

Valorisation de résidus végétaux agricoles
vers le secteur de l'alimentation animale

Rapport final

Projet PRIME-VERT no. PV3.2-2013-11

Projet IRDA no. 901 070

Élaboré par :

Daniel Yves Martin, ing., Ph.D. - IRDA
Christine Landry, agr., biologiste, Ph.D. - IRDA
Jean-Paul Laforest, agr., Ph.D.

Avec la collaboration de :
Caroline Vouligny, agr. - IRDA



Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Juin 2014

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée 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 Lutte contre les Changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, Innovation et Exportation (MEIE).

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

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Martin, DY, 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 pages.

Équipe de réalisation

IRDA

| | |
|----------------------|----------------------------|
| Daniel Yves Martin | Chercheur |
| Christine Landry | Chercheure |
| Patrick Dubé | Chimiste |
| Caroline Vouligny | Attachée de recherche |
| Hubert Labissonnière | Technicien agricole |
| Michel Noël | Ouvrier agricole principal |
| Harold Dusablon | Ouvrier agricole |
| Alain Soucy | Ouvrier agricole |

CONSULTANT

| | |
|--------------------|-----------------------|
| Jean-Paul Laforest | Agronome et chercheur |
|--------------------|-----------------------|

MAPAQ

| | |
|--------------|----------|
| Rémi Carrier | Agronome |
|--------------|----------|

BIOPTERRE

| | |
|------------------|---------------------|
| Vincent Lamarre | Ingénieur de projet |
| Jean-Pierre Dion | Technicien |

LABORATOIRES D'ANALYSES S.M. INC. ET AGRIDIRECT

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

Daniel Yves Martin
MAPAQ, DAEDD
200 chemin Sainte-Foy
10e étage
Québec (Québec)
G1R 4X6
Téléphone : 418 380-2150 # 3854
Courriel : daniel-yves.martin@mapaq.gouv.qc.ca

Christine Landry
Institut de recherche et de développement
en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380 # 660
Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

TABLES DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| LISTE DES ABRÉVIATIONS..... | 5 |
| LISTE DES TABLEAUX | 6 |
| LISTE DES FIGURES..... | 7 |
| 1. RÉSUMÉ | 8 |
| 2. INTRODUCTION | 10 |
| 3. OBJECTIFS | 11 |
| 3.1 Objectif général..... | 11 |
| 3.2 Objectifs spécifiques | 11 |
| 4. MATÉRIEL ET MÉTHODE..... | 12 |
| 4.1 Acquisition des résidus..... | 12 |
| 4.2 Broyage des résidus..... | 12 |
| 4.3 Séparation des broyats | 13 |
| 4.3.1 Séparateur décanteur-centrifuge | 13 |
| 4.3.2 Pressoir pneumatique..... | 14 |
| 4.4 Granulation | 15 |
| 4.5 Analyses biochimiques et physicochimiques | 16 |
| 5. RÉSULTATS | 18 |
| 5.1 Broyage et séparation des résidus | 18 |
| 5.1.1 Broyage des résidus..... | 18 |
| 5.1.2 Séparation par centrifugation..... | 19 |
| 5.1.3 Séparation par pressage | 21 |
| 5.1.4 Performances des séparateurs..... | 22 |
| 5.2 Granulation | 26 |
| 5.3 Composition chimiques et biochimiques et des granules..... | 30 |
| 6. DISCUSSION | 32 |
| 6.1 Comparaison des séparateurs | 32 |
| 6.2 Propriétés nutritives des granules | 34 |
| 6.2.1 Granules de pommes de terre | 34 |
| 6.2.2 Granules de carottes | 36 |
| 7. CONCLUSION | 38 |
| 8. REMERCIEMENTS | 41 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

| | |
|---------------------|--|
| Al | Aluminium |
| B | Bore |
| Ba | Baryum |
| C_{Broyat} | Concentration d'un élément chimique dans le broyat ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
| C_{FS} | Concentration d'un élément chimique dans la fraction solide ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
| Ca | Calcium |
| Cd | Cadmium |
| Co | Cobalt |
| Cr | Chrome |
| Cu | Cuivre |
| E_s | Efficacité de séparation (%) |
| Fe | Fer |
| FS | Fraction solide produite par séparation |
| FL | Fraction liquide produite par séparation |
| K | Potassium |
| M_{Broyat} | Masse de broyat (kg) |
| M_{FS} | Masse de fraction solide (kg) |
| Mg | Magnésium |
| Mn | Manganèse |
| Mo | Molybdène |
| MS | Matière sèche |
| Na | Sodium |
| Ni | Nickel |
| P | Phosphore |
| Pb | Plomb |
| S | Soufre |
| Sr | Strontium |
| Zn | Zinc |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Liste des analyses effectuées à partir de résidus de pommes de terre ou de résidus de carottes | 17 |
| Tableau 2. Bilan de masse de la séparation des carottes. | 23 |
| Tableau 3. Bilan de masse de la séparation des pommes de terre. | 23 |
| Tableau 4 Concentration des éléments dans les différentes fractions de carottes selon les séparateurs. | 24 |
| Tableau 5. Concentration des éléments dans les différentes fractions de pommes de terre selon les séparateurs..... | 25 |
| Tableau 6. Taux d'humidité et durabilité mécanique des granules de carottes et de pommes de terre issues de fractions solides préalablement séchées. | 29 |
| Tableau 7. Composition biochimique et chimique de granules fabriqués à partir de résidus de pommes de terre ou de résidus de carottes..... | 31 |
| Tableau 8. Efficacités de séparation des deux séparateurs pour différents éléments contenus dans le broyat de carottes et de pommes de terre..... | 34 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1. Broyeur semi-industriel STEPHAN 80..... | 12 |
| Figure 2. Carottes et pommes de terre avant le broyage. | 12 |
| Figure 3. Séparateur décanteur-centrifuge (centrifugeuse) ASSERVA 2000. | 13 |
| Figure 4. Principe d’opération de la centrifugeuse. | 14 |
| Figure 5. Pressoir pneumatique HP180. | 14 |
| Figure 6. Granuleuse Granulart GR75. | 15 |
| Figure 7. Séchoir Watromat TLG200S..... | 15 |
| Figure 8. Carottes et pommes de terre après le broyage. | 18 |
| Figure 9. Représentation schématique de l’anneau liquide à l’intérieur de la centrifugeuse..... | 19 |
| Figure 10. Fraction solide des carottes à la sortie de la centrifugeuse. | 20 |
| Figure 11. Fraction solide des pommes de terre à la sortie de la centrifugeuse. | 20 |
| Figure 12. Fraction liquide des carottes et des pommes de terre à la sortie de la centrifugeuse..... | 21 |
| Figure 13. Pressage des broyats de carottes et de pommes de terre. | 21 |
| Figure 14. Fraction solide de carottes et de pommes de terre à l’intérieur du pressoir à la fin de la période de pressage. | 22 |
| Figure 15. Fraction solide de carottes et de pommes avant granulation. | 26 |
| Figure 16. Granules de pommes de terre pressées (FS humide)..... | 27 |
| Figure 17. Granules de carottes pressées (FS sèche) avec et sans ajout d’eau lors de la granulation. | 27 |
| Figure 18. Granules de carottes centrifugées (FS sèche) sans ajout d’eau lors de la granulation. | 28 |
| Figure 19. Granules de pommes de terre pressées et centrifugées (FS sèches) sans ajout d’eau lors de la granulation. | 28 |

1. RÉSUMÉ

Ce projet visait à valoriser des carottes et pommes de terre qui sont déclassés à la ferme et ne peuvent être vendues sur le marché de la consommation humaine. Ces aliments, qui sont alors considérés comme des résidus agricoles, pourraient probablement retourner vers la filière de l'alimentation animale s'ils étaient préparés en conséquence. En raison des quantités importantes générées sur les fermes, les pommes de terre et les carottes ont été ciblées dans ce projet. Plus spécifiquement, ce projet a consisté à broyer ces légumes et à séparer le broyat pour en extraire de la matière solide (fraction solide (FS)). Deux types d'équipement ont été utilisés afin de comparer leur performance : un séparateur décanteur-centrifuge (centrifugeuse) et un presseur pneumatique. Une fois extraite, la FS a été séchée et granulée. L'utilisation de granules déshydratés permet de faciliter l'entreposage, la conservation et le transport des aliments. Une fois produits, les granules de carottes et de pommes de terre ont été analysés et leur composition nutritionnelle a été comparée à celle de produits équivalents utilisés présentement dans l'industrie pour l'alimentation animale.

L'efficacité de séparation de la matière sèche (MS) (soit la proportion de celle-ci dans le broyat qui se transfère dans la fraction solide) pour les deux équipements se révèle être à peu près la même pour les carottes, soit près de 54 %, alors que pour les pommes de terre le presseur se démarque légèrement avec une efficacité de 81 % par comparaison à 75 % pour le séparateur décanteur-centrifuge. Pour les éléments chimiques, on obtient pour les carottes une efficacité de séparation moyenne de 56 % pour la centrifugeuse et de 51 % pour le presseur, alors que pour les pommes de terre on obtient respectivement des valeurs de 39 % et 43 %. La principale différence dans les performances des appareils est plutôt liée au produit séparé (carottes et pommes de terre) qu'au type d'équipement. En ce qui a trait à la capacité de production des appareils, compte tenu que l'efficacité de séparation est la même pour les deux équipements avec la carotte, il faut 22 kg de carottes brutes pour les deux équipements pour obtenir 1 kg de matière sèche de FS (permettant ainsi de former de 1,1 kg de granules à 90 % de siccité). Par contre, pour obtenir la même quantité de MS de fraction solide de pomme de terre, il faut traiter respectivement 7,6 kg et 7,0 kg de produit brut pour la centrifugeuse et le presseur.

