,54
Moyenne		587	9,54

La production de cendres a par contre été plus faible à la combustion des granules de Pdt que les granules de bois (Tableau 42), malgré la plus haute teneur en cendres dans les granules de Pdt (Tableau 33). Cependant, il est important de mentionner que des mâchefers de taille importante ont été retrouvés parmi les cendres récupérées

au foyer et au descendeur (Figure 49). Dans le cas d'une utilisation de plus longue durée, la combustion des granules de Pdt peut former une quantité de mâchefers aussi importante pouvant déclencher le mal fonctionnement ou l'arrêt de l'appareil de combustion. D'ailleurs, le poids des mâchefers a été remarquablement faible. Cela pourrait être en lien avec la quantité massique plus faible de cendres aperçue.

Tableau 42. Taux de production de cendres récupérées au foyer et au descendeur (CF), du cendrier sous l'échangeur (CE) et du cendrier sous la cheminée (CC).

Cendres	Foyer et descendeur	Sous l'échangeur de chaleur	Cendrier sous la cheminée	Total
	(g _{cendres} /kg _{biomasse b.h.})			
Bois – test 1	83,0	1,1	0,4	84,5
Bois – test 2	54,9	1,3	0,5	56,7
Moyenne	68,9	1,2	0,45	70,6
Pomme de terre – test 1	-	-	-	-
Pomme de terre – test 2	24,3	5,4	1,6	31,3
Moyenne	24,3	5,4	1,6	31,3



Figure 49. Échantillon de mâchefers retrouvés suite à la combustion des granules de Pdt déclassées.

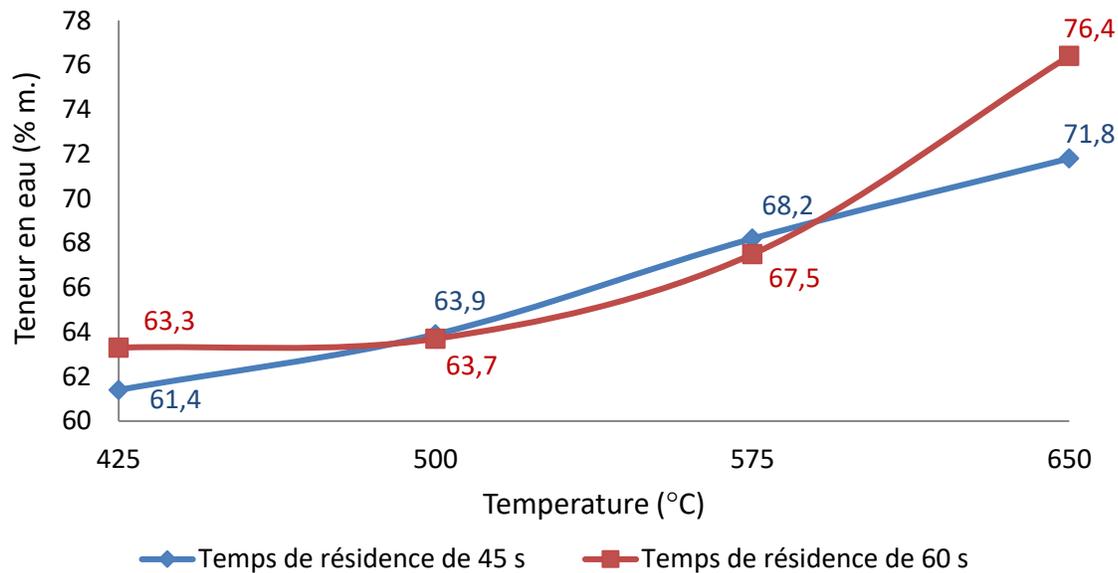
3.4.4 Test de pyrolyse

Le plus haut rendement en biohuile de Pdt (50 %) a été obtenu à 500 °C et à un temps de résidence de 45 secondes. Dans ces conditions, les rendements en biocharbon et en gaz non condensable ont été de 23 % et 28 %, respectivement (Tableau 43). Au-dessus de 500 °C, lorsque la température augmente, le rendement en biohuile tend à diminuer. D'ailleurs, la plus grande quantité de biohuile a été collectée au deuxième condensateur (91% en moyenne).

Tableau 43. Rendement en biohuile des tests de pyrolyse.

Températures		Rendement (%)			
		425 °C	500 °C	575 °C	650 °C
Temps de résidence de 45 s	% m.	48	50	44	45
Temps de résidence de 60 s	% m.	45	49	49	43

La teneur en eau des biohuiles (du deuxième condensateur) ont varié entre 61,4 et 76,4%. Elle a augmenté au fur et à mesure que la température de pyrolyse a augmentée (Figure 50). Étant donné que la teneur en eau influence le pouvoir calorifique de l'huile, ce paramètre a eu priorité dans la sélection de l'huile pour l'analyse complète. Ainsi, l'huile ayant la teneur en eau la plus faible (61,4 % m.), produite à 425 °C et avec un temps de résidence de 45 s, a été sélectionnée pour l'analyse complète.

**Figure 50. Teneur en eau des huiles pyrolytiques.**

Pour ce qui est de la pyrolyse du bois, le rendement le plus élevé en biohuile (57%) a été obtenu à une température de pyrolyse de 600 °C. Dans ces conditions, les rendements en biocharbon et en gaz non condensable ont été de 22 % et 21 %, respectivement. Le Tableau 44 compare les caractéristiques de cette biohuile et de la biohuile de la pyrolyse de Pdt sélectionnée avec les seuils de la norme ASTM D7544. Un code de couleur a été instauré afin de discerner rapidement le respect ou non des différents critères :

- **Vert** : le seuil est respecté ;
- **Orangé** : le seuil est légèrement dépassé ;
- **Rouge** : le seuil est dépassé.

Tableau 44. Seuils de la norme ASTM D7544 et caractéristiques de l’huile pyrolytique de Pdt déclassées et du bois.

