

Méthode de suivi de la taille de particules de caillé dans le lactosérum pendant le processus de fabrication fromagère

Hervé Guillemain¹, Thomas Cattenoz¹, Bruno Perret¹

Résumé : *Nous proposons une nouvelle méthode pour estimer la proportion volumique des grains de caillé dans le lactosérum et leur répartition par taille en fonction du temps pendant la synérèse lors du brassage en cuve de fromagerie. Elle repose sur la mise au point d'un dispositif de prise d'images original associé à un traitement spécifique des images.*

Mots clés : mesure en ligne, analyse d'image, taille de particule, caillé, égouttage en cuve.

Introduction

Dans le cadre de ses travaux dans le domaine des capteurs et de la mesure en ligne pour l'automatisation de la fabrication fromagère, l'unité de génie et microbiologie des procédés alimentaires de Thiverval Grignon a travaillé sur la coagulation et le raffermissement des caillés, le présent document présente une méthode de suivi de la synérèse. La synérèse est une étape importante de la fabrication fromagère. Le lait passe tout d'abord d'un état liquide à un état de gel appelé coagulum puis la synérèse démarre et transforme le coagulum en caillé. Le réseau protéique constituant le gel se contracte et expulse une fraction liquide, le lactosérum. La quantité de lactosérum rejeté et sa dynamique (vitesse de la synérèse) ont une influence sur le développement microbien lors de l'affinage.

La synérèse peut affecter fortement la qualité finale du fromage. De nombreuses variables, liées au processus fromager, influencent la synérèse et plus globalement l'égouttage il s'agit essentiellement de la taille des particules de caillé, de la température et de la pression qui sera appliquée au moulage (Johnston *et al.*, 1998 ; Whitehead et Harkness, 1954). La mesure de la taille des grains améliorerait le processus de fabrication fromagère. Guillemain *et al.*, (2006), s'appuyant sur le brevet de Perret *et al.*, (2002), ont développé un système de mesure en temps réel de cette taille basé sur une mesure optique et une mesure de contrainte. Cette dernière permet de tenir compte de l'agitation. Ce système simple et facile à mettre en œuvre s'est révélé insuffisant pour une application industrielle malgré l'utilisation de traitements avancés du signal optique : une seule mesure en un point ne donne pas la précision voulue. Une autre méthode a été développée, dans le même esprit de mesure en temps réel, mais en deux dimensions en utilisant une caméra ou un appareil photographique numérique, elle nécessite une bonne prise de vue et des traitements avancés des images obtenues. Le suivi de la taille des grains de caillé au cours du temps devrait permettre de stopper la synérèse à un instant opportun pour la qualité finale du fromage. Nous proposons une méthode de mesure sur des échantillons synthétiques pour valider le système et l'analyse des images.

¹ UMR782 GMPA - Génie et microbiologie des procédés alimentaires - INRA- AgroParisTech -
F-78850 Thiverval-Grignon ☎ 01 30 81 54 93 ✉ Herve.Guillemain@grignon.inra.fr,
Thomas.Cattenoz@grignon.inra.fr, Bruno.Perret@grignon.inra.fr

1. Matériels et méthodes

1.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (**figure 1**) comporte une cuve transparente, un spot pour l'éclairage (40W, couleur jaune) et un appareil photo numérique (CANON EOS350D, Auchan) pour la prise de vue. Le spot produit une lumière permettant de contraster les grains blancs dans le lactosérum (fond opaque jaunâtre). Dans le dispositif, les grains sont préalablement calibrés à des tailles connues. Ils ont été fabriqués lors d'une précédente coagulation, triés à l'aide de tamis de 1, 2, 3 et 4 mm, puis stabilisés par du formol avant d'être stockés. Même s'ils sont tamisés, ces grains ne sont pas pour autant tous de forme identique. Le contenu de la cuve est agité à l'aide d'un barreau magnétique pour simuler le mouvement des grains dans les cuves industrielles.

Nous effectuons plusieurs mélanges lactosérum/grains pour disposer de différentes concentrations voisines des conditions fromagères (20 %, 30 %, 40 %).

Les préparations ne contiennent que de grains de taille unique (1 à 2, 2 à 3 et 3 à 4mm).

Cuve transparente (L7xH6xI14cm)

