

Influence du débit d'air et du débit d'alimentation sur le poste de broyage et la qualité du produit sur une ligne pilote

Le temps de séjour de la matière dans la chambre de broyage peut théoriquement affecter la mouture produite (granulométrie, création de particules fines, échauffement, variation d'humidité...) et la production de l'usine à ce poste (débit de production, consommation électrique spécifique, ...). Par exemple, plus le temps de séjour des particules dans la chambre de broyage est long, et plus la mouture est fine. A l'inverse, des particules grossières sont obtenues avec une baisse du temps de séjour.

Le but de cette étude en pilote est d'identifier l'effet du taux de charge du broyeur et du débit d'air sur le temps de séjour des particules. Si la variation de débit d'air a un effet, alors, il pourra être envisagé de le stimuler, afin de gagner en performance énergétique de l'ensemble de la ligne. Ceci pourrait justifier la pertinence de l'installation d'une variation de vitesse sur les moteurs de ventilateur au poste de broyage ou le choix de la puissance installée en fonction du bon point de fonctionnement, dont le réglage serait en relation avec le débit et la qualité de produit attendue.

Pour rappel, la ligne de broyage consomme entre 20 à 25 % de la consommation électrique d'une usine. Le moteur du ventilateur représente environ 15% de cette consommation électrique de la ligne de broyage.

1. Matériel et méthodes

1.1. Matière première

Pour ces essais, du blé en grain est prélevé en usine. Les particules fines (<1 mm) sont retirées. Ses caractéristiques sont détaillées ci-dessous :

Analyses	Méthodes	Résultats
Masse volumique apparente	Nilema Litre – 1 répétition	774.5 g/L
Dureté	SOTAX MT50 - mâchoire en V – 10 répétitions	58.6 N
Poids de 1000 g	Comptage puis pesée – 1 répétition	40 g
Humidité	Etuve chopin sur grain entier à 104°C jusqu'à poids stabilisé	13.2 %

Tableau 1 : Caractéristiques des grains de blé broyés

1.2. Ligne de broyage

Les essais sont réalisés sur une ligne de broyage pilote instrumentalisée. Elle est composée d'un broyeur à percussion Retsch SR 300 et d'un aspirateur Nilfisk VP 930. Ce dernier permet de mimer la présence d'un ventilateur industriel en créant un débit d'air connu, et donc une dépression, dans le broyeur. Un cyclone permet la séparation de la mouture et de l'air. Le Tableau 2 compare les caractéristiques de la ligne pilote à une ligne industrielle moyenne (données tirées de l'enquête présentée dans i'Tec_B9 et i'Tec_B10 et de données internes).

Caractéristiques	Ligne de broyage	
	Pilote	Industrielle
Puissance nominale moteur de broyeur	2.2 kW	Moyenne 193 kW (de 15 à 355 kW)
Vitesse rotation du moteur	3 000 à 10 000 tr/min	500 à 3 000 t/min
Vitesse de rotation périphérique	26 à 72 m/s	53 à 106 m/s
Diamètre perforation des grilles	2 / 4 / 5 / 8 mm	Moyenne 3.5 mm (de 0.5 à 15 mm)
Epaisseur de grilles	1.5 mm	1.5 à 3.0 mm
Formes de perforations	Rondes	Rondes (dans 96% des cas)
Surface ouverte des grilles	Pour grille de 4 mm : 37%	de 27 à 50% Optimal de 40 à 50%
Surface totale des grilles	111 cm ² /kW	87 à 105 cm ² /kW
Débit d'air	2 à 120 m ³ /h	2 000 à 30 000 m ³ /h
Débit de broyage	8 à 300 kg/h**	1 à 104 t/h

Tableau 2 : Comparaison entre la ligne de broyage pilote de Tecaliman et un broyeur industriel

** débit maximum des essais (d'autres conditions expérimentales permettraient d'augmenter ce débit)

Il est logique de constater que la puissance et la vitesse de rotation du moteur du broyeur pilote soient inférieures à celles d'un broyeur industriel. Toutefois, la vitesse de rotation périphérique des marteaux, qui est en lien direct avec le mécanisme de broyage de la matière, se situe dans des plages similaires entre un broyeur pilote et industriel.

