

Effet de conditions de granulation pilote sur la qualité des granulés

L'objectif de cette étude est d'étudier au niveau pilote l'impact de la variation du taux de compression et de la température de conditionnement sur la granulation et la qualité des granulés. Il s'agit également de comparer 3 techniques de mesure de la dureté de granulés sur une collection d'aliments poulet issue de différentes modalités de granulation :

- Duromètre Schleuniger (Aujourd'hui Sotax) avec une pointe triangulaire ou pointue
- Duromètre Schleuniger avec une pointe plate de 3 mm
- Duromètre Instron

Sur ce second aspect, cette étude complète que les observations présentées dans l'i'Tec G 8 :

- Collection d'aliment plus large : 9 modalités de fabrication
- Comparaison de méthodologies différences : tête de compression plate, en V ou compression par un plateau

1. Matériel et méthodes

1.1. Aliments

Il s'agit d'un aliment pour poulet de chair dont la formule comprend essentiellement : 40 % de blé, 30 % de tourteau de soja et 20 % de Maïs.

Ses caractéristiques physiques sont les suivantes :

- Masse volumique apparente : 618 g/l
- Diamètre médian : 630 µm
- Ecart-type géométrique : 1.7
- Angle de talus par éboulement : 61.8°

1.2. Granulation

La ligne de granulation est composée d'une alimentation initiale en farine assurée par un système bivis, d'un conditionneur conçu par l'INRA de Nantes où de la vapeur est incorporé à l'aliment, et d'une presse à filière discoïdale fixe de marque Kalh. Cette presse kahl est de type 14-175. Son moteur a une puissance de 3 kW.

Elle dispose d'une instrumentation avec enregistrements :

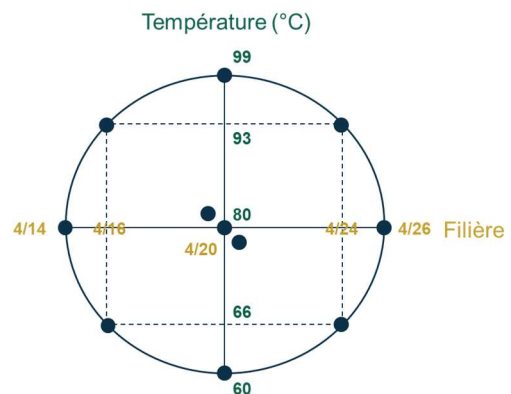
- de la température initiale
- de la température de conditionnement (consigne

de régulation)

- de la température dans un des canaux de la filière
- de la puissance appelée par le moteur principal de la presse
- Débit et pression de vapeur

Le débit de fabrication est fixé à 30 kg/h.

Onze fabrications sont réalisées à 9 conditions différentes selon un plan d'expérience appelé étoile centré afin de couvrir un vaste domaine de conditions :



Afin de tester la répétabilité des essais, le centre du domaine est répété 3 fois.

Ainsi, les filières employées sont donc toutes de 4 mm de diamètre mais ont des épaisseurs allant de 14 à 26 mm. Le domaine d'étude de l'effet de la température de conditionnement s'étale de 60 à 99°C.

A l'issue de chacune des granulations, 10 kg sont prélevés et refroidis sur des refroidisseurs individuels. Cette quantité permet de procéder à toutes les mesures nécessaires. Les échantillons initiaux sont ensuite divisés successivement afin d'obtenir les prises d'essais.

1.3. Durabilité

La mesure de la durabilité est effectuée sur un appareil Eurotest sur des prises d'essais de 500g de granulés. Les sollicitations mécaniques sont de 20 s. et le tamis a une maille égale à 3,2 mm.

1.4. Dureté

Les mesures de dureté réalisées avec l'appareil **Schleuniger**, quelle que soit la pointe, sont appliquées sur une population de 36 granulés par

essais afin de tenir compte de la variabilité des résultats. Les mesures sont réalisées avec la pointe plate de 3 mm de large (Droite sur la photo ci-après) puis avec la pointe triangulaire (En bas sur la photo ci-après).



