Étude systémique du broyage du blé dur par un broyeur à boulets

David BORDEAUX*,
Jean-Charles BÉNÉZET**,
Ali BENHASSAINE**

Résumé

Dans le cadre d'applications non alimentaires, il est possible d'envisager le broyage du blé dur par des techniques d'écrasement à l'aide de corps broyants. Dans ce travail, deux types de broyeurs à boulets ont été utilisés : un broyeur de laboratoire et un broyeur industriel. L'étude de la dimension des diamètres modaux des populations récupérées a montré que le broyage à boulets produit des valeurs similaires à celles obtenues avec d'autres types de broyeurs (broyeur à percussion par exemple). Le nombre de populations et le mode de chacune sont corrélés aux familles de particules décrites dans le grain de blé. Il existe un lien très fort entre la microstructure du grain et les particules obtenues après broyage. Le nombre de populations et la dimension des particules sont en grande partie hérités du matériau.

Mots-clés : blé dur, déconvolution, population, granulométrie.

Abstract

Systemic study of the milling of durum wheat by using a break-roller mill

Within the framework of non-food applications, it is possible to consider the grinding of durum wheat by milling techniques using grinding elements. In this work two types of break-roller mills have been used: a laboratory test-mill and an industrial mill. The study of the size of the modal diameters of the particle populations obtained showed that milling through break-roller mills produces similar values to those obtained with other types of mills - hammer mills for example. The number and the mode of each kind of populations are correlated with the families of particles described in the wheat grain. There is a strong link between the microstructure of the grain and the particles obtained after grinding. The number and the size of the populations are mainly inherited materials.

Key-words: *durum wheat, deconvolution, particle population, granulometry.*

Introduction

Dans le cadre de la mise en place d'une filière non alimentaire comportant trois opérations unitaires (**Figure 1**) (ABÉCASSIS *et al.*, 1997), nous nous sommes intéressés à l'opération du broyage du blé dur.

Pour étudier cette opération unitaire, nous avons résolument adopté les principes de l'analyse systémique et les méthodes de résolution des systèmes complexes. Cela nous a conduits à décomposer l'opération unitaire de broyage en cinq sous ensembles selon le découpage présenté dans la **Figure 2** (BORDEAUX, 2002).

Bien évidemment, les décompositions pertinentes supposent des validations que nous avons voulues redondantes. Elles l'ont été grâce à la vérification des propriétés de décomposabilité-composabilité par l'intermédiaire des techniques mises au point au laboratoire telles que la déconvolution-reconstruction des propriétés et des ensembles (ANDRÉANI, 2002).

* SD-Tech S.A., P.I.S.T. - 3, rue de la Bergerie, 30100 Alès - david.bordeaux@sd-tech.com
** École des Mines d'Alès - 6, avenue de Clavières, 30319 Alès - jean-charles.benezet@ema.fr

Figure 1 : Filière non alimentaire : les opérations unitaires.

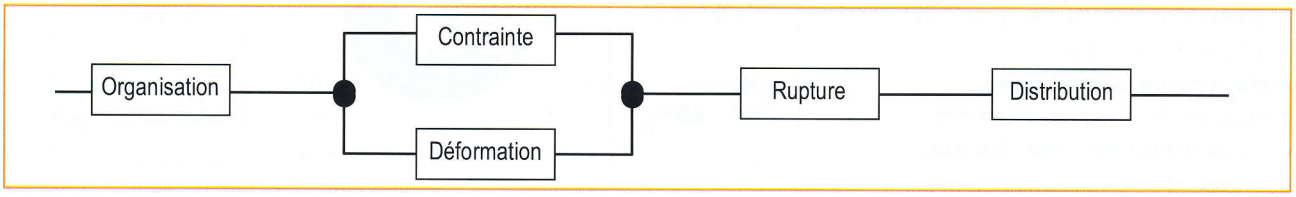

Figure 2 : Opération de broyage : décomposition en 5 sous ensembles.

