

## Agitation et Mélange

### Mesure de l'énergie mise en œuvre pendant le pétrissage

VMI a entrepris depuis plusieurs années déjà des travaux de recherche sur le contrôle des différents paramètres de conduite du pétrissage. Dans la majorité des cas, qu'il s'agisse de fabrication artisanale ou industrielle, le boulanger se base sur des critères liés à l'observation sensorielle de la pâte pour définir la durée optimale du pétrissage. Des considérations de productivité et en particulier de reproductibilité ont récemment amené certains boulangers, principalement industriels, à réclamer une méthode de suivi du pétrissage en temps réel qui puisse tenir compte à la fois des caractéristiques rhéologiques de la pâte en constitution et des différents paramètres de fonctionnement des pétrins. L'énergie développée par le pétrin et transmise à la pâte est l'une des valeurs physiques qui répond à cet objectif et qui peut, avec un certain nombre de précautions, apporter une aide précieuse au suivi du pétrissage et à l'optimisation des différents réglages.

#### Quelques notions de base

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. L'énergie est un concept créé pour quantifier les interactions entre des phénomènes très différents ; c'est en quelque sorte l'expression de l'échange qui se produit entre les phénomènes physiques. Ces échanges sont contrôlés par les lois et principes de la thermodynamique. Lorsqu'un phénomène entraîne un autre phénomène, l'intensité du second dépend de l'intensité du premier. Par exemple, les réactions chimiques dans les muscles d'un cycliste lui permettent de provoquer le déplacement du vélo. L'intensité de ce déplacement (c'est-à-dire la vitesse) dépend de l'intensité des réactions chimiques des muscles du cycliste, qui peuvent être quantifiées. Le concept d'énergie va permettre de calculer l'intensité des différents phénomènes (par exemple la vitesse d'une automobile) en fonction de l'intensité du phénomène initial (la quantité de gaz et la chaleur produite par la réaction chimique de combustion dans le moteur). La notion d'énergie mécanique nécessite la mise en œuvre d'une force mécanique.

Force :	Phénomène physique provoquant la déformation, la mise en mouvement, l'arrêt ou le changement de direction d'un corps. L'unité de la Force est le Newton (N). 1 N correspond à l'intensité de force nécessaire à provoquer une accélération de $1 \text{ m.s}^{-2}$ à un corps d'une masse de 1 kg.
Energie :	Le Joule (J) est l'unité utilisée pour exprimer l'énergie (aussi appelé travail). 1 J correspond au travail produit par une force de 1 N dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction et sous l'effet de la force.
Puissance :	La puissance est l'expression du transfert d'une énergie de 1 J pendant 1 seconde. En mécanique, Puissance = Energie (J) / Temps (s). L'unité de la puissance est le Watt (W). $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ , et $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ . On exprime souvent l'énergie en Wh (= 3600 J).

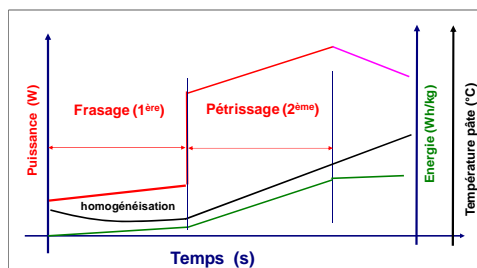
#### L'Énergie développée lors du pétrissage

Un pétrin doit transmettre suffisamment d'énergie à la pâte afin de favoriser la constitution et le développement structural du réseau gluténique. Ce sont les forces d'étirement, de compression et de cisaillement mises en œuvre par les différents constituants du pétrin qui génèrent l'énergie dont une partie est matérialisée par une transformation de la constitution de la pâte et l'autre en une élévation de sa température. Ces forces sont fonction de nombreux paramètres :

- Formes et dimensions des outils et de la cuve,
- Caractéristiques rhéologiques de la pâte (viscosité, élasticité, régime d'écoulement), elles-mêmes fonction des constituants de base (eau, farine, sel, ...) et de l'effet de l'apport d'énergie,
- Comportement de la pâte vis-à-vis de son environnement extérieur (frottement, adhérence),
- Quantité relative de pâte dans le pétrin

Ce qui explique que pour un même apport en énergie, à ingrédients par ailleurs identiques, la qualité du pétrissage ne sera pas la même d'un pétrin à un autre et que pour un même pétrin, ce même apport en énergie ne restituera pas toujours la même qualité de pâte tout au long de la durée de vie du pétrin qui connaîtra un certain nombre d'usures qui modifieront l'effet des forces mécaniques vis-à-vis de la restitution d'énergie.

