

## Comportement au broyage et à la granulation de différents lots de maïs

Le comportement des matières premières en presse à granuler a donné lieu à des tables de prédiction, afin d'évaluer leur effet sur la qualité des granulés, sur le rendement de la presse ou encore sur leur abrasivité (MacMahon et Payne, 1983). Cependant, pour une même matière première, des comportements en presse et des qualités de granulés différents peuvent être observés. Les industriels indiquent que le maïs ou le tourteau de soja sont particulièrement concernés par cette variabilité de comportement. Pourtant, Cavalcanti et Behnke (2005) montrent que la variation de composition du maïs dans différentes fractions nutritionnelles (Amidon, protéines, fibres et matières grasses) n'impactait pas la qualité physique des granulés. Nathier Dufour et al (1994) vont dans le même sens, mais sur du blé avec peu de liens entre les analyses au NIR et le comportement des blés en presse.

En 2023, Tecaliman a réalisé, en partenariat avec l'université Polytech Sorbonne, une étude afin d'étudier les relations entre des caractéristiques physico-chimiques de 9 maïs et le comportement au broyage ou en presse et la cohésion des granulés obtenus. Au-delà des résultats obtenus, cette i'Tec permet de prendre en compte les méthodologies employées avec ces objectifs.

### 1. Principe

Pour répondre à cet objectif :

- une bibliographie est menée afin d'identifier des caractéristiques physico-chimiques susceptibles d'influencer le comportement de matières premières en presse.
- Les lots de maïs sont caractérisés selon leur composition par NIR
- Les lots de maïs sont broyés avec les mêmes réglages de broyeur et leurs caractéristiques physiques sont comparées
- Les 9 farines de maïs obtenues sont granulées pures selon les mêmes conditions et celles-ci font l'objet de caractérisation (Consommation spécifique électrique, augmentation de la température dans la filière).
- des mesures classiques (granulométrie, durabilité et dureté, humidité, ...) et d'autres caractéristiques physico-chimiques identifiées par la bibliographie sont réalisées sur chaque lot à chaque étape.

### 2. Matériels et méthodes

Les 9 maïs ont été obtenus sous forme de grains, auprès de 4 industriels en 2022 et probablement récoltés en 2021. Ils ont fait l'objet d'analyses constituant des données d'entrée et de sortie des 2 procédés de transformation testés : broyage et granulation.

#### 2.1. Opérations testées

##### 2.1.1. Broyage

Les maïs ont été broyés à l'aide d'un broyeur à percussion pilote de marque Retsch, modèle SR300 de 2.5kW (Figure 1). Ce broyeur est équipé d'une grille et de 6 couteaux. La chambre de broyage est alimentée par un distributeur de vitesse réglable et est mise en dépression par une aspiration réglable. Un cyclone assure la filtration de l'air. La puissance appelée par le moteur du broyeur est mesurée et enregistrée toutes les secondes par une centrale d'acquisition.



**Figure 1** : Broyeur à couteaux Retsch SR300 et chambre de broyage du broyeur

Les 9 maïs ont été broyés avec les mêmes débits de distribution (Position 20 du distributeur) et la même aspiration (Position 1) selon les conditions suivantes :

- Grille de 2 mm
- Vitesse de rotation des couteaux de 5000 tr/min

## 2.1.2. Granulation

Les 9 farines « fines » de maïs broyées ont été granulées sur une ligne de granulation pilote de marque Kahl, modèle 14-175, équipée d'un moteur de 3 kW (Figure 2).