Des essais de durabilité mécanique effectués sur les granules des deux produits sous étude présentent des valeurs entre 80 et 89 %, soit en deçà de la valeur de 97 % établie pour les granules de bois. Le taux d'humidité présent dans les particules au moment de la granulation s'avère l'élément déterminant pour la durabilité des granules. Dans le cadre de ce projet, celui-ci s'est situé à près de 12 % pour les carottes et 5 % pour les pommes de terre.

La composition nutritionnelle des granules de pommes de terre et des granules de carottes a été comparée à celle de produits équivalents utilisés présentement dans l'industrie. Les grands constats sont les suivants :

- a. les granules de pommes de terre sont riches en amidon et pauvre en fibres ;
- b. la composition des granules de pommes de terre est essentiellement la même que celle des résidus de pommes de terre, parfois utilisés en alimentation animale;

- c. les granules de carottes contiennent environ 25 % de fibres ADF et sont donc relativement fibreux;
- d. les granules de carottes ne sont pas suffisamment riches en protéine brute pour en faire un ingrédient protéique;
- e. la composition des granules de carottes est essentiellement la même que celle des résidus de carottes, parfois utilisés en alimentation animale.

Des recommandations ont été formulées quant aux domaines d'application semblant les plus prometteurs pour l'utilisation des deux types de granules, Les grandes lignes sont les suivantes :

- a. les granules de pommes de terre peuvent potentiellement être utilisés comme source d'énergie pour l'alimentation des porcs, mais il faudra tout d'abord évaluer l'effet du traitement de granulation sur la cuisson du produit, considérant que les porcs utilisent mal la pomme de terre crue, mais utilisent très bien la pomme de terre cuite;
- b. les granules de pommes de terre peuvent potentiellement être utilisés comme source d'énergie pour l'alimentation des ruminants;
- c. les granules de carottes sont probablement peu digestibles par les porcs et ne devraient pas être utilisés en alimentation porcine, sauf si l'objectif est d'accroître le volume non digestible de la ration à l'aide de fibres alimentaires non digestibles;
- d. les granules de carottes peuvent potentiellement être utilisés dans l'alimentation des ruminants;
- e. comme débouchés futurs et en gardant notamment à l'esprit les nouvelles tendances de réduire l'utilisation des antibiotiques avec des prébiotiques qui se retrouvent naturellement dans les fruits et légumes, les granules de pomme de terre et les granules de carottes pourraient potentiellement être des sources de prébiotiques et autres nutraceutiques bénéfiques à la santé de l'animal. Toutefois, des essais alimentaires avec des animaux devront être réalisés pour confirmer cette hypothèse.

2. INTRODUCTION

La politique québécoise de gestion des matières résiduelles suggère le bannissement de l'enfouissement de la matière organique d'ici 2020. Bien que cette politique provienne du MDDELCC, elle touche directement le milieu agricole qui est à la fois générateur et receveur de matières résiduelles organiques. Ce projet visait à valoriser des aliments de bonne qualité produits sur des fermes québécoises qui, pour diverses raisons, sont déclassés et ne peuvent être vendus sur le marché de la consommation humaine. Ces aliments, qui sont alors considérés comme des résidus à gérer par les producteurs agricoles, pourraient probablement retourner vers la filière de l'alimentation animale s'ils étaient préparés en conséquence. Des quantités importantes de pommes de terre et de carottes sont déclassées à la ferme et c'est pourquoi ces légumes ont été ciblés dans ce projet. Actuellement, les surplus de pommes de terre sont souvent entreposés au bout du champ où ils pourrissent ou enfouis dans une partie du champ. En ce qui concerne les carottes, soit elles ne sont pas récoltées lorsque le prix est trop bas pour rentabiliser la récolte, soit elles sont vendues à un prix dérisoire pour la chasse au chevreuil. De plus, ces deux productions se retrouvent dans plusieurs régions du Québec, ce qui justifie l'aspect interrégional du projet.

Plus spécifiquement, ce projet a consisté à broyer les légumes et à séparer le broyat pour en extraire la matière solide en utilisant et en comparant deux types d'équipement : un séparateur décanteur-centrifuge et un presseur pneumatique. Une fois extraite, la matière solide a été séchée et granulée. L'utilisation de granules déshydratés permet d'entreposer, de conserver, et de transporter plus facilement les aliments.

Les granules de carottes et de pommes de terre ont alors été analysés et leur composition nutritionnelle a été comparée à celle de produits équivalents utilisés présentement dans l'industrie pour l'alimentation animale. Des recommandations ont été formulées quant aux domaines d'application semblant les plus prometteurs pour l'utilisation des deux types de granules.

3. OBJECTIFS

3.1 Objectif général

Utiliser des carottes et des pommes de terre déclassées à la ferme pour fabriquer des granules à partir de leur matière sèche et caractériser le potentiel de ceux-ci pour la filière de l'alimentation animale.

3.2 Objectifs spécifiques

- Séparer, en utilisant deux types de séparateurs, un broyat de pommes de terre et de carottes et déterminer l'efficacité de séparation des équipements;
- Produire des granules à partir des fractions solides découlant des essais de séparation et déterminer leurs propriétés physicochimiques;
- Caractériser les granules en vue de leur utilisation comme supplément alimentaire animal, tant pour les animaux monogastriques que polygastriques ;
- Comparer la composition nutritionnelle des granules avec des produits équivalents utilisés présentement dans l'industrie ;
- Formuler, le cas échéant, des recommandations quant aux domaines d'application semblant les plus prometteurs pour l'utilisation des deux types de granules en alimentation animale.

4. MATÉRIEL ET MÉTHODE

4.1 Acquisition des résidus

Les opérations terrain de ce projet se sont déroulées à la Ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon en septembre et octobre 2013. Les Fermes David et Richard Blais Inc. de l'Île d'Orléans ont fourni les pommes de terre déclassées alors que les carottes provenaient de la ferme de M. Jean-Paul Leblanc de Saint-Anselme.

4.2 Broyage des résidus

Les légumes ont été pesés puis broyés à l'aide d'un broyeur semi-industriel Stephan UM 80 (Figure 1 et Figure 2) loué au Centre de développement des bioproduits Biopterre. Une première portion du broyat obtenu était conservée dans un réservoir de stockage temporaire d'une capacité de 1000 L en vue d'être transférée vers un séparateur décanteur-centrifuge, alors qu'une seconde portion était préservée dans des chaudières de 20 L afin d'alimenter un presseur à jus pneumatique.



Figure 1. Broyeur semi-industriel STEPHAN 80.



Figure 2. Carottes et pommes de terre avant le broyage.

4.3 Séparation des broyats

Une fois broyées, les carottes et les pommes de terre ont été séparées en phases solide et liquide au moyen de deux méthodes de séparation pouvant se retrouver éventuellement à la ferme soit : un séparateur décanteur-centrifuge et un pressoir pneumatique.

4.3.1 Séparateur décanteur-centrifuge

Le séparateur décanteur-centrifuge, ci-après désigné centrifugeuse, était un modèle ASSERVA 2000 d'une capacité de traitement de $2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Figure 3) dont la performance a déjà été démontrée (Martin et coll. 2006) pour d'autres produits organiques au Québec.



Figure 3. Séparateur décanteur-centrifuge (centrifugeuse) ASSERVA 2000.

Ce séparateur utilise la force centrifuge afin de séparer le solide contenu dans le broyat. Dans le cas présent, une vitesse de rotation de $4400 \text{ tours} \cdot \text{min}^{-1}$ du bol à l'intérieur de l'appareil permettait d'appliquer une accélération d'environ 3000 g (où 1 g correspond à l'accélération terrestre) sur les particules présentes dans le broyat. Une vis sans fin récupérait ensuite le solide plaqué sur la paroi du bol et l'acheminait vers une zone d'essorage avant de l'évacuer hors de l'appareil (Figure 4).

D'un point de vue opérationnel, le broyat des légumes a été pompé de son réservoir temporaire de stockage de 1000 L vers un deuxième réservoir de même capacité dédié à alimenter la centrifugeuse. Ce deuxième réservoir fait partie intégrante de l'unité de séparation et contient à sa base une pompe volumétrique à débit variable permettant d'alimenter adéquatement le séparateur.

La fraction solide (FS) était récupérée dans un bac et pesée tandis que la fraction liquide (FL) s'accumulait dans un bassin de 1000 L .

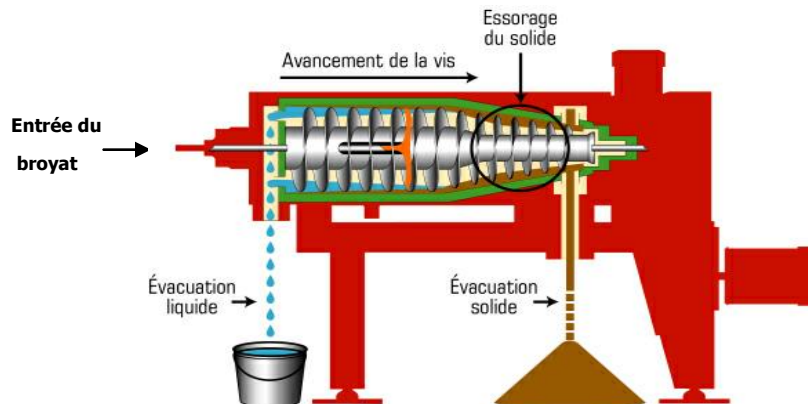


Figure 4. Principe d’opération de la centrifugeuse.

4.3.2 Pressoir pneumatique

Un pressoir pneumatique, aussi appelé pressoir à ballon, a été employé pour séparer les phases liquide et solide des deux broyats. Il s’agissait d’un pressoir HP modèle 180, d’une capacité de 180 L (Figure 5). Son diamètre intérieur mesurait 55 cm et il faisait 84 cm de hauteur. La cuve en acier inoxydable de l’appareil est perforée de minuscules ouvertures. Préalablement au chargement, une membrane est déployée à l’intérieur du pressoir pour limiter la migration de la matière solide vers l’extérieur. Pour les deux légumes, le pressoir a été rempli avec environ 100 L de broyat. Une fois la cuve du pressoir remplie, le ballon central était gonflé progressivement au moyen d’un compresseur à air. Lorsque la pression appliquée avait atteint 2 bars, elle était maintenue ainsi pendant 18 heures. La pression était ensuite élevée progressivement jusqu’à 3 bars pour extraire le maximum de liquide.