	Teneur en eau (%)	pH	Teneur en solides (%)	Pouvoir calorifique supérieur (MJ/kg)	Densité à 20 °C (g/ml)	Soufre (%)	Cendres (%)	Point d’éclaircissement (°C)
Seuil de la norme ASTM D7544	≤ 30	Rapporter	≤ 2,5	≥ 15	1,1 – 1,3	≤ 0,05	≤ 0,25	≥ 45
Biohuile de Pdt	61,4	2,59	0,097	7,3	1,08	103	< 0,01	102
Biohuile de bois	28,1	1,98	0,02	14,7	1,18	24,1	< 0,01	104

n.d : paramètre non déterminé

Lors de la pyrolyse, des molécules d’eau sont formées et condensées avec l’huile pyrolytique. Selon les résultats du [Tableau 44](#), il est possible d’affirmer que les granules de Pdt favorisent la formation d’eau par rapport à la pyrolyse de bois. Cet effet se produit de façon si importante pour la pyrolyse des granules de Pdt, que les seuils de la norme concernant la teneur en eau et le pouvoir calorifique (paramètre étroitement lié à la teneur en eau) sont surpassés amplement. Comparativement, l’huile pyrolytique du bois respecte pratiquement tous les seuils, même si elle a été sélectionnée pour l’analyse complète seulement sur la base du rendement, et non de la teneur en eau. Ainsi, l’huile pyrolytique des granules de Pdt telle quelle, ne peut pas être utilisée en tant que combustible dans le système de combustion de mazout ou de diesel. Il existe par contre des techniques de séparation permettant de réduire la teneur en eau dans l’huile. Il serait donc intéressant d’évaluer une telle procédure afin de valoriser les granules de Pdt pour la production d’huile pyrolytique.

3.5 ANALYSE ÉCONOMIQUE DE SUBSTITUTION

La valorisation économique du procédé de granulation des Pdt fraîches réside dans le potentiel de substitution des granules. Trois voies de valorisation par substitution ont été étudiées. Toutefois, comme la voie sur l’alimentation animale semble la plus profitable à ce stade de recherche, l’analyse économique porte uniquement sur cette voie de substitution. Cependant, de futurs travaux de recherches pourraient fournir des résultats justifiant d’inclure les voies de valorisation de fertilisation ou énergétique dans de futures analyses économiques. Ainsi, le scénario de base retenu dans ce projet pour l’analyse économique est celui de la valorisation des granules de Pdt pour l’alimentation des bovins de boucherie ou celle des porcs. Dans le cas de l’alimentation porcine cependant, il faut retenir que le potentiel se présenterait surtout chez les entreprises fabricant leur moulée à la ferme tant qu’une chaîne de production plus industrielle n’est pas développée. Il en est ainsi car on peut douter que les volumes seraient suffisants pour être utilisés par les meuneries commerciales lors du début du développement de la filière des granules de Pdt.

3.5.1 Analyse de substitution

Tel que présenté dans la section 3.3.1, les granules de Pdt offre une valeur riche en énergie, mais moins intéressante en protéine. Dans l’alimentation des bovins de boucherie et des porcs, on pourrait croire que les

granules pourraient substituer le maïs-grain à 100 % sur la base de leur teneur en énergie. Toutefois, un manque de protéine apparaîtrait dans la ration. Il faut donc inclure dans le calcul de substitution l'ajout de tourteau de soya comme apport en protéine. Le scénario pour le calcul de substitution choisi est le suivant : une tonne de maïs-grain peut être substituée par 875 kg de granules de Pdt et 125 kg de tourteau de soya (Cinq-Mars 2017; *communication personnelle*). Mathématiquement, la valeur économique des granules sur la base de leur valeur alimentaire se calcule selon les équations (1) à (4). Tout d'abord, le coût du maïs-grain est tel que dans l'équation (1).

$$c_m = q_m \times p_m \quad (1)$$

Où : c_m , le coût du maïs-grain;
 q_m , la quantité de maïs-grain achetée;
 p_m , le prix du maïs-grain;

L'équation (2) illustre le fait que le coût de substitution ne doit pas dépasser le coût du maïs-grain.

$$c_m = q_m \times p_m = (q_g \times p_g) + (q_t \times p_t) \quad (2)$$

Où : q_g , la quantité de granules de Pdt achetée;
 p_g , le prix des granules de Pdt;
 q_t , la quantité de tourteau de soya
 p_t , le prix du tourteau de soya;

Ainsi, pour l'achat d'une tonne de maïs-grain, l'équation (2) devient l'équation (3), qui est elle-même transformée pour donner l'équation (4).

$$p_m = 0,875p_g + 0,125p_t \quad (3)$$

$$p_g = \frac{p_m - 0,125(p_t)}{0,875} \quad (4)$$

Pour des prix de 200 et 450 \$/tonne (\$/t) respectivement pour le maïs-grain et le tourteau de soya, le prix des granules de Pdt sur la base de leur valeur nutritionnelle est de 164 \$/t¹.

3.5.2 Économie du coût de transport

Pour les raisons évoquées précédemment, une économie du coût de transport s'ajoute à la valeur économique alimentaire des granules. Le calcul se fait simplement en utilisant le taux de conversion entre les Pdt fraîches et les granules.

$$ct_{pat} - ct_g = (q_{pat} \times cut) - (q_g \times cut) \quad (5)$$

Où : ct_{pat} , le coût de transport des Pdt;
 ct_g , le coût de transport des granules;

¹ $\frac{200 - 0,125(450)}{0,875} = 164,28$

q_{pdt} , la quantité de Pdt;

q_g , la quantité de granules;

cut , le coût unitaire de transport des Pdt (par tonne);

Ainsi, pour une tonne de Pdt, l'équation (5) devient :

$$cut_{pdt} - (0,152 \times cut_g) \quad (6)$$

Les *Références économiques* du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ 2010b) rapporte que le coût de transport des Pdt est de 26,46 \$/t et une fois indexé à l'année 2015, ce montant est plutôt de 30,76³. Dans ce contexte, l'économie de coût de transport est de 26,09 \$/t.

3.5.3 Coût de granulation

Avec les calculs faits aux deux étapes précédentes, le coût cible se chiffre à 190 \$/t, soit simplement l'addition du prix des granules et de l'économie de coût de transport. Cela signifie qu'à l'échelle de la ferme, le procédé devrait permettre au producteur de granuler ses Pdt déclassées à moins que 190 \$ par tonne de granules. En utilisant le taux de conversion, ce coût cible est de 29 \$ par tonne de Pdt fraîches.