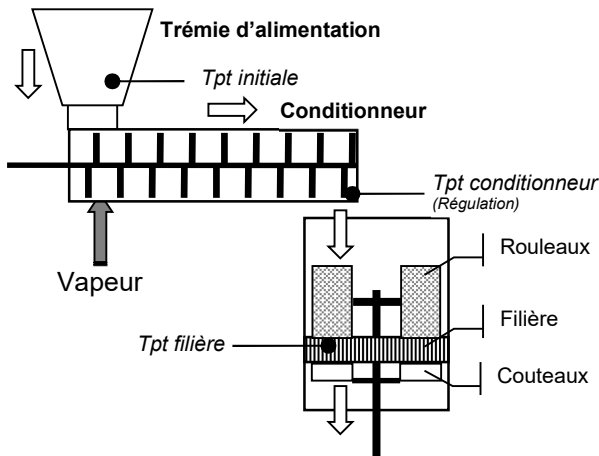


Figure 2 : Ligne de granulation pilote Kahl

Cette presse est instrumentée, afin de mesurer et d'enregistrer à chaque seconde :

- La température sortie conditionneur (°C)
- La température de la filière (°C)
- La puissance appelée par le moteur de la presse en kW (+/-0.6%)
- L'ouverture de la vanne modulante (%)

Les 9 lots de maïs ont été granulés à 40 kg/h avec une filière 4/16 (4 mm de diamètre sur 16 mm de longueur) à 60°C et 70°C de consigne avec une pression de vapeur de 1.5 bars.

## 2.2. Mesures

### 2.2.1. Maïs grain

Les maïs en grains ont fait l'objet d'une analyse visuelle pour identifier la variété majoritairement présente dans chaque lot (maïs corné, corné-denté ou denté) et d'analyses du taux de grains cassés.

Des analyses NIR classiques ont également été mises en œuvre, afin de quantifier : **humidité, protéines, amidon, cellulose, matières grasses et cendres.**

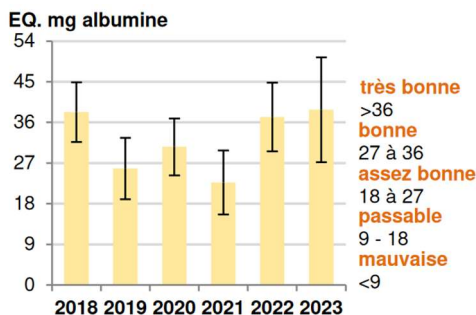


Figure 3 : Valeurs Promatest moyenne des maïs en fonction de leur année de récolte (France AgriMer, Arvalis, Qualit@lim n° 71 2024)

Un indicateur de choc thermique reçu par les grains de maïs lors du séchage après récolte appelé

« **Promatest** » est également obtenu par NIR. Il s'exprime en équivalent mg albumine et quantifie les protéines thermosensibles des maïs. Plus le résultat est élevé, meilleure est la qualité et moins les protéines du maïs ont subi un choc thermique (Figure 3). Dans notre étude, la valeur de Promatest est obtenue par méthode NIR avec le même équipement.

### 2.2.2. Maïs broyé

L'analyse de la **distribution granulométrique** des farines broyées est réalisée à l'aide d'un ensemble de 9 tamis standards : 3150, 2000, 1250, 800, 500, 315, 200, 125, 80 µm. La mesure a été obtenue à partir d'échantillon entre 50 et 100 g pendant 10 minutes (Une seule mesure). Le **diamètre de maille médian (D50)** et l'**écart géométrique (Sg)** sont ensuite calculés (iTec B6) de même que le pourcentage de particules en dessous de 200 µm et au-dessus de 2000 µm.

Pour mesurer la quantité d'**amidon endommagé**, éventuellement par le séchage, dans chacun des lots de maïs, des analyses au **SDmatic** (Chopin) ont été réalisées (en simple) sur ces échantillons broyés.

Lors des opérations unitaires, les grains d'amidon, de structure semi-cristalline, peuvent être lésés. Cet amidon endommagé absorbe plus d'eau que l'amidon natif (Dubat, 2004). Cet endommagement peut donc accroître l'aspect collant de la farine humidifiée.

Pour la mesure, chaque échantillon de farine est mis en contact avec une solution iodée. Plus l'amidon est endommagé, plus l'iode se fixera à l'amidon et moins la quantité d'iode libre sera importante dans la solution restante. L'appareil quantifie donc l'iode libre en mesurant l'intensité électrique de la solution en µA.