L'appareil indique la force exercée sur le granulé au point de rupture de celui-ci. La valeur est affichée en Newton sur l'appareil. Pour rendre possible la comparaison entre l'appareil Schleuniger et l'Instron, il est nécessaire d'utiliser le Méga pascal (MPa) car il tient compte de la géométrie de la pointe et du diamètre des granulés. La force (en Newton) est convertie en contrainte lors de l'utilisation des pointes plates. Il est alors nécessaire de tenir compte de la longueur d'écrasement sur le granulé et de son diamètre. L'unité de référence utilisée est alors le Méga-Pascal.

$$\text{Dureté (MPa)} = \frac{F \times 2}{\pi \times d \times L}$$

Dureté exprimée en MPa

F = Force de rupture du granulé en N

d = diamètre du granulé en mm

L = Longueur en mm d'application de la force sur le granulé

Toutefois l'unité exprimée avec la pointe triangulaire reste le Newton car il est impossible de déterminer la surface de l'extrémité de la pointe.

L'Instron (Voir photo ci-après) permet de suivre l'évolution de la force exercée sur le granulé en fonction du déplacement du piston et pas seulement la force de rupture.



La mâchoire est ici plus grande que la longueur du granulé. Les mesures sont réalisées sur une population de 100 granulés. Le diamètre est mesuré sur 10 granulés, et la longueur sur la totalité des 100 granulés. Cet appareil appartenant l'INRA de Tours a

été mis à la disposition de Tecaliman pour réaliser les mesures.

Ces mesures permettent de convertir la force de rupture (N) en contrainte (MPa). La formule est identique à la précédente, excepté la longueur L qui est ici la longueur intégrale des granulés qui subit la force de compression du piston.

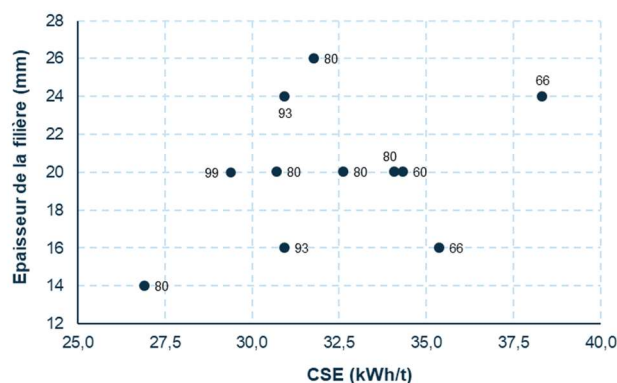
2. Résultats

2.1. Conditions de granulation

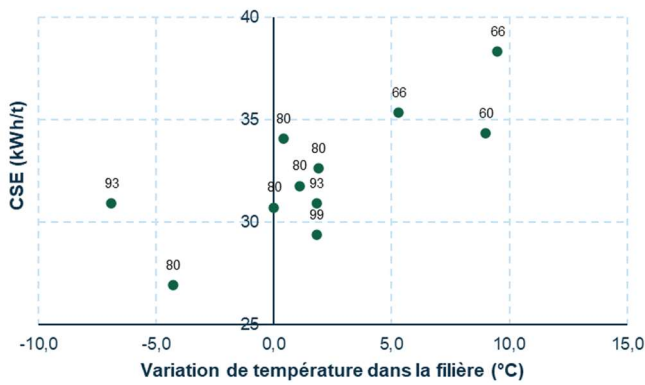
Toutes les conditions de granulation souhaitée ont été appliquées scrupuleusement. Ainsi, la température de conditionnement est pilotée à moins d'un degré près.

Cette ligne pilote qui permet la maîtrise de l'ensemble des paramètres, conduit à des observations dont certaines pourraient être plus difficiles, voire impossibles, à faire en milieu industriel.