Des travaux de recherche ont récemment permis d'établir un profil caractéristique de l'évolution de l'énergie transmise à la pâte en cours de pétrissage :



Les valeurs relatives de ces courbes dépendent bien entendu du type de pétrin utilisé, des caractéristiques des matières premières et des vitesses de rotation des outils. Elles montrent cependant qu'il est possible d'établir une corrélation entre le temps de pétrissage, l'énergie (ou la puissance) développée par le pétrin et la température de la pâte en cours de pétrissage.

Certains ont utilisé ces corrélations relativement précisément afin de déterminer des valeurs d'énergie à attendre en regard d'objectifs qualitatifs de la pâte. C'est le cas des anglais de la *Flour Milling and Baking Research Association* qui en mettant au point ce qu'ils ont

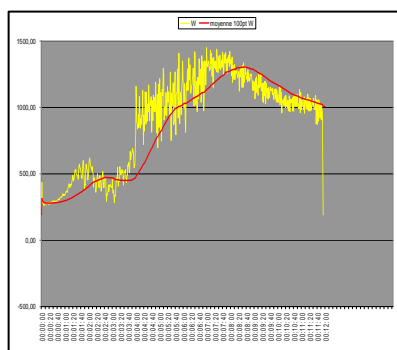
appelé le Chorleywood Bread Process (CBP), ont défini un niveau d'énergie de référence pour obtenir la qualité de pâte requise dans des conditions précises d'ingrédients et de températures. La valeur de 40 kJ/kg de pâte est celle préconisée pour ce type de pain.

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 avec des pétrins à axe oblique, et aux alentours de 25 kJ/kg avec des pétrins à spirale.

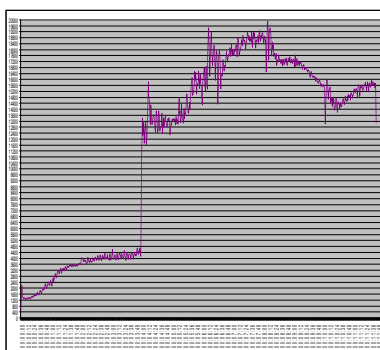
Cette notion d'énergie « optimale » peut être appréhendée à partir de la notion de surpétrissage. Si la pâte se constitue grâce à la formation d'un réseau de fibres et de protéines liées les unes aux autres par des liaisons mécaniques favorisées par l'apport d'énergie du pétrissage, un apport trop important d'énergie contribue à rompre ces liaisons initialement constituées. Ces ruptures se trouvent favorisées par l'élévation de température et l'amincissement du film protéique lorsqu'il atteint son extension maximale. La pâte atteint alors des niveaux de viscosité et de résistance qui ne lui permettent plus d'être travaillée correctement. On parle alors de pâte surpétrée. La diminution des liaisons mécaniques internes de la pâte conduisent à un effondrement de sa résistance globale. Il y a besoin de beaucoup moins de puissance mécanique pour que les outils de pétrissage continuent à vitesse constante à appliquer les forces demandées. Nous observons alors un point d'inflexion dans l'évolution de la puissance, donc de l'énergie, transmise à la pâte par le pétrin. Ce point d'inflexion peut donner une indication quant à la durée « optimale » de pétrissage. Cette durée peut cependant n'être qu'une durée maximale à ne pas dépasser et non optimale eu égard à des critères sensoriels qui dicteraient une qualité de pâte à obtenir correspondant à un temps de pétrissage inférieur.

#### Mise en œuvre de la mesure de l'énergie

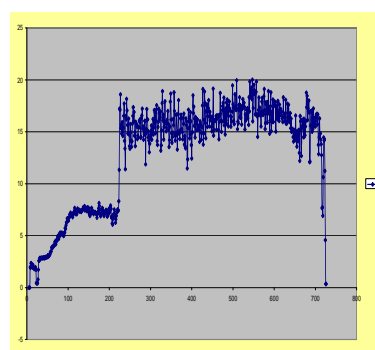
Les pétrins VMI permettant la mesure en temps réel de l'énergie sont équipés d'un wattmètre mesurant l'énergie électrique consommée par le ou les moteurs des pétrins. De nombreux essais ont montré que l'évolution de cette puissance électrique consommée en cours de pétrissage suit le profil caractéristique théorique de la courbe de la puissance, donc de l'énergie, transmise à la pâte.



