

LE PETRISSAGE (suite)

ANALYSE DU TRAVAIL DE DEFORMATION DE LA PÂTE

1 - Définitions - Rappels

FORCE (F) : On appelle force toute cause capable de déformer, mettre en mouvement ou arrêter un corps s'il est en mouvement ou encore modifier son mouvement.

Le Newton (N), unité de force, correspond à la force qui communique une accélération de 1m/s^2 à un corps ayant une masse de 1kg.

$$F \text{ (Newton)} = M \text{ (kg)} \times \gamma \text{ (m/s}^2\text{)}$$

MASSE (M) : Le kilogramme (kg), unité de masse, correspond à une quantité de matière qui, sous l'action de la pesanteur (=accélération de $9,81\text{m/s}^2$) crée une force (le poids) de 9,81 Newtons.

TRAVAIL (W) (ou énergie) : Le joule (J) correspond au travail produit par une force de 1 Newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force : $W = F \times L$

Autre unités utilisées pour caractériser un travail :

- 1 Wh (Wattheure) = 3600 J (joules) ou 3,6 kJ (KiloJoules)
- 1 cal (calorie) = 4,185 J (joules)

PUISSANCE (P) (d'un système énergétique) : Une puissance d' 1 Watt (W) correspond à un transfert d'une énergie de 1 joule (J) pendant 1 seconde : $1\text{W} = 1\text{J/s}$ ou $1\text{kW}=1\text{kJ/s}$. $P = W / t$

Le cheval-vapeur électrique européen est défini comme valant 736 watts (= 1 ch),

Le travail fourni, ou l'énergie fournie, est le produit de la puissance par le temps pendant lequel cette puissance s'exerce ; $W \text{ (Watt-heure ou Joule)} = P \text{ (watt)} \times t \text{ (heure ou seconde)}$

L'énergie et le travail représentent des quantités, la puissance représente une intensité.

LES KILOWATTS (kW) REPRESENTENT UNE PUISSANCE ALORS QUE LES KILOWATTS-HEURE (kWh) REPRESENTENT UNE QUANTITE D'ENERGIE.

2 - Notion d'énergie développée au pétrissage

L'énergie développée par un pétrin correspond à sa capacité à produire ou à effectuer un travail mécanique qui aboutisse à un mélange satisfaisant des ingrédients et un développement structural du gluten et de la pâte.

Comme défini ci-dessus, le travail est le résultat du déplacement d'une force :

$$\begin{aligned} \text{Travail} &= \text{Force} \times \text{Longueur} \\ W \text{ (Joule)} &= F \text{ (Newton)} \times L \text{ (mètre)} \end{aligned}$$

La force F, résultante des forces qui s'exercent sur le frasseur, varie en fonction de la forme du frasseur, de la masse de la pâte, des forces de frottement sur les parois du pétrin et sur le frasseur, de la qualité rhéologique de la pâte (résistance visqueuse et élasticité).

Les forces de résistance conduisent à une élévation de la température et le travail mécanique produit une énergie calorifique.

La longueur L est en relation directe avec le nombre total de rotations du frasseur, son mouvement et la vitesse de rotation de la cuve.

→ Pour un même apport d'énergie, la qualité d'un mélange et d'une texturation peuvent donc être très variables.

3 - Influence des conditions de pétrissage

3.1. La vitesse de rotation du frasseur et la durée de pétrissage

En théorie, toute chose étant égale par ailleurs, un travail mécanique sensiblement identique peut être obtenu en des temps différents si la vitesse est modifiée en conséquence :

Exemple : W (20 min x 40 tr/min) \approx W (10 min x 80 tr/min)

Mais, la même texturation n'est certainement pas assurée :

- le régime d'écoulement est rhéofluidifiant => l'accélération de la vitesse de rotation du frasseur provoque une fluidification du milieu et de ce fait la résistance diminue.
- La relaxation de la pâte varie => le travail réel effectué à chaque passage est variable
- L'effet de cisaillement augmente avec la vitesse => le développement de la structure gluténique s'en trouve amélioré.

3.2. La masse de pâte

Lorsque l'on diminue la masse de pâte dans un même pétrin, sans changer la vitesse de rotation du frasseur, le travail total décroît en conséquence :

F (Newton) = M (kg) x γ (m/s²) => si $M \downarrow$ alors $F \downarrow$

F (Newton) = W (Joule) / L (mètre) => si $F \downarrow$, alors $W \downarrow$

Même si le travail par kilogramme est sensiblement équivalent, la masse de pâte plus ou moins importante dans la cuve du pétrin (ou coefficient de remplissage) influence les échanges de température et le régime d'écoulement de la pâte et donc les caractéristiques qualitatives de la pâte. En effet, avec une petite quantité de pâte, les échanges thermiques sont plus importants et la proportion d'eau évaporée est plus élevée qu'avec une quantité importante de pâte.