Ainsi, la figure ci-dessous permet de constater que l'accroissement du taux de compression par l'augmentation, ici, de l'épaisseur de la filière, n'est pas forcément corrélée avec l'accroissement de la consommation spécifique électrique (CSE). En effet, le conditionnement (Température indiquée en étiquette sur chaque point) joue un rôle au moins équivalent. Par exemple, à 80°C, **l'accroissement de l'épaisseur de la filière** de 14 à 26 mm conduit à une **augmentation de la CSE de 5 kWh/t** soit 5 % même si une variabilité est notée avec la filière de 20 mm. Parallèlement, **l'augmentation de 66 à 93 °C de la température de conditionnement** pour les filières de 16 et 24 mm, ou de 60°C à 99°C pour la filière de 20 mm, conduisent à chaque fois à **une réduction significative de la puissance nécessaire à la production sur des niveaux de 5 à 7.5 kWh/t** soit de 15 à 23 % en moins.



Autre constat, la **relation globalement linéaire entre la consommation spécifique électrique (CSE) et l'accroissement de la température au passage dans la filière** (Figure ci-après). La modification de la température de conditionnement et de l'épaisseur de la filière perturbe cette relation. Cette variation de température dans la filière bascule autour de 80 °C de conditionnement pour cet aliment poulet. Ainsi, l'augmentation de température par la friction en dessous de cette valeur, devient une diminution quand le taux de compression est trop faible ou que la quantité de vapeur incorporée est importante.



2.2. Qualité des granulés

Les conditions de granulation appliquées dans le cadre de ce plan d'expérience, conduit à des **durabilités** très variables (Voir tableau ci-après) sur un vaste domaine : de 43.3 à 93.2 %.

Une régression multilinéaire a été réalisée pour tenter de prédire la durabilité en fonction de la température de conditionnement (TC) et de l'épaisseur de la filière (F) :

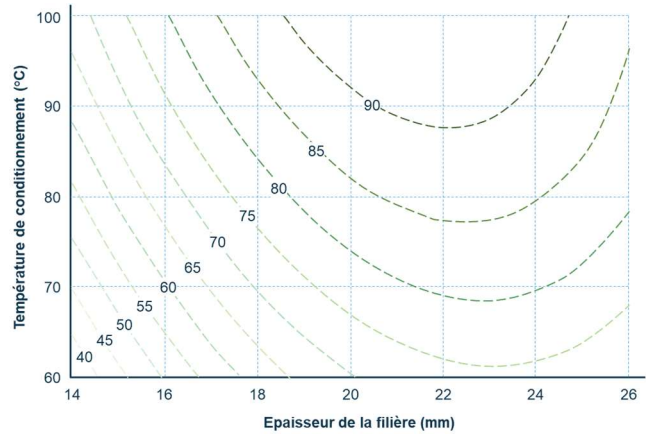
$$\text{Durabilité (\%)} = -263,992 + 26,155 \cdot F + 1,132 \cdot TC - 0,523 \cdot F^2 - 0,033 \cdot F \cdot TC$$

$$R^2 = 86.8 \%$$

Cette équation met en évidence le rôle prépondérant de l'épaisseur de la filière sur la durabilité puisque ce paramètre intervient 3 fois dans l'équation et avec des coefficients élevés.

La figure de courbes de niveaux que traduit cette équation (Voir ci-après) met en évidence

l'accroissement de la durabilité avec les deux paramètres.



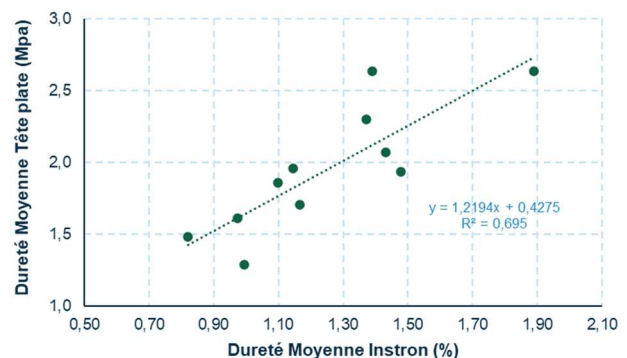
L'hypothèse expliquant l'atténuation de l'effet de compression visible sur les valeurs élevées serait un effet combiné de l'incorporation de plus de vapeur à hautes températures de conditionnement et d'une difficulté à extraire l'humidité acquise au moyen des refroidisseurs pilotes quand les granulés sont plus comprimés. Les résultats d'humidité des granulés après refroidissement mettent effectivement une humidité résiduelle globalement en relation avec la température de conditionnement ce qui est physiquement cohérent.