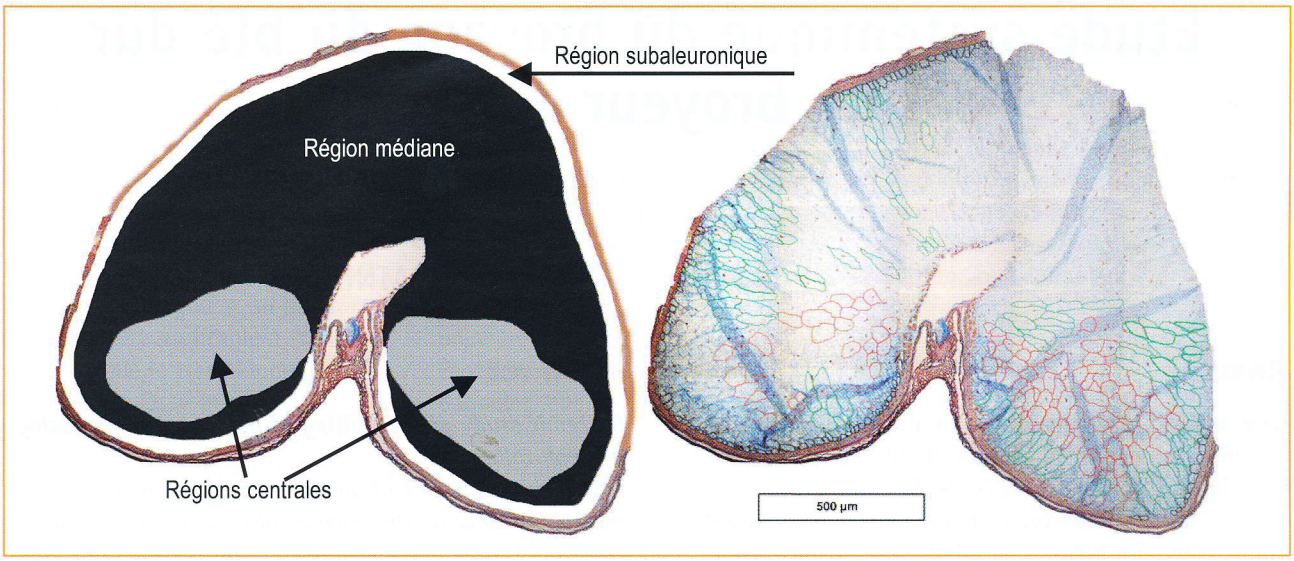

Figure 3 : Coupe histologique de blé dur de la variété *Ardente*.

Matériaux et méthodes

Le blé dur

Au cours de cette étude, un blé dur de variété Ardente a été utilisé. Trois différentes zones structurées peuvent être mise en évidence dans ces grains de blé (**Figure 3**) :

- une région périphérique subaleuronique, composée de cellules de petites tailles cuboïdes et d'isodiamètres ;
- une région médiane composée de cellules prismatiques dont la taille augmente lorsque l'on s'éloigne de la couche à aleurone ;
- une région centrale composée de cellules centrales polyédriques.

Les caractéristiques (forme, taille et proportion) concernant les différents niveaux de structuration sont reportées dans le **Tableau I**. À partir des mécanismes de fragmentation existant, un nombre important de familles de particules (particules constituées exclusivement d'enveloppes, d'amande, de cellules, d'amidon, etc.) peut être identifié. Sachant que l'âme du matériau représente plus de 80 % du grain total, les particules issues de la fragmentation de l'amande (centre) représenteront la majorité des particules. Par conséquent, toutes les familles « significatives » seront issues de cette partie du grain.

Les broyeurs

Les principaux paramètres du broyeur à boulets sont : le remplissage de la jarre, la proportion de la charge broyante / produit à broyer, la forme et la composition de la charge broyante, la vitesse de rotation de la jarre, la durée de broyage, l'adjuvantation éventuelle. Dans ce travail, un remplissage de 40 %, avec une proportion charge broyante / produit égale à 2,5 (1,6 kg de produit et 4 kg de boulets) a été choisi pour le broyeur de laboratoire.

