

Suivi de l'apparition de la croûte du pain par imagerie

Anne-Laure Réguerre⁽¹⁾, Marie-Françoise Devaux⁽²⁾, Hubert Chiron⁽²⁾ et Mehdi Raitière⁽²⁾

Résumé

Afin de caractériser la formation de la croûte du pain français lors de la cuisson, nous avons développé un outil permettant d'en évaluer l'épaisseur à partir d'images de tranches. Les images sont acquises en couleurs RVB (Rouge, Vert, Bleu) puis converties dans le système colorimétrique HSI (Teinte, Saturation, Intensité). Une Analyse en Composantes Principales est effectuée sur les quatre composantes rouge, vert, bleu et saturation d'un panel d'images. Les vecteurs propres obtenus servent à calculer de nouvelles images qui mettent en évidence les constituants de la tranche, dont la croûte. Nous avons ainsi pu caractériser la croûte pour des pains ayant subi différentes durées de cuisson. Cet outil a pour vocation d'être utilisé dans le cadre d'autres études.

Mots clés

Pain, croûte, cuisson, analyse d'images, Analyse en Composantes Principales

Introduction

La croûte joue un rôle essentiel dans les caractéristiques organoleptiques du pain français. Son aspect intervient de manière non négligeable dans l'acte d'achat. Elle contribue majoritairement à la croustillance du pain. Au centre Inra de Nantes, l'équipe « Matériaux, Création et Comportement » étudie les transformations intervenant durant la cuisson du pain et tout particulièrement la cinétique de formation de la croûte.

D'un point de vue « mécanique », la croûte est l'enveloppe du pain qui s'en détache lors d'un tranchage ou d'un choc. Pour la caractériser, nous pouvons en prélever à l'aide d'un couteau puis mesurer son épaisseur au pied à coulisse ou peser la quantité obtenue. L'opération est délicate et le résultat dépend de l'opérateur. D'un point de vue visuel, la croûte est définie dans l'image comme la région de la tranche proche du bord et présentant une différence de couleur : elle est plus sombre que la mie. Son épaisseur peut être variable mais elle n'excède pas une limite d'environ 1 cm, selon le type de pain. Il n'est pas évident d'en tracer un contour précis car la coloration évolue progressivement du bord externe de la tranche vers l'intérieur, du plus sombre vers le plus clair.

L'objectif de ce travail était de définir une méthode objective de mesure de l'épaisseur de la croûte par analyse d'images. Rouillé *et al.* (2005) et Devaux *et al.* (2005) ont montré que les images de tranches de pains acquises au moyen d'un scanner à plat permettaient d'étudier la structure de la mie. Nous proposons d'utiliser les mêmes images pour caractériser l'épaisseur de la croûte du pain. Cette approche revient à définir la croûte par rapport aux caractéristiques

⁽¹⁾ *URBIA INRA*

⁽²⁾ *INRA - UR 1268 - Biopolymères, Interactions & Assemblages (BIA), Rue de la Géraudière BP 71627,44316 Nantes cedex reguerre@nantes.inra.fr*

visuelles de la tranche. Pour mettre au point la méthode, des images de pain à différents temps de cuisson ont été utilisées.

1 Matériel et méthode

1.1 Echantillons

Les échantillons de pain ont été fabriqués en suivant la méthode de panification BIPEA norme Afnor NF V03-710 (Roussel et Chiron, 2002). Sa formulation exprimée par rapport à 100 g de farine de blé type 55 est : 64 g d'eau, 2,2 g de sel, 2,5 g de levure fraîche de panification et 20 ppm d'acide ascorbique. Nous avons utilisé la farine T55 sans additif de la minoterie Giraudineau, Pont-James.

Les pains sont placés dans un four à 245°C, température de sole et de voûte. Les échantillons de pain sont prélevés au centre de la sole du four, de façon à s'affranchir des éventuels effets de bords.

Dix temps de cuisson ont été considérés : 6- 10- 12,5- 15- 17,5- 20- 25- 30- 35 et 40 min. Pour chaque temps, quatre pains ont été fabriqués puis découpés en tranches de 11 mm avec une trancheuse du modèle PICO de chez JAC. Dix tranches ont été prélevées au milieu de chaque pain.

1.2 Acquisition des images

La méthode utilisée est celle décrite dans Devaux *et al.* (2005). Les images couleurs de chacune des tranches ont été acquises avec un scanner Epson Perfection V100. La tranche était recouverte d'une boîte à fond noir mat. Les images ont été enregistrées avec une résolution de 400 dpi¹ et stockées au format TIFF non-compressé (**figure 1**).