**Mesures réalisées sur pétrin spirale SPI53**  
5.6 kg farine, 3.3 kg eau, 16.5g de sel (ajoutés à 10'30)  
Frasage première vitesse (110 tr/min) pendant 4 min  
Pétrissage deuxième vitesse (220 tr/min) pendant 8 min



**Mesures réalisées sur pétrin spirale 400 AVI**  
100 kg farine, 150 kg eau  
Frasage première vitesse (96 tr/min) pendant 4 min  
Pétrissage deuxième vitesse (192 tr/min) pendant 8 min



**Mesures réalisées sur pétrin axe oblique 1595**  
10 kg farine, 15 kg eau  
Frasage première vitesse (40 tr/min) pendant 6 min  
Pétrissage deuxième vitesse (80 tr/min) pendant 12 min

La puissance électrique consommée par le pétrin est, comme le montrent les différentes expérimentations réalisées, entachée d'une incertitude liée à la fois aux instabilités du réseau électrique, à la non homogénéité du milieu résistant que constitue la pâte en cours de constitution, à l'aspect cyclique des efforts du à la rotation globale de la pâte au sein de la cuve, et aux incertitudes des mesures réalisées instantanément par échantillonnage. Ces incertitudes sont également illustrées par le fait que la puissance consommée à vide par les pétrins n'est pas constante dans le temps, et ce principalement à cause des différents rendements et échauffements des organes mécaniques internes des pétrins. Des essais ont cependant montré la répétabilité de ces mesures pour des conditions de pétrissage identiques. On peut donc considérer que cette mesure de la puissance électrique consommée, si elle ne permet pas d'obtenir une valeur absolue de l'énergie finalement transmise à la pâte, permet par contre de vérifier un certain nombre de paramètres par comparaison des valeurs relatives des puissances d'une production à l'autre. En effet une variation de puissance peut être le résultat d'une modification liée aux ingrédients (caractéristiques de la farine, oubli d'ingrédients, erreur dans l'ordre d'incorporation des ingrédients, températures différentes, ...), ou un signe de modification de comportement du pétrin lui-même (usures, mauvais réglages).

#### Energie et température

Il est important de relier l'expression de l'énergie consommée, et en partie transmise à la pâte par le pétrin, à la température de la pâte. Il y a en effet une relation directe entre l'énergie transmise à la pâte et son élévation en température. Cette relation s'établit à travers la chaleur spécifique de la pâte qui exprime la quantité de chaleur (assimilable à une énergie) à apporter pour produire une élévation de température donnée. L'unité officielle de la chaleur spécifique ( $C_p$ ) d'un corps s'exprime en  $J/kg/°K$ , mais est souvent exprimée en  $cal/kg/°C$  ( $1 J/kg/°C = 0.24 cal/kg/°C$ ). La relation entre énergie ( $E$ ) et variation de température ( $\Delta T$ ), pour une quantité de matière ( $M$ ) donnée est donc simplement  $E (J) = C_p (J/kg/°C) \times \Delta T (°C) \times M (kg)$ . Cette relation relativement simple ne conduit malheureusement pas à une expression linéaire de l'élévation de température en fonction de l'énergie apportée, car la chaleur spécifique du milieu qui nous intéresse, la pâte, varie en fonction de l'état même de cette pâte qui évolue d'un état relativement liquide ( $C_p = 410 cal/kg/°C$ ) à un état solide ( $C_p = 640 cal/kg/°C$ ) en cours de travail. La mesure de l'élévation en température de la pâte, réalisée en parallèle de celle de la puissance consommée par le pétrin, permet toutefois, en première approximation d'avoir une idée des valeurs absolues de l'énergie transmise à la pâte.



Exemple de mesures réalisées en temps réel par un pétrin horizontal sous vide VeryMix III  
Courbes de Puissance, Energie, Température, Vitesse de rotation

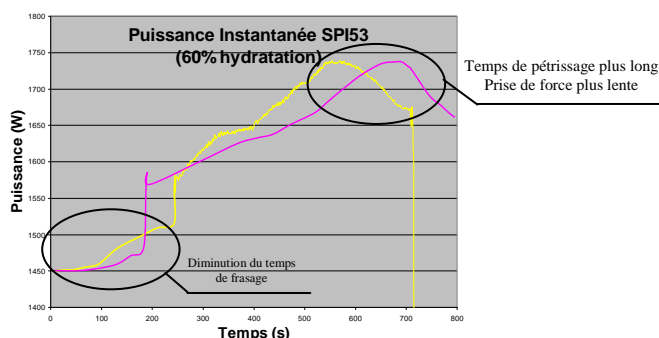
Intérêts et limites de la lecture de l'énergie de pétrissage