Un diamètre de boulets égal à 35 mm et une durée de broyage variant de 8 à 96 heures ont été utilisés. Le broyage est réalisé en régime de « cataracte » : les corps broyants roulent et retombent les uns sur les autres en chute libre qui se termine au pied de la charge (**Figure 4**). Le régime de cataracte est obtenu avec une vitesse de rotation du broyeur variant de 80 à 70 % de la vitesse de centrifugation de la couche extérieure des corps broyants ou vitesse critique Nc (en tr/min) (BLAZY et JDID, 1991 ; BLAZY *et al.*, 1992) donnée par la relation :

(1) $N_c = 42,3 / D^{0,5}$

dans laquelle, D est le diamètre intérieur de la jarre en mètre. En tenant compte de l'équation (1) et des caractéristiques du broyeur, une vitesse de rotation égale à 80 tr/min a été imposée.

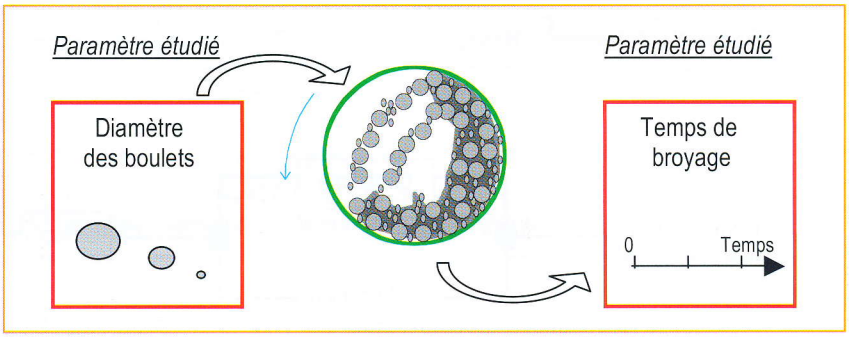

Figure 4 : Paramètres de broyage étudiés : broyage à boulets en cataracte.

Niveau de structure		Caractéristiques et forme			Région
		Forme	Taille (µm)	Proportion %	
Niveau 1	Grain de blé			100	Grain
Niveau 2	Germe			3	Grain
	Enveloppes			15	
	Endosperme amylacé			80-85	
Niveau 3	Cellules de l'épicarpe	Cell. Alter : 2 à 4 couches	80-300 x 25-48 x 15-20	4,3	Péricarpe
	Cellules du mésocarpe	Transversal en col.	100-150 x 15-20 x 10-15	1,5	
	Cellules de l'endocarpe	Espace intercellulaire	120-130 x 12-15 x 5-8		
	Cellules du tégument		100-191 x 9-20 x 5-8	2,2	Enveloppe de la graine
	Épiderme Nucelle	Cell. Écrasées	30-300 x 15-45 x 7		
	Cell. Al.	Cuboïde	50 x 13-50	6,5-7,5	Assise protéique
	Cell. Subal.	Cuboïde	40 x 60	8	Endosperme amylacé
	Cell. Prism.	Prismatique	50 x 170	42	
	Cell. Centr.	Polyédrique	90 x 150	35	
Niveau 4	Parois Cell. Env.				
	Parois Cell. Al.		8		
	Grain à Al.				
	Parois Cell. End. Amy.		1-6		Endosperme
	Amidon Cell. Subal.		3-25		Subaleurone
	Amidon A Cell. Prism.	Elliptique	15-30		Médiane
	Amidon B Cell. Prism.	Sphérique	0,5-7,5		
	Amidon A Cell. Centr.	Elliptique	28-33		Centrale
	Amidon B Cell. Centr.	Sphérique	2-8		
	Amidon A Total	Elliptique	20-35	6-14	Endosperme
	Amidon B Total	Sphérique	2-10	48-63	
	Ciment protéique			12-16	Grain

Tableau I : Tableau récapitulatif des caractéristiques des différents niveaux de structure du grain de blé.
Dimension : Longueur x Largeur x Hauteur ou Longueur x Hauteur. Proportion exprimée en pourcentage de la matière sèche.