Tout au long du processus de pressage, la FL a été récupérée dans des seaux de 20 L et a été quantifiée. À la fin du pressage, la FS a aussi été récupérée dans des seaux de 20 L puis, pesée.



Figure 5. Pressoir pneumatique HP180.

4.4 Granulation

Les FS de pommes de terre et de carottes ont été granulées au Centre de développement des bioproduits Biopterre à La Pocatière. Il y a eu trois épisodes de fabrication de granules : le 30 septembre, le 29 octobre et le 27 novembre 2013. L'appareil qui a servi à la granulation est un modèle Granulart GR75 d'une capacité de 50 à 250 kg·h⁻¹ équipé d'une matrice ayant des ouvertures de 6 mm de diamètre.



Figure 6. Granuleuse Granulart GR75.

Afin d'explorer la meilleure siccité pour granuler les FS, deux approches ont été utilisées. Dans un premier temps, une granulation a été tentée sur une portion des FS humides, tel que sorties de la centrifugeuse et du pressoir. Les quelques granules produits ont été séchés par la suite dans une étuve à 60°C pendant 32 à 48 heures. Le reste des FS, qui a constitué la plus importante portion de matériel granulé, a été séché préalablement à la granulation dans un séchoir Watromat modèle TLG200S (Figure 7). Celui-ci a conservé le matériel à 40°C pendant 25 heures.



Figure 7. Séchoir Watromat TLG200S.

Les granules ont par la suite subi des tests d'intégrité physique afin d'évaluer leur durabilité mécanique basée sur le protocole NF CEN/TS 15210-1 (AFNOR, 2006). Le Centre de

développement des bioproduits Biopterre a réalisé ces tests avec l'appareil « Pelleter tester » équipé d'un tamis à trous carrés de 3,35 mm, conçu pour répondre à la norme de l'AFNOR. Des tests d'humidité ont été effectués avec l'humidimètre Ohaus MB-45.

4.5 Analyses biochimiques et physicochimiques

Pour les deux légumes testés, des échantillons de broyats, de FS et de granules ont été prélevés et caractériser au moyen d'analyses biochimiques et physicochimiques. Ces analyses ont été réalisées au Laboratoire de l'IRDA. Les analyses pour caractériser les propriétés nutritionnelles des granules ont été confiées au Laboratoires d'analyses S.M. Inc. et Agridirect. Une fois prélevés, les échantillons ont été conservés à 4 °C dans des contenants hermétiques de 500 ml jusqu'à leur analyse, à l'exception des granules séchés qui ont été conservés dans des sacs de plastique. Les analyses effectuées sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1. Liste des analyses effectuées à partir de résidus de pommes de terre ou de résidus de carottes.

| Laboratoire | Analyse | |
|---|--|---------------------|
| S.M. Inc. et Agridirect (Granules seulement) | Matière sèche | |
| | Protéine brute (N X 6,25) | |
| | Fibres ADF | |
| | Fibres NDF | |
| | Amidon | |
| | Sucres* | |
| | Cendres | |
| | Calcium (Ca) total | |
| | Phosphore (P) total | |
| | Magnésium (Mg) total | |
| | Sodium (Na) total | |
| | Potassium (K) total | |
| | *(saccharose, maltose, lactose, glucose, fructose) | |
| | IRDA | Phosphore (P) total |
| Potassium (K) total | | |
| Calcium (Ca) total | | |
| Magnésium (Mg) total | | |
| Aluminium (Al) total | | |
| Bore (B) total | | |
| Cuivre (Cu) total | | |
| Fer (Fe) total | | |
| Manganèse (Mn) total | | |
| Zinc (Zn) total | | |
| Molybdène (Mo) total | | |
| Sodium (Na) total | | |
| Nickel (Ni) total | | |
| Cadmium (Cd) total | | |
| Chrome (Cr) total | | |
| Cobalt (Co) total | | |
| Plomb (Pb) total | | |
| Soufre (S) total | | |
| Baryum (Ba) total | | |
| Strontium (Sr) total | | |

5. RÉSULTATS

5.1 Broyage et séparation des résidus

5.1.1 Broyage des résidus

En ce qui a trait aux carottes, 301 kg ont été broyées. De cette quantité, 250 kg de broyat ont été dirigés vers la centrifugeuse alors que 51 kg ont été pressés. Pour des raisons opérationnelles, parce que les particules de carotte avaient tendance à se coller aux parois du broyeur, environ 20 L d'eau ont dû être ajoutés à la trentaine de kilogrammes de carottes se trouvant dans celui-ci pendant le broyage. De plus, près de 10 L d'eau supplémentaires ont également été ajoutés dans la cuve du broyeur à la fin du broyage pour faciliter l'écoulement du broyat. Ce faisant, au total 239 L d'eau ont été ajoutés au broyat destiné à la centrifugeuse alors que 49 L ont été ajoutés au broyat dirigé vers le presseur pneumatique.

En ce qui concerne les pommes de terre, 595 kg ont été broyées dont 490 kg ont été centrifugées et 105 kg ont été pressées. L'addition d'eau n'a pas été requise lors du broyage des pommes de terre.

Les légumes ont été broyés à basse vitesse pendant 20 secondes, puis à haute vitesse pendant 20 à 30 secondes. Le but consistait à obtenir des particules de taille régulière, ni trop fines ni trop grossières, pour maximiser la capture de la matière solide lors des étapes de séparation. La Figure 8 présente l'aspect du broyat pour les deux légumes étudiés.



Figure 8. Carottes et pommes de terre après le broyage.

5.1.2 Séparation par centrifugation

Comme l'objectif ultime de ce projet est de produire des granules à partir du broyat des deux légumes étudiés, une récupération maximale de la matière solide à un taux d'humidité le plus bas possible était souhaitée. Pour obtenir ce résultat, la principale action consistait à ajuster la hauteur de l'anneau liquide dans le bol de la centrifugeuse (Figure 9). Comme des essais antérieurs avaient été réalisés avec succès avec du broyat de résidus de fruits et légumes en utilisant la position « D », qui correspond à un diamètre d'anneau liquide de 210,57 mm, celle-ci a été retenue pour séparer les broyats de carottes et de pommes de terre. Pour plus de détails sur l'ajustement de l'anneau liquide, on pourra se référer à Martin et coll. (2006)

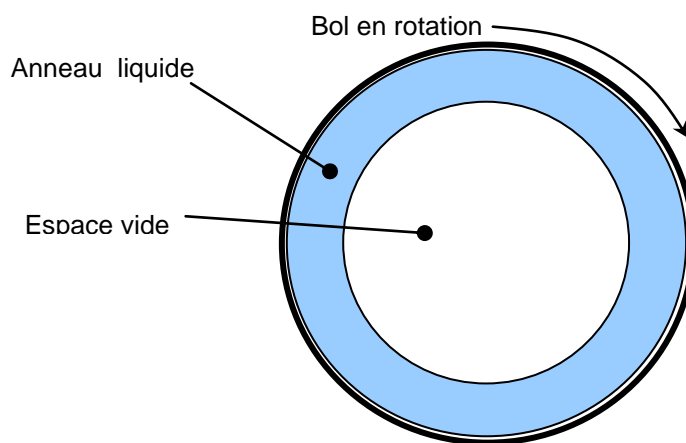


Figure 9. Représentation schématique de l'anneau liquide à l'intérieur de la centrifugeuse.

La centrifugation des carottes et des pommes de terre a eu lieu respectivement les 17 et 24 septembre 2013.

En raison des caractéristiques de la pompe utilisée et de la consistance du broyat de carotte contenu dans le réservoir de stockage temporaire, 150 L d'eau ont été ajoutés pour en permettre le transfert vers le réservoir dédié à la centrifugeuse. Cet apport d'eau n'a pas été nécessaire pour pomper le broyat de pomme de terre.

De plus, afin de permettre le libre écoulement du broyat des deux légumes étudiés vers la pompe volumétrique de l'unité de centrifugation, de l'eau a dû être ajoutée constamment pendant le pompage. En raison de cette dilution non mesurable en cours d'opération, les valeurs concernant la fraction liquide seront calculées par différence entre celles du broyat et de la fraction solide.

Les Figures 10 et 11 montrent respectivement l'aspect de la fraction solide de carotte et de pomme de terre à la sortie de la centrifugeuse alors que la Figure 12 montre l'aspect des fractions liquides des deux légumes étudiés.



Figure 10. Fraction solide des carottes à la sortie de la centrifugeuse.



Figure 11. Fraction solide des pommes de terre à la sortie de la centrifugeuse.



Figure 12. Fraction liquide des carottes et des pommes de terre à la sortie de la centrifugeuse.

5.1.3 Séparation par pressage

Les broyats de carotte et de pommes de terre ont été pressés respectivement le 18 et le 26 septembre. Le pressoir a été rempli avec les broyats des deux légumes sous étude tels qu'ils sortaient du broyeur. Pour les deux légumes, près de la moitié de la quantité totale de liquide a été libérée avant de mettre le ballon interne sous pression. Pour obtenir une extraction optimale du liquide pendant le pressage des deux légumes, des ajustements sur la durée d'application de la pression de 3 bars au cours des dernières heures de pressage ont été nécessaires. Ainsi, la durée totale du pressage a été respectivement de 24 et 42 heures pour les broyats de carottes et de pommes de terre.