Concernant les grilles utilisées, leurs caractéristiques sont assez proches. L'épaisseur des grilles est

légèrement inférieure à la moyenne industrielle. Des essais effectués à Tecaliman en 1986, avec des grilles d'épaisseur de 1.5 à 3 mm, n'ont montré aucune influence significative de l'épaisseur sur la granulométrie (données internes). Enfin, les débits d'alimentation et d'air sont également différents entre les deux échelles.

Il serait intéressant de calculer le débit d'air ramené à la surface de grilles de broyeur. Cet indicateur pourrait permettre un transfert d'échelle. Cependant, des données complémentaires sur les surfaces de grilles et les débits d'air industriels sont nécessaires.

1.3. Conduite des essais

La vitesse de rotation du moteur est fixée à 10 000 tr/min, soit **72 m/s de vitesse périphérique** des marteaux, afin d'être au milieu de ce qui est constaté au niveau industriel. Une grille de **4 mm** est également sélectionnée. Ces choix permettent de couvrir tous les domaines de la puissance du broyeur en charge et des granulométries industrielles. Le débit d'air et le taux de remplissage du broyeur sont les deux paramètres variables dans cette étude.

Le pilotage du débit permet d'obtenir entre **25 et 70 m³/h**. Il se réalise soit en :

- modifiant la puissance de l'aspirateur : vitesse 0 = 0 W, vitesse 1 = 430 W, vitesse 2 = 863 W
- créant des pertes de charges par l'ouverture de trous sur le circuit aéraulique (de 0 à 5 trous ouverts)

Le taux de charge du broyeur est stimulé par la variation du débit d'alimentation. Ce dernier peut être piloté par la hauteur de trémie arrivant sur le convoyeur et par la vibration du convoyeur. Pour ces essais, l'ouverture de la trémie est fixée à 2 cm au-dessus du convoyeur, seule la vibration de ce convoyeur est modifiée. Le débit d'alimentation pour ces essais varie de **10 à 273 kg/h**.

Un plan composite centré est réalisé sur la base de ces deux paramètres. Au total, 11 modalités sont testées avec 3 répétitions du point central.

Modalités	Débit d'alimentation (kg/h)	Débit d'air (m ³ /h)
A	273.0	70.0
B	273.0	25.0
C	10.0	25.0
D	10.0	70.0
E	234.5	47.5
F	141.5	31.6
G	48.5	47.5
H	141.5	63.4
I (x3)	141.5	47.5

Tableau 3 : Paramètres théoriques à atteindre lors du broyage

La totalité des essais est conduite sur une seule journée. Le broyeur est préalablement nettoyé, le sac aspirateur est changé et les différentes sondes nettoyées. Le broyeur est lancé 30 mn à vide avant le début des essais. Les modalités sont réalisées dans un ordre aléatoire et à débit d'alimentation stabilisé (début et fin de lot non broyés).

1.4. Paramètres relevés

Les paramètres sont relevés manuellement ou par une centrale d'acquisition FD5 associée à un logiciel d'acquisition de données VISUOLOG. L'acquisition se réalise toutes les secondes.

Le débit d'air dans le poste de broyage est acquis par un débitmètre massique thermique VA 570.

Le débit d'alimentation est déterminé avant les essais. Une quantité de matière est prélevée durant 30 secondes puis pesée. La mesure est répétée 2 fois.

La puissance du broyeur est acquise par un transmetteur monophasé.

La température et l'hygrométrie ambiante sont relevées grâce au thermohygromètre portable HD 110 Kimo au début de chaque essai.

La température des grains est acquise avec une sonde placée directement dans les grains de blé.

La température de la mouture est effectuée une fois le broyage terminé. La mouture est rapidement placée dans un bol isotherme avec une sonde de température. La température est relevée une fois stabilisée.

1.5. Analyses

La distribution granulométrique est réalisée sur des échantillons préalablement divisés avec une masse comprise entre 50 et 100 g. Chaque échantillon est tamisé pendant 10 minutes à une amplitude de vibration de 1.22 à l'aide de onze tamis Retsch (tailles de maille de : 80 µm, 125 µm, 160 µm, 200 µm, 315 µm, 500 µm, 800 µm, 1000 µm, 1250 µm et 2000 µm, 3150 µm). Chaque fraction est pesée séparément. Le diamètre moyen géométrique est calculé. La mesure est répétée 2 fois.