Les caractéristiques de la jarre de laboratoire sont les suivantes :
- diamètre : 0,18 m
- volume : 4 litres

Dans le cas du broyeur industriel, les caractéristiques sont :
- volume : 100 litres
- diamètre intérieur : 1 m
- vitesse de rotation : 43 tr/mn
- taille des boulets : 20 mm

Résultats - Obtention des données

Les granulogrammes (répartitions granulométriques) des produits obtenus après les différents temps de broyages sont représentés sur les **Figures 5** et **6**.

En comparant les spectres, il apparaît que les courbes granulométriques, obtenues après broyage industriel et après broyage de laboratoire, ont des allures semblables. Par exemple, la granulométrie obtenue après 10 heures de broyage industriel est très proche de la granulométrie obtenue après 48 heures de broyage de laboratoire (**Figure 7**).
Afin de déterminer les correspondances (en temps) entre les deux types de broyages, les différents granulogrammes ont été comparés. Le **Tableau II** récapitule les résultats des correspondances et des différences absolues entre celles-ci.

À partir de ce tableau, le graphe de corrélation des temps de broyage peut être établi (**Figure 8**). Le coefficient de corrélation est égal à 0,95, prouvant ainsi que la corrélation est très bonne. La pente des droites exprime le rapport de proportionnalité entre les temps de broyage des deux broyeurs. Il apparaît que pour un volume 25 fois plus grand (4 litres puis 100 litres), le broyeur industriel produit une fraction dont le spectre granulométrique est quasi identique à celui du broyeur de laboratoire, en 5 fois moins de temps.
L'obtention de granulogrammes similaires et la corrélation forte prouvent qu'il est facile dans le cas

du broyage à boulets de transposer les résultats de laboratoire au domaine industriel. Il existe véritablement un rapport de proportionnalité lorsque l'on augmente la taille du broyeur.

Traitement des données

Une déconvolution « probabiliste » fait apparaître que pour les différentes courbes granulométriques issues du broyage à boulets, il existe une seule solution probabiliste pour chaque granulométrie (**Figure 9**).
Le nombre de solutions probabilistes est fonction de la superposition des populations. Plus les populations sont proches (mode) et dispersées (écart type), plus on obtiendra de solutions probabilistes doubles ou triples (BORDEAUX, 2002). Dans le cas du broyage à boulets, les populations possèdent un domaine commun moins important (moins de recouvrement entre les populations) : il existe une seule solution probabiliste.

Néanmoins, cela ne prouve en rien que la solution unique obtenue correspond à la réalité physique du broyage. En effet, il s'agit de la convergence à un algorithme mathématique ; il peut exister d'autres solutions pouvant répondre à des critères de corrélation et d'erreur.

Traitement des modes

Il apparaît que quatre ou cinq populations suffisent pour déconvoluer les courbes granulométriques issues du broyage à boulets de laboratoire.
Naturellement, le traitement des données du broyage à boulets industriel révèle les mêmes conclusions. Chaque population se trouve sur une gamme granulométrique identique à celle observée pour le broyage à boulets de laboratoire. La corrélation avec les différentes familles de particules décrites dans le grain de blé est identique.

Étant donnée l'excellente correspondance entre le broyage industriel et le broyage de laboratoire, les résultats des déconvolutions probabilistes des deux types de broyage à boulets ont été synthétisés sur la **Figure 10**.
Les résultats font apparaître que pour quatre populations, on retrouve respectivement le même domaine granulométrique qu'en utilisant d'autres types de broyeurs [broyeur à percussion par exemple (BORDEAUX *et al.*, 2003)].
Les différentes populations identifiées dans chaque produit sont corrélées aux dimensions des différentes familles de particules identifiées (HOSENEY, 1998) :

- Le mode de la population 1 semble augmenter en fonction du nombre de broyages. Il est compris entre 3 et 18 µm. La population est corrélée à l'ensemble des familles constituées par des grains d'amidon de type B et des débris microniques.

