

## Influence de la granulométrie sur les performances énergétiques du Couple Broyage-Granulation

Du point de vue bibliographique, Seeling et Wulff (1946), et Kumar (1973) décrivent 3 mécanismes de base qui régissent la compression :

- Glissement directement lié au tassement
- Déformation élastique ou plastique
- Fragmentation

Sur la base de ce troisième point, il est donc possible d'imaginer qu'un produit « trop grossier » puisse conduire à une augmentation de la puissance appelée par une presse lors de son agglomération. De nombreux auteurs (Smith, 1962, Lefumeux, 1979, Wellin, 1976, Payne, 1978) font état d'une meilleure agglomération des particules d'un produit lorsque sa mouture devient plus fine, mais ils ne parlent pas forcément de l'énergie globale consommée. Vercauteren (1982) pense que la granulométrie joue un rôle important sur l'agglomération des mélanges et il ressort de ses expériences que la friabilité (100 - durabilité) et le taux de fines sont d'autant plus élevés que le produit est plus grossier. L'étude de Pedamond (1977) sur l'agglomération de fractions granulométriques d'une farine de maïs (chaque fraction n'ayant toutefois, pas forcément la même composition) montre une réduction de l'énergie à fournir lors de l'agglomération de particules fines. La théorie veut également que la réduction de la taille des particules, conduit à une surface développée plus importante, ce qui permet l'adhésion d'une quantité supérieure de vapeur. Cette vapeur devenant plus lubrifiante, faciliterait l'agglomération des particules par la création de plus de ponts solides. Toutefois, d'autres études ont conduit à des conclusions plus relatives, notamment réalisées par la Kansas State University, dont la plus significative est celle menée par Stevens (1987 – Tableau ci-dessous).

	D50	CSE Broyage (KWh/t)	CSE Granulation (KWh/t)	CSE Total (KWh/t)	Durabilité PDI (%)
Maïs	1023	3.6	8.8	12.4	89.9
	794	4.7	7.7	12.4	88.8
	551	9.1	7.6	16.7	90.3
Blé	1710	2.3	11.0	13.3	92.4
	802	3.9	9.9	13.8	96.7
	365	7.2	9.7	16.9	97.4

Elle est réalisée sur des formules à base de maïs et de blé granulées à une température de consigne de 75°C (sortie conditionneur) à des débits de granulation

de 1.7 à 2 t/h (3 répétitions pour chaque formule). Les résultats montraient avec l'augmentation de taille des particules pour les 2 types de formule :

- Une réduction de la Consommation Spécifique Electrique au broyage : CSE<sub>broyage</sub>
- Une augmentation de la CSE<sub>granulation</sub>
- Une réduction de la CSE<sub>totale</sub>
- Une réduction de la durabilité (PDI) surtout visible avec la formule blé

Au bilan de la bibliographie, on notera que la majorité des éléments conduirait donc à attendre une réduction de la consommation électrique quand la granulométrie de la farine décroît, même si l'étude Stevens contredit ce point de vue qui semble partagé par beaucoup. Si le gain énergétique existait, il serait utile de savoir si la consommation électrique accrue au broyage pour obtenir une farine plus fine se traduit par un gain électrique significatif qui nous serait promis au niveau de la granulation. Enfin, on notera également la rareté de ce type d'études et l'ancienneté des références et l'utilisation d'une méthode ancienne de mesure de la durabilité moins discriminante.

Pour ajouter un élément, cette fiche technique relate les résultats d'une étude de ce type menée en 1990, au niveau industriel par Tecaliman, mais qui n'avait jamais été retranscrite sous forme de fiche technique.

### 1. Matériel

#### 1.1. Aliment

Il s'agit d'un aliment Dindon 2<sup>ème</sup> âge majoritairement composé de céréales (Blé 35 % et Maïs 8 %), de tourteaux de soja 48 (16 %) et de graines de soja extrudés (15 %).

Chaque essai est réalisé sur un lot de 10 tonnes.

#### 1.2. Broyeur

Deux broyeurs sont utilisés, afin d'obtenir une plage granulométrique suffisamment large :

- Broyeur à marteaux horizontal de marque Buhler (235 kW) avec grilles de 1.7, 2.5 et 3.0 mm
- Broyeur à marteaux vertical de marque PSI (200 kW) avec grille de 20 mm, sauf en fin de lot avec grille de 5 mm. Il fonctionne avec un tamiseur et un recyclage. Le tamiseur a des grilles de 1.6, 2.2 et 3.2 mm.