Évidemment, tel que mentionné précédemment, il y a certains éléments d'incertitude. Le prix du maïs-grain et du tourteau de soya sont les principaux éléments. Le [Tableau 45](#) offre une analyse de sensibilité en fonction de différentes variations de ces prix. On constate qu'en fonction des différents prix, le coût cible est pratiquement multiplié par 2,5 (105 \$/t vs 251 \$/t) selon que le contexte est favorable à l'utilisation des granules ou non. Cette variation importante illustre bien le fait que le procédé aura plus de chance d'être concurrentiel dans le contexte où le prix du maïs-grain augmente et celui du tourteau de soya diminue. Évidemment, le procédé sera d'autant plus concurrentiel que le coût du procédé de granulation sera réduit.

Tableau 45. Analyse de sensibilité du coût cible de granulation des Pdt déclassées (\$/tonne de granules).

	Prix du maïs	150	175	200	225	250
Prix du tourteau de soya	425	137 \$	165 \$	194 \$	222 \$	251 \$
	450	133 \$	162 \$	190 \$	219 \$	247 \$
	475	130 \$	158 \$	187 \$	215 \$	244 \$
	500	126 \$	155 \$	183 \$	212 \$	240 \$
	525	122 \$	151 \$	180 \$	208 \$	237 \$
	550	119 \$	147 \$	176 \$	205 \$	233 \$
	575	115 \$	144 \$	172 \$	201 \$	230 \$
	600	112 \$	140 \$	169 \$	197 \$	226 \$
	625	108 \$	137 \$	165 \$	194 \$	222 \$
	650	105 \$	133 \$	162 \$	190 \$	219 \$

³ Dans son *Étude sur le coût de production Pommes de terre 2014*, le Centre d'étude sur les coûts de production en agriculture a trouvé un coût de transport de 28,82 \$/tonne.

Dans cette analyse, la notion de coût cible repose sur la logique suivante. La situation initiale présumée est que pour plusieurs producteurs de Pdt, la disposition des Pdt déclassées vers une entreprise de production animale est faite sans transaction monétaire, c'est-à-dire que le producteur de Pdt donne ses Pdt déclassées et l'entreprise de production animale assume le coût de transport. Or, si le procédé de granulation est adopté, cela augmente le coût de production du producteur de Pdt et bénéficie à l'entreprise de production animale. Le bénéfice se situe dans la concentration de la valeur nutritive de la nouvelle matière, soit les granules, et la réduction du coût de transport et d'entreposage pour une même quantité d'énergie et de protéine. Mais d'autres bénéfices pourraient aussi s'ajouter. Contrairement aux Pdt entières, les granules se conservent longtemps et dans beaucoup moins d'espace. Ceci facilite la gestion de leur utilisation puisqu'il n'est plus impératif de les utiliser dans un court délai. Leur manutention est aussi réduite et simplifiée. Dans ce contexte, le producteur de Pdt est désormais justifié de vendre ces résidus de Pdt sous leur forme granulée à cause de la valeur ajoutée au produit (valeur nutritive concentrée, facilité de transport et manutention, durée et espace de conservation). Aussi à cause de cette valeur ajoutée, le producteur en production animale montrera un consentement à payer pour les granules de Pdt.

4 CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet démontre qu'il est possible de produire à partir de Pdt déclassées, en quelques étapes simples et peu coûteuses (broyage, pressage, séchage) en raison des équipements utilisés, des granules à valeur ajoutée qui conservent leur intégrité physique. Ainsi, 24 h de pressage suivies d'un séchage d'appoint permettent d'atteindre 88 % de matière sèche (MS) de la fraction solide, conduisant au taux optimal de conversion en granules de 96 %. Sous un taux de 85 % de MS, les risques de colmatage de la matrice étaient fréquents, alors qu'au-dessus de 90 % de MS, une part importante de la matière était perdue en poussière. Les bilans massiques ont montré qu'avec le procédé utilisé, 1 000 kg de Pdt fraîches (20% MS) donnaient 152 kg de granules (90% MS). Ainsi granulées, les Pdt se conservent très longtemps, occupent 6,2 fois moins d'espace et pèsent 6 fois moins. Elles se manutentionnent donc beaucoup plus facilement.

Le suivi des caractéristiques physico-chimique au cours des diverses campagnes de granulation réparties sur plusieurs mois et années a démontré que la durée d'entreposage des Pdt et leurs variétés ont peu d'influence sur la composition chimique finale des granules qui est demeurée stable dans le temps. Par ailleurs, il est ressortit qu'une part importante des éléments sont solubles et demeurent dans la fraction liquide, exception faite de la matière carbonée qui demeure dans la fraction solide, incluant une partie soluble appréciable. Une amélioration du procédé pour augmenter la part d'éléments demeurant dans la fraction solide est donc à envisager. D'autant plus que l'azote (N), et donc les protéines, à 62 % solubles, est un des éléments les moins récupérés, ce qui diminue grandement la valeur tant fertilisante qu'alimentaire des granules. Les granules présentent par ailleurs de très faibles valeurs en éléments traces métalliques, toutes très en-deçà des valeurs des critères de valorisation du MDDELCC et des teneurs rencontrées pour d'autres amendements et fertilisants organiques disponibles sur le marché. Les composts, entre autres, présentent des valeurs beaucoup plus élevées, jusqu'à des centaines de fois.

L'alimentation animale est ressortit comme étant la voie la plus prometteuse. Les granules ont en effet une valeur énergétique de source glucidique comparable à celle du maïs, avec toutefois une valeur protéique d'un peu moins de la moitié. De plus, le potentiel prébiotique des granules, mesuré par les contenus en acides phénoliques (0,07 mg/g) est véritable, quoique inférieur aux aliments conventionnels tels que le blé, l'orge, l'avoine ou le seigle (contenus variant entre 0,2 et 1,0 mg/g). C'est l'acide férulique qui a été retrouvé en plus grande concentration. Par ailleurs, toutes les valeurs minérales sont ressorties comme étant sous les seuils maximaux recommandés. Le contenu moyen en solanine (0,134 mg/kg) des granules était aussi grandement inférieur à la teneur maximale régie par Santé Canada (200 mg/kg de glycoalcaloïdes totaux). Une attention particulière devrait cependant être portée lors de l'entreposage afin que les Pdt ne soient pas exposées à la lumière. Enfin, le procédé de granulation a assuré un contrôle des agents pathogènes *E. coli*, *Salmonella spp.* et *Listeria monocytogenes*. La montée en température lors du procédé, entre autre dans la matrice où les granules atteignent 100°C, est probablement impliquée dans ce contrôle.