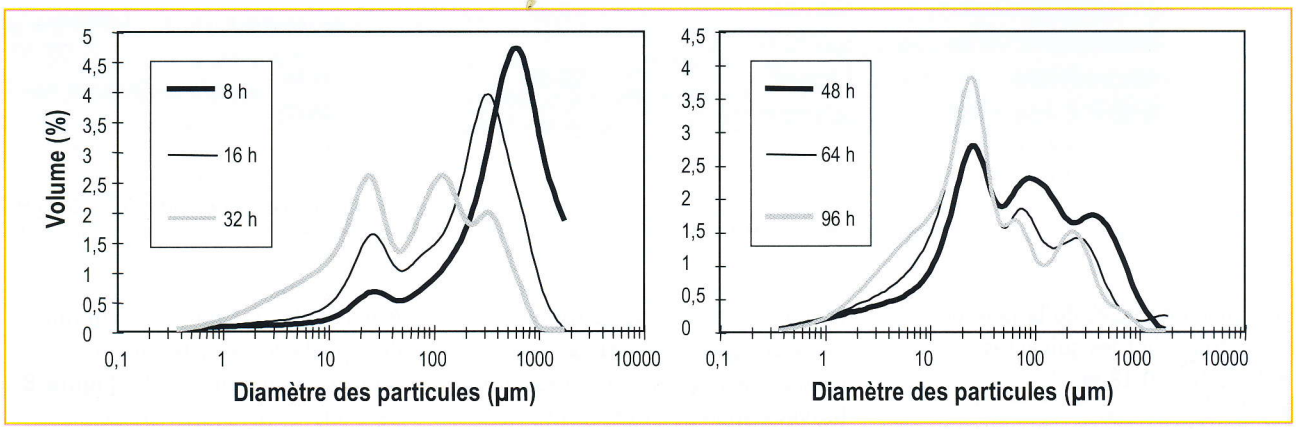

Figure 5 : Évolution de la granulométrie en fonction du temps de broyage dans le cas du broyeur de laboratoire.

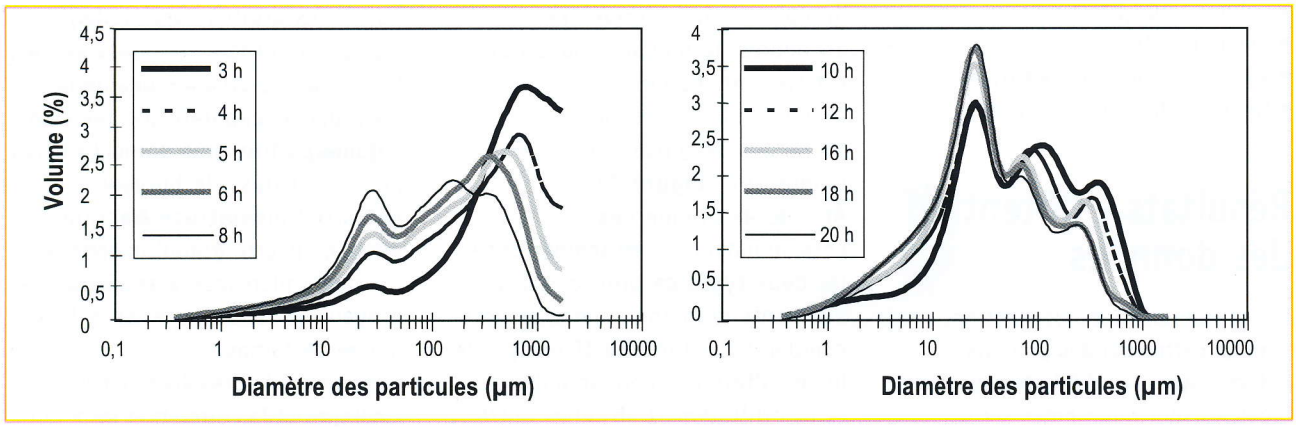

Figure 6 : Évolution de la granulométrie en fonction du temps de broyage dans le cas du broyeur industriel.