En partant de l'hypothèse d'un lien éventuel entre comportements de granulation et de pétrissage, des essais ont enfin été réalisés sur le **Mixolab**, pétrin dans lequel une pâte est formée à partir d'un mélange eau/farine (115% d'hydratation) porté, dans ces essais, à 90°C. L'appareil mesure en temps réel le couple de torsion (Nm) produit par la pâte entre 2 mobiles tournants. Il en résulte un graphique traçant l'évolution du couple mesuré en fonction du temps (Figure 4).

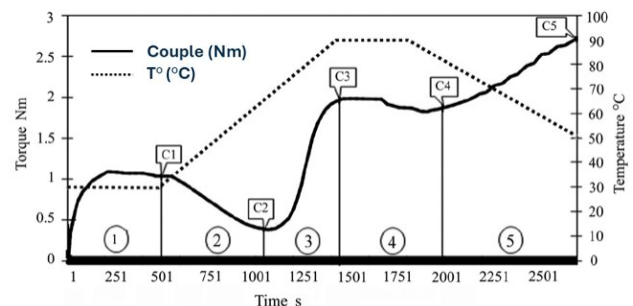


Figure 4 : Evolution du couple de torsion en fonction du temps lors d'un essai sur Mixolab (exemple)

La phase 3, notée ③ sur la courbe, correspond à la phase de gélatinisation de l'amidon. L'indicateur C3-C2, écart entre le couple maximal et minimal en phase de chauffe de la pâte, correspondrait ainsi à l'intensité

de gélatinisation de l'amidon.

### 2.2.3. Maïs granulé

Les granulés ont fait l'objet de mesures :

- de **dureté** sur l'appareil Sotax MT50, équipé d'une mâchoire de 3 mm. La dureté moyenne des granulés est exprimée en Newton (N) (36 mesures par lot) (Voir l'Tec G2 ou G16).
- de **durabilité**, qui est le pourcentage restant de 500 g granulés tamisés résistant à 20 secondes de passage dans l'Eurotest, et donc retenus sur un tamis de 3.2 mm correspondant à 80% du diamètre des granulés (mesure en double) (Voir l'Tec G7).

Une partie des granulés, prélevés en sortie de refroidisseur, ont été broyés « à froid » (broyeur à cylindre ou mortier/pilon), puis ont fait l'objet des mêmes mesures que le maïs broyé fin, à savoir : endommagement de l'amidon au **SDmatic** et intensité de gélatinisation avec l'appareil **Mixolab**.

La différence d'endommagement de l'amidon (SDmatic) et d'intensité de gélatinisation mesurée au Mixolab (C3-C2) avant et après granulation sont calculés, afin d'évaluer l'effet de la granulation sur l'amidon.

## 3. Résultats

### 3.1. Maïs grain

Sept caractéristiques biochimiques des maïs en grains sont déterminées en NIR (Tableau 1).

Lot	Humidité (%)	Protéine (%)	Amidon (%)	Cellulose (%)	M. Grasses (%)	Cendres (%)	Promatest
1 D	12,7	7,1	67,0	2,8	3,2	1,2	33,0
2 D	11,4	7,8	67,4	2,5	3,2	1,2	50,3
3 D	13,2	7,3	67,3	2,5	2,8	1,1	44,0
4 D	13,2	7,6	66,4	2,6	2,9	1,2	43,6
5 D	12,8	7,9	65,6	2,7	3,4	1,3	36,3
6 D	13,9	7,4	65,8	2,7	3,1	1,2	34,2
7 C	13,1	7,3	66,8	2,6	3,2	1,2	24,4
8 C	13,4	7,5	64,9	2,9	3,6	1,2	32,6
9 CD	12,3	7,9	66,0	2,7	3,2	1,2	44,9
<b>Moy.</b>	<b>12,9</b>	<b>7,5</b>	<b>66,4</b>	<b>2,7</b>	<b>3,2</b>	<b>1,2</b>	<b>38,1</b>
<b>CV (%)</b>	<b>5,7</b>	<b>3,7</b>	<b>1,3</b>	<b>4,7</b>	<b>8,0</b>	<b>4,2</b>	<b>21,2</b>

**Tableau 1** : Résultats des mesures NIR sur les 9 lots de maïs (D : Denté – C : Corné)

L'humidité moyenne est de 12.9 %, avec un étalement allant de 11.4 à 13.9%. Les taux de composants sont assez homogènes. Parmi ceux-ci, le plus standard est le taux d'amidon avec en moyenne 66.4 %.