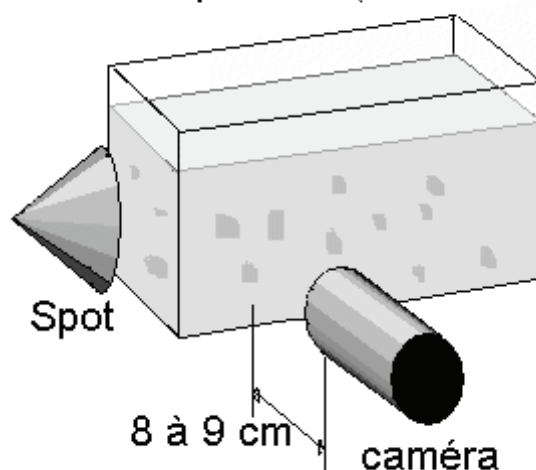


Figure 1 : *Dispositif expérimental utilisé pour traiter l'image acquise*

1.2 Prises de vues

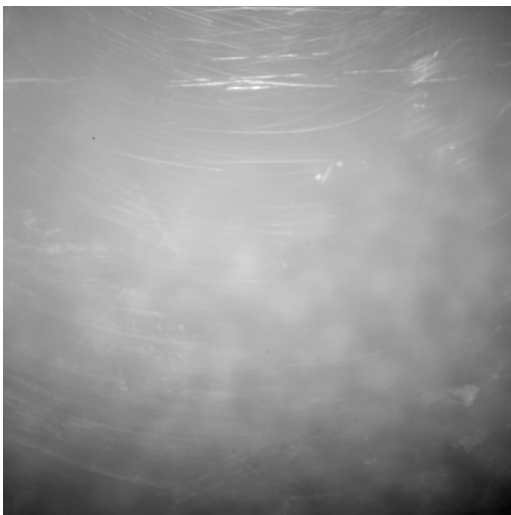
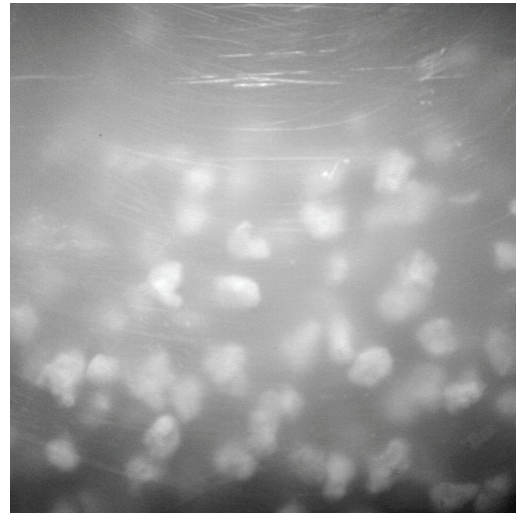
Pour un même échantillon, les images sont prises pendant l'agitation des grains à intervalle régulier de 10s (réglage manuel : temps de pause 1/200s, ouverture 5,6), pendant 3 minutes seulement pour éviter la dégradation des grains. Au total 19 images sont donc acquises pour un même échantillon. La largeur des images est de 3 456 pixels et la hauteur de 2 304 pixels. Les images d'origine sont en couleur codée sur 24 bits. Seule une région de 512 × 512 pixels est extraite de chaque image puis convertie en image monochrome dont les niveaux de gris sont codés sur 8 bits.

Le champ de vue dans les images d'origine est d'environ 8 cm de haut × 12cm de large et celui de la région 512 × 512 de 1,8 cm × 1,8 cm.

1.3 Algorithme de traitement

Nous avons réalisé les traitements à l'aide du logiciel **DefNouv** développé en C++ au laboratoire. Les bibliothèques de fonctions spécifiques (ligne de partage des eaux, ...) ont été réalisées par nos soins dans l'optique de créer un code portable occupant un minimum d'espace mémoire destiné à l'origine à être embarqué dans une caméra intelligente. Les traitements comportent six étapes décrites ci-dessous et illustrées sur une image de départ correspondant à des grains de taille de 2 à 3 mm représentant 20 % du mélange grains/lactosérum.

Image initiale (exemple)
Grains de 2 à 3 mm, mélange à 20 % de grains



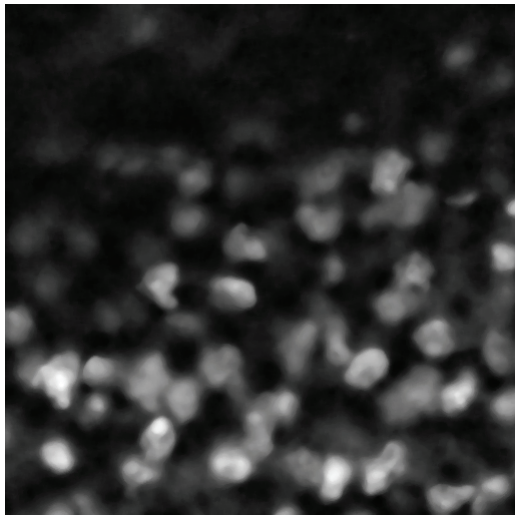
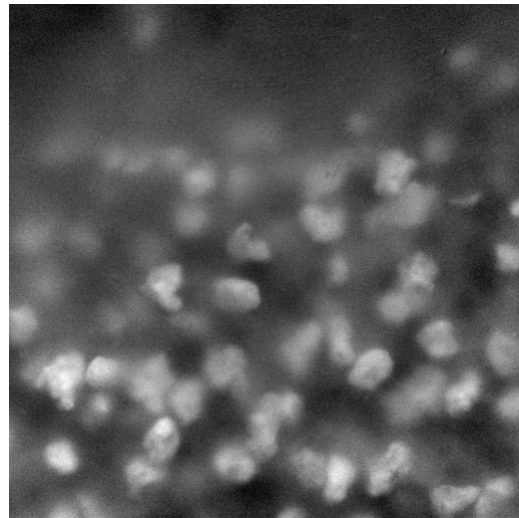
1^{ère} étape

Estimation d'une image des défauts (rayures sur la paroi de la cuve et fond non uniforme dû à la diffusion de la lumière dans le milieu opaque) en 2 étapes. La 1^{ère} étape est nécessaire pour corriger les défauts de stabilité de notre dispositif de prise de vue.