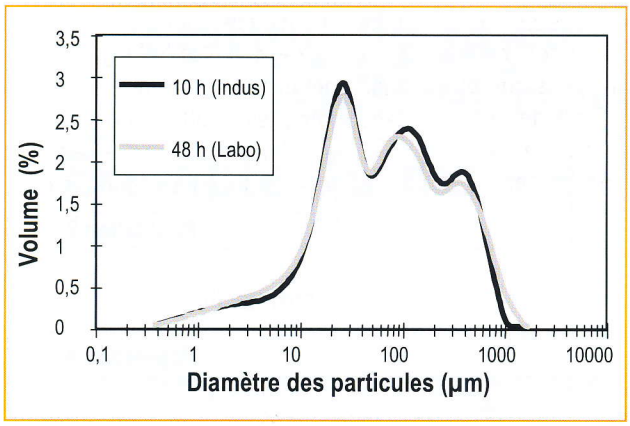

Figure 7 : Comparaison des granulogrammes (10 heures de broyage industriel et 48 heures de broyage laboratoire).

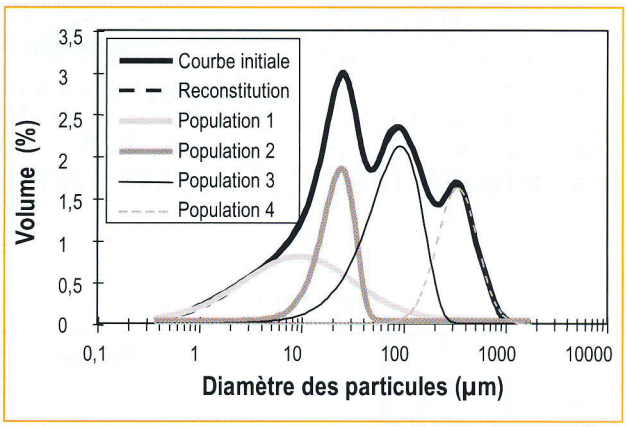

Figure 9 : Solution probabiliste de la déconvolution d'une distribution granulométrique (broyeur industriel, 12 heures).

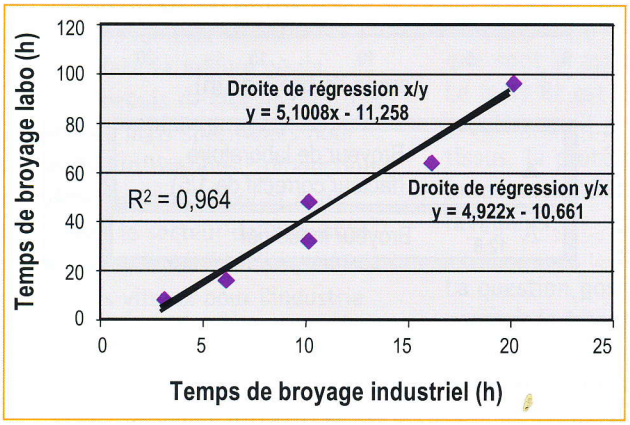

Figure 8 : Corrélation des temps de broyage pour les deux types de broyeurs.

Broyage industriel	Broyage laboratoire	Différence absolue (Volume %)
3 h	8 h	20,3
6 h	16 h	20,5
10 h	32 h	17,6
10 h	48 h	8,1
16 h	64 h	12,7
20 h	96 h	12,2

Tableau II : Correspondance des temps de broyage et différence absolue associée.

- Le mode de la population 2 est compris entre 25 et 28 µm. Il n'évolue pas en fonction du temps de broyage. Cette population est corrélée à la famille constituée par des grains d'amidon de type A.
- Le mode de la population 3 diminue en fonction du rang de broyage. Il est compris entre 60 et 180 µm. Cette population est corrélée à la famille constituée par des cellules unitaires de l'albumen amylacé.
- Le mode de la population 4 diminue en fonction du rang de broyage. Il est compris entre 200 et 900 µm. Cette population est corrélée à la famille des fragments de l'amande du grain composés de plusieurs cellules.
- La population 5 uniquement visible pour la fraction issue d'un broyage à boulets pendant 96 heures possède un mode situé aux alentours des 650 µm. Cette population n'a pas été identifiée lors des observations optiques.