La voie alimentaire constituerait donc une solution facilement et rapidement applicable par l'industrie, puisque de grandes quantités de granules pourraient être incorporées dans les rations pour bouvillons d'abattage. Cette voie est d'autant plus prometteuse dans un contexte de prix des grains relativement élevés, et qu'il n'est pas vraiment prévu que ceux-ci diminueront à long terme. Le fort contenu en amidon des granules laisse aussi croire

qu'ils pourraient remplacer une partie des antibiotiques chez le porcelet pour venir limiter la diarrhée lors du sevrage. Les entreprises porcines avec moulange à la ferme pourraient également bénéficier économiquement de l'ajout de granules dans la ration de leurs animaux. Toutefois, des études supplémentaires restent essentielles pour explorer divers autres questionnements, notamment les changements d'odeurs, d'agents pathogènes ou d'émissions de gaz qui pourraient survenir dans les déjections. De plus, la formulation la plus adéquate reste à étudier.

La voie agronomique de valorisation a aussi démontré un potentiel à être utilisée, même si les résultats obtenus indiquent que des travaux supplémentaires seront nécessaires. Ainsi, la granulation a fait augmenter entre 1,4 et 2,2 fois les contenus en N, P, K, Ca et Mg des granules, comparativement aux Pdt entières, tout en maintenant les contenus en éléments traces métalliques très en-deçà des valeurs limites de valorisation C1 et C2 (MDDELCC) et de celles de plusieurs engrais et amendements organiques courants. Le carbone organique (Corg) s'est retrouvé en quasi-totalité dans les granules qui s'avèrent donc une excellente source de Corg de faible indice de stabilité biologique, contenant 16 % de C sous forme soluble. Au global, une tonne de granules apporte donc 437 kg de Corg facilement minéralisable et 5,5, 1,0 et 6,4 kg de N, P et K totaux, respectivement. Il n'a toutefois pas été possible de déterminer les coefficients d'efficacité du N et K des granules. Par contre, le bioessai en serre a démontré que le procédé de granulation inactive l'agent causal de la gale commune (*S. Scabies*). Les essais au champ dans la culture de l'avoine ont aussi démontré que les granules sont une bonne source de K. Toutefois, comme leur ratio en cations est fortement débalancé ($K/Ca+Mg = 11$), leur application a entraîné des carences en Ca. L'application des granules a, par contre, eu un impact positif et activateur sur les microorganismes bénéfiques du sol. Leur apport a en effet fait augmenter les populations bactériennes *Limnobacter* et *Burkholderia*, impliquées au niveau du bon fonctionnement de la rhizosphère, ainsi que *Arthrobacter*, impliqué dans la dégradation de la MO. Leur fort ratio C/N de 74, résultant de la perte du N soluble dans la fraction liquide, a cependant causé une immobilisation du N en début de saison. Celle-ci s'est toutefois avérée transitoire puisque le Corg des granules, hautement labile, a haussé l'activité microbienne globale (respiration microbienne) et l'activité uréase, impliquée dans la minéralisation du N organique. Des valeurs positives de libération de nitrate ont d'ailleurs été observées une fois passée la mi-saison. Des liens étroits ont aussi été établis entre l'activité uréase, les contenus en Corg soluble du sol et les rendements en paille.

Si l'exploration de la voie agronomique est poursuivie, il serait ainsi surtout intéressant d'étudier l'épandage d'automne des granules, seul ou même en complémentarité avec des engrais de ferme riches en N et susceptibles de causer des pertes de nitrate. La fonction immobilisante azotée transitoire des granules, couplée à leur fort effet carboné stimulant sur l'activité microbienne, pourrait en effet servir à favoriser l'incorporation du nitrate des engrais de ferme dans la biomasse microbienne, prévenant ainsi sa perte en automne et permettant son relâchement par minéralisation au printemps. L'application conjointe de granules avec certaines proportions d'engrais minéraux pourrait aussi être testée s'il devenait trop coûteux ou impossible d'écouler les résidus de Pdt autrement. Il se pourrait qu'un arrière-effet fertilisant de 2^e année, ou une amélioration de la santé microbienne des sols et du bilan carboné, viennent compenser en partie la dépense en engrais. Des essais plein champ sur les risques de transmission de maladies seraient aussi à faire.

La valorisation énergétique demande également davantage de travaux puisque les granules ont produit des mâchefers et ont augmenté l'émission de particules. Toutefois, il ressort que les granules peuvent servir de combustible dans des chaudières à biomasse. Leur performance énergétique a été similaire et presque aussi bonne que celle des granules de bois. Les principales différences étaient une efficacité légèrement plus faible (50,2 % vs 56,4 %, respectivement) et un taux de combustion plus élevé (7,6 vs 4,3 kg/h, respectivement) des granules de Pdt. Ces différences étaient respectivement liées à leur teneur en humidité plus élevée et à leur pouvoir calorifique plus faible. La co-granulation bois-granules pourrait donc s'avérer une avenue intéressante apportant un gain environnemental puisque moins de bois serait consommé. Par pyrolyse, il a aussi été possible de produire de l'huile à partir des granules de Pdt à un rendement maximal de 50%, mais le potentiel énergétique de cette huile s'est avéré très faible (7,3 MJ/kg), possiblement en raison de sa teneur en eau élevée (61,4 %). Puisque les seuils des autres paramètres de la norme ASTM D7544 sont respectés (Tab. 5), il serait toutefois intéressant de réaliser d'autres travaux, soit pour retirer l'eau de l'huile pyrolytique, ou pour éviter sa formation durant la réaction de pyrolyse.