- Recadrage spatial de chaque image par rapport à la première image lue en déterminant le maximum de l'inter-corrélation avec la première image sur une zone contenant au moins un défaut convenablement orienté spatialement.
- Calcul de l'image moyenne de la série des 19 images recadrées. Le calcul d'une image sans grain est rendu possible par le mouvement aléatoire des grains. Un simple blanc réalisé à partir de lactosérum sans grain n'a pas été réalisé pour rester au plus proche des conditions opératoires réelles.

2^{ème} étape

Uniformisation du fond et atténuation des défauts pour chaque image en lui retranchant une combinaison linéaire de l'image moyenne sur toute la série (image obtenue à l'étape 1). Les coefficients optimaux sont obtenus par minimisation de l'*erreur quadratique moyenne* entre l'image traitée et la combinaison linéaire de l'image moyenne : $Im_corr. = Im_dép. - (a Im_moy. + b)$. a et b sont obtenus analytiquement en annulant le gradient de l'erreur quadratique. Une formule littérale permet donc d'obtenir directement les valeurs de a et b, sans recourir à un quelconque algorithme (cf. annexe).



3^{ème} étape

Application d'un filtre médian de taille 8 pour atténuer le bruit tout en préservant les contours.

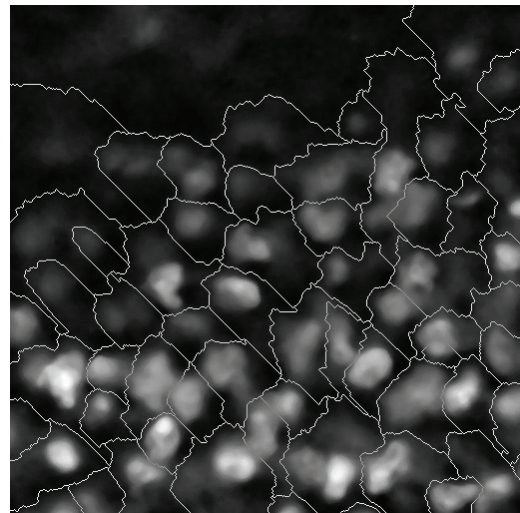
Uniformisation de l'histogramme des niveaux de gris par la méthode d'égalisation d'histogramme pour améliorer le confort visuel.

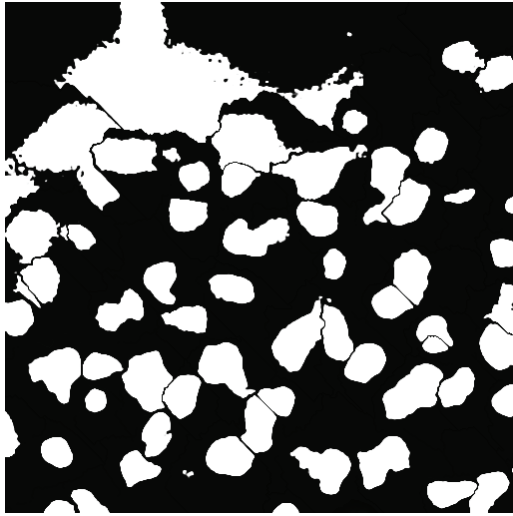
4^{ème} étape

Segmentation des images (après inversion) à l'aide de l'algorithme de ligne de partage des eaux (LPE) en négligeant tous les minima locaux dont la hauteur est strictement inférieure à un seuil de 20 sur l'échelle des 256 niveaux.

L'image obtenue est une image binaire où les frontières sont représentées par des 1 et les régions par des 0. L'image représentée est le résultat d'un opérateur 'OU' logique entre l'image de départ et l'image segmentée.

Chaque région est supposée contenir 1 grain.