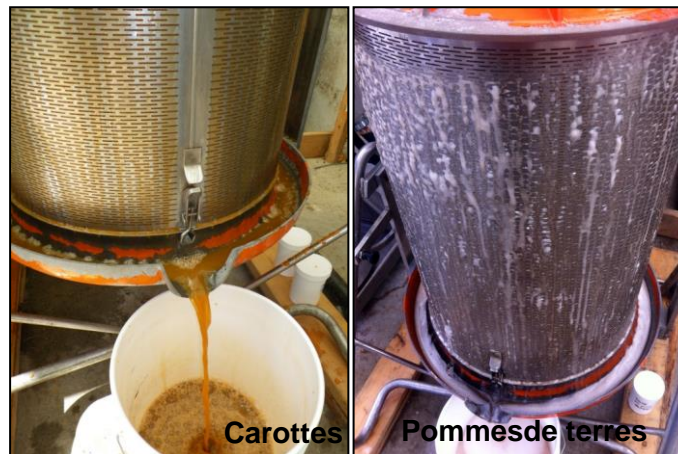


Figure 13. Pressage des broyats de carottes et de pommes de terre.

Une fois le liquide extrait, les FS des deux légumes présentaient un aspect similaire à celui d'un gâteau compact et friable, tel que montré à la Figure 14.

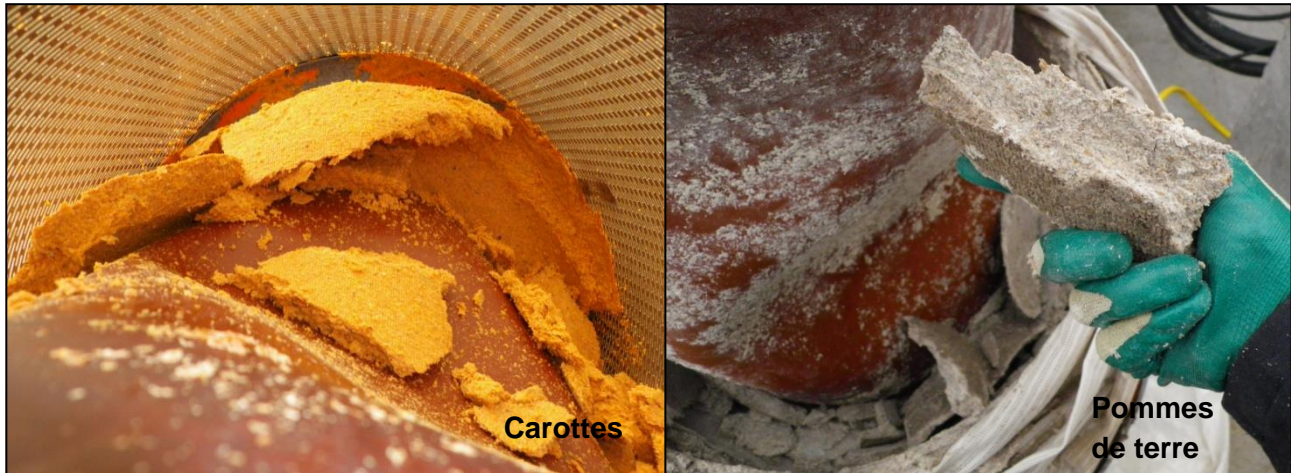


Figure 14. Fraction solide de carottes et de pommes de terre à l'intérieur du presseur à la fin de la période de pressage.

5.1.4 Performances des séparateurs

Le Tableau 2 présente les résultats obtenus à la suite de la séparation du broyat de carotte en utilisant les deux séparateurs étudiés. On note, pour la centrifugeuse, que la séparation de 250 kg de broyat à 8,4 % de matière sèche (MS) a conduit à la formation d'environ 131 kg de FS et de 119 kg de FL avec une siccité respective de 8,7 % et de 8,0 %. Pour le presseur pneumatique, la séparation de 51 kg de broyat à 8,4 % de matière sèche a produit 17 kg de FS et 34 kg de FL ayant respectivement une siccité de 13,9 % et de 5,6 %. Similairement, le Tableau 3 montre les résultats de séparation pour la pomme de terre. On remarque, pour le cas de la centrifugeuse, que 490 kg de broyat à 17,5 % de MS ont été séparé provoquant la formation d'environ 146 kg de FS et de 344 kg de FL avec une siccité respective de 44,2 % et 6,2 %. Quant au presseur pneumatique, la séparation de 105 kg de broyat à 17,5 % de MS a conduit à la formation de 28,4 kg de FS et de 76,6 kg de FL ayant respectivement une siccité de 52,5 % et de 4,5 %. Finalement, les Tableaux 4 et 5 présentent les résultats moyens des concentrations de différents éléments chimiques présents dans le broyat, la FS et la FL pour les deux légumes étudiés et ce pour chacun des séparateurs. Les valeurs de FL ont été calculées par bilan de masse à partir des données des broyats et des FS.

Tableau 2. Bilan de masse de la séparation des carottes.

| CAROTTES | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|
| BILAN DE MASSE | | | | | | |
| Matière | Centrifugeuse | | | Pressoir pneumatique | | |
| | Masse | MS | | Masse | MS | |
| | kg | % | kg | kg | % | kg |
| Broyat | 250 | 8,38 | 20,95 | 51 | 8,38 | 4,27 |
| FS | 130,7 | 8,68 | 11,34 | 17 | 13,9 | 2,36 |
| FL | 119,3 | 8,05 | 9,61 | 34 | 5,62 | 1,91 |

Tableau 3. Bilan de masse de la séparation des pommes de terre.

| POMMES DE TERRE | | | | | | |
|------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|
| BILAN DE MASSE | | | | | | |
| Matière | Centrifugeuse | | | Pressoir pneumatique | | |
| | Masse | MS | | Masse | MS | |
| | kg | % | kg | kg | % | kg |
| Broyat | 490 | 17,5 | 85,75 | 105 | 17,5 | 18,38 |
| FS | 146 | 44,2 | 64,53 | 28,4 | 52,5 | 14,91 |
| FL | 344 | 6,17 | 21,22 | 76,6 | 4,52 | 3,47 |

Tableau 4. Concentration des éléments dans les différentes fractions de carottes selon les séparateurs.

| CAROTTES | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------|----------------------|-----------|-----------------|-----------|
| CONCENTRATION DES ÉLÉMENTS | | | | | | |
| | Unité | | Centrifugeuse | | Pressoir | |
| | | Broyat | FS | FL | FS | FL |
| Matière sèche | % | 8,4 | 8,7 | 8,0 | 13,9 | 5,6 |
| N Total | mg·kg⁻¹ | 1843,0 | 1295,0 | 2446,3 | 2099,0 | 1715,0 |
| N-NH₄ | mg·kg⁻¹ | 48,0 | 51,4 | 44,3 | 31,3 | 56,4 |
| P soluble | mg·kg⁻¹ | 314590,0 | 139337,0 | 507515,6 | 121642,0 | 411064,0 |
| P total | mg·kg⁻¹ | 479,0 | 296,0 | 680,5 | 370,0 | 533,5 |
| K soluble | mg·kg⁻¹ | 3135,0 | 1967,0 | 4420,8 | 2663,0 | 3371,0 |
| K total | mg·kg⁻¹ | 3733,0 | 2617,0 | 4961,5 | 3833,0 | 3683,0 |
| Ca soluble | mg·kg⁻¹ | 185,0 | 42,4 | 342,0 | 112,0 | 221,5 |
| Ca total | mg·kg⁻¹ | 464,0 | 606,0 | 307,7 | 1058,0 | 167,0 |
| Mg soluble | mg·kg⁻¹ | 98,7 | 27,9 | 176,6 | 58,4 | 118,9 |
| Mg total | mg·kg⁻¹ | 181,0 | 195,0 | 165,6 | 329,0 | 107,0 |
| Na soluble | mg·kg⁻¹ | 127,0 | 203,0 | 43,3 | 241,0 | 70,0 |
| Na total | mg·kg⁻¹ | 143,0 | 257,0 | 17,5 | 323,0 | 53,0 |
| B total | mg·kg⁻¹ | 4,2 | 8,8 | 0,0 | 10,6 | 1,1 |
| Cu total | mg·kg⁻¹ | 1,2 | 0,9 | 1,5 | 1,7 | 1,0 |
| Fe total | mg·kg⁻¹ | 20,0 | 36,6 | 1,7 | 56,0 | 2,0 |
| Mn total | mg·kg⁻¹ | 1,1 | 1,5 | 0,6 | 2,2 | 0,5 |
| Zn total | mg·kg⁻¹ | 3,0 | 3,3 | 2,7 | 5,4 | 1,8 |
| Cd total | mg·kg⁻¹ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Co total | mg·kg⁻¹ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| S total | mg·kg⁻¹ | 190,0 | 127,0 | 259,4 | 183,0 | 193,5 |
| Ba total | mg·kg⁻¹ | 2,1 | 3,8 | 0,2 | 6,5 | 0,0 |

Tableau 5. Concentration des éléments dans les différentes fractions de pommes de terre selon les séparateurs.

