

## Influence de la grille et de la vitesse des marteaux sur la taille des particules de trois formules d'aliments obtenus sur un broyeur à marteaux industriel

L'étape de broyage est une étape énergivore (de 20 à 25 % de la consommation électrique d'une usine), mais primordiale pour l'obtention de granulés de qualité lors de la granulation. Il s'avère donc intéressant de comprendre, de connaître, voire de prédire les caractéristiques granulométriques des aliments en sortie de broyeur.

L'objectif de cette étude est d'analyser la performance d'un broyeur à marteaux en milieu industriel pour le broyage de formules complètes (Pré-dosage) destinées à différents animaux (Truie, Porc charcutier et Volaille) et de tenter, dans une première phase, de modéliser l'influence de la grille ou de la vitesse des marteaux sur la taille des particules. Une seconde phase porte sur la validation des modèles.

### 1. Matériel et méthodes

#### 1.1. Aliments

Les 3 formules industrielles utilisées pour l'établissement des modèles (lots de 2 tonnes) ont leurs compositions détaillées dans le Tableau 1.

Aliment	Truie (%)	Porc charcutier (%)	Volaille (%)
Blé	20.0	38.9	57.5
Pois	15.0	25.0	
Orge	15.0	10.0	
Maïs			5.0
Tourteaux tournesol	8.8	3.1	
Son fin	8.0		
Pulpes betteraves	6.0		
Remoulage blé dur	4.8	2.0	
Tourteaux soja	3.1	5.0	22.0
Mélasses canne	2.7	3.2	
Graine colza		3.5	6.6
Tourteaux colza		5.0	
Autres	6.6	4.3	8.9

**Tableau 1 : Composition des formules utilisées en phase de modélisation**

Pour la seconde étape de validation des modèles, de légères variations dans la composition des formules utilisées sont observées en raison du délai entre les 2 séries d'essais (2 mois) (Tableau 2).

Aliment	Truie (%)	Porc charcutier (%)	Volaille (%)
Blé	20.8	34.1	57.5
Pois	15.0	21.7	
Orge	25.0	14.9	
Maïs			5.0
Tritical		5.0	
Tourteaux tournesol	8.8	2.2	
Son fin	8.0		
Pulpes betteraves	6.0		
Remoulage blé dur	5.0	3.0	
Tourteaux soja	3.0	5.0	22.0
Mélasses canne	1.9	1.6	
Graine colza			6.6
Tourteaux colza		5.0	
Tourteaux de riz		3.4	
Autres	6.5	4.1	8.9

**Tableau 2 : Composition des formules utilisées en phase de validation des modèles**

#### 1.2. Broyeurs à marteaux

Les essais sont réalisés sur une ligne de broyage industrielle recevant un mélange des matières premières à broyer disposant de deux broyeurs. Le premier broyeur à marteaux B1 est de marque Stolz (RM 114) équipé d'un variateur de vitesse ABB. Le second broyeur B2 est identique, mais la vitesse du moteur est fixée à 3000 tr/min. Le Tableau 3 présente les caractéristiques des grilles utilisées.

Diamètre de perçage (mm)	Épaisseur	% vide	Entraxe de perçage
2.0	2.0	40.0	3.0
2.5	2.5	46.0	3.5
3.0	3.0	51.0	4.0
3.5	3.0	54.0	4.5
4.0	3.0	48.0	5.5
5.0	3.0	53.0	6.5
6.0	3.0	55.0	8.0

**Tableau 3 : Description des grilles du broyeur utilisées**

#### 1.3. Conduite des essais

Onze lots de 2 tonnes sont prévus d'être broyés à vitesses variables sur le broyeur B1 pour chaque type de formules. L'ordre de passage des lots est défini afin d'effectuer le moins de changement de grilles possibles. Les essais commencent par un

rinçage de la ligne grâce au broyage d'un premier lot de 2 tonnes. Ensuite, les 11 essais se déroulent selon l'ordre de passage décrit dans le Tableau 4. Certains essais (grisés) ont été interrompus par des contraintes industrielles (arrêt imprévu, casse, etc...). Etant donné la complexité de réalisation d'essais en usine d'aliments pour animaux, ces résultats n'ont pu être recommencés. Ils ne seront donc pas exploités dans la suite de cette étude. Un dernier essai est réalisé, pour chaque type de formule, sur le broyeur B2 à vitesse fixe.