Traitement des proportions

La déconvolution probabiliste ne permet pas toujours d'obtenir une indication précise de la proportion de chaque population.
En effet, il apparaît que même si une solution est obtenue lors de la déconvolution, il n'est pas possible de conclure directement sur la pertinence physique de cette valeur.
Il apparaît que la déconvolution probabiliste peut donner une indication catégorielle pertinente pour la valeur des proportions de chaque population (**Figure 11**).
Pour obtenir une indication sur la pertinence de la valeur, il est nécessaire d'effectuer une régression. Aucune des régressions envisagées n'a permis d'obtenir pour les différentes populations, une courbe de tendance fortement corrélée avec le temps de broyage.

Conclusion

La forte corrélation entre le broyage de laboratoire et le broyage industriel a permis de déterminer un facteur de correspondance. Le broyage à boulets effectué en laboratoire est transposable au domaine industriel.
En ce qui concerne la dimension des modes, le broyage à boulets produit des valeurs similaires à celles obtenues avec d'autres types de broyeurs (broyeur à percussion).
Le nombre de populations et le mode de chacune sont corrélés aux familles de particules décrites dans le grain de blé. Il existe un lien très fort entre la microstructure du grain et les particules obtenues après broyage. Le nombre de populations et la dimension des particules sont

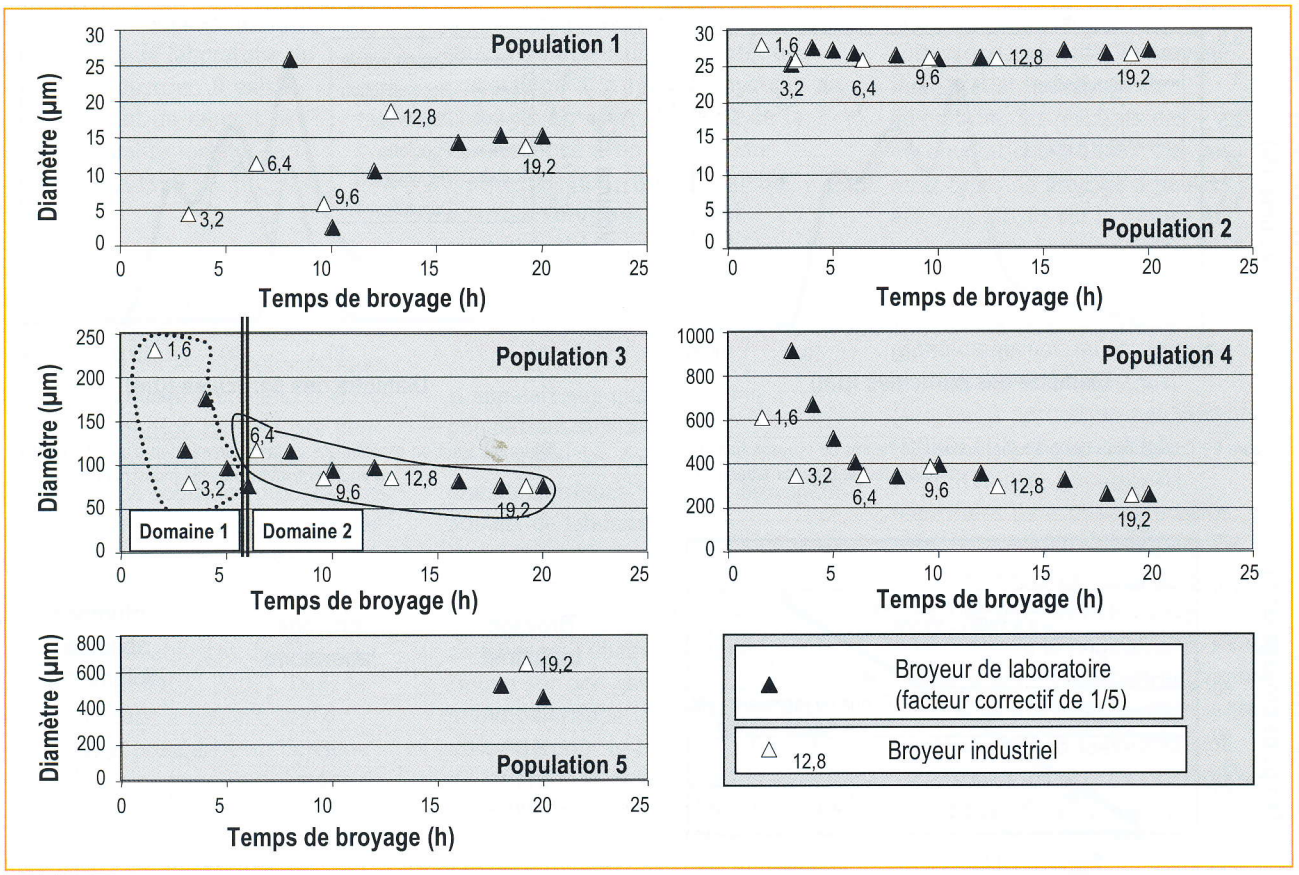

Figure 10 : Évolution du mode des populations du broyeur industriel et du broyeur de laboratoire.