| POMMES DE TERRE | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------|----------------------|-----------|-----------------|-----------|
| CONCENTRATION DES ÉLÉMENTS | | | | | | |
| | Unité | | Centrifugeuse | | Pressoir | |
| | | Broyat | FS | FL | FS | FL |
| Matière sèche | % | 17,5 | 44,2 | 6,2 | 52,5 | 4,5 |
| N Total | mg·kg⁻¹ | 3161,0 | 2330,0 | 3513,7 | 2980,0 | 3228,1 |
| N-NH₄ | mg·kg⁻¹ | 358,0 | 136,0 | 452,2 | 577,0 | 276,8 |
| P soluble | mg·kg⁻¹ | 185173,0 | 3716,0 | 262186,7 | 9940,0 | 250141,9 |
| P total | mg·kg⁻¹ | 387,0 | 382,0 | 389,1 | 440,0 | 367,3 |
| K soluble | mg·kg⁻¹ | 3069,0 | 1641,0 | 3675,1 | 2336,0 | 3340,8 |
| K total | mg·kg⁻¹ | 3405,0 | 2245,0 | 3897,3 | 3053,0 | 3535,5 |
| Ca soluble | mg·kg⁻¹ | 10,7 | 55,0 | 0,0 | 93,8 | 0,0 |
| Ca total | mg·kg⁻¹ | 75,0 | 174,0 | 33,0 | 216,0 | 22,7 |
| Mg soluble | mg·kg⁻¹ | 111,0 | 28,9 | 145,8 | 47,5 | 134,5 |
| Mg total | mg·kg⁻¹ | 239,0 | 205,0 | 253,4 | 300,0 | 216,4 |
| Na soluble | mg·kg⁻¹ | 2,3 | 40,2 | 0,0 | 2,4 | 2,3 |
| Na total | mg·kg⁻¹ | 3,2 | 52,7 | 0,0 | 9,3 | 1,0 |
| B total | mg·kg⁻¹ | 2,3 | 5,5 | 1,0 | 6,5 | 0,8 |
| Cu total | mg·kg⁻¹ | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 1,6 | 0,9 |
| Fe total | mg·kg⁻¹ | 306,0 | 388,0 | 271,2 | 629,0 | 186,2 |
| Mn total | mg·kg⁻¹ | 18,0 | 7,8 | 22,3 | 11,0 | 20,6 |
| Zn total | mg·kg⁻¹ | 5,0 | 4,5 | 5,3 | 6,4 | 4,5 |
| Cd total | mg·kg⁻¹ | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Co total | mg·kg⁻¹ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| S total | mg·kg⁻¹ | 252,0 | 159,0 | 291,5 | 216,0 | 265,3 |
| Ba total | mg·kg⁻¹ | 4,2 | 6,0 | 3,4 | 10,9 | 1,7 |

5.2 Granulation

Le 30 septembre 2013, un premier essai de granulation a eu lieu avec les FS des deux légumes issues de la séparation par centrifugation et par pressage. Ces quatre FS avaient été conservées dans une chambre froide à 4 °C dans des seaux de 20 L (Figure 15).

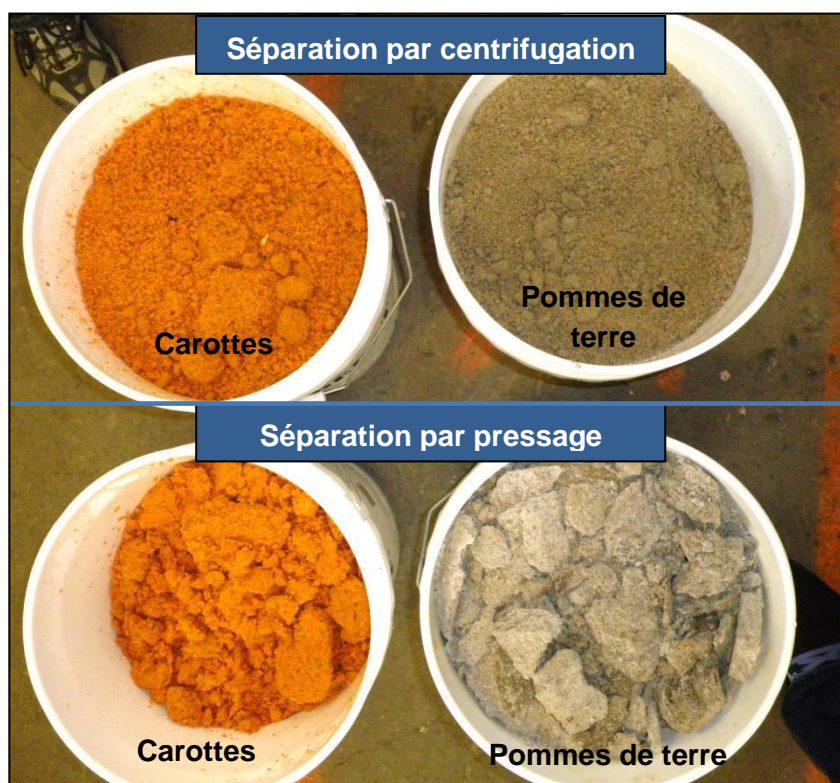


Figure 15. Fraction solide de carottes et de pommes avant granulation.

Au niveau du réglage de la granuleuse, deux matrices comportant des perforations de 4 mm et 6 mm ont été testées. Comme les ouvertures de la matrice de 4 mm avaient tendance à s'obstruer, la matrice de 6 mm a été retenue pour la suite des essais de granulation.

Avec la FS des carottes pressées, il a été possible de produire quelques granules mais la matière semblait trop humide pour être facilement granulée. Elle roulait autour des rouleaux. La FS des carottes centrifugées n'a pas permis la production de granule. Quant aux FS de pommes de terre, en utilisant la matrice de 6 mm il a été possible de produire des granules mais ils étaient fragiles et de formes irrégulières. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la FS issue du pressoir. La Figure 16 présente ces granules à leur sortie de la granuleuse. Ces granules ont nécessité un séchage, ce qui a pu se réaliser facilement dans une étuve.



Figure 16. Granules de pommes de terre pressées (FS humide).

Suite à ce premier essai, il a été conclu que les FS devaient être séchées au préalable. Les quatre échantillons ont été séchés au séchoir Watromat pendant 25 heures. Les essais de granulation avec du matériel sec provenant des deux légumes se sont déroulés le 29 octobre et le 27 novembre. Dans un premier temps il a été constaté que la FS des carottes pressées se granulait avec difficulté tout en produisant beaucoup de poussières. Un peu d'eau a ainsi été ajoutée à cette FS. À partir de ce moment la granulation a pu être réalisée sans produire de poussières. Les granules ainsi produits étaient plus durs et lustrés que ceux produits avec l'échantillon sec (Figure 17). Dans un deuxième temps, les essais de granulation avec de la FS des carottes centrifugées se sont déroulés avec succès tout en ne produisant que peu de poussières (Figure 18).



Figure 17. Granules de carottes pressées (FS sèche) avec et sans ajout d'eau lors de la granulation.

(Crédit photo : Jean-Pierre Dion, Biopterre)



Figure 18. Granules de carottes centrifugées (FS sèche) sans ajout d'eau lors de la granulation.

(Crédit photo : Jean-Pierre Dion, Biopterre)

Dans un troisième temps, la FS des pommes de terre pressées a été facilement granulée alors qu'il a été difficile de granuler la FS des pommes de terre centrifugées (Figure 19). De fait, très peu de granules ont été produits avec cette dernière et la majorité du matériel est sorti en poussière. En y ajoutant un peu d'eau, le matériel a eu tendance à produire une pâte ayant l'apparence d'un plastique sous l'effet de la chaleur. Les quelques granules qui ont été produits étaient très durs (Figure 19).



Figure 19. Granules de pommes de terre pressées et centrifugées (FS sèches) sans ajout d'eau lors de la granulation.

(Crédit photo : Jean-Pierre Dion, Biopterre)

Les granules produits à partir des FS séchées avant granulation ont subi des tests de durabilité. Les résultats de ces tests sont présentés au Tableau 6. On y note que pour les granules issus de la FS de carotte, une teneur en eau d'environ 12 % est nécessaire pour assurer la durabilité du produit. Ainsi, les granules formés avec de la FS séchée présentent une durabilité mécanique de 49 % alors que celles produites avec un léger apport en eau pendant la granulation ont obtenu un plus haut pourcentage de durabilité mécanique, soit près de 89 %. Les granules des pommes de terre centrifugées ont atteint une durabilité mécanique légèrement supérieure (86,49 %) à ceux formés à partir de la matière pressée (84,17 %).

Tableau 6. Taux d'humidité et durabilité mécanique des granules de carottes et de pommes de terre issues de fractions solides préalablement séchées.

| GRANULES | | | | |
|---|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| HUMIDITÉ ET DURABILITÉ MÉCANIQUE | | | | |
| Légumes | Séparateurs | Ajout d'eau | Humidité | Durabilité mécanique |
| | | (O/N) | % | % |
| Carottes | Pressoir | N | 8,53 | 48,99 |
| Carottes | Pressoir | O | 12,86 | 89,48 |
| Carottes | Centrifugeuse | N | 9,1 | 79,84 |
| Pommes de terre | Pressoir | N | 5,23 | 84,17 |
| Pommes de terre | Centrifugeuse | N | 3,65 | 86,49 |

À titre comparatif, la norme de résistance mécanique pour les granules de bois est de 97,5 % ou plus selon le protocole XP CEN/T 15210-1. Ces résultats variables démontrent bien l'importance de connaître le taux d'humidité optimale de la matière (FS) avant de la granuler pour obtenir une durabilité maximale. De plus, la relation entre les taux d'humidité et les pourcentages de durabilité mécanique n'est pas constante d'une substance à l'autre. Dans le cas présent, un taux d'humidité plus élevé a favorisé une meilleure durabilité pour les granules de carottes alors que ce fut l'inverse pour les granules de pommes de terre. Somme toute, lorsque la FS possède une teneur en eau adéquate pour être granulée, l'étape de la granulation peut se réaliser simplement et facilement. La fenêtre d'humidité appropriée pour la granulation peut être étroite et devrait être identifiée pour les différentes matières. La qualité des granules est en partie dépendante de ce facteur.

5.3 Composition chimiques et biochimiques et des granules

Les résultats moyens (trois échantillons) d'analyses de composition pour les granules fabriqués à partir de résidus de pomme de terre et ceux à partir de résidus de carottes sont présentés au Tableau 7. La variation (erreur standard ou erreur-type) n'a pas été présentée car elle est très faible et même nulle pour certains paramètres mesurés. Les sucres n'ont été analysés que dans un échantillon.

Les pourcentages de matière sèche étaient très uniformes dans le produit (aucune variation entre les échantillons).

Les granules de pomme de terre sont particulièrement riches en amidon et contiennent peu de fibres. Globalement, ils contiennent moins de minéraux que les granules de carotte, tout en étant plus riches en Mg, Al et Fe.