Le Promatest est assez variable selon les lots (CV de 21.2%). Toutefois, l'ensemble des lots peut être considéré comme de qualité acceptable selon ce test, car aucune valeur n'est inférieure à 18. Les valeurs s'évaluent de 24.4 à 50.3 avec une moyenne à 38.1.

Aucune relation entre les résultats de test et les autres teneurs en composants, notamment l'humidité, n'a été identifiée.

Des tests de caractérisation physique ont également été réalisés sur ces grains (Tableau 2) sans pour autant qu'aucune liaison puisse être identifiée entre ces caractéristiques. Il convient de noter que certains lots ont beaucoup de grains cassés et une très légère variabilité de la masse volumique apparente avec une

moyenne de 391 g/l, indépendamment de l'humidité du lot.

Lot	Taux grain cassé (%)	Durabilité grains (%)	Masse vol. (g/l)
1	14,6	79,2	756,2
2	20,7	75,5	807,9
3	6,3	87,1	785,5
4	13,6	87,5	805,2
5	13,3	77,8	804,3
6	16,1	87,0	755,7
7	31,4	77,6	745,3
8	11,5	82,5	741,5
9	13,9	88,9	836,1
<b>Moy.</b>	<b>15,7</b>	<b>82,6</b>	<b>782,0</b>
<b>CV (%)</b>	<b>44,5</b>	<b>6,3</b>	<b>4,3</b>

**Tableau 2** : Caractérisations physiques des grains

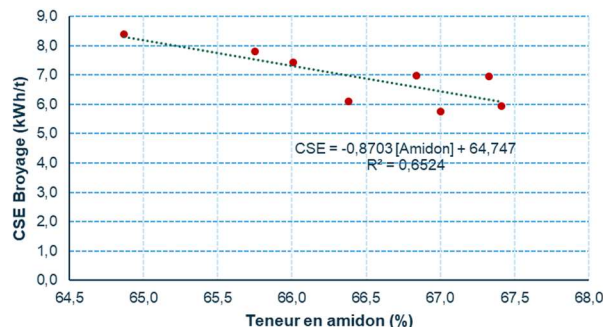
### 3.2. Maïs broyés

A l'issue des broyages, les diamètres médians varient peu : 644.4 µm en moyenne (CV de 4.6%), de même que l'indice de répartition Sg. Les fractions fines et grossières varient beaucoup, mais ceci n'a pu être expliqué par aucun des autres critères mesurés.

Lot	D50 (µm)	Sg	% < 200 µm	% > 2000 µm	CSE (KWh/kg)	SDmatic (%)	Mixolab
1	594,0	2,0	6,2	0,6	5,7	65,0	0,77
2	627,4	1,9	4,3	0,3	5,9	59,2	0,55
3	674,4	1,9	3,8	0,4	6,9	60,6	0,67
4	693,4	2,0	4,5	0,6	6,1	58,7	0,74
5	637,9	1,9	3,5	0,3	/	60,0	0,67
6	648,6	2,0	4,9	0,4	7,8	65,8	0,75
7	618,3	1,9	4,4	0,2	7,0	68,2	0,82
8	657,2	1,9	3,7	0,2	8,4	59,5	0,76
9	648,1	2,0	5,4	0,2	7,4	58,8	0,59
<b>Moy.</b>	<b>644,4</b>	<b>1,9</b>	<b>4,5</b>	<b>0,4</b>	<b>6,9</b>	<b>61,8</b>	<b>0,7</b>
<b>CV (%)</b>	<b>4,6</b>	<b>2,2</b>	<b>19,6</b>	<b>41,5</b>	<b>13,6</b>	<b>5,8</b>	<b>12,7</b>