La mesure **d'humidité de la mouture** est effectuée quelques jours après les essais. Une fois le broyage d'une modalité terminée, la mouture est rapidement insérée dans un flacon à double fermeture, puis placée en chambre froide. La mesure d'humidité s'effectue sur 5 g d'échantillon avec une étuve Chopin à 104°C pendant 4h. Le pourcentage d'humidité s'obtient par différence entre le poids de l'échantillon avant et après le passage à l'étuve.

2. Résultats

Les essais centraux (points I1, I2, I3), montrent une bonne répétabilité du protocole déployé.

2.1. Temps de séjour

Le temps de séjour des grains de blé dans la chambre de broyage est déterminé par l'augmentation, puis la diminution de la puissance du moteur de broyeur acquise. Le temps de séjour est directement lié au débit d'alimentation selon une équation de puissance. En effet, plus le débit d'alimentation est faible, plus le temps de séjour dans la chambre de broyage

augmente. Par contre, aucun lien ne se dégage entre le débit d'air et le temps de séjour.

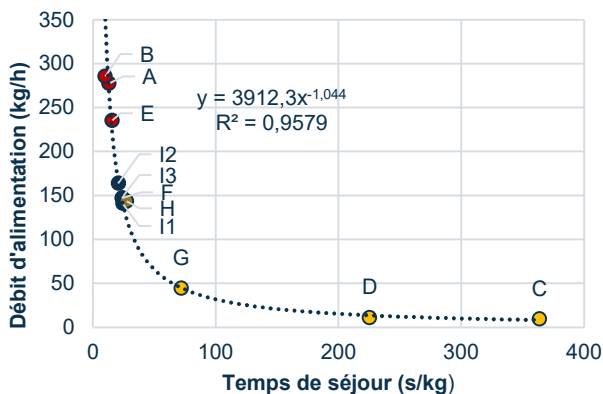


Figure 1 : Relation entre temps de séjour dans la chambre de broyage et débit d'alimentation

2.2. Consommation spécifique nette

La puissance électrique de l'aspirateur n'a pas pu être mesurée indépendamment pour chaque essai. Elle n'est donc pas prise en compte dans le calcul de la consommation spécifique nette du broyeur.

Modalités	Débit d'air (m ³ /h)	Débit d'alimentation (kg/h)	Puissance moyenne nette (W)	Consommation spécifique nette (kWh/t)
A	72	278	1474	5.3
B	26	286	1749	4.9
C	24	9	58	5.9
D	70	11	97	6.1
E	49	236	1185	5.2
F	38	147	799	5.3
G	49	45	291	5.8
H	61	144	758	5.8
I1	47	141	761	5.1
I2	47	164	906	5.2
I3	48	148	803	5.3

Tableau 4 : Résultats des essais de débits d'air, d'alimentation, puissance et consommation spécifique

La variation du débit d'air semble avoir un impact minime sur la consommation spécifique du broyeur. Elle apparaît meilleure lorsque le débit d'air est plus faible. En effet, à débit d'alimentation proche, la consommation spécifique est la plus faible au point B à 26 m³/h, puis au point E à 49 m³/h et enfin le point A à 72 m³/h. Cette constatation est uniquement réalisée pour les débits d'alimentation élevés.

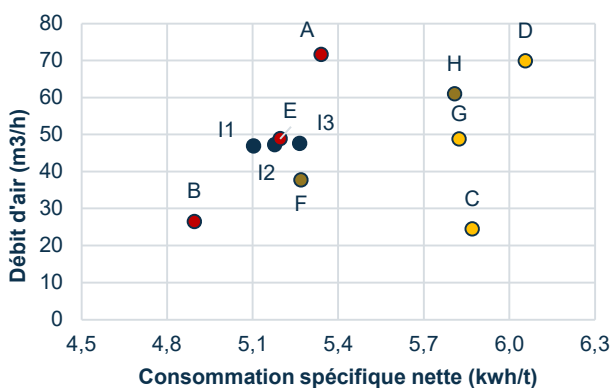


Figure 2 : Relation consommation spécifique nette et débit d'air

En revanche, le débit d'alimentation a un impact direct sur la consommation spécifique du broyeur. Cette dernière diminue lorsque le débit d'alimentation augmente.