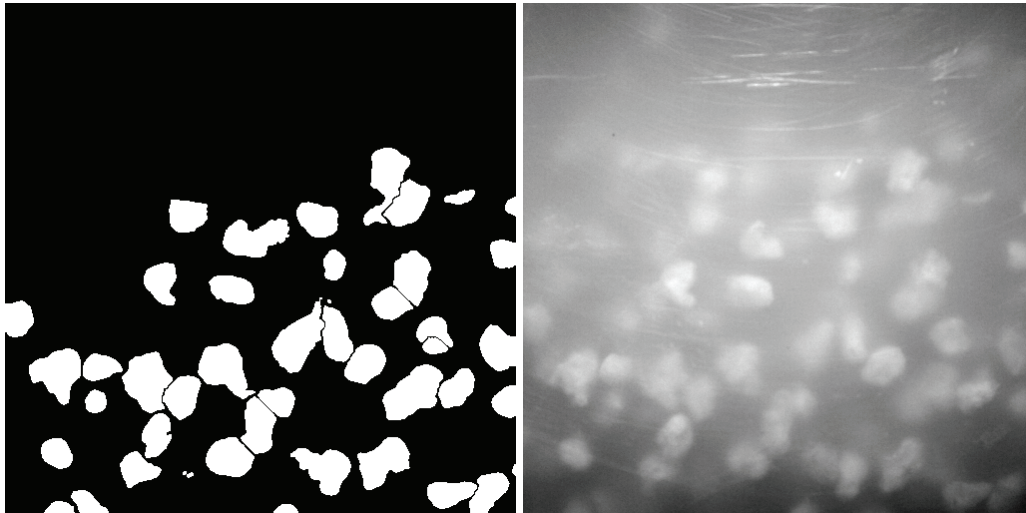


5^{ème} étape

Détermination d'une 1^{ère} approximation de la taille de chaque grain par seuillage adaptatif région par région. L'algorithme utilisé est un algorithme de relaxation probabiliste (Hummel R.A. and Zucker S.W., 1983 ; Kittler J. and Illingworth J., 1986).

La taille des grains est estimée en calculant le diamètre équivalent, et la proportion par le pourcentage de surface.

6^{ème} et dernière étape



Suppression des grains trop peu contrastés. La netteté des grains est estimée par la moyenne de la norme du gradient au niveau des contours de chaque grain trouvé. Les grains trop peu contrastés sont éliminés par comparaison du gradient avec un seuil fixé à 15. Pour comparaison, l'image initiale est placée à proximité de l'image traitée.

Figures 2 : description des 6 étapes de l'algorithme utilisé

À l'heure actuelle, tous les paramètres de réglage, à chacune des 6 étapes, sont choisis heuristiquement de façon à réaliser un bon compromis entre résultats obtenus et temps de calcul. À l'étape 1 par exemple, plus la taille de la fenêtre utilisée dans le calcul est grande, meilleur est le recalage (car les détails sont plus nombreux) mais dans ce cas, le temps de calcul est élevé. Le paramètre le plus délicat à déterminer pour arriver à cette qualité de résultat est probablement le seuil de l'algorithme LPE à l'étape 4.

2. Résultats

Nous présentons sur les **figures 3** des exemples de résultats obtenus pour les 3 tailles de grains.

Les résultats traités en termes de proportions de grains par rapport au caillé (en %) et de taille de grains (en mm) sont reportés dans la **figure 4**.

Nous avons testé deux proportions (20 et 40 % de grains dans la partie liquide) avec à chaque fois 3 tailles de grains (1 et 2 mm, 2 et 3 mm, 3 et 4 mm).

Les pourcentages de grains calculés ont tendance à être sous-estimés de 11 % pour le mélange à 40 % (quelle que soit la taille des grains). Pour le mélange à 20 %, l'erreur sur la proportion est de 4 % sauf avec les tailles 3 et 4 mm où elle est de 8,3 % (soit une erreur relative importante de 40 %).

Au niveau des tailles, les histogrammes présentés dans les figures 4 montrent une dispersion assez grande mais la moyenne correspond bien aux tailles cibles. Les histogrammes sont d'autant plus étalés que la taille standard des grains est élevée.

Du fait de l'anisotropie des grains de caillé, la solution proposée ici apporte une véritable amélioration par rapport à l'article publié en 2006 (Guillemin *et al.*), car elle donne une dimension supplémentaire et donc une estimation plus précise du volume des grains.

On pourrait poursuivre dans cette voie en imaginant une prise de vue stéréoscopique de la scène à l'aide de 2 caméras juxtaposées afin accéder enfin à la 3^{ème} dimension et par conséquent, au volume réel de chaque grain.

La solution proposée révélera tout son intérêt pour les fromagers quand une solution plus compacte sera mise en œuvre : de petites caméras embarquant toute la puissance de calcul nécessaire au traitement des images existent déjà. Au niveau industriel, il faut savoir que positionner la caméra pour avoir une bonne prise de vue ne sera pas toujours facile.