L'analyse économique des diverses voies de valorisation explorées a établi que la valeur économique des granules comme substitut au maïs en alimentation animale était économiquement possible. Cette voie de valorisation est d'autant plus prometteuse dans un contexte de prix des grains relativement élevés et qu'il n'est pas vraiment prévu que ceux-ci diminueront à long terme. Par contre, il a été jugé que pour les volets valorisation au champ et énergie, leur développement étant toujours au stade exploratoire, il était prématuré de leur appliqué une valeur économique. Pour le volet alimentation animale, le coût cible de production des granules se chiffrerait à 190 \$/t. Cette évaluation offre ainsi un ordre de grandeur intéressant entre autres comme cible pour de futurs travaux où le procédé serait amené à l'échelle commerciale. Évidemment, le procédé sera aussi plus concurrentiel dans la mesure où des progrès technologiques sont accomplis et que le coût du procédé est réduit. De plus, comme cette valeur est l'addition de la valeur alimentaire des granules (164\$/t) et de l'économie de coût de transport (26\$/t), celle-ci pourrait être plus élevée en additionnant d'autres économies difficiles à chiffrer, tel que la plus grande facilité de manutention, la réduction de pertes due à l'acquisition d'une longue durée de conservation et la réduction marquée de l'espace d'entreposage nécessaire. Ces éléments de l'analyse économique pourront être évalués précisément lors des travaux futurs. La gestion des stocks est également facilitée dû au fait qu'il n'y a plus d'impératif d'emploi immédiat. Le prix du maïs-grain et du tourteau de soya établissant la valeur des granules demeurent aussi des éléments d'incertitude qui peuvent multiplier le coût cible par 2,5 (105 \$/t vs 251 \$/t), selon que le contexte est favorable à l'utilisation des granules ou non. En fonction de tout ceci, le producteur, en production animale, pourrait montrer un consentement à payer pour les granules, contrairement aux Pdt déclassées.

Autrement, d'autres voies de valorisation pourraient également être envisagées. Par exemple, la filière de l'amidon. En effet, des compagnies comme HFS Food et Agrawest récupèrent actuellement des Pdt déclassées pour produire de l'amidon, mais comme leur coût de transport est élevé, cette option présente peu de valeur ajoutée pour le producteur. En revanche, le transport à moindre coût sous forme de granules à contenu concentré en amidon pourrait devenir avantageux et mériterait d'être exploré. L'avenue des matériaux biosourcés pourrait aussi être exploitée. Par exemple, la fabrication de films plastiques, d'emballages, de pièces plastiques, etc., représente une alternative environnementale au polyéthylène d'origine fossile. De plus, les bioplastiques sont

biodégradables et dû au caractère résiduel des Pdt traitées, leur utilisation ne rentrerait pas en compétition avec l'alimentation humaine. L'exploration future de ces différentes voies sera cependant conditionnelle à la mise en place d'une chaîne de production plus intensive de granules, laquelle pourrait être basée sur des paramètres établis dans le cadre de cette présente étude. De plus, trouver un procédé qui limiterait la perte du N vers la fraction liquide ou, mieux encore, qui ne générerait pas de fraction liquide (évaporation des liquides) dont la disposition devra être étudiée, serait un atout précieux.

RÉFÉRENCES

- Adom, K.K. et Liu, R.H.** 2002. Antioxidant activity of grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:6182-6187.
- AFNOR.** 2005. Fractionnement biochimique et estimation de la stabilité biologique : Méthode de caractérisation de la matière organique par solubilisations successives. *Association française de normalisation. Norme XP U p.44-162.*
- AGECO.** 2007. Portrait et priorités du secteur maraîcher québécois. *Rapport final, FPMQ, 39p.*
- Agrinova.** 2009. Biohuile Pyrolytique. Fiche technique, [En ligne] www.mamrot.gouv.qc.ca/pub/developpement_regional/ruralite/groupes_travail/Biohuile_pyrolytique.pdf.
- Arfaoui, M.A., Simard, R.R., Bélanger, G., Laverdière, M.R. et Chabot, R.** 2001. Mixed papermill residus affect yield, nutritive value and nutrient use of a grass-alfalfa sward. *Can. J. Soil. Sci.* 81:101-111.
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2008a. E1756-08: Standard test method for determination of total solids in biomass. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 3p.*
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2004. E711-87: Standard test method for gross calorific value of refused-derived fuel by the bomb calorimeter. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 8p.*
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2007a. E1757-01: Standard practice for preparation of biomass for compositional analysis. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 4p.*
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2007b. E1755-01: Standard test method for ash in biomass. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 3.*
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2008b. E777-08: Standard test method for carbon and hydrogen in the analysis sample of refuse-derived fuel. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 5p.*
- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2008c. E778-08: Standard test methods for nitrogen in the analysis sample of refuse-derived fuel. *American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA, États-Unis, 5p.*

- ASTM (American Society for Testing and Materials).** 2012. D7544-12: Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel, *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- Bach, S., Yada, R.Y., Bizimungu, B. et Sullivan, J.A.** 2012. Genotype by environment interaction effects on fibre components in potato. *Euphytica.* 187:77-86.
- Bhandari, S.K., Niachotti, C.M. et Krause, D.O.** 2009. Raw potato starch in pigs diets and its influence on posweaning scours and the molecular microbial ecology of the digestive tract. *J. Anim. Sci.* 87:984-993.
- Bushboom, J.R., Nelson, M.L., Jeremiah, L.E., Duckett, S.K., Cronrath, J.D., Falen, L. et Kuber, P. S.** 2000. Effects of graded level of potato by-products in barley- and corn-based feedlot diets: II. Palatability. *J. Anim. Sci.* 78:1837-1844.
- Cinq-Mars, D.** 2017. *Communication personnelle, février 2017.*
- Comeau, A.M., William K. W. Li, Tremblay, J.-E., Carmack, E.C. et Lovejoy, C.** 2011. Arctic Ocean microbial community structure before and after the 2007 record sea ice minimum. *PloS one*, 6(11).
- CRAAQ.** 2003. Guide de référence en fertilisation du Québec. 1ere édition. *Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 293p.*
- CRAAQa.** 2010. Guide de référence en fertilisation du Québec. 2ere édition. *Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Ste-Foy, Québec. 473p.*
- CRAAQb.** 2010. Pomme de terre de table - Budget variétés tardives (AGDEX 258/821h). *CRAAQ, 10 p.*
- Eriksson, T., Murphy, M. Ciszuk, P. et Burstedt, E.** 2004. Nitrogen balance, microbial protein production and milk production in dairy cows fed fodder beets, potato, or barley. *J. Dairy Sci.* 87:1057-1070.
- FCBA.** 2013. NF 444 - Biocombustibles solides. Site officiel de la marque NF, *[En ligne] <http://nf-biocombustibles-solides.fr/telechargements/13.pdf>.*
- Garcia, C., Hernandez, T. Costa, F.** 1990. Study on water extract of sewage sludge compost. *Soil Sci. Plant Nutr.* 37:399-408.
- Giroux, M. et Audesse, P.** 2004. Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol 15(2):107-110.*