3.3. Le type de pétrin

Si l'on compare différents pétrins, pour une même énergie mécanique réelle exprimée par rapport à un kilogramme de pâte, les différences de configuration de ces matériels, les écarts de réglages entre le frasseur et la cuve, l'usure du frasseur... conduisent à des pâtes structurées différemment en raison de différences au niveau des régimes d'écoulement, de la part de travail rhéologiquement efficace et de la répartition de l'air dans la pâte. Ainsi les pétrins français de type axe oblique, qui travaillent plus en extension, donnent beaucoup plus d'irrégularités alvéolaires que les pétrins spirales. Les matériels qui travaillent principalement en cisaillement (vitesse élevée et fraseurs tranchants), comme les batteurs ou cutter, incorporent moins d'air mais la régularité et la division alvéolaires sont plus marquées (alvéoles plus petites et plus nombreuses).

4 - Travail effectué au cours du pétrissage

Le travail effectué au pétrissage s'exprime de la manière suivante : W (en joules ou en Wh) = U (en volts, tension = Résistance \times I) \times I (Intensité, en Ampères) \times t (en secondes ou en heures).

Il est possible de programmer le pétrissage en fonction du travail à effectuer ; l'utilisation du wattmètre permet l'arrêt automatique du pétrin :

- On fixe la valeur du travail mécanique désiré en tenant compte des pertes liées au fonctionnement du moteur lui-même et considérées comme constantes (effet joule et frottements mécaniques).
- Pour un travail déterminé et une tension constante, une résistance de la pâte plus importante se traduit par une intensité supérieure, ce qui entraîne une diminution de l'opération de pétrissage.

La mesure de l'ampérage permet de visualiser les variations de résistance de la pâte ainsi que son affaiblissement en relation avec un éventuel surpétrissage.

Si la résistance de la pâte est importante (pâte ferme et élastique), la force nécessaire à la déformation est supérieure et on atteint plus rapidement la valeur du travail fixée ; mais la pâte n'est pas suffisamment structurée si le pétrissage est stoppé pour cette valeur de travail déterminée ; il est nécessaire de prolonger le pétrissage (=travail fourni plus important) → voir §.6.

5 - Notion de puissance du pétrin

Le travail de déformation de la pâte est directement lié à la puissance du moteur du pétrin : P (puissance, en Watt) = W (travail, en Joules) / t (durée, en secondes).

Par exemple, si un temps de pétrissage plus court pour un travail identique est envisagée, la fréquence de rotation du frasseur doit être supérieure => la puissance du moteur doit être suffisante en conséquence.

$$P = W \times t = F \text{ (Force)} \times L \text{ (Déplacement)} / t = F \times L / t$$

$$\text{Or } L / t = V \text{ (vitesse)} \Rightarrow P = F \times V$$

6 - Intensité du pétrissage

L'intensité du pétrissage varie en fonction de la qualité de la pâte (consistance, composition...) et du type de production souhaité.

Les anglo-saxons, qui apprécient les pains dont la mie a une structure fine et régulière, préconisent un travail (= énergie absorbée par la pâte au cours du pétrissage) de 40 kJ / kg (ou 11 Wh/Kg de pâte) pour développer le réseau gluténique (référence prise dans le Chorleywood Bread Process ou CBP). Les caractéristiques des farines sont bien fixées, de manière à ce que la durée du pétrissage définie par la valeur du travail déterminée et la puissance du moteur, aboutisse effectivement à la structuration souhaitée de la pâte.

Un appareil puissant fournit beaucoup d'énergie en peu de temps.

→ Pour pétrir 100 kg de farine, soit 162 kg de pâte (hydratation à 62%), il faut, selon cette référence anglo-saxonne, effectuer un travail de $162 \times 11 = 1782$ Wh (ou 6515,2 kJ).

Un moteur de 60 ch par exemple (ou 44,16 kW), qui développe une puissance de 44,16 kJ/s, a besoin de $6515,2 / 44,16 = 145$ secondes, soit 2min 25 s, pour disperser cette énergie dans la pâte.