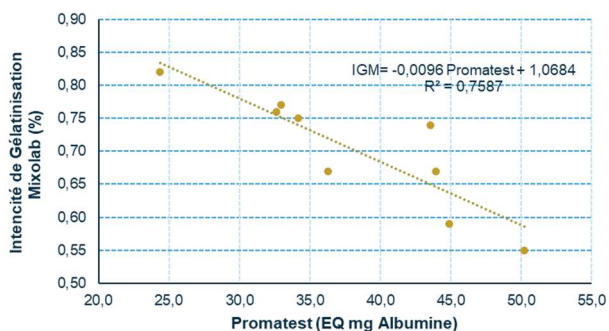
**Tableau 3** : Caractéristiques granulométriques des farines de maïs et endommagement de l'amidon

La consommation spécifique électrique n'est en relation faible qu'avec un seul paramètre : la teneur en amidon (Figure 5). Selon ce résultat, des maïs à haute teneur en amidon seraient légèrement plus faciles à broyer. Ce résultat devrait être vérifié avec plus de données.



**Figure 5** : Relation entre la teneur en amidon des 9 maïs et la consommation spécifique électrique au broyage

Les résultats SDmatic et Mixolab sont variables entre lot (CV de 5.8 % et 12.7 %) mais moins que ceux du Promatest (CV de 21.2 %). Ces différents tests sont susceptibles d'informer sur l'état de « dégradation thermique » des maïs après leur séchage. Il est donc intéressant d'étudier leurs relations.



**Figure 6 :** Relation entre les valeurs Promatest et Mixolab pour les 9 maïs

Ces caractéristiques semblent assez liées, mais la relation entre Promatest et Mixolab (gélatinisation de l'amidon) apparait plus forte (Figure 6 -  $R^2$  0.76 contre 0.61 pour la relation avec le SDmatic). Ainsi, la bonne qualité Promatest permettrait d'envisager un moindre endommagement de l'amidon et une capacité de gélatinisation plus faible.

Parmi ces paramètres assez liés, le Promatest apparait comme celui le plus efficace, car plus facile à mesurer en NIR sur grains natifs et peut être plus discriminant (CV supérieur).

### 3.3. Maïs granulés

Le comportement à la granulation et l'impact sur l'amidon ont été mesurés (Tableau 4).

Lot	CSE (KWh/t)	Montée tpt Filière (°C)	Durété (N)	Durabilité (%)	SDMatic (%)	Mixolab	Variation SDMatic (%)	Variation Mixolab (%)
1	43,4	26,1	25,9	78,1	98,9	0,37	33,9	51,9
2	38,5	27,3	31,8	82,3	97,9	0,27	38,7	50,9
3	33,1	25,2	30,0	80,6	97,6	0,30	37,0	55,2
4	33,0	22,6	28,2	80,1	97,4	0,30	38,7	59,5
5	37,9	23,3	24,7	78,2	97,5	0,20	37,5	70,1
6	36,4	23,7	22,0	75,2	97,9	0,36	32,1	52,0
7	32,5	21,2	18,8	74,1	97,9	0,36	29,7	56,1
8	30,8	25,1	25,2	80,2	97,2	0,39	37,6	48,7
9	40,8	20,6	30,1	81,6	97,0	0,25	38,2	57,6
<b>Moy.</b>	<b>36,3</b>	<b>23,9</b>	<b>26,3</b>	<b>78,9</b>	<b>97,7</b>	<b>0,3</b>	<b>35,9</b>	<b>55,8</b>
<b>CV (%)</b>	<b>11,7</b>	<b>9,3</b>	<b>15,9</b>	<b>3,5</b>	<b>0,6</b>	<b>20,5</b>	<b>9,0</b>	<b>11,5</b>