- Giroux, M et Lemieux, M.** 2000, Effets de la fertilisation N, P et K et leurs interactions sur le rendement d'une prairie à dominance de mil (*Phleum Pratense L.*), la teneur en éléments nutritifs de la récolte et l'évolution de la fertilité des sols. *Agrosol 11(1):40-47.*
- Giroux, M., N'Dayegamin, A. et Oyer, R.** 2007. Effets des apports d'automne et de printemps de fumier et de boues mixtes de papetières sur le rendement, la qualité de la pomme de terre et de l'efficacité de l'azote. *Agrosolution 18(1):25-34.*
- Hébert, M.** 2008. Guide sur la valorisation des matières résiduelles fertilisantes. *Gouvernement du Québec 14p.*
- Hébert, M. et Beaulieu, R.** 2002. Agronomic utilization of biosolids from pulp and paper mills and other residuals in Quebec : risk management. *Presentation to TAPPI Environmental Conference 2002, Montreal, April 6-10.*
- Heckman, J. et Wolf, A.** 2011. Recommended soil test for silicon. Dans *Cooperative Extension, Recommended soil testing procedures for the Northeastern United States, 3e édition. University of Delaware, Newark, Delaware, États-Unis, p. 99-102.*
- Isaac, A.R. et Johnson, W.C.** 1976. Determination of nitrogen in plants tissue using a block digester. *J. AOAC 59 :98-100.*
- ISQ.** 2012. Profil sectoriel de l'industrie horticole au Québec. *Ed. 2012. ISQ, Québec, 110 p.*
- Jin, Z., Yang, Y. X., Choi, J. Y., Shinde, P. L., Yoon S. Y., Hahn, T.-W., Lim, H. T., Park, Y., Hahm, K.-S., Joo, J. W. et Chae, B. J.** 2008. Potato (*Solanum tuberosum L. cv. Gogu valley*) protein as a novel antimicrobial agent in weanling pigs. *J. Animal Sci. 86:1562-1572.*
- Krause, D. O., Bhandari, S. K., House, J. D. et Nyachoti, C. M.** 2010. Response of Nursery Pigs to a Synbiotic Preparation of Starch and an Anti-*Escherichia coli* K88 Probiotic. *Appl. Environ. Microbiol. 76(24):8192-8200.*
- Landry, C., Martin, DY., Hogue, R., Dubé, P. et Belzile, L.** 2014. Mise au point d'une alternative au compostage pour le recyclage des résidus de fruits et légumes. *Rapport final remis au CDAQ. IRDA. 127p.*
- Linères, M.** 2002. Fertilisation de la vigne un point sur les préconisations : La matière organique, fiche 3 [En ligne] <http://www.vignevin.com/publications/brochures-techniques/fertilisation-de-la-vigne.html>.
- Linères, M. et Djakovitch, J.L.** 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique. Dans *Decroux et Ignazi (eds.) Matières organiques et agriculture. Quatrième journée de l'analyse de terre (Gemmas). Cinquième formule de la fertilisation raisonnée (Comifer), 16-18 novembre 1993. p. 159-168.*