### 1.3. Presse à granuler

Une Presse PSI de 250 kW avec 2 rouleaux est utilisée dans les conditions suivantes

- Débit de 14.7 t/h
- Température de consigne de 67°C
- Filière : Epaisseur 70 x Diamètre 3.5, soit un Taux de compression de 20
- Durée de mesure en régime stabilisé : 20 minutes

## 2. Méthode

Six modalités de broyage sont testées, et chaque modalité est répétée 3 fois. Les répétitions d'essais ne sont jamais consécutives. Les 18 résultats sont traités. Il n'est pas fait de moyenne par modalité.

### 2.1. Broyage

La capacité du mélangeur étant de 5 tonnes, le lot de 10 tonnes est fractionné en 2 sous-lots. Seuls 73.5 % de la formule sont broyés, soit des sous-lots de 3.67 t. La durée de broyage est comptée au départ de la montée en charge du broyeur, jusqu'à la fin du second sous-lot, la durée de marche à vide entre les 2 sous-lots étant décomptée.

Pour la mesure de l'humidité, un échantillon de chaque sous-lot est prélevé en sortie de mélangeur. Aucun apport de liquide n'est effectué entre le mélange et la granulation.

Les mesures réalisées sont les suivantes :

- Quantité (t)
- Puissance cumulée des moteurs de broyeurs et des aspirations liées (kW)
- Durée de broyage (s)
- Granulométrie de la farine sortie mélangeur ( $\mu\text{m}$ )
- Humidité de la farine sortie mélangeur (%)

### 2.2. Granulation

Les 2 sous-lots sont rassemblés dans un boisseau de presse. Après démarrage de celle-ci, les réglages sont effectués afin d'obtenir le point de fonctionnement ciblé qui est conservé pendant au moins 20 minutes. La fin de la granulation est déterminée approximativement une minute avant la chute de puissance de la presse en fin de lot.

Les mesures réalisées sont les suivantes :

- Débit (t/h)
- Puissance du moteur de la presse (kW)
- Débit de vapeur incorporé en préparateur (kg/h)
- Températures de la farine avant et après injection de vapeur (°C)
- Température des granulés en sortie de filière (°C)
- Humidité de la farine avant et après injection de vapeur (°C)
- Durabilité des granulés (%) mesurée avec la méthode au Caisson (PDI)

## 3. Résultats

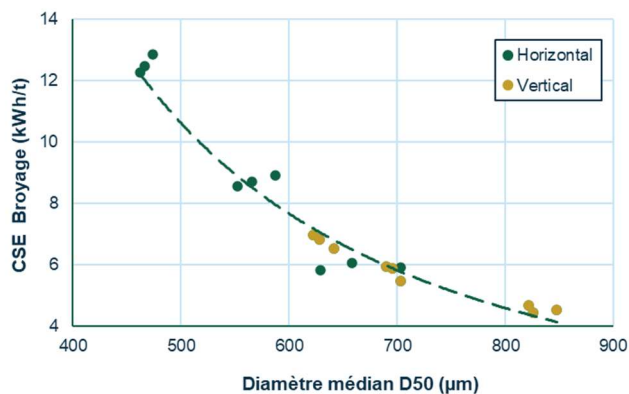
### 3.1. Conditions de broyage

Les plages granulométriques (diamètres médians des moutures) obtenues sont de :

- 450 à 700  $\mu\text{m}$  pour le broyeur horizontal
- 600 à 800  $\mu\text{m}$  pour le broyeur vertical

La plage entre 600 et 700 est donc commune.

L'évolution de la consommation spécifique électrique (CSE) de ce poste (tous moteurs confondus) est décroissante, lorsque la granulométrie obtenue s'accroît indépendamment du broyeur choisi (Figure ci-dessous).



L'évolution de cette courbe apparaît ici indépendante du changement de broyeur.

Ainsi, un aliment Dinde d'environ 800  $\mu\text{m}$  demandera environ 5 kWh/t alors que le même aliment à 500  $\mu\text{m}$  demandera 11 kWh/t, soit 2.2 fois plus. Il est donc important de s'interroger sur l'intérêt zootechnique et nutritionnel à dépenser **2.2 fois plus d'énergie** au broyage pour passer **de 800 à 500  $\mu\text{m}$** .