Essais	Grille (mm)	Truie	Porc charcutier	Volaille
		Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )	Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )	Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )
B1 1	2	2000	2000	1500
B1 2	3	2500	2500	1875
B1 3	3	1500	1500	1125
B1 4	4	3000	3000	2250
B1 5	4	2000	2000	1500
B1 6	4	2000	2000	1500
B1 7	4	2000	2000	1500
B1 8	4	1000	1000	750
B1 9	5	2500	2500	1875
B1 10	5	1500	1500	1125
B1 11	6	2000	2000	1500
B2	3.5	3000	3000	3000

**Tableau 4 : Ordre de passage des lots lors des essais de modélisation**

Les essais de validation des modèles ont également été réalisés sur le broyeur B1. Seule la consigne de charge acceptée par le broyeur a été modifiée. Ceci a pour conséquence une augmentation des débits. Le rinçage de la ligne est obtenu à l'aide de lots de 5 t. L'ordre de passage des lots est présenté dans le Tableau 5.

Essais	Grille (mm)	Truie	Porc charcutier	Volaille
		Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )	Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )	Vitesse (tr.min <sup>-1</sup> )
1	4	1500	1500	1200
2	4	3000	3000	1300
3	4	-	-	1400

**Tableau 5 : Ordre de passage des lots et paramètres expérimentaux des essais pour la validation des modèles**

Un analyseur d'énergie (HIOKI) est connecté aux moteurs de chaque ligne de broyeur afin de calculer l'énergie spécifique électrique nécessaire pour le broyage de chacun des lots (Broyeur + aspiration). Les résultats de ces essais permettent de définir les performances de la ligne de broyage dans ses conditions habituelles de production : granulométrie, débit et énergie.

Des prélèvements sont réalisés à 2 niveaux de la ligne de broyage :

- Avant broyage, les échantillons sont prélevés en sortie du pré-mélangeur. Pour chaque essai, un prélèvement est réalisé toutes les 20 secondes. À la fin, un échantillon représentatif global de 500 ml de la formule est prélevé et conditionné dans un récipient hermétique.
- Après broyage, les échantillons de farine sont

prélevés en bout de vis d'extraction après la trémie. À chaque essai, trois échantillons sont prélevés dans des récipients de 150 ml après que 25 %, 50 % et 75 % du temps de broyage se soit écoulé.

## 1.4. Analyses

### D50 [Tecaliman, 1996]

L'analyse de la distribution granulométrique est réalisée à l'aide d'un ensemble de douze tamis standards Retsch avec des tailles allant de 80 à 2000 µm (80 µm, 125 µm, 160 µm, 200 µm, 250 µm, 315 µm, 425 µm, 630 µm, 800 µm, 1000 µm, 1250 µm et 2000 µm). La mesure a été obtenue à partir d'échantillon de 100 g et a été répété trois fois. Chaque échantillon est tamisé pendant 10 minutes. Chaque fraction est alors pesée séparément. Le diamètre moyen géométrique et l'écart géométrique sont ensuite calculés [AFNOR, 1987].

### Humidité

La méthode de mesure de l'humidité suit la norme NF V18-109 [Norme NF V18-109, 1982]. 5g (±0,05g) des formules sont toutes d'abord broyées dans un broyeur de laboratoire réfrigéré par un courant d'eau froide. Ils sont ensuite desséchés pendant au moins 4h dans une étuve réglée à 103°C.

### Modèles et validation

Afin d'élaborer les modèles de prédiction des diamètres médian, l'étude statistique est effectuée grâce au logiciel Statgraph. Il s'agit d'une régression polynomiale de type :  $D50 = cte + a X + b Y + c X^2 + d Y^2 + e XY$

Avec  $X$  : le diamètre d'ouverture de la grille (mm)  
 $Y$  : la vitesse de rotation du rotor (tr.min<sup>-1</sup>)

## 2. Résultats

### 2.1. Elaboration des modèles

Les résultats bruts obtenus lors des essais sur les 3 aliments sont présentés du Tableau 6 au Tableau 8.

L'humidité moyenne des matières premières avant broyage pour les aliments Truie, Porcs charcutier et Volaille sont respectivement de 12.2% ± 0.2, 12.0 % ± 0.1, et de 11.2 % ± 0.2.

Les écarts types géométriques montrent que les distributions granulométriques sont voisines pour les aliments Truie et Volaille (E.G. compris entre 2.0 et 2.1), alors qu'elles sont plus variables et parfois beaucoup plus étalées pour l'aliment Porc charcutier (EG compris entre 2.0 et 2.5). Il est probable que ceci soit expliqué par la composition des formules, notamment la présence d'une quantité de pois fourragers supérieurs dans ce dernier.