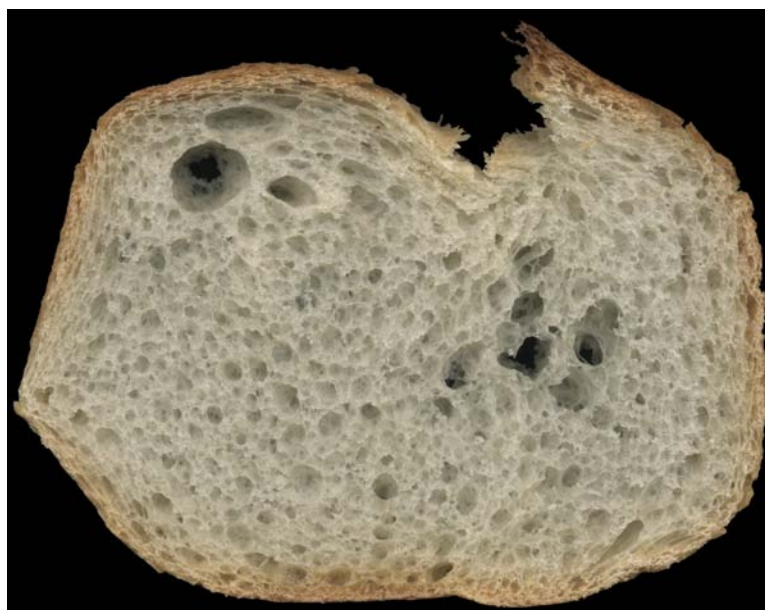


Figure 1. Exemple d'image de tranche de pain après 30 min de cuisson.

¹ Dpi = dot per inch = nombre de pixels par pouce (2,54 cm).

1.3 Traitement des images

Le traitement des images est illustré au travers de l'image exemple de la **figure 1**.

1.3.1 Sélection des régions d'intérêt de la tranche et de la croûte

La première étape du traitement consiste à identifier dans l'image les pixels de la tranche sans le fond de l'image. L'image est convertie en niveaux de gris par la fonction de conversion de Matlab *rgb2gray*. Un seuil unique de niveau de gris de 60 a été déterminé pour la série d'images de l'étude à partir de l'ensemble des histogrammes de niveaux de gris. Le masque de la tranche (**figure 2**) est utilisé pour calculer deux autres régions d'intérêt. La première, appelée *région maximum de croûte*, correspond à la région au-delà de laquelle il ne peut y avoir de croûte. Dans ce travail, son épaisseur a été fixée à 0,75 cm. La seconde région a été construite pour contenir des pixels à la fois de la croûte et de la mie en proportions relativement équilibrées. Les pixels de cette région sont ceux sur lesquels portent les calculs pour la séparation mie et croûte.

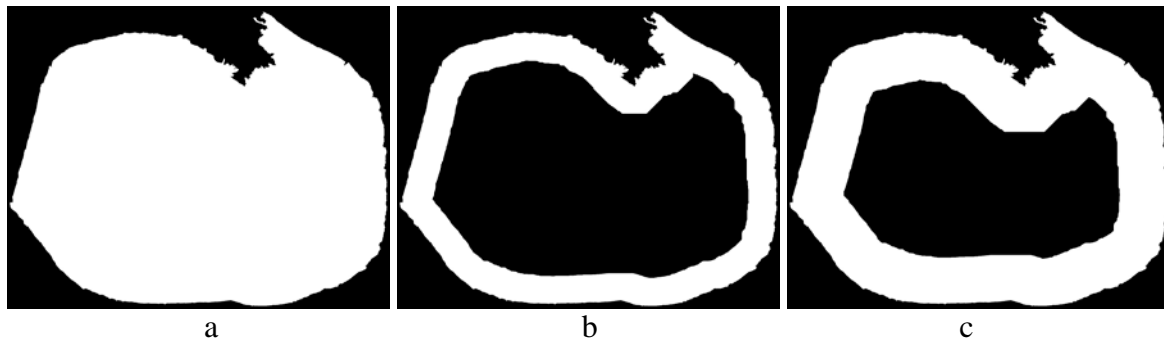


Figure 2. Régions d'intérêt. a : région tranche, b : région maximum de croûte, c : région de calcul.

Ces deux dernières régions sont obtenues par *morphologie mathématique* (Soille, 2003), ensemble de fonctions qui permettent de modifier une image en utilisant un masque de taille et forme donnée : *l'élément structurant*. La *région maximum de croûte* est obtenue en appliquant au masque de la tranche une *érosion* avec un élément structurant disque de diamètre 118 pixels correspondant à 1,5 cm. La *région de calcul* est obtenue de la même manière en considérant un diamètre de 394 pixels correspondant à 2,5 cm.