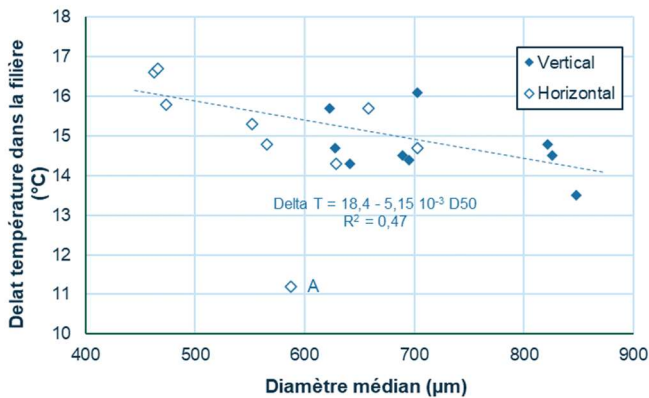
### 3.2. Conditions de granulation

En moyenne,

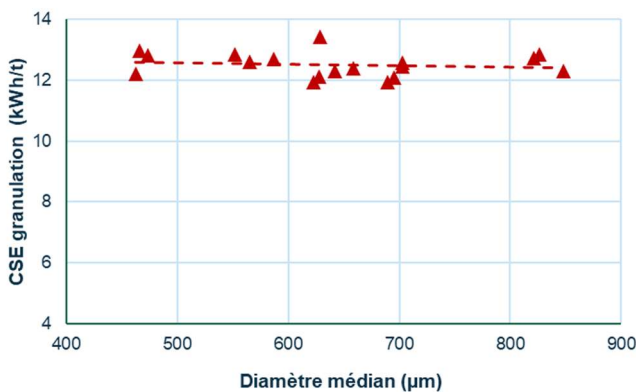
- Les aliments après broyage sont relativement chauds, car la température moyenne de la farine était de 31.5 °C
- On constate + 2.6 % d'eau au conditionnement (+/- 0.46 %) pour une élévation de température moyenne de 35.9 °C (+/- 1.95 °C) **soit 1 % d'eau pour 13.8 °C d'élévation.**
- Une progression de **+ 14.9 °C lors du passage en presse** avec peu d'écart entre les essais (+/- 2.8°C entre les extrêmes).

Sur ce dernier aspect, malgré la faible variation, un début de liaison entre la granulométrie et la variation de température a pu être identifié (figure suivante). Il semblerait que ce soit les granulométries les plus fines qui conduisent à une augmentation de la température au passage dans la filière (hors point A issue d'une erreur de mesure). Cette variation a été statistiquement validée malgré la faiblesse du  $R^2$ . Sur

la base des 3 mécanismes de base qui régissent la compression (Voir plus haut), il semblerait donc que le glissement directement lié au tassement joue un rôle important. A contrario, le fractionnement lors de la compression ne jouerait pas de rôle ni sur l'augmentation de température, ni sur la consommation électrique lors du passage en filière. Les produits les plus fins, dotés de surfaces développées supérieures, auraient plus de surface de contact avec les canaux de la filière et conduiraient donc à des frottements plus intenses, malgré la possibilité de collecte d'une quantité supérieure de vapeur à la surface des particules. Ce résultat, étant opposé à ceux de Stevens, mériterait donc d'être à nouveau exploré.

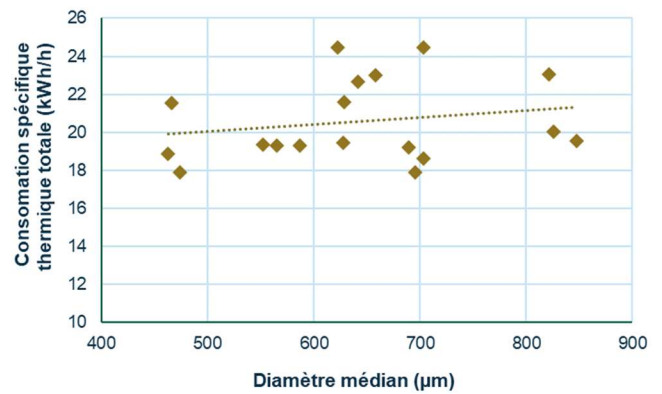


Autre argument dans le sens de la nécessité de refaire ce type d'étude, cette légère augmentation de température à la granulation ne se traduit pas par une augmentation significative de la CSE. En effet, sur la même échelle que la figure précédente concernant la CSE<sub>broyage</sub>, la figure suivante permet de constater une stabilité globale de la CSE de la presse en fonction de la granulométrie de la farine (CV = 3.2 %).