Il est probable que cet effet n'existe pas ou soit largement atténué sur des lignes industrielles avec des refroidisseurs fonctionnant en continu comme l'on montré certains essais du programme réalisé sur la variation des vitesses de filière (CINEP).

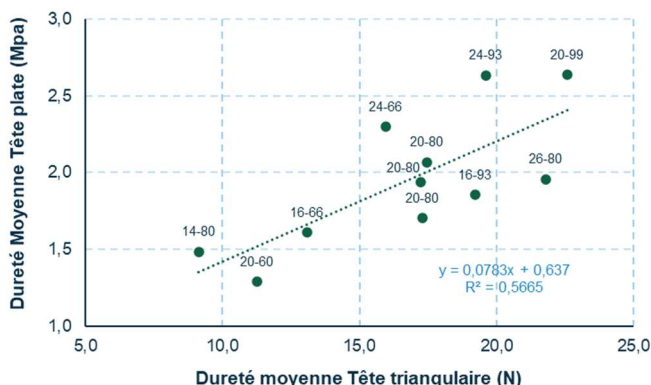
Epaisseur de la filière (mm)	Température de conditionnement (°C)	Durabilité (%) *	Dureté Tête plate 3 mm (Mpa) *	Dureté Tête triangulaire (N) *	Dureté Instron *
14	80	43,3 k	1,48 i	9,1 h	0,82 k
16	66	68,6 j	1,61 j	13,1 i	0,97 j
16	93	83,9 h	1,86 g	19,2 d	1,10 h
20	60	73,3 i	1,29 k	11,3 j	0,99 i
20	80	85,6 f	1,94 f	17,2 g	1,48 b
20	80	86,3 e	1,70 h	17,3 f	1,17 f
20	80	87,9 c	2,07 d	17,5 e	1,43 c
20	99	93,2 a	2,64 a	22,6 a	1,89 a
24	66	83,7 g	2,30 c	16,0 h	1,37 e
24	93	91,0 b	2,64 b	19,6 c	1,39 d
26	80	86,6 d	1,96 e	21,8 d	1,15 g

* L'ordre indiqué par une lettre est indicatif et n'est pas validé par un test statistique

Pour ce qui est des mesures de **dureté**, les valeurs moyennes sont indiquées dans le tableau ci-dessus pour les 3 techniques. La figure ci-après montre que les 2 méthodes par écrasement par une surface (Tête plate et Instron) sont globalement cohérentes entre elles sur la base de la force de rupture. La méthode Instron donne plus de renseignements par l'obtention d'une courbe totale à chaque écrasement mais pour l'obtention de la dureté moyenne, ceci n'est pas utile. **L'appareil est coûteux.** Autre coût, celui de la durée de mesure sur 100 granulés y compris avec la mesure plus ou moins précise de leur longueur individuelle.

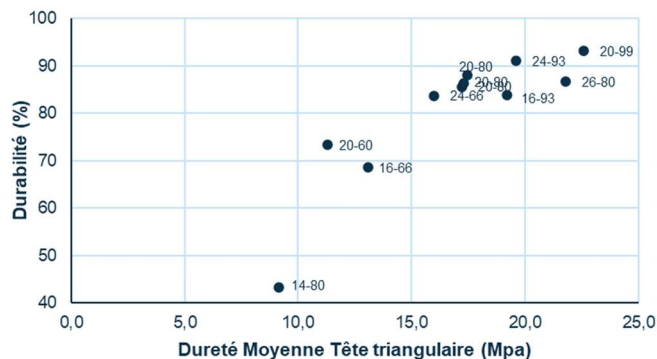
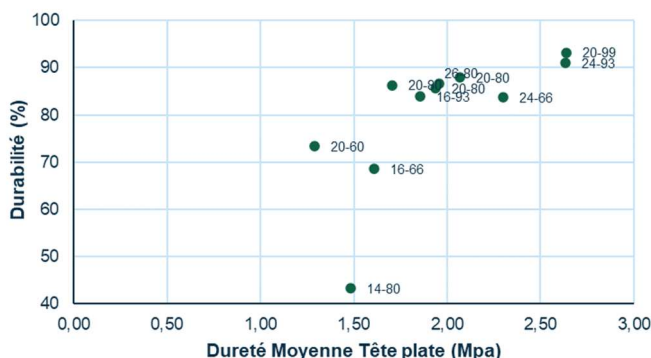