D'une manière générale, pour tous les aliments, l'énergie spécifique électrique est inversement proportionnelle à la granulométrie des produits broyés, même si une certaine dispersion peut être notée pour l'aliment Volaille. A granulométrie voisine, les rendements énergétiques moins performants

sont observés lorsque des vitesses de rotation faibles sont associées à des grilles de petits diamètres de perforations (Figure 1).

Code	Grille (mm)	Vitesse (tr/min)	Débit (t/h)	Énergie spécifique (kWh/t)	D <sub>50</sub> (µm)	EG
B1 2	3	2500	30.1	7.7	618	2.09
B1 5	4	2000	44.8	4.9	1045	2.10
B1 6	4	2000	49.4	4.8	1034	2.11
B1 7	4	2000	47.3	4.8	1049	2.08
B1 8	4	1000	27.8	8.6	1671	2.05
B1 9	5	2500	48.4	4.5	977	2.05
B1 10	5	1500	61.1	3.5	1607	2.09
B1 11	6	2000	71.5	2.9	1380	2.05
B2	3.5	3000	41.2	6.4	660	2.13

Tableau 6 : Résultats des essais de modélisation aliment Truie

Code	Grille (mm)	Vitesse (tr/min)	Débit (t/h)	Énergie spécifique (kWh/t)	D <sub>50</sub> (µm)	EG
B1 1	2	2000	21.4	10.8	474	2.03
B1 2	3	2500	40.7	5.7	676	2.17
B1 3	3	1500	32.2	7.5	930	2.19
B1 4	4	3000	34.9	6.8	597	2.19
B1 5	4	2000	44.7	5.2	889	2.19
B1 6	4	2000	44.2	5.3	851	2.21
B1 7	4	2000	44.7	5.5	851	2.20
B1 9	5	2500	55.2	4.2	980	2.19
B1 10	5	1500	70.4	3.1	1728	2.06
B1 11	6	2000	80.5	2.7	1440	2.16
B2	3.5	3000	41.9	6.3	473	2.53

Tableau 7 : Résultats des essais de modélisation aliment Porc charcutier

Code	Grille (mm)	Vitesse (tr/min)	Débit (t/h)	Énergie spécifique (kWh/t)	D <sub>50</sub> (µm)	EG
B1 2	3	1875	37.6	6.1	800	2.02
B1 3	3	1125	24.7	9.6	1078	2.13
B1 4	4	2250	55.5	4.3	931	2.07
B1 5	4	1500	53.1	4.3	1274	2.05
B1 6	4	1500	54.2	4.3	1251	2.08
B1 7	4	1500	54.0	4.3	1232	2.08
B1 8	4	750	21.0	8.7	1875	1.98
B1 9	5	1875	59.8	3.2	1225	2.06
B1 10	5	1125	70.4	2.6	1931	1.92
B1 11	6	1500	98.4	2.0	1598	2.01
B2	3.5	1500	68.2	3.1	1490	2.01