en grande partie hérités du matériau.
La déconvolution probabiliste permet d'obtenir une indication catégorielle sur la proportion de chaque population. En revanche, la détermination nominale ne semble pas être correcte. En effet, aucune corrélation forte avec le temps de broyage n'a pu être déterminée.

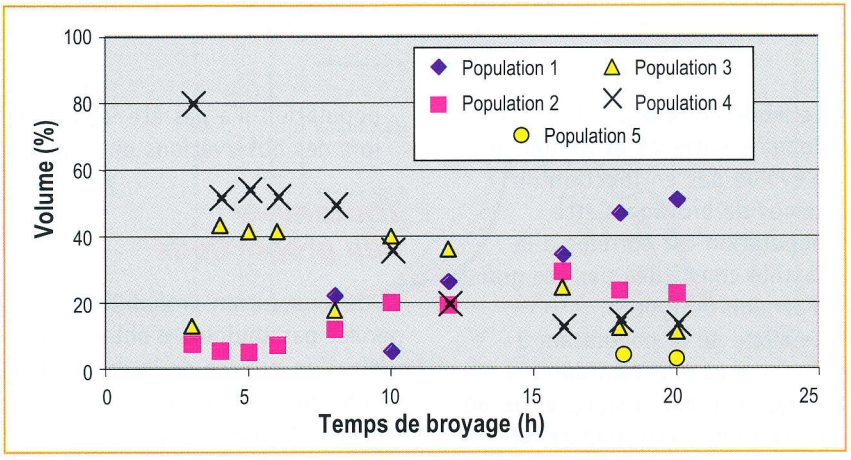

Figure 11 : Évolution des proportions en fonction du temps de broyage (broyeur industriel).

Références bibliographiques

ABÉCASSIS J., BENHASSAINE A., CHULIA D., DODDS J., GUIGON P., ILARI J.L., MELCION J.P., VASSEUR J., 1997. Le génie particulaire : une propriété stratégique pour le développement des industries alimentaires. *Ind. Alim. Agr.*, 579-585.

ANDRÉANI P.A., 2002. *Modélisation des propriétés complexes par composition de sous ensembles : Application aux cendres volantes de lit fluidisé circulant*. Thèse de Docteur es Sciences, École des Mines de Saint-Étienne.

BLAZY P., JDID E.A., 1991. *Fragmentation, Technologie. In:* Techniques de l'ingénieur, A 5060.

BLAZY P., JDID E.A., YVON J., 1992. *Fragmentation, Applications. In:* Techniques de l'ingénieur, A 5070.

BORDEAUX D., 2002. *Modélisation des systèmes complexes par décomposition en sous ensembles : Application au broyage du blé dur.* Thèse de Docteur es Sciences, Université de Montpellier 2.

BORDEAUX D., BÉNÉZET J.-C., BENHASSAINE A., 2003. Approche de la modélisation du broyage, *Matériaux et Techniques*, **10-11-12**, 41-47.

HOSENEY R.C., 1998. *Principles of cereal*, 2nd Ed. American Association of Cereal Chemists, Inc.