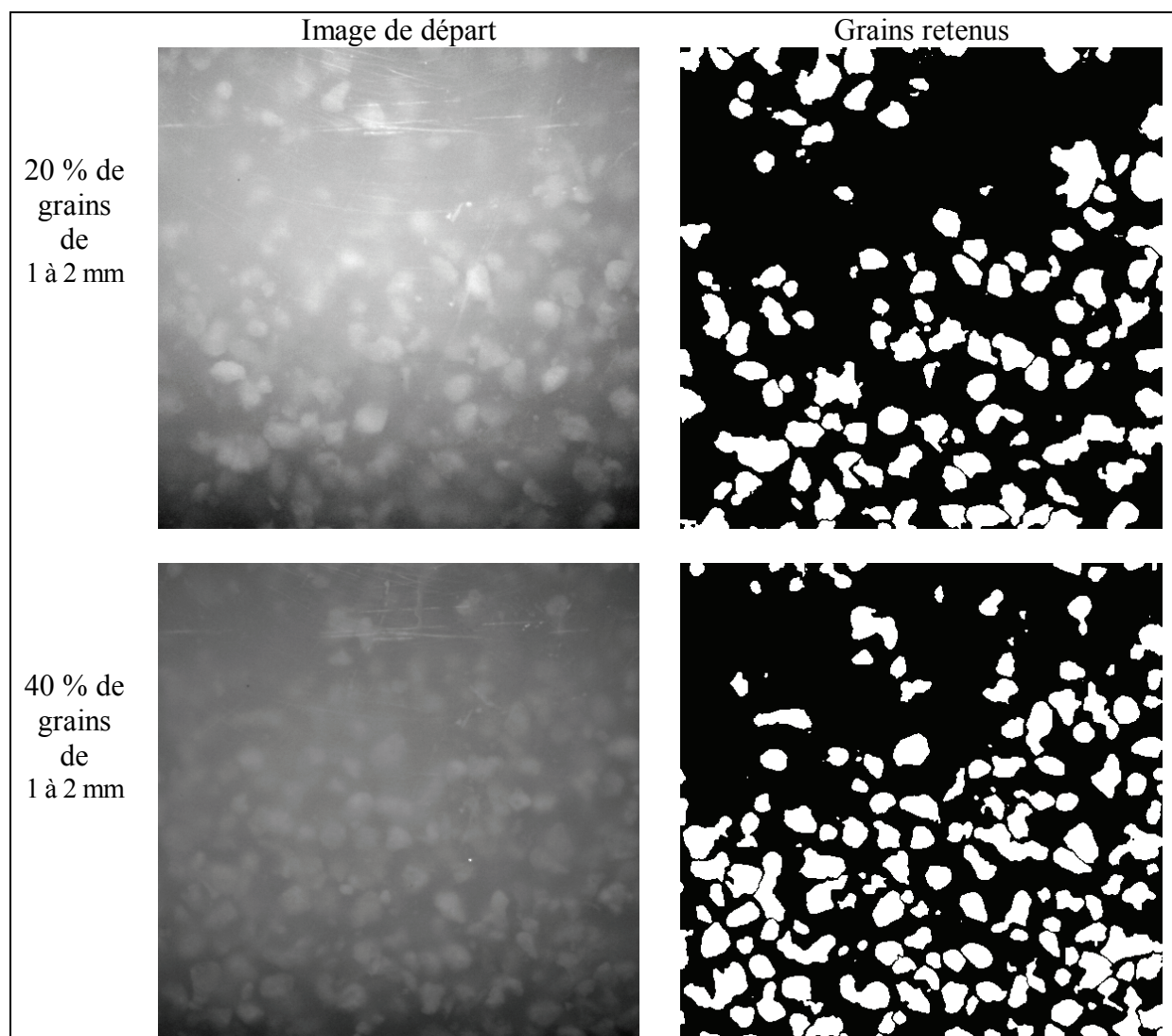


Figure 3a : *exemples d'images traitées et d'origine pour des tailles de grains de 1 à 2 mm*