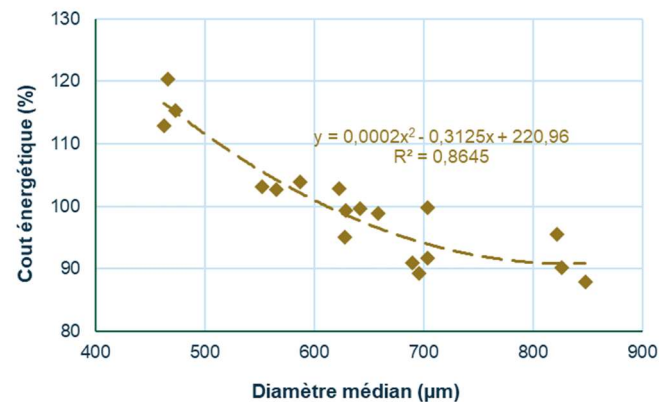


La granulométrie, évoluant pourtant sur une échelle assez large, ne paraît **pas** avoir **d'impact** sur la **consommation électrique de la presse**.

La figure suivante montre qu'il en est de même pour la Consommation Spécifique Thermique, ce qui n'est pas surprenant, puisque la régulation de cette valeur ne dépend pas de l'aliment, mais de sa température initiale et de la température ciblée en sortie de conditionneur. Celle-ci varie donc entre 17.9 et 24.5 kWh/t.

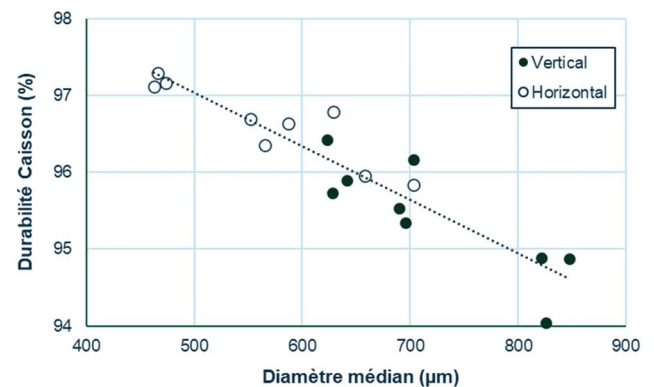


Traduit en coût énergétique de transformation pour ces 2 postes principaux en termes de consommation d'énergie (Environ 70 % de l'énergie électrique d'une usine et 100 % de l'énergie thermique), la variation totale de coûts (rapport des coûts électrique et thermique Base 2022) serait de l'ordre de 30 % (Figure ci-dessous) sur la totalité du domaine d'étude. Pour rester sur la comparaison faite au poste de broyage, **le passage de 500 à 800 µm conduirait à une réduction d'un peu plus de 20% du coût énergétique global sur ces deux postes.**



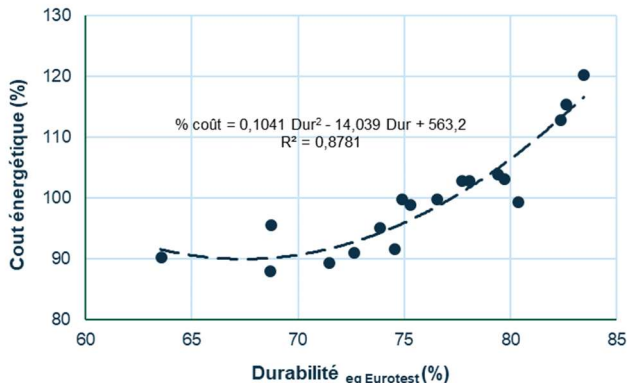
### 3.3. Durabilité

Toutefois, cette baisse de consommation énergétique globale se traduit par ce qui pourrait être considéré comme une baisse de la qualité des granulés. En effet, la durabilité décroît avec l'augmentation de la granulométrie de l'aliment.