Les granules de carotte contiennent des quantités appréciables de fibres, essentiellement sous forme de cellulose et de lignine. En effet, les teneurs en fibres ADF et fibres NDF étant pratiquement identiques, ceci indique un très faible contenu en hémicelluloses (hémicelluloses = fibres NDF – fibres ADF). Les hémicelluloses ont généralement une digestibilité plus grande que la cellulose et que la lignine, cette dernière composante étant essentiellement non digestible, autant pour les ruminants que le porc. Les granules de carottes contiennent de fortes concentrations des minéraux suivants : K, Zn et S.

Tableau 7. Composition chimique et biochimique de granules fabriqués à partir de résidus de pommes de terre ou de résidus de carottes.

| GRANULES | | | |
|--|---------------------|------------------------|-----------------|
| COMPOSITION CHIMIQUE ET BIOCHIMIQUE | | | |
| | Unités | Pommes de terre | Carottes |
| Matière sèche | % | 94,3 | 90 |
| Protéine brute (N X 6,25) | % | 3 | 9 |
| Fibres ADF | % | 6,2 | 25,6 |
| Fibres NDF | % | 6,1 | 26 |
| Amidon | % | 60,5 | 4,2 |
| Sucres* | % | - | 0,5 |
| Cendres | % | 4,1 | 8 |
| P | mg·kg ⁻¹ | 792 | 2961 |
| K | mg·kg ⁻¹ | 5313 | 24661 |
| Ca | mg·kg ⁻¹ | 333 | 5611 |
| Mg | mg·kg ⁻¹ | 1929 | 501 |
| Al | mg·kg ⁻¹ | 687 | 147 |
| B | mg·kg ⁻¹ | 4,5 | 38,6 |
| Cu | mg·kg ⁻¹ | 2,1 | 8,8 |
| Fe | mg·kg ⁻¹ | 1037 | 400 |
| Mn | mg·kg ⁻¹ | 23,3 | 18,7 |
| Zn | mg·kg ⁻¹ | 19,4 | 986 |
| Mo | mg·kg ⁻¹ | 0,1 | 0,5 |
| Na | mg·kg ⁻¹ | 107 | 2364 |
| Ni | mg·kg ⁻¹ | 20,8 | 88,2 |
| Cd | mg·kg ⁻¹ | 0,1 | 0,2 |
| Cr | mg·kg ⁻¹ | 2,4 | 5,3 |
| Co | mg·kg ⁻¹ | 0,4 | 0,2 |
| Pb | mg·kg ⁻¹ | 0,4 | 0,8 |
| S | mg·kg ⁻¹ | 341 | 1322 |
| Ba | mg·kg ⁻¹ | 16,6 | 39,8 |
| Sr | mg·kg ⁻¹ | 2,3 | 29,4 |

*Les résultats sont présentés sur une base de matière humide, sans correction pour le pourcentage de matière sèche de l'échantillon.

‡ Maltose, Lactose, Glucose, Fructose : <0,1 % pour les pommes de terre et les carottes
 Saccharose : <0,1 % pour les pommes de terre et 0,5 % pour les carottes

6. DISCUSSION

6.1 Comparaison des séparateurs

L'un des objectifs de ce projet étant de produire des granules à partir des fractions solides, chacun des séparateur a été évalué pour sa propension à transférer le contenu solide du broyat vers la fraction solide. L'efficacité de séparation pour un élément donné peut être définie comme étant sa proportion retrouvée dans la fraction solide par rapport à celle contenue dans le broyat. Elle peut être évaluée autant pour la quantité de matière sèche que pour tout élément chimique transféré vers la fraction solide. L'efficacité de séparation d'un élément est évaluée avec l'équation 1.

$$E_S = \frac{M_{FS} C_{FS}}{M_{Broyat} C_{Broyat}} \times 100 \quad (1)$$

Où :

E_S : Efficacité de séparation d'un élément (%);

M_{FS} : Masse de fraction solide produite par le séparateur (kg);

C_{FS} : Concentration ou proportion de l'élément retrouvé dans la fraction solide ($mg \cdot kg^{-1}$ ou %);

M_{Broyat} : Masse de broyat séparé (kg);

C_{Broyat} : Concentration ou proportion de l'élément retrouvé dans le broyat ($mg \cdot kg^{-1}$ ou %).

En utilisant les données contenues dans les Tableaux 2 à 5, il est possible de réaliser le Tableau 8. Ce dernier présente les efficacités de séparation des deux équipements utilisés. L'examen de ce tableau permet de constater que l'efficacité de séparation de la matière sèche pour les deux équipements se révèle être à peu près la même pour les carottes, soit 54 % et 55 % respectivement pour la centrifugeuse et le pressoir. Toujours pour la matière sèche et en ce qui concerne les pommes de terre, le pressoir serait légèrement avantagé à la centrifugeuse en obtenant une efficacité de 81 % par comparaison à 75 % pour cette dernière. La principale démarcation dans les performances des appareils pour l'extraction de la matière sèche est ainsi liée au produit séparé plutôt qu'au type d'équipement puisqu'on note une meilleure séparation avec la pomme de terre qu'avec les carottes.

Pour un même produit séparé, les efficacités de séparation d'un élément chimique donné sont également dans les mêmes ordres de grandeur pour les deux séparateurs. Néanmoins, en calculant la moyenne des efficacités de séparation des éléments chimiques par appareil, on obtient pour les carottes une efficacité moyenne de 56 % pour la centrifugeuse et de 51 % pour le pressoir, alors que pour les pommes de terre on obtient des valeurs respectives de 39 % et

43 %. Ainsi, contrairement à ce qui a été observé pour la matière sèche, on obtient un meilleur transfert des éléments chimiques avec les carottes qu'avec les pommes de terre. Ceci est probablement lié à la solubilité des éléments selon le type de légume.

Le Tableau 8 permet également de constater que pour certains éléments chimiques, une efficacité de séparation égale ou supérieure à 100 % a été calculée et ceci est particulièrement le cas pour la centrifugeuse. On peut en déduire qu'une certaine contamination s'est produite dans la fraction solide. Il faut ici rappeler que le transfert du broyat vers les séparateurs a nécessité l'ajout d'eau et que cette quantité a été importante dans le cas de la centrifugeuse.

En ce qui a trait à la capacité de production des appareils, l'examen des Tableaux 2 et 3 permet d'estimer qu'il faut broyer 22 kg de carottes brutes pour les deux équipements afin d'obtenir 1 kg de matière sèche de FS (soit près de 1,1 kg de granules à 90 % de siccité), alors que pour obtenir la même quantité de MS de fraction solide de pomme de terre, il faut traiter 7,6 kg et 7,0 kg de produit brut respectivement pour la centrifugeuse et le pressoir. De plus, ces mêmes tableaux permettent de constater qu'avec des contenus en eau respectivement de 91,7 % et 82,5 % pour les carottes et les pommes de terre, les quantités de fraction liquide générée lors des manipulations sont importantes. Il faudra ainsi réfléchir sur le mode de disposition des liquides qui ne pourront directement être rejetés dans un cours d'eau en raison de la charge organique. L'épandage sur les terres, un traitement biologique, voir la déshydratation complète seront autant de pistes de solution à explorer.

Finalement, du point de vue opérationnel, le pressoir pneumatique, en raison de sa taille et de sa facilité d'utilisation, est particulièrement bien adapté aux travaux à petite échelle et probablement à de futurs travaux de recherche en laboratoire. Pour sa part, avec sa capacité de production plus grande, la centrifugeuse a permis d'explorer certaines facettes d'un traitement industriel. Le transfert des produits du broyeur vers la centrifugeuse a été la contrainte la plus difficile à surmonter, surtout en raison des limites des unités de pompage par rapport à la siccité élevée des produits à pomper. Il a donc fallu diluer les broyats avec de l'eau pour en permettre le pompage. Il est entendu que dans un contexte industriel ceci serait sans doute évité en utilisant des pompes mieux adaptées aux produits traités.

Tableau 8. Efficacités de séparation des deux séparateurs pour différents éléments contenus dans le broyat de carottes et de pommes de terre.

| EFFICACITÉ DE SÉPARATION | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | CAROTTES | | POMMES DE TERRE | |
| | Centrifugeuse | Pressoir | Centrifugeuse | Pressoir |
| | % | % | % | % |
| Matière sèche | 54 | 55 | 75 | 81 |
| N Total | 37 | 38 | 22 | 25 |
| N-NH₄ | 56 | 22 | 11 | 44 |
| P soluble | 23 | 13 | 1 | 1 |
| P total | 32 | 26 | 29 | 31 |
| K soluble | 33 | 28 | 16 | 21 |
| K total | 37 | 34 | 20 | 24 |
| Ca soluble | 12 | 20 | (≥ 100) ¹ | (≥ 100) ¹ |
| Ca total | 68 | 76 | 69 | 78 |
| Mg soluble | 15 | 20 | 8 | 12 |
| Mg total | 56 | 61 | 26 | 34 |
| Na soluble | 84 | 63 | (≥ 100) ¹ | 28 |
| Na total | 94 | 75 | (≥ 100) ¹ | 78 |
| B total | (≥ 100) ¹ | 83 | 70 | 75 |
| Cu total | 41 | 46 | 24 | 41 |
| Fe total | 96 | 93 | 38 | 56 |
| Mn total | 72 | 69 | 13 | 17 |
| Zn total | 57 | 60 | 27 | 34 |
| Cd total | (≥ 100) ¹ | 78 | 47 | 55 |
| Co total | 36 | 33 | 33 | 45 |
| S total | 35 | 32 | 19 | 23 |
| Ba total | 95 | (≥ 100) ¹ | 43 | 71 |

¹Valeur calculée d'efficacité de séparation égale ou supérieure à 100 %

6.2 Propriétés nutritives des granules

6.2.1 Granules de pommes de terre

La pomme de terre s'utilise régulièrement dans l'alimentation du bétail, principalement sous forme déshydratée, autant pour le porc que pour les ruminants. La composition des granules de pommes de terre produits dans la présente étude se rapproche de celle des pommes de terre déshydratées (Sauvant et coll. 2002) et de celle des pommes de terre entières crues (USDA

2014a). La concentration en protéine brute de seulement 3,2 % (sur une base de MS) (Tableau 7) semble un peu faible par rapport à ce que rapportent d'autres sources (9,8 % (sur une base de MS), pour Sauvart et coll. (2002) ; 10,0 % (sur une base de MS), pour Eriksson et coll. (2004)). Ceci pourrait s'expliquer par les variétés de pommes de terre utilisées, ou encore par le type de résidus retenus pour fabriquer les granules. Sauvart et coll. (2002) et Eriksson et coll. (2004) rapportent la composition du tubercule complet, séché dans le premier cas, et cru dans le second.