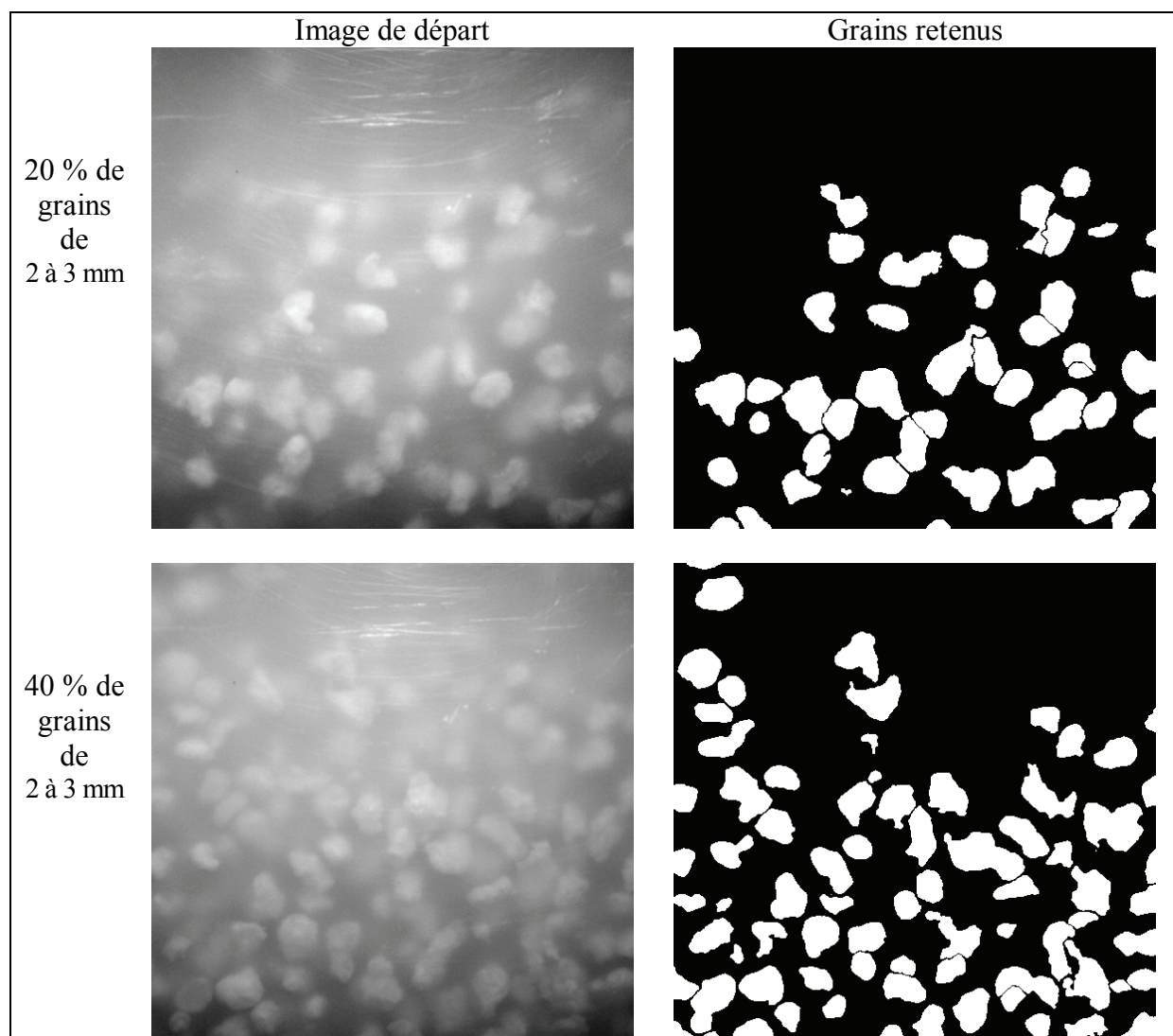


Figure 3b : exemples d'images traitées et d'origine pour des tailles de grains de 2 à 3 mm

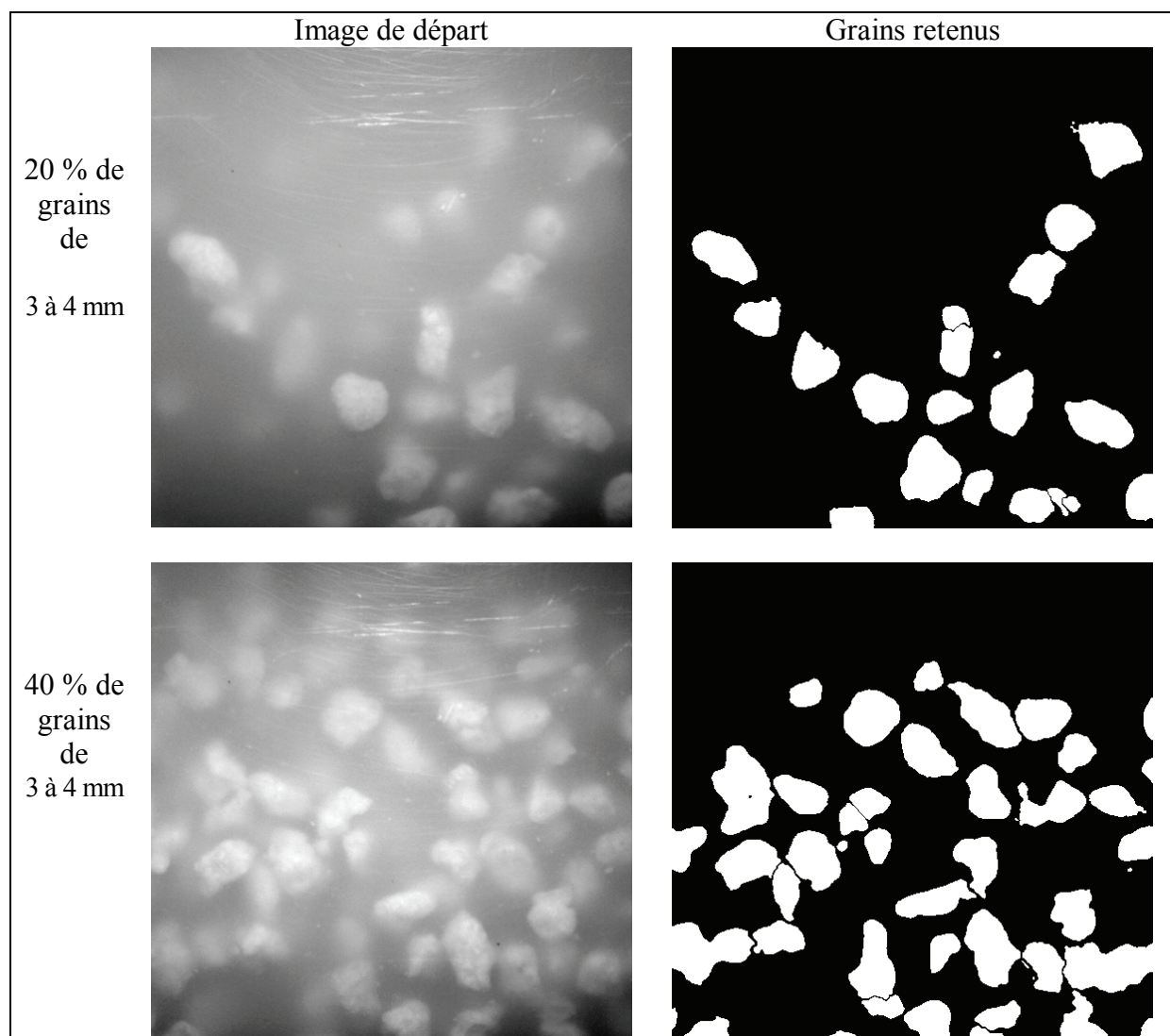


Figure 3c : *exemples d'images traitées et d'origine pour des tailles de grains de 3 à 4 mm*