Traditionnellement, le boulanger se fie à des critères sensoriels afin de définir les bons paramètres de pétrissage. Il considèrera obtenir une bonne pâte après de multiples essais qui lui permettront de définir un temps optimal de pétrissage. Ce temps devient l'unique moyen de control du pétrin. On demandera à ce dernier d'arrêter le pétrissage au bout d'un certain temps. On peut considérer ce paramètre de control comme totalement décorrélé de toute réalité physique qui permettrait de caractériser l'état de la pâte. Tout changement dans les conditions de pétrissage (ingrédients, températures, paramètres du pétrin) ne pourra voir son impact évalué par une simple mesure du temps. C'est pourquoi il peut être intéressant en particuliers pour des considérations de reproductibilité et de traçabilité de disposer d'une méthode de suivi du pétrissage qui puisse tenir compte à la fois des caractéristiques rhéologiques de la pâte en constitution et des différents paramètres de fonctionnement des pétrins. L'énergie transmise à la pâte est l'une des valeurs physiques qui répond à cet objectif comme expliqué précédemment.

Cependant, cette mesure de l'énergie se trouve confrontée à quelques difficultés et limitations :

- A quelle valeur d'énergie, l'utilisateur doit-il considérer que son pétrissage est optimal ? Les méthodes de panification dans le monde sont extrêmement diverses et variées et mettent en œuvre des ingrédients (farine et autres) aux propriétés extrêmement changeantes. Il est par conséquent très difficile de définir à priori une valeur optimale d'énergie à atteindre. Cette valeur ne pourra être obtenue qu'à travers une batterie d'essais propres à chaque pâte.
- Le signal de la mesure instantanée de la puissance consommée par le pétrin est fortement bruité et fluctuant. Cette fluctuation n'a pas d'impact direct sur le calcul de l'énergie correspondante, mais est une gêne importante au calcul du point d'inflexion qui indique l'instant de « surpétrissage ». Des algorithmes de lissage par moyennation doivent être utilisés, mais ces derniers induisant des retards non négligeables dans la détection des inversions de pentes, ils ne permettent pas à ce jour de pouvoir arrêter le pétrin lorsque ce point d'inflexion est atteint, si tant est que ceci soit souhaitable.

Lors des multiples essais entrepris par VMI, la mesure de l'énergie nous a permis de mettre en exergue l'importance de l'étape dite de frassage. Cette étape consiste à favoriser l'absorption de l'amidon et du gluten par l'eau de coulage en mélangeant intimement la farine à l'eau. Elle s'effectue en amont du pétrissage à des vitesses de rotation inférieures à ce dernier et prépare le mélange à son malaxage. Les boulangers en connaissent l'importance vis-à-vis de la qualité finale de la pâte. Les mesures d'énergies réalisées selon différents paramètres ont permis à VMI d'en quantifier l'impact.



On vérifie donc qu'un temps de frassage plus court conduit à retarder la prise de force de la pâte et donc en final à allonger le temps global de pétrissage.

Et demain ? ...

Hier, le boulanger ne disposait que de la seule variable Temps pour piloter ses pétrins. Une variable dont la mesure seule n'autorise pas la prise en compte de l'état réel et effectif de la pâte. Il s'agit d'un paramètre totalement découplé de la caractérisation de la pâte.

Aujourd'hui VMI rend possible la mesure de l'énergie consommée par le pétrin et offre ainsi au boulanger une variable qui prend en compte de façon globale l'état de l'ensemble pétrin/pâte à travers son bilan énergétique. Il s'agit d'un paramètre partiellement lié à la caractérisation de la pâte.

Pour demain, VMI travaille en collaboration avec un certain nombre de chercheurs partenaires, à la mise au point d'un moyen de mesure qui permettrait de piloter le pétrissage en tenant compte d'un paramètre qui ne serait lié qu'à la caractérisation de la pâte, découplé des phénomènes mécaniques ou thermiques du pétrin lui-même.

La mesure de l'énergie mise en œuvre pendant le pétrissage, à travers celle de la puissance électrique instantanée consommée par le pétrin, est un moyen de quantifier l'état de la pâte lors du pétrissage. Elle est surtout utile à des fins de traçabilité et d'identification de variations pour un process bien établi. Elle est un complément à d'autres paramètres comme par exemple la température, qui permet aujourd'hui de contrôler le bon fonctionnement des pétrins en tenant compte de l'état de la pâte en cours de constitution. Cette mesure étant un bilan global de l'énergie mise en œuvre par le couple pétrin/pâte, elle intègre des paramètres propres au pétrin lui-même, en limitant l'interprétation de ses valeurs absolues.

**Pour en savoir plus :**

Littérature

- *Les Pains Français – Philippe Roussel, Hubert Chiron (Editions Maé-Erti)*