La forte proportion d'amidon dans la pomme de terre amène les experts dans le domaine à classer cet ingrédient dans la catégorie « Amidon, racines et tubercules » (Sauvart et coll. 2002), au côté du manioc, de la patate douce et de divers concentrés d'amidon (ex. amidon de maïs), dont les teneurs en amidon sont supérieures à 60 %. Ce pourcentage d'amidon se compare aussi à celui de la plupart des grains (maïs, blé, orge en particulier). Ces ingrédients sont donc des sources facilement disponibles d'énergie autant pour les ruminants que les porcs.

Les granules de pomme de terre pourraient donc, théoriquement, être utilisables comme source d'énergie autant dans l'alimentation des porcs que celle des ruminants (bovins, ovins et caprins). Toutefois, la pomme de terre crue ne semble pas être particulièrement prisée par le porc qui présente alors une baisse de la prise alimentaire, de la digestibilité de l'amidon et des performances zootechniques (Braude et Mitchell 1951), ainsi qu'une baisse de la digestibilité des protéines (Whittemore et coll. 1975). Toutefois, lorsque cuite, la pomme de terre est hautement palatable pour le porc et permettrait d'obtenir des performances nutritionnelles comparables à celles obtenues avec le maïs (Whittemore et coll. 1974).

Les granules de pommes de terre contiennent des quantités de Fe particulièrement élevées. En effet, des teneurs en Fe de plus de 500 mg·kg⁻¹ sont considérées comme étant la limite tolérable chez le ruminant, le porc pouvant tolérer jusqu'à 3000 mg·kg⁻¹ (Klasing et coll. 2005). Comme cet ingrédient contient plus de 1000 mg·kg⁻¹, il faudrait faire attention de ne pas en ajouter trop dans la ration et de le combiner à des ingrédients pauvres en Fe. Il n'est pas impossible qu'une forte proportion du Fe provienne de la machinerie utilisée pour la fabrication des granules, quoi que les granules de carottes en contiennent moins. Si c'est le cas, il serait sûrement possible d'améliorer le processus de fabrication pour réduire la contamination. La teneur en Al est aussi particulièrement élevée (687 mg·kg⁻¹) bien qu'elle soit quand même en dessous d'une concentration de 1000 mg·kg⁻¹ considérée acceptable pour le porc et les ruminants (Klasing et coll. 2005). Tous les autres minéraux dosent sous les concentrations jugées acceptables.

L'analyse simple de l'ingrédient, telle qu'effectuée dans le cadre de la présente étude, ne permet pas de conclure sur le potentiel nutritionnel des granules de pomme de terre en alimentation porcine, considérant les effets connus de l'amidon de pommes de terre sur la prise alimentaire et la digestibilité de la ration. Il est possible que les manipulations préalables de séchage et de cubage, pour la fabrication des granules de pommes de terre, représentent un traitement de chaleur suffisamment important pour augmenter la palatabilité ainsi que la digestibilité des nutriments, mais ceci reste à être évalué. Néanmoins, la composition de base de ce produit qui, à peu de choses près, est identique à celle de la pomme de terre crue ou séchée, laisse présager d'un bon potentiel nutritionnel pour le porc.

Pour l'alimentation des ruminants, un ingrédient riche en amidon et pauvre en fibres, comme les granules de pommes de terre, doit être utilisé adéquatement pour ne pas nuire au bon fonctionnement du rumen. Cependant, le ruminant ne semble pas avoir la même contrainte de cuisson de l'amidon que le porc et, peu importe l'intensité de la cuisson subie par les granules lors de leur préparation, ils devraient représenter une source énergétique facilement disponible pour le ruminant au même titre que les grains. Toutefois, la pomme de terre crue, ajoutée à la ration en remplacement de l'orge, réduit la consommation d'ensilage et la production laitière chez la vache (Eriksson et coll. 2004). Ce résultat pourrait peut-être s'expliquer par un effet de volume, la pomme de terre crue occupant un espace important dans le rumen. Si c'est le cas, les granules seraient une alternative potentiellement intéressante, considérant leur volume plus faible par rapport au produit frais. Toutefois, il a aussi été montré que l'amidon de la pomme de terre est dégradé plus lentement dans le rumen que celui du blé (Monteils et coll. 2002). Il est possible que cette dégradation plus lente explique la baisse de consommation de l'ensilage et la réduction concomitante de production laitière. Tout comme pour le porc, il n'est pas possible d'inférer sur les effets possibles du traitement de granulation sur la digestibilité de l'amidon dans le rumen. Néanmoins, la composition de base de ce produit qui, à peu de choses près, est identique à celle de la pomme de terre crue ou séchée, laisse présager d'un bon potentiel nutritionnel pour les ruminants. Cependant, il faudrait porter une attention particulière au contenu élevé en Fe.

Des études récentes indiquent que la protéine de pommes de terre pourrait avoir un effet bénéfique sur la santé des porcelets (Shinde et coll. 2009). Cependant, ces résultats restent marginaux et controversés. De plus, l'obtention de résultats positifs avec la protéine de pommes de terre n'est pas une indication qu'un effet similaire puisse être obtenu avec la pomme de terre entière. Ces résultats laissent quand même pressentir un potentiel nutraceutique de la pomme de terre en alimentation porcine.

6.2.2 Granules de carottes

Contrairement à la pomme de terre, la carotte s'utilise peu dans l'alimentation du bétail, bien que rien ne semble s'opposer à son utilisation. La composition des granules de carottes produits dans la présente étude se rapproche de celle rapportée par Rust et Buskirk (2008) et de celle de la carotte entière crue (USDA 2014b). Les modes de récolte de la carotte et les lavages qu'elle peut subir ou non avant d'être transformée peuvent affecter considérablement la teneur en cendres et donc en minéraux, considérant les apports potentiels de résidus de sols qui restent attachés à cette racine (Rust et Buskirk 2008). Les quantités de cellulose et de lignine (ADF) sont relativement importantes (environ 25 %) et surpassent celles du grain d'avoine par exemple (environ 15 %). Certains tourteaux (ex. tourteau de tournesol) présentent des teneurs en ADF comparables à celles des granules de carottes, mais ils sont beaucoup plus riches en protéine brute. De plus, ces tourteaux ne peuvent représenter une forte proportion de la ration en alimentation porcine, sans qu'il ne s'en suive une baisse de productivité considérant leur contenu élevé en fibres. La teneur relativement faible en protéine brute des granules de carottes ne permet pas de considérer cet ingrédient comme une source intéressante de protéines.

Les granules de carottes contiennent peu d'amidon et presque pas de sucres. L'apport énergétique des granules de carottes ne semble alors provenir que de la cellulose, qui est peu ou pas digestible par le porc. Donc, à prime abord, les granules de carottes ne seraient pas recommandés en alimentation des porcs, sauf dans le cas de truies en gestation, dans le but d'augmenter le volume de la ration avec une source de fibres peu ou pas digestibles.

Les granules de carottes contiennent des quantités importantes de plusieurs minéraux, qui proviennent peut-être de contamination avec la terre ou encore à partir des équipements de granulation. Notamment, le seuil tolérable rapporté dans la littérature pour le K est de 10 000 à 20 000 mg·kg⁻¹, selon les espèces (Klasing et coll. 2005), pour une concentration de 24 661 mg·kg⁻¹ pour les granules de carottes. Le Zn dose à 986 mg·kg⁻¹ tandis que les recommandations sont de ne pas dépasser 300 mg·kg⁻¹ pour les ovins, 500 mg·kg⁻¹ pour les bovins et 1000 mg·kg⁻¹ pour le porc (Klasing et coll. 2005). Il faudrait donc faire attention de ne pas ajouter trop de granules de carottes dans la ration et de les combiner à des ingrédients pauvres en K et en Zn. Tous les autres minéraux dosent sous les concentrations jugées acceptables.

Pour l'alimentation des ruminants, les granules de carottes sont probablement un ingrédient intéressant à considérer. Sans être riches en protéines, ils contiennent quand même des quantités appréciables et intéressantes pour l'animal. Pour parfaire l'analyse, il faudrait évaluer jusqu'à quel point cette protéine est dégradable dans le rumen puisque les sources de protéines peu dégradables dans le rumen, mais digestibles, sont particulièrement intéressantes pour l'alimentation de la vache laitière. Rust et Buskirk (2008), ont montré que des résidus de carottes, non traités, peuvent représenter jusqu'à 40 % de la ration de bovins de boucherie en parcs d'engraissement, sans effet notable sur les performances zootechniques. La composition de base des granules de carottes laisse présager d'un bon potentiel nutritionnel pour les ruminants.

Les carottes contiennent d'importantes quantités de vitamines, notamment la vitamine A et autres caroténoïdes. Elles présenteraient aussi une activité d'antioxydant qui pourrait s'avérer favorable pour la santé des animaux. Des essais en condition réelle d'alimentation animale permettraient de valider cet aspect.

7. CONCLUSION

Les objectifs de ces travaux de recherche ont tous été satisfaits.