	Proportion de grains par rapport au lactosérum (%)		Taille des grains (mm)	
	Attendue	Mesurée	Attendue / Moyenne calculée	Mesurée (diamètre équivalent)
grains de 1 à 2mm	20	24,0	1 à 2 / 1,96	
	40	28,2	1 à 2 / 1,69	
grains de 2 à 3mm	20	16,8	2 à 3 / 2,41	

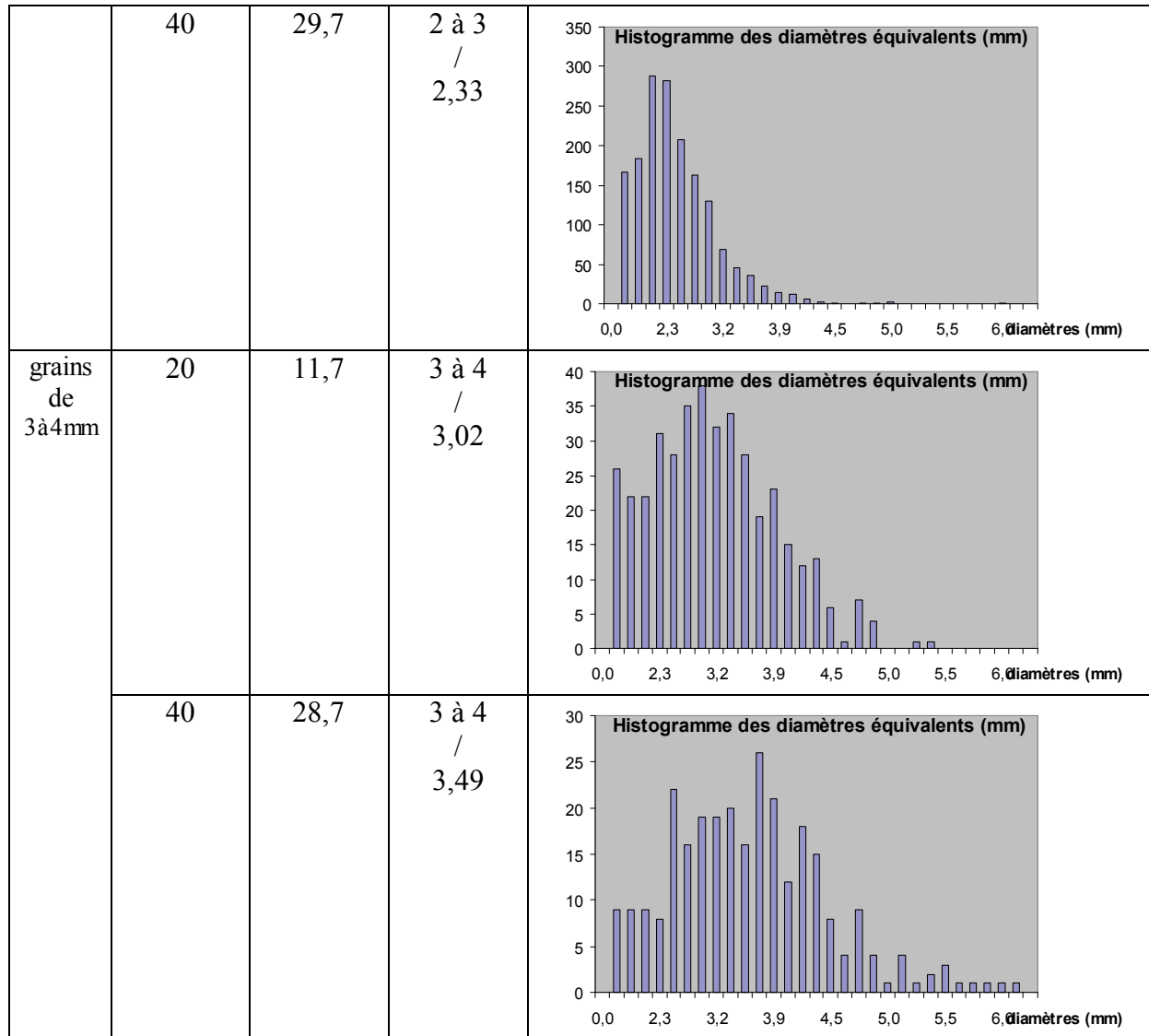


Figure 4 : résultats obtenus à 20 et 40 % de grains pour les tailles (1 à 2 mm ; 2 à 3 mm et 3 à 4 mm)