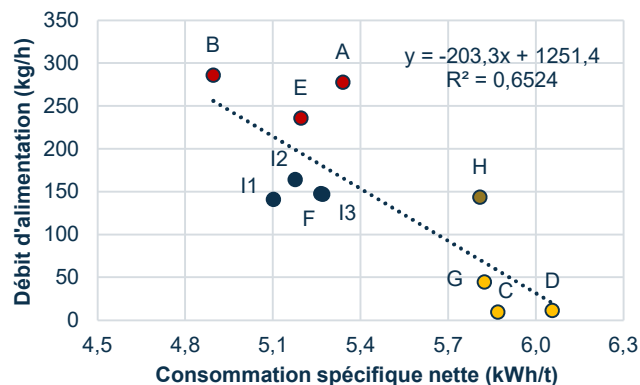


Figure 3 : Relation entre la consommation spécifique nette et débit d'alimentation

2.3. Distribution granulométrique

Les diamètres médians granulométriques obtenus varient de 483 à 632 μm. Une différence visuelle sur les particules fines a été constatée durant l'étude. La proportion des particules inférieures à <200 μm a donc été étudiée et elle varie de 13.4 à 21.8 %.

Modalités	D50 (μm)	Proportion (%) particules inférieures à <200 μm	Proportion (%) particules inférieures à <80 μm
A	632	13.4	4.8
B	591	15.8	6.4
C	501	20.2	7.5
D	483	21.8	9.4
E	593	15.8	6.1
F	569	16.7	6.4
G	502	20.1	7.5
H	537	18.5	7.6
I1	542	18.2	7.6
I2	551	17.2	6.8
I3	546	17.6	7.1

Tableau 5 : Résultats des essais de la répartition granulométrique de la mouture

Aucun lien n'est constaté entre le diamètre médian et la variation de débit d'air. Cependant, la granulométrie médiane est fortement liée au débit d'alimentation. Plus ce dernier est faible, plus les particules ont une D₅₀ faible.

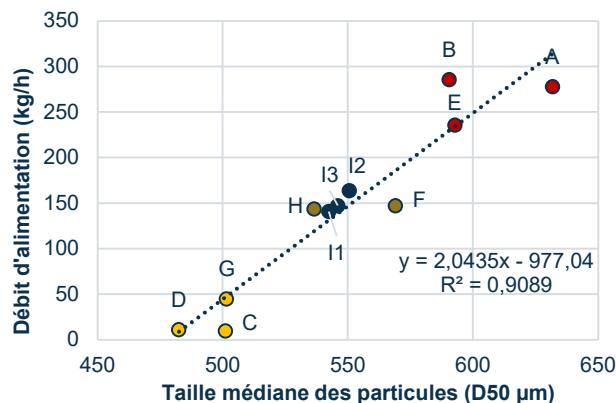


Figure 4 : Relation entre D₅₀ et débit d'alimentation

La réduction de la granulométrie est directement liée à la création de particules les plus fines. La baisse du débit d'alimentation entraîne donc une hausse de la fraction des particules inférieures à 80 µm. D'un point de vue industriel, cela peut se traduire par un encrassement plus rapide du système de filtration. La hausse du temps de séjour conduirait donc bien à une plus grande attrition des particules générant une fraction fine plus importante.

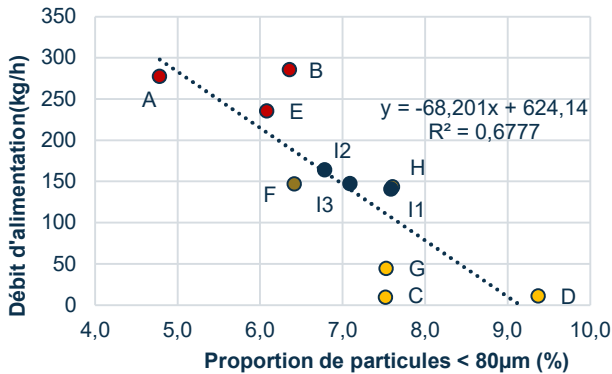


Figure 5 : Proportion de particules inférieures à 80 µm en fonction du débit d'alimentation

2.4. Température et humidité de la mouture

La variation de la température avant broyage et après broyage présente des écarts de +5.3°C à +8.0°C.