1. Des granules de carottes et de pommes de terre ont été réalisées à partir de fractions solides (FS) produites par séparation de phases d'un broyat de ces légumes.
2. Deux séparateurs ont été utilisés et comparés : un séparateur décanteur-centrifuge (centrifugeuse) et un presseur pneumatique.
3. L'efficacité de séparation de la matière sèche pour les deux équipements se révèle être à peu près la même pour les carottes soit près de 54 % alors que pour les pommes de terre le presseur se démarque avec une efficacité de 81 % par comparaison à 75 % pour la centrifugeuse. Pour les éléments chimiques, on obtient pour les carottes une efficacité de séparation moyenne de 56 % pour la centrifugeuse et de 51 % pour le presseur, alors que pour les pommes de terre on obtient des valeurs respectives de 39 % et 43 %. La principale différence dans les performances des appareils est plutôt liée au produit séparé (carottes et pommes de terre) qu'au type d'équipement.
4. En ce qui a trait à la capacité de production des appareils, il faut environ 22 kg de broyat de carottes pour les deux équipements pour obtenir 1 kg de fraction solide (FS) (soit près de 1,1 kg de granules à 90 % de siccité). Pour obtenir la même quantité de FS de pomme de terre, il faut séparer 7,6 kg et 7,0 kg de broyat respectivement pour la centrifugeuse et le presseur.
5. Le presseur pneumatique, en raison de sa taille, est particulièrement bien adapté aux travaux à petite échelle et probablement à de futurs travaux de recherche en laboratoire. Pour sa part, avec sa capacité de production plus grande, la centrifugeuse a permis d'explorer certaines facettes d'un traitement industriel. Le transfert des produits du broyeur vers la centrifugeuse a été la contrainte la plus difficile à surmonter, surtout en raison des limites des unités de pompage par rapport à la siccité élevée des produits à pomper. Il a donc fallu diluer les broyats avec de l'eau pour en permettre le pompage. Il est entendu que dans un contexte industriel ceci serait évité en utilisant des pompes mieux adaptées aux produits traités.
6. Des essais de durabilité effectués sur les granules des deux produits sous étude présentent des valeurs entre 80 et 89 %, soit en deçà de la valeur de 97 % établie pour les granules de bois. Le taux d'humidité présent dans les particules au moment de la granulation s'avère l'élément déterminant pour la durabilité des granules. Dans le cadre de ce projet, celui-ci s'est situé près de 12 % pour les carottes et de 5 % pour les pommes de terre.

7. La composition nutritionnelle des granules de pommes de terre et des granules de carottes a été comparée à celle de produits équivalents utilisés présentement dans l'industrie :
 - a. les granules de pommes de terre sont riches en amidon et pauvre en fibres ;
 - b. la composition des granules de pommes de terre est essentiellement la même que celle des résidus de pommes de terre, parfois utilisés en alimentation animale ;
 - c. les granules de carottes contiennent environ 25 % de fibres ADF, et sont donc relativement fibreux ;
 - d. les granules de carottes ne sont pas suffisamment riches en protéine brute pour en faire un ingrédient protéique ;
 - e. la composition des granules de carottes est essentiellement la même que celle des résidus de carottes, parfois utilisés en alimentation animale.

8. Des recommandations ont été formulées quant aux domaines d'application semblant les plus prometteurs pour l'utilisation des deux types de granules, Les grandes lignes sont les suivantes :
 - a. les granules de pommes de terre peuvent potentiellement être utilisés comme source d'énergie pour l'alimentation des porcs, mais il faudra tout d'abord évaluer l'effet du traitement de granulation sur la cuisson du produit, considérant que les porcs utilisent mal la pomme de terre crue, mais utilisent très bien la pomme de terre cuite ;
 - b. les granules de pommes de terre peuvent potentiellement être utilisés comme source d'énergie pour l'alimentation des ruminants ;
 - c. les granules de carottes ne devraient pas être utilisés en alimentation porcine, sauf si l'objectif est d'accroître le volume non digestible de la ration à l'aide de fibres alimentaires non digestibles ;
 - d. les granules de carottes peuvent potentiellement être utilisées dans l'alimentation des ruminants ;
 - e. comme débouchés futurs et en gardant notamment à l'esprit les nouvelles tendances de réduire l'utilisation des antibiotiques avec des prébiotiques qui se retrouvent naturellement dans les fruits et légumes, les granules de pomme de terre et les granules de carottes pourraient potentiellement être des sources de prébiotiques et autres nutraceutiques bénéfiques à la santé de l'animal. Toutefois, des essais alimentaires avec des animaux devront être réalisés pour confirmer cette hypothèse.

9. Ce rapport offre un premier portrait de l'utilisation potentielle des granules de pommes de terre et des granules de carottes dans l'alimentation des animaux d'élevage. Toutefois, des mises en garde sont nécessaires :
- ❖ Les volailles n'ont pas été incluses dans l'analyse. Ces espèces sont particulièrement performantes et ont des exigences nutritionnelles importantes. Une analyse grossière de la composition nutritionnelle d'un ingrédient est nettement insuffisante pour se prononcer sur l'utilisation possible de cet ingrédient à la ration. Il est nécessaire de procéder directement avec des tests de digestibilité et de performances zootechniques.
 - ❖ Même si les conclusions sont à l'effet que les granules de pommes de terre et les granules de carottes sont potentiellement utilisables dans l'alimentation du bétail, il est nécessaire de procéder à des analyses plus poussées, notamment des essais de digestibilité, pour vraiment bien caractériser le produit. Il importera aussi d'évaluer les taux d'incorporation acceptables de chacun de ces ingrédients dans la ration en fonction des performances zootechniques obtenues pour chaque espèce.
 - ❖ Les modes de récoltes, les manipulations que subissent le produit d'origine et le processus de granulation altèrent probablement certaines caractéristiques du produit. Notamment, les deux types de granules se sont avérés riches en certains minéraux qui pourraient peut-être provenir de contamination avec la terre ou des manipulations pendant la transformation. De plus, les concentrations vitaminiques n'ont pas été évaluées et plusieurs vitamines sont détruites ou dénaturées par la chaleur ou la lumière. Enfin, il n'est pas possible pour le moment d'évaluer le potentiel du processus de granulation de préserver l'activité des diverses substances de type prébiotique ou antioxydant, qui pourraient être présentes dans le produit originel.
 - ❖ Les quelques références utilisées pour la rédaction de ce rapport sont loin de constituer une revue de littérature complète, qui ne faisait d'ailleurs pas partie des mandats. Avant d'aller plus loin, il serait opportun et pertinent d'explorer plus en profondeur la littérature scientifique portant sur l'utilisation de la pomme de terre et de la carotte comme ingrédients dans l'alimentation du bétail.
 - ❖ Les impacts économiques et environnementaux n'ont pas été évalués. En raison des volumes produits, la disposition de la fraction liquide sera un enjeu important à considérer. De même, la déshydratation et la granulation sont des processus relativement « énergivores » qui vont éventuellement influencer le coût du produit final et son utilisation potentielle en élevages.

8. REMERCIEMENTS

Une partie du financement de ce projet a été fournie par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec par l'entremise de son programme PRIME-VERT, Sous-volet 3.2 – Approche interrégionale.

Les organismes et producteurs suivants sont remerciés pour leur collaboration, sans laquelle le projet n'aurait pu être réalisé :

- Centre de développement des bioproduits Biopterre;
- Les Fermes David et Richard Blais inc. de l'Île d'Orléans;
- M. Jean-Paul Leblanc de Saint-Anselme.

RÉFÉRENCES

- AFNOR. 2006.** NF CEN/TS 15210-1;2006. Solids biofuels. Methods for the determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Part 1: Pellets. 13p.
- Braude R, Mitchell KG, 1951.** Potatoes for fattening pigs. Comparison of cooked and raw potatoes. *Agriculture* 57:501-506.
- Eriksson T, Murphy M, Cizuk P, Burstedt E, 2004.** Nitrogen balance, microbial protein production, and milk production in dairy cows fed fodder beets and potatoes, or barley. *J Dairy Sci* 87:1057-1070.
- Klansing KC, Goff JP, Greger JL, King JC, Lall SP, Lei XG, Linn JG, Nielsen FH, Spears JW, 2005.** Mineral Tolerance of Animals, 2nd Edition. National Research Council. The National Academies Press, Washington DC, USA. 496 pages.
- Martin, D.Y., Léveillé, F., Landry, C. et Carrier, R. 2006.** Installation et essais à la ferme d'un système de séparation solide-liquide du lisier de porcs complétement par la stabilisation et l'entreposage de la fraction solide. Rapport de recherche. Institut de recherche et de Développement en Agroenvironnement. 100 pages.
- Monteil V, Jurjanz S, Colin-Schoellen O, Blanchart G, Laurent F, 2002.** Kinetics of ruminal degradation of wheat and potato starches in total mixed rations. *J Anim Sci* 80:235-241.
- Rust S et Buskirk D, 2008.** Feeding carrots or sugar beets to cattle. *Cattle Call* (Published by the Michigan State University Beef Team). Vol 13, No 4, pp 1-2.
- Sauvant D, Perez JM, Tran G, 2002.** Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. INRA, Paris, France. 299 pages.
- Shinde PL, Byung JC, Aparicio Arnay M, Piñeiro C, 2009.** Antimicrobial peptides as an alternative to antibiotics in pig nutrition. Consulté sur Internet le 27-01-2014 : http://www.pig333.com/nutrition/antimicrobial-peptides-as-an-alternative-to-antibiotics-in-pigs-nutrit_1917/
- USDA, 2014a.** Composition de la pomme de terre crue. Consulté sur Internet le 14-01-2014 : <http://nutritiondata.self.com/facts/vegetables-and-vegetable-products/2546/2>
- USDA, 2014b.** Composition de la carotte crue. Consulté sur Internet le 14-01-2014 : <http://nutritiondata.self.com/facts/vegetables-and-vegetable-products/2383/2>
- Whittemore CT, Scott A, Moffat W, 1975.** The inhibition of nitrogen digestion in diets for growing pigs containing various sources of raw potato. *Potato Res.* 18:322-325.

Whittemore CT, Taylor AG, Crooks P, 1974. The nutritive value for young pigs of cooked potato flake in comparison to maize meal. J Agric. Sci. Camb. 83:1-5.