L'extrême diversité des pains français ne permet pas d'établir une valeur d'énergie unique. Plusieurs résultats expérimentaux montrent qu'avec la méthode française de pétrissage intensif, les valeurs d'énergie « optimales » se situent entre 7 à 15 kJ/kg (soit 2 à 4 Wh/kg) avec des pétrins à axe oblique, et aux alentours de 25 kJ/kg (soit env. 7Wh/kg) avec des pétrins à spirale.

Les pâtes industrielles, plus froides et moins hydratées qu'en boulangerie traditionnelle, réclament un travail plus important et donc des moteurs plus puissants.

La résistance du milieu pâteux et les forces de frottement entraînent une augmentation variable de la température de la pâte ; la consistance de la pâte, le type de pétrin utilisé et l'intensité du pétrissage sont en relation avec cette augmentation de la température de la pâte.

Il existe une relation entre l'énergie apportée à la pâte et la chaleur massique (=quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance) de la celle-ci :




Exemple : pour un apport d'énergie de 15 kJ/kg (soit environ 4,2 Wh/kg) lors d'un pétrissage intensifié de 18 minutes dans un pétrin à axe oblique, la chaleur massique de la pâte étant de 2,64 kJ/kg/°C, l'échauffement est de $15/2,64 = 5,7^{\circ}\text{C}$. Ce résultat correspond à un échauffement de 0,32]C par minute de pétrissage.

Le surpétrissage correspond à un stade de développement où la pâte atteint un niveau de résistance et de viscosité qui ne lui permet plus d'être stable pour pouvoir être travaillée correctement.

La mise en régime d'écoulement de la pâte au début du pétrissage se réalise grâce à la rupture de liaisons de faible énergie. Si le pétrissage se prolonge (ou si le travail fourni devient trop important), on peut penser que des ruptures de liaisons de fortes énergie se produisent ; ce phénomène est favorisé par l'amincissement du film protéique formé et son extension maximale. L'échauffement qui croît au cours du pétrissage facilite vraisemblablement les phénomènes de rupture et contribue à la fragilisation de la structure de la pâte.

Quelques rappels d'ordres de grandeurs :

<u>Pétrin à axe oblique :</u>	V1 : 35 à 50 t/min	→ P = 2,5 à 3,5 kW pour 160 kg de pâte
	V2 : 72 à 85 t/min	→ échauffement de 0,3 à 0,4 °C/min
		→ P = 3,5 à 5,5 kW pour 160 kg de pâte
Pétrissage conventionnel :	V1 : 12 à 15 min	Θbase = 65 °C
Pétrissage amélioré :	V1 : 2 à 3 min	
	V2 : 10 à 12 min	
		Θbase = 58 °C
Pétrissage intensifié :	V1 : 2 à 3 min	
	V2 : 18 à 20 min	
		Θbase = 52 à 54 °C
<u>Pétrin à spirale :</u>	V1 = 60 à 120 t/min	→ P = 2 à 4 kW pour 160 kg de pâte
	V2 = 120 à 360 t/min	→ échauffement de 0,8 à 1°C/min
		→ P = 8 à 10 kW pour 160 kg de pâte
Vitesse de la cuve :	12 à 30 tours/min	
Pétrissage intensifié :	V1 : 2 à 3 min	
	V2 : 6 à 14 min	
		Θbase = 43 à 48°C
<u>Pétrin à bras plongeants :</u>	V1 = 40 à 50 t/min	
	V2 = 70 t/min	→ échauffement de 0,2 à 0,3°C/min
		Θbase = 55 à 60°C

	 Pétrin cycloïdal	 Pétrin spirale	 Pétrin oblique
PETRISSAGE			
Vitesse 1 (frasage) Temps moyen en V1	40 tours/min 2-4 min	100 tours/min 2-3 min	40 tours/min 3-5 min
Vitesse 2 (étrirage/soufflage) Temps moyen en V2 intensifié Temps moyen en V2 amélioré	80 tours/min 17-18 min 9-10 min	200 tours/min 18-20 min 10-12 min	80 tours/min 18-20 min 10-13 min
ECHAUFFEMENT			
Vitesse 1	~ 0	~ 0	~ 0
Vitesse 2	0,2-0,3°C/min	0,8-1°C/min	0,3-0,4°C/min
PUISSANCE (160 kg de pâte)			
Vitesse 1	1-2 kW	2-4 kW	2,5-3,5 kW
Vitesse 2	2-3 kW	8-10 kW	3,5-5,5 kW

Comparatif technique des trois principaux types de pétrins (modèles classiques).