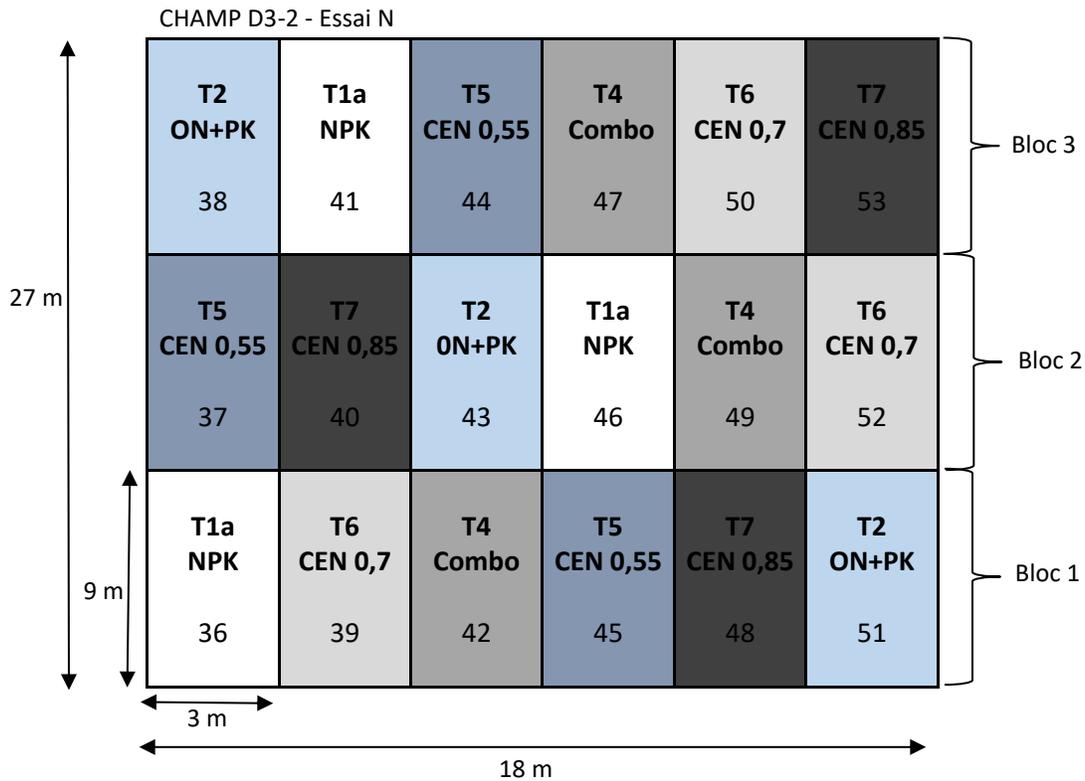
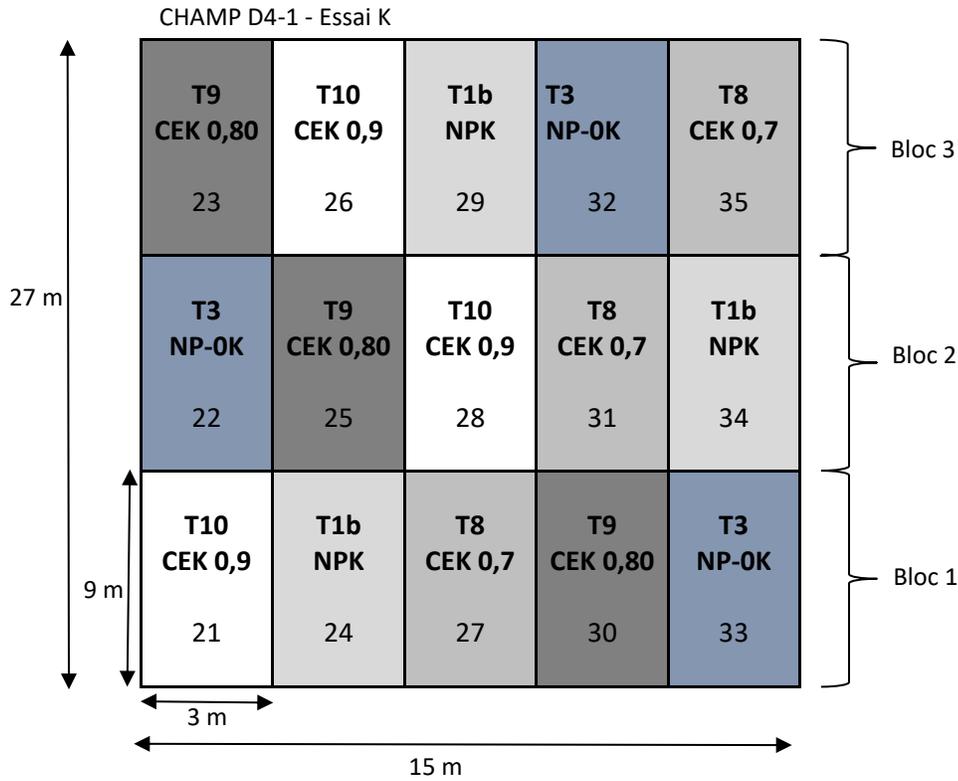
- Lösel, D. et Claus, R.** 2005. Dose-dependant effects of resistant potato starch in the diet on intestinal skatole formation and adipose tissue accumulation in the pig. *J. Vet. Med. A.* 52:209-212.
- Lullien-Pellerin, V.** 2014. Phytomicronutriments des grains de céréales : un aperçu de la génétique au consommateur en passant par la transformation. *Innovations Agronomiques* 139-152.
- MAPAQ.** 2013. Règlement sur la culture de pommes de terre. [En ligne] http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/P_42_1/P42_1RO_1.HTM.
- Martin, D. Y., Landry, C. et Laforest, J.-P.** 2014. Valorisation de résidus végétaux agricoles vers le secteur de l'alimentation animale. Rapport final remis au MAPAQ dans le cadre du programme Prime-Vert (sous-volet 3.2). *IRDA.* 43 p.
- Mattila, P. et Kumpulainen J.** 2002. Determination of Free and Total Phenolic Acids in Plant-Derived Foods by HPLC with Diode-Array Detection *J. Agric. Food Chem.* 50(13):3660-3667.
- McGill, W.B., Cannon, K.R., Robertson, J.A. et Cook, F.D.** 1986. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton after 50 years of cropping to two rotations. *Can. J. Soil Sci.* 66 :1-19.
- MDDEP.** 2011. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. *Gouvernement du Québec*, 33p.
- N'Dayegamiye, A.** 2006. Mixed paper mill sludge effects on corn yield, nitrogen efficiency and soil properties. *Argon. J.* 98 :1471-1478.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A. et Laverdière, M.R.** 2005. Effets des apports de composts de résidus ménagers sur les rendements des cultures et certaines propriétés du sol. *Agrosol* 16(2) :135-144.
- N'Dayegamiye, A., Drapeau, A., Huard, S. et Thibault, Y.** 2004b. Intégration de boues mixtes et de fumiers dans des rotations agricoles : réponse des cultures et interactions avec les propriétés du sol. *Agrosol* 15(2) :83-90.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Royer, R.** 2003a. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : rendements de maïs-ensilage, coefficients d'efficacité et accumulation des nitrates dans le sol. *Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Québec.* 23p.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. et Royer, R.** 2004a. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières : coefficients d'efficacité et nitrates dans le sol. *Agrosol* 15(2):97-106.

- N'Dayegamiye, A., Huard, S. et Thibault, Y.** 2001. Valeur fertilisante des boues mixtes de papetières (biosolides) dans des sols cultivés en maïs-grains, soya et orge. *Agrosol* 12(1):25-34.
- Nduwamungu, C.** 2006. Stabilité biologique et pouvoir tampon des amendements et des engrais organiques. *Thèse de doctorat. Université Laval. 110p.*
- Nelson, M.L., Bushboom, J.R., Cronrath, J.D., Falen, L. et Blankenbaker, A.** 2000. Effects of graded level of potato by-products in barley- and corn-based feedlot diets: I. Feedlot performance, carcass traits, meat composition, and appearance. *J. Anim. Sci.* 78:1829-1836.
- NRC.** 1982. United states-Canadian tables of feed composition. *National Academy Press. Washington DC. 148p.*
- NRC.** 2007. Nutrient requirements of small ruminant. *NRC. NAP. Washington DC. 362p.*
- Obernberger, I.** 1998. Decentralized biomass combustion: state of the art and future development. *Biomass and Bioenergy* 14(1):33-56.
- Obernberger, I., Brunner, T. et Bärnthaler, G.** 2006. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30(11):973-982.
- Pedersen, C. et Lindberg, J.E.** 2004. Comparison of low-glycoalkaloid potato protein and fish meal as protein sources for weaner piglets, *Acta agriculturae scandinavica, section a-animal science*, 54(2):75-80.
- Perron, V et Hébert, M.** 2007a. Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie I : paramètres agronomique. Vecteur environnement. *Novembre 2007. p. 48-52.*
- Perron, V et Hébert, M.** 2007b. Caractérisation des boues d'épuration municipales. Partie II : éléments traces métalliques. Vecteur environnement. *Novembre 2007. p. 42-46.*
- Peters, J., Combs, S. M., Hoskins, B., Jarman, J., Kovar, J., Watson, M., et Wolf, N.** 2003. Recommended methods of manure analysis. *University of Wisconsin Cooperative Extension Publishing: Madison, WI.*
- Pettigrew, J.E.** 2006. Reduced Use of Antibiotic Growth Promoters in Diets Fed to Weanling Pigs: Dietary Tools, Part 1. *Animal Biotech.* 17(2):207-215.
- Pienkowski, C.A.** 2010. The Possibilities of Using Renewable Sources of Energy in Podlaskie Province. *Polish J. of Environ. Stud* 19(3):537-544.
- RAA (Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère).** 2011. *Gazette officielle du Québec.*