Modalités	Delta Température sortie – entrée (°C)	Humidité (%)
A	5.3	12.2
B	8.0	12.1
C	6.6	11.4
D	6.2	12.0
E	6.9	11.8
F	7.1	12.0
G	6.6	11.9
H	6.1	11.7
I1	6.2	12.1
I2	7.0	11.7
I3	6.8	11.7

Tableau 6 : Résultats des essais de variation de la température et humidité de la mouture

La réduction du débit d'air conduit à une augmentation de la température de la mouture. A noter que la durée de broyage, durant les essais, était relativement courte, mais cela a tout de même permis l'élévation jusqu'à 8°C du produit (en moins de 1 min de broyage).

En revanche, il n'y a pas de lien constaté entre l'échauffement de la mouture et le débit d'alimentation. Cela paraît surprenant, puisque le débit d'alimentation est en lien direct avec le temps de séjour des particules dans la chambre de broyage. Une élévation de la température de la mouture était donc attendue. Un effet seuil limite donc peut être cette élévation.

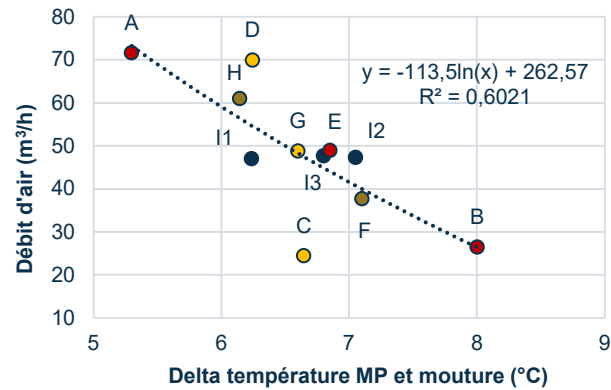


Figure 6 : Relation entre l'écart de température de matière broyée et le débit d'air

Concernant l'humidité des moutures, elle est uniquement comparée entre les différentes modalités, car une mesure d'humidité fiable sur les grains est complexe à obtenir. Une variation est significative lorsqu'un écart de 0.2% est observé. Toutefois les variations restent faibles (de 11.4% à 12.2%) et aucune tendance ne se dégage. A noter que l'essai C perd le plus d'humidité. Or, il possède des débits d'alimentation et d'air les plus faibles de l'étude.

3. Conclusion

Le débit d'alimentation (et donc le taux de charge du broyeur) a un impact direct sur la répartition de la mouture et la production du poste de broyage. L'augmentation du débit d'alimentation est plutôt bénéfique. En effet, elle permet de diminuer le temps de séjour des particules dans la chambre de broyage et donc de limiter la création de particules fines. La consommation spécifique nette du broyeur se retrouve également améliorée.

Concernant le débit d'air, peu d'impacts sont observés sur les paramètres cités précédemment. Il est tout de même intéressant de noter qu'une baisse de débit d'air entraîne un échauffement de la mouture, mais sans conséquence apparente sur son humidité et donc la freinte humide à ce poste.

Il semble donc possible de stimuler la variation de débit d'air sans prendre de risques importants sur la qualité de la mouture et la production du poste. Cette variation permettrait, par exemple, de diminuer la consommation électrique du ventilateur du poste de broyage, de compenser la perte de charge liée à l'encrassement des manches filtrantes ...

Dans le cadre de ces essais, les deux paramètres débit d'alimentation et débit d'air ont été modifiés ensemble. Il serait donc intéressant de faire des essais au débit maximal avec une variation du débit d'air sur une plage plus importante.

Des essais industriels sont également essentiels pour affirmer ces constatations. Pour apprécier, uniquement, l'impact du débit d'air, il sera important que ces essais soient également menés à débit d'alimentation constant et élevés au vu du fort impact de ce dernier sur l'ensemble des paramètres de performance.