Pour ce qui est de la comparaison des **deux têtes de mesures**, la figure ci-après met en évidence que, si, globalement, la croissance des duretés va dans le même sens, il peut exister une **forte distribution** autour de la tendance générale qui se traduit par un R^2 de mauvaise qualité.



Cette **disparité entre les deux manières de mesurer la dureté** se perçoit également dans la relation avec la durabilité. Les deux figures suivantes mettent en évidence que la relation entre la durabilité et la dureté mesurée avec la tête triangulaire paraît plus cohérente et moins dispersée. Ainsi, quand la dureté s'accroît, il en est de même pour la durabilité jusqu'à atteindre l'asymptote à proximité du maximum possible pour cette mesure. Cette progression paraît moins évidente avec la tête plate notamment en raison de la position de l'essai 14-80.

Autre conséquence, la **hiérarchie des aliments sur la base de la dureté est différente** selon qu'une tête plate ou une tête triangulaire est employée. L'observation des figures suivantes sur lesquelles Filière et température de conditionnement sont indiquées en étiquette ou du tableau précédent donnant les valeurs et l'ordre (Lettres), permettent bien d'observer la **disparité de classement** : p.e. l'essai 16-93 classé en 4^{ème} rang par la tête triangulaire et 7^{ème} rang par la tête plate, ou l'essai 24-66 classé en 8^{ème} rang par la tête triangulaire et 3^{ème} rang par la tête plate. Il semble donc important de bien identifier quel classement est intéressant. Pour un animal utilisant des incisives ou un bec, une tête triangulaire en V pourrait être privilégiée alors que pour un animal utilisant de manière prépondérante des molaires, une tête plate pourrait être plus intéressante.



3. Conclusions

Ces essais ont été menés sur un aliment poulet car ce type d'aliment est souvent la cible de l'intérêt pour les indices de qualité des granulés au premier rang desquels on trouve la dureté. Le plan d'essai appliqué et l'utilisation d'une ligne pilote instrumentées permet d'appliquées des **consignes de granulation ciblées** et très précises, et ainsi d'accéder à des observations spécifiques. L'accroissement de l'épaisseur de la filière de 14 à 26 mm soit un équivalent de 14 à 26 en taux de compression (Facteur multiplicateur pilote/ Industriel estimé à 4) conduit à 5 % de plus en consommation électrique pour le même débit. Inversement, **l'augmentation de la température de conditionnement** de 66 à 93 °C conduit à une **réduction** de 5 % de cette **consommation électrique**. Ces effets sont connus pas toujours évalués. De plus, il est montré qu'il existe une **relation de type linéaire entre la consommation spécifique électrique et l'augmentation de température dans la filière**.

Sur le large domaine d'étude testé, la **durabilité** varie de 43 à 93 % et est **très influencée par le taux de compression**. Il est important de signaler que la difficulté de sécher avec les refroidisseurs pilote utilisés, fonctionnant par charge, se traduit par de moindres effets du taux de compression et la température de conditionnement dans les valeurs extrêmes du plan d'essais notamment en relation avec la forte humidité des granulés.

Concernant les tests de dureté, l'usage d'un système **Instron** paraît **trop coûteux** mais l'utilisation d'un appareil de type Schleuniger (Sotax) paraît fondée pour évacuer l'effet opérateur et faire une mesure sur un panel suffisamment large de granulés (> 30) afin d'obtenir une moyenne robuste.

La **différence de classification des aliments selon le type de tête employée** (Triangulaire ou plate) nécessite une nouvelle approche afin de **tester le comportement des animaux** pour valider la tête la plus convaincante afin de prédire le besoin de dureté des animaux et leurs conditions de fabrication.