- RAP.** 2012. Gestion des rebuts de pomme de terre. *Bulletin d'information, No 07, 1 juin 2012, 5p.*
- Robin, D.** 1997. Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable dans le sol et la classification des produits organomiréraux. *Agronomie 17:157-171.*
- Rousselle, P., Robert, y. et Crosnier, J.C.** 1996. La pomme de terre. Production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations. *Édition INRA, Paris, 607p.*
- Santé Canada.** 2017. Les glyco-alcaloïdes dans les aliments. [En ligne].
<http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/pubs/securit/2010-glycoalkaloids-glycoalcaloïdes/index-fra.php>
- Salomons, W. et Gerritse, R.G.** 1981. Some observations on the occurrence of phosphorus in recent sediments from western Europe. *The Science of the Total Environment 17:37-49.*
- Satege.** 2007. Caractérisation en laboratoire de produits organiques épandus dans le Nord-Pas-de-Calais-Somme. Au travers de cinétiques de minéralisation et de mesure d'indice de stabilité biologique (ISB). *Février 2007. 105p.*
- Seydoux, S., Côté, D., Grenier, M. et Comité technique Porc.** 2005. Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisants des déjections animales liquides en Chaudière-Appalaches. *Rapport de recherche IRDA. 76p.*
- Seydoux, S., Côté, D., Grenier, M. et Gasser, M.-O.** 2007. Caractérisation des volumes et des concentrations en éléments fertilisant des effluents d'élevages de poulettes et de poules pondeuse. *Rapport de recherche IRDA. 41p.*
- Simard, R.R., Coulombe, J., Lalande, R., Gagnon, B. et Yelle, S.** 1998. Use of fresh ans composted de-linking sludge in cabbage production. Dans S. Brown, J.S. Angle et L. Jacobs (eds.) Beneficial co-utilization of agricultural, municipal and industrial by-products. *Kluwer Academic Publishers. 349-361p.*
- Sissingh, H.A.** 1971. Analytical technique of the PW method used for the assessment of the phosphate status of arabe soils in the Netherlands. *Plant ans Soil 34:483-486.*
- Tran, T.S., Côté, D. et N'Dayegamiye, A.** 1996. Effets des apports prolongés de fumier et de lisier sur l'évolution des teneurs du sol en éléments nutritifs majeurs et mineurs. *Agrosol 9(1) :21-30.*
- Tsiloyiannis V.K., Kyriakis, S. C., Vlemmas, J. et Sarris K.** 2001. The effect of organic acids on the control of post-weaning oedema disease of piglets, *Res. Vet. Sci. 70(3):287-293.*

- Tusnio, A., Pastuszewska, B., Święch, E. et Taciak, M.** 2011. Response of young pigs to feeding potato protein and potato fibre - nutritional, physiological and biochemical parameters, *J. Animal Feed Sci.* 20:361-378.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency).** 2012. Method 3050B acid digestion of sediments, sludges, and soils. Dans United States Environmental Protection Agency (USEPA), [En ligne] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf> .
- USEPA (United States Environmental Protection Agency).** 2016. Method 5 - Determination of particulate matter emissions from stationary sources. [En ligne] <https://www.epa.gov/emc/method-5-particulate-matter-pm>.
- Van Loo, S. et Koppejan, J.** 2008. The handbook of biomass combustion and co-firing. *Earthscan, Washington, DC, États-Unis*, 442 p.
- Wallinga, I., Van der Lee, J. J., Houba, V. J. G. et Novozamsky, I.** 1995. Plant Analysis Manual. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas*.
- Whittemore, C.T.** 1977. The potato (*solanum tuberosum*) as a source of nutrients for pigs, calves and fowl-a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2:171-190.
- Yara.** 2017. Besoins nutritionnels de la pomme de terre, [En ligne] <http://www.yara.fr/fertilisation/cultures/pomme-de-terre/les-fondamentaux/resume-nutritionnel/> .
- Ying, L., ZhiSheng, W., et AnGuo, Z.** 2009. Effects of hesperidin and chlorogenic acid on performance, antioxidance and immunity of weaned piglets. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 29(9):1233-1236.

ANNEXE A



ANNEXE B

Tableau 1. Caractérisation du lot composite de granules avant l'épandage au champ au printemps 2016

Paramètres		Granules
M.S.	%	89,7
pH		4,8
M.O.	kg/t b.h.	978,67
C _{total}	kg/t b.h.	394,67
C Organique (2.00)	kg/t b.h.	489,33
C Organique soluble	kg/t b.h.	74,21
C/N		72,06
Cendres	%	2,16
N _{total}	kg/t b.h.	5,48
N _{total} Kejdhal	kg/t b.h.	5,43
N _{soluble}	kg/t b.h.	.
N-NH ₄	kg/t b.h.	0,4
N-NH ₄ soluble	kg/t b.h.	0,45
N-NO ₃	kg/t b.h.	0,005
N-NO ₃ -N-NO ₂ soluble	kg/t b.h.	0,007
N _{organique}	kg/t b.h.	5,08
P _{total}	kg/t b.h.	0,964
P _{soluble}	kg/t b.h.	0,43
P _{soluble} aqueux	kg/t b.h.	0,34
K _{total}	kg/t b.h.	5,2
K _{soluble}	kg/t b.h.	4,8

Tableau 2. Caractérisation du sol à l'automne des sites choisis pour les essais en champ

Paramètres	Essai N	Essai K
pH _{eau}	6,21	5,76
Matières organiques (M.O.) (%)	5,33	NA
C _{tot} (%)	NA	0,83
N _{tot} (%)	NA	0,07
C/N	NA	11,90
Éléments majeurs Mehlich-3 (kg ha ⁻¹ b.s.)		
P	158	410
K	246	90
Ca	2563	1109
Mg	69	47
Al	3783	3143
P _{M3} /Al _{M3} (%)	4,2	13,0