Tableau 8 : Résultats des essais de modélisation aliment Volaille

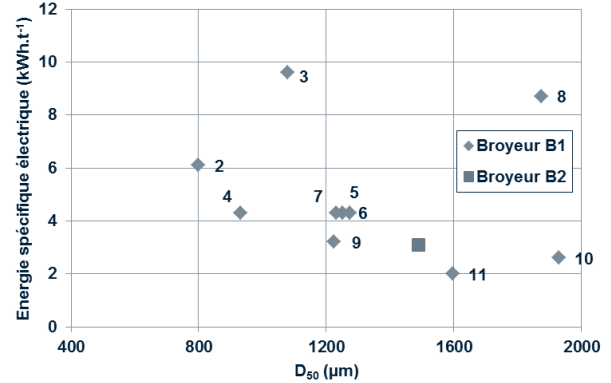
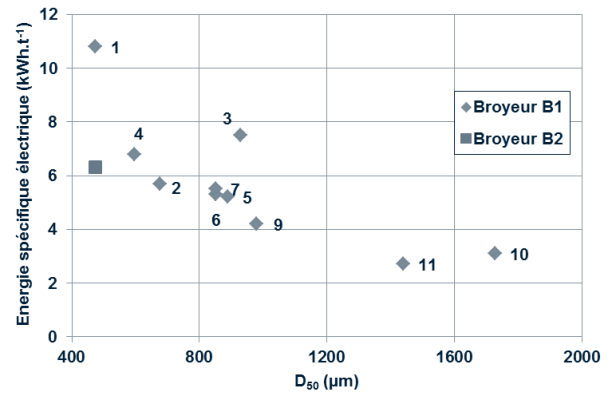
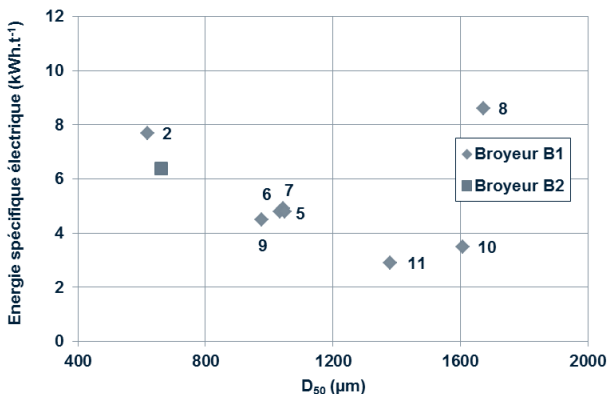


Figure 1 : Énergie spécifique électrique Vs D<sub>50</sub> pour (de haut en bas) les aliments Truie, Porc charcutier et Volaille

Les équations de régressions polynomiales de prédiction du diamètre médian de tamisage (D<sub>50</sub>) en fonction du couple grille/vitesse sont répertoriées dans le Tableau 9.

Pour les 3 aliments, les effets primaires des grilles et des vitesses sont antagonistes : une augmentation du diamètre d'ouverture de grille a pour conséquence d'augmenter le D<sub>50</sub> et une augmentation de la vitesse tend à le réduire. Les modèles d'estimation du D<sub>50</sub> font apparaître des interactions de 1<sup>er</sup> ordre entre les facteurs « Grille » et « Vitesse », ainsi que des effets quadratiques (X<sup>2</sup> et Y<sup>2</sup>) et une interaction simple entre XY.

Pour l'aliment « Volaille », les effets primaires de la grille et de la vitesse sur le D<sub>50</sub> sont sensiblement plus importants et antagonistes que ceux constatés sur les autres aliments.

Aliment	Équation du modèle	R <sup>2</sup> ajusté
Truie	$D_{50}(\mu\text{m}) = 678,031.X - 0,1446.Y - 7,931.X^2 + 0,000111776.Y^2 - 0,199.XY - 132,228$	95 %
Porc charcutier	$D_{50}(\mu\text{m}) = 591,754.X - 0,067.Y + 19,385.X^2 + 0,000150039.Y^2 - 0,247.XY - 239,509$	92 %
Volaille	$D_{50}(\mu\text{m}) = 1051,890.X - 0,294082.Y - 43,1316.X^2 + 0,000265731.Y^2 - 0,2853.XY - 705,105$	99 %

Avec X : le diamètre d'ouverture de la grille (mm)  
Y : la vitesse de rotation du rotor (tr.min<sup>-1</sup>)

Tableau 9 : Équations du modèle obtenu pour chaque aliment

## 2.2. Validation des modèles

La comparaison des résultats bruts, obtenus au cours des essais de modélisation et de validation des aliments Truie et Porc charcutier (broyeur B1, 3000 tr/min, grilles de 4 mm), montre que l'augmentation de la charge du moteur du broyeur et le changement de formule sont à l'origine d'un accroissement du débit, de la granulométrie et de la diminution de l'énergie spécifique électrique (Tableau 10). Ceci impose une augmentation du diamètre  $D_{50}$  des farines qui se traduit par une augmentation de la constante des deux modèles (aliment Truie : + 145  $\mu\text{m}$ , aliment Porc charcutier : + 211  $\mu\text{m}$ ) corrélative à une diminution probable du temps de séjours des produits dans le broyeur.