Cette décroissance paraît faible en valeur, mais il est important de se souvenir que la mesure a été réalisée à l'aide de la méthode au caisson. A titre informatif, sur

la base de l'équation définie dans la fiche i'Tec G6 entre la durabilité au caisson et la durabilité Eurotest ( $R = 0.95$  avec  $Dura_{\text{Caisson}} = 0.1637 Dura_{\text{Eurotest}} + 83.64$ ), la courbe de durabilité, si elle avait été mesurée avec l'Eurotest, aurait globalement évolué entre 65 et 85 %, comme on le voit sur la figure suivante qui met en relation cette durabilité et le coût énergétique (%).



Cette courbe met en évidence, qu'en dessous de la zone 70/75 % de durabilité, le coût énergétique (pour cet aliment) reste stable. À partir de la durabilité de 75% et jusqu'à environ 84 %, **chaque point de durabilité gagné se traduirait par une augmentation du coût énergétique total de plus de 3 %** (Il s'agit bien d'une valeur estimative sur la base de la liaison entre des 2 méthodes de durabilité).

Cette relation montre qu'il convient bien de **définir un seuil de durabilité** qui serait justifié d'un point de vue zootechnique, afin de déterminer les critères technologiques de fabrication permettant d'y accéder, mais avec un objectif d'une consommation énergétique la plus efficace possible. Il semble bien que la recherche de points de durabilité supplémentaires, au-delà d'un seuil, se traduise bien par une croissance rapide des coûts énergétiques.

## 4. Conclusions

Ces essais industriels réalisés avec 2 broyeurs sur un aliment Dinde ayant des granulométries allant de 450 à 800 µm ont permis de constater, au niveau de la granulation, que lorsque le diamètre médian de la farine diminue, on obtient :

- Un accroissement statistiquement significatif, de quelques degrés, de la température en sortie de filière
- Une amélioration de la durabilité
- Une stabilité de la CSE de la presse

Du point de vue du bilan énergétique, ces essais se traduisent par :

- Aucun effet sur la consommation de vapeur et la consommation spécifique thermique

- Une réduction significative de la CSE au niveau du broyage de 220 % en passant de 500 à 800 µm.
- Une estimation d'un accroissement de plus de 3 % du coût énergétique global par point de durabilité au-dessus de 75 % (Equivalent Eurotest)

Les résultats de ces essais sont, en partie, en accord avec ceux de Stevens, du point de vue du broyage et de la durabilité, mais pas du point de vue de l'énergie consommée à la granulation. Cet écart pourrait être expliqué par l'usage d'un aliment Dinde plutôt gras lors de ces essais.

Ces essais valident donc bien l'effet de la granulométrie de l'aliment sur la consommation énergétique globale du couple broyage/granulation et sur la qualité des granulés.

Ces résultats devraient conduire la profession à renouveler ce type d'études sur d'autres aliments et en testant d'autres paramètres comme la température de conditionnement et les taux de compression, afin de préciser tous les éléments du coût d'un point de durabilité.

Il conviendrait également de tester différentes répartitions de granulométrie pour un même diamètre médian, pour affiner l'impact de la présence de fraction de fines particules dans les aliments.

## Bibliographie

- Kumar M., 1973.** Compaction behavior of ground corn. *J. of Food Sci.* **38**, 877-878.
- Lefumeux J., 1979.** Etude de la fabrication des pellets. Publication NRA – Fats in pellets handling equipment, **314**, 4-11.
- Payne J.D., 1978.** Improving quality of pellet feeds. *Milling feed and fertilizer*, **5**, 34-41.
- Pedamond M., 1977.** Aptitude à l'agglomération des aliments des animaux : mise au point méthodologique ; application à l'étude de l'influence de la granulométrie et de la nature des matières premières. Thèse ENITIAA, Nantes, 79 p.
- Seeling R.R.P., Wulff J. 1946.** *Trans. Aime*, 106 : 492. Cité par Pedamond, 1977.
- Smith G.M., 1962.** The effect of particle size. *Feed production school*, 47-50.
- Stevens C.A., 1987.** Effect of particle size on pelleting efficiency and pellet quality. Kansas State University.
- Vercauteren W.C.P. 1982.** Future development in feed production technology. Holmen Feed production symposium.
- Wellin F., 1976.** Pelleting equipment operations. *Feed Manufacturing Technology. AFMA*, 329-332.