Conclusion

Les résultats obtenus peuvent paraître insuffisants dans une optique de suivi et surtout de contrôle de procédé : les écarts observés entre les proportions de grains mesurées et attendues sont parfois grands (de 3 à 12 %). En effet on ne s'attend pas à trouver, dans les résultats de la classification pour une classe donnée, des grains des autres classes. À la lecture des résultats visuels obtenus, l'algorithme utilisé, s'il peut être amélioré, n'est pourtant pas la principale cause de cette contre performance. Celle-ci s'explique par les deux faits suivants :

- il est difficile de sélectionner des grains de taille strictement comprise entre deux valeurs (du fait de l'hétérogénéité de forme des grains et aussi parce que des grains se désagrègent lorsqu'ils sont brassés) dans une proportion précise (car les grains classifiés sont humides lorsque les mélanges sont préparés) ;

- le mécanisme utilisé pour brasser le mélange est à améliorer (si possible) car dans aucune des images les grains ne sont uniformément répartis.

Les prises de vue sont à améliorer, elles ne reflètent peut être pas suffisamment le contenu de la cuve. On voit bien sur les **figures 3** que l'algorithme détecte correctement les objets qui se trouvent sur l'image d'origine. Il semble que ce qui est observé visuellement ne reflète pas correctement la globalité du phénomène, on sous estime vraisemblablement la quantité de grains, ceux ci restent en profondeur, ce que confirment les résultats.

Par ailleurs, de par sa conception, l'algorithme ainsi développé sera facile à mettre en œuvre en temps réel dans un logiciel d'acquisition.

Bibliographie

- Guillemin H., Trelea I.C., Picque D., Perret B., Cattenoz T., Corrieu G. (2006) An optical method to monitor casein particle size distribution in whey, *Lait* 86, 359–372
- Hummel R.A. and Zucker S.W. (1983) "On the foundations of relaxation labeling processes," *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5, (3), 267-287
- Johnston K. A. J. Luckman M. S, Lilley H. G. and Smale B. M. (1998) Effect of Various Cutting and Stirring Conditions on Curd Particle Size and Losses of Fat to the Whey during Cheddar Cheese Manufacture in Ost Vats, [International Dairy Journal](#) 8, 281-288
- Kittler J. and Illingworth J. (1986) Relaxation labelling algorithms-a review, *Image and Vision Computing*, .Nov.3, (4), 206-216
- Perret B., Picque D., Cattenoz T., Corrieu G. (2002) Procédé de contrôle de l'égouttage des grains de caillé et dispositif pour sa mise en oeuvre, French Patent n° FR2822953
- Whitehead H.R. and Harkness L. (1954) The influence of variations in cheese-making procedure on the expulsion of moisture from cheddar cheese curd, *Aust. J. Dairy Technol.* 9, 103–107

Annexe

Soient :

x l'image en cours de traitement.

Moy l'image moyenne.

N la taille des images (supposées carrées).

i, j les indices des lignes, respectivement des colonnes dans les images ($x[i][j]$ représente par exemple le niveau gris dans l'image x au pixel de coordonnées (i, j)).

On cherche à minimiser l'erreur quadratique moyenne suivante :

$$\xi = \sum_i \sum_j (x[i][j] - (a \cdot \text{moy}[i][j] + b))^2$$

(la double somme porte sur tous les pixels de l'image)

Les paramètres a et b qui minimisent ξ sont ceux pour lequel le gradient $\text{grad}_{a,b}(\xi) = \underline{0}$, autrement dit ceux qui annulent les dérivées partielles de ξ :

$$\begin{aligned} 0 &= \partial \xi / \partial a \\ &= -2 \sum_i \sum_j \text{moy}[i][j] (x[i][j] - a \cdot \text{moy}[i][j] - b) \\ &= -2 (\sum_i \sum_j \text{moy}[i][j] \cdot x[i][j] - a \cdot \sum_i \sum_j \text{moy}^2[i][j] - b \sum_i \sum_j \text{moy}[i][j]) \\ 0 &= \partial \xi / \partial b \\ &= -2 \sum_i \sum_j (x[i][j] - a \cdot \text{moy}[i][j] - b) \\ &= 2 (\sum_i \sum_j x[i][j] - a \cdot \sum_i \sum_j \text{moy}[i][j] - bN^2) \end{aligned}$$

Notons :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sum_i \sum_j x[i][j] \\ \sigma_2 &= \sum_i \sum_j \text{moy}[i][j] \\ \sigma_{22} &= \sum_i \sum_j \text{moy}^2[i][j] \\ \sigma_{12} &= \sum_i \sum_j (x[i][j] \cdot \text{moy}[i][j]) \end{aligned}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{22}$ et σ_{12} sont des constantes.

Nous obtenons un système de 2 équations à 2 inconnues :

$$\begin{aligned} 0 &= \sigma_{12} - a \cdot \sigma_{22} - b \cdot \sigma_2 \\ 0 &= \sigma_1 - a \cdot \sigma_2 - b \cdot N^2 \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{aligned} a &= (\sigma_{12} - \sigma_1 \cdot \sigma_2 / N^2) / (\sigma_{22} - \sigma_2^2 / N^2) \\ b &= (\sigma_1 - a \cdot \sigma_2) / N^2 \end{aligned}$$