Aliment et essais	$D_{50}$ observés ( $\mu\text{m}$ )	E.G.	Débit (t/h)	Énergie spéc. électrique (kWh/t)
Truie modélisation	618	2.09	30.1	7.7
Truie validation	763	2.14	50.0	5.5
Porc charcutier Modélisation	597	2.19	34.9	6.9
Porc charcutier Validation	808	2.11	50.4	5.2

Tableau 10 : Influence de la conduite du broyeur et de la composition des formules

Pour tester les modèles, les  $D_{50}$  prédits pour les formules (modifiées pour les aliments Truie et Porc charcutier et initiales pour l'aliment Volaille) et les  $D_{50}$  obtenus lors des essais de validation sont comparés. Les résultats bruts sont présentés dans la Figure 2. Malgré un faible nombre de données et des conditions différentes de broyage (composition des aliments et conduite du broyeur), une relation entre les valeurs prédites et obtenues est observée. En effet, la Figure 2 montre une forte corrélation entre ces valeurs ( $R^2 = 0.91$ ). Cette corrélation tend à valider les modèles proposés pour les trois aliments testés.

Dans le cas des aliments Truie et Porc charcutier, les valeurs observées sont supérieures aux valeurs prédites. Ce phénomène semble être influencé par la vitesse du rotor. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le modèle « Volaille ».

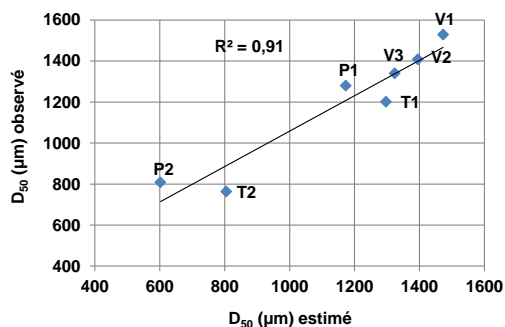


Figure 2 : Relation  $D_{50}$  observés et  $D_{50}$  estimés

Afin de vérifier la fiabilité des données, les modèles ont été testés lors de la seconde campagne d'essais (Figure 3).

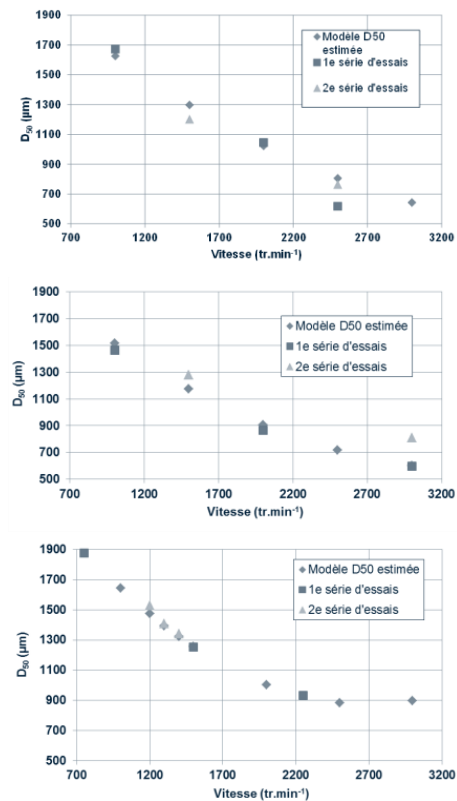


Figure 3 : Relation  $D_{50}$  estimés et  $D_{50}$  mesurés des broyats lors de deux campagnes d'essais sur des aliments Truie, Porc charcutier et Volaille (de haut en bas) en Grille 4 et pour différentes vitesses de rotor

La Figure 3 démontre que les modèles proposés pour chaque aliment permettent de prédire des valeurs de  $D_{50}$  très proches des  $D_{50}$  obtenus lors des deux séries d'essais ( $D_{50}$  obtenus et  $D_{50}$  mesurés par rapport à la vitesse de rotation des marteaux). Il est donc possible de conclure que les modèles proposés sont en capacité d'aider les industriels à anticiper les résultats de leurs broyages.

## 3. Conclusion

Malgré des conditions expérimentales difficiles en milieu industriel, les résultats démontrent :

- qu'il est possible de prédire, assez précisément, la granulométrie de farines d'aliments complets en connaissant la vitesse du rotor et le diamètre de perforation des grilles ;
- que l'erreur de prédiction est probablement de même niveau que la variabilité des granulométries obtenues dans des conditions classiques sur un broyeur de 3000 tr/min (vitesse du rotor fixe et perforation de la grille définies en fonction de la formule).

Toutefois, des essais complémentaires seraient souhaitables pour préciser l'influence de la variation de formule, car les deux campagnes successives sur les « mêmes » formules ont montré l'impact de la variation de composition sur les débits autorisés et donc un effet de la conduite du broyeur sur la qualité de la prédiction.