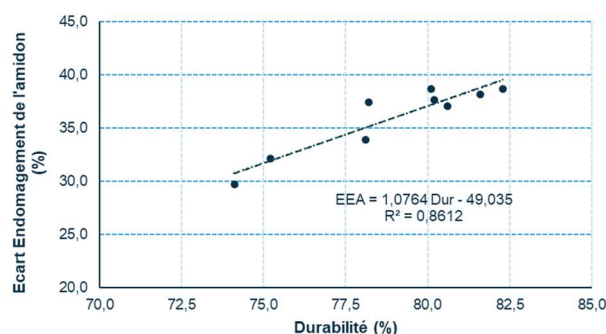
**Tableau 4 :** Données de sorties du comportement à la granulation et impact sur l'amidon

Bien que celles-ci varient, il est apparu impossible de relier la consommation électrique ou l'élévation de température dans la filière avec les autres critères mesurés. Toutefois, cette granulation conduit à un accroissement significatif de l'endommagement de l'amidon : + 35.6 % conduisant à une valeur SDmatic proche de 100 %. Consécutivement, la capacité de gélatinisation de l'amidon Mixolab décroît de près de 56 %. Le traitement thermique et la friction de la granulation impactent donc réellement les composants du maïs et en premier lieu, l'amidon.

A l'issue, **durété et durabilité sont heureusement très liées** avec un  $R^2$  proche de 0.91.

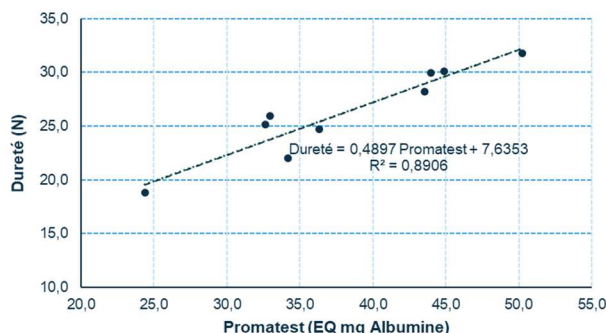
Ces caractéristiques de qualité des granulés semblent impactées par la progression de l'endommagement de l'amidon (Figure 7). Ceci peut apparaître logique avec l'hypothèse que cet endommagement puisse conduire

à des liaisons inter-particulaires, plus solides après séchage, par un phénomène de collage appelé ponts solides.



**Figure 7 :** Relation entre l'accroissement de l'endommagement de l'amidon lors de la granulation et l'augmentation de la durabilité pour les 9 maïs

De manière plus étonnante, la meilleure liaison linéaire obtenue pour l'ensemble de cette étude (Hors la liaison durété/durabilité) est celle entre le résultat du Promatest réalisé sur les grains initiaux et la durété finale des granulés (Figure 8). Ainsi, **des grains ayant subi moins d'impact thermique au séchage conduiraient à de meilleurs granulés.**



**Figure 8 :** Relation entre la durété à l'issue de la granulation et le Promatest initial pour les 9 maïs

## 4. Conclusions

Au final, des différences entre les lots de maïs ont bien été constatées. Cette étude n'a pas permis d'identifier clairement des indicateurs permettant d'anticiper des difficultés de granulation avec des maïs. Toutefois, elle a permis d'identifier des paramètres permettant d'anticiper la qualité des granulés au premier rang desquels le Promatest. Ce qui signifierait que les maïs moins endommagés au séchage donneraient les meilleurs granulés. D'autres essais devraient être faits pour vérifier cette tendance.

### Bibliographie

- MacMahon M.J., Payne J.D., 1983. Guide Holmen pour la fabrication de granulés.
- Cavalcanti W.B., Behnke K.C., 2005. Effect of composition of feed model systems on pellet quality : a mixture experimental approach. Cereal chem 82 (4) p. 455-461.
- Nathier Dufour N. et al, 1994. Influence of wheat meal variability upon compacting behaviour during pelleting. An. feed Sci. and technol. 51 (1995) p. 255-268.
- Dubat A., 2004. Importance de l'endommagement de l'amidon et évolution des méthodes de mesure, Avril-mai. Industries des céréales n°137.