1.3.2 Modèles colorimétriques RVB et HSI

Les images ont été acquises en couleurs et enregistrées au format RVB, c'est à dire que chaque fichier image contient trois images monochromes correspondant aux couleurs rouge, vert et bleue (**figure 3**) :

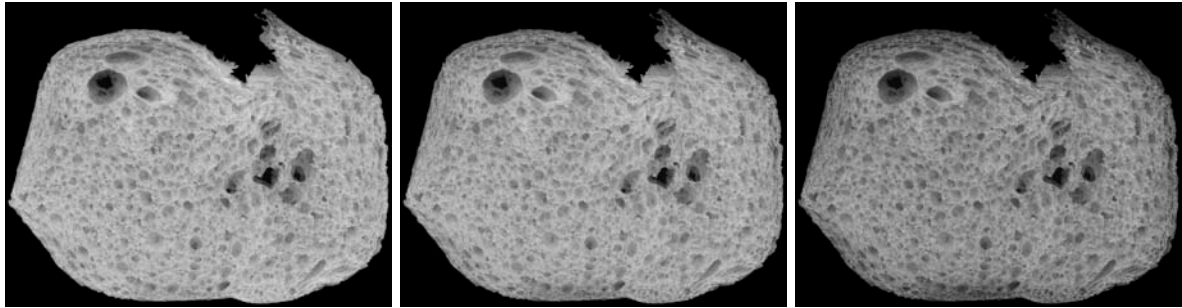


Figure 3 . Images des canaux rouge, vert et bleu pour la tranche de la figure 1.

La mie de pain est plus intense en rouge et en vert qu'en bleu. Le canal bleu est celui dans lequel la croûte est la plus contrastée. Toutefois, le seul critère de la couleur n'est pas suffisant pour la séparer de la mie. Pour le type de pain utilisé dans cette étude, nous avons testé le modèle colorimétrique HSI. Les composantes HSI obtenues pour l'image de la **figure 1** sont montrées **figure 4** :

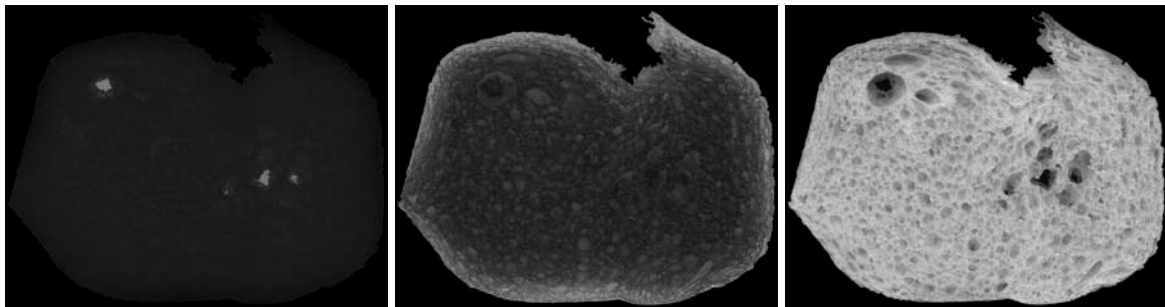


Figure 4. Composantes H, S et I de l'image de la figure 1.

La teinte H (*Hue*) est une mesure de perception de la couleur (mauve, orange...) et peut être représentée dans un cercle chromatique (**figure 5**). Dans ce cercle, les couleurs se suivent comme dans un arc-en-ciel. Chaque valeur d'angle correspond à une teinte. La saturation S correspond à une mesure de « la pureté » de la couleur : caractère vif (S élevée) ou grisé. Sur la **figure 5**, elle varie de 0 au centre au cercle à 100% (ou 1) au bord. L'intensité (ou luminance ou *Value*) I est calculée comme une combinaison linéaire des trois canaux R, G et B. Elle correspond à la conversion de l'image couleur en image monochrome. Elle varie du plus sombre : 0 (noir) à 100% pour le plus clair. Elle a été fixée à 70 % pour représenter le cercle chromatique de la **figure 5**.

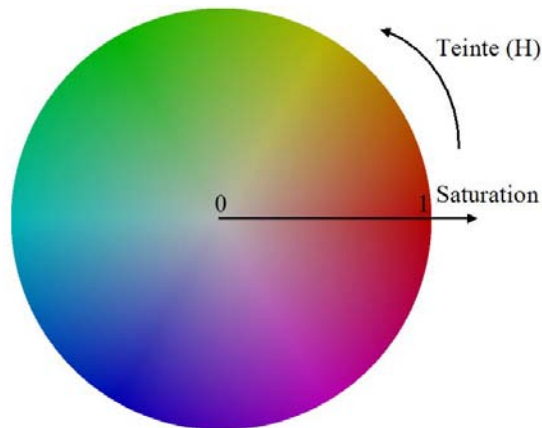


Figure 5. Représentation du modèle HSI pour une intensité $I=70\%$.

Pour l'image exemple (**figure 4**), la composante de teinte H est homogène excepté au niveau des plus grosses alvéoles qui traversent la tranche. La croûte et la mie ont une même teinte : ocre. L'image de saturation montre un contraste entre la croûte, plus saturée et la mie. L'image intensité montre la structure alvéolaire de la tranche, la croûte et la mie ayant pratiquement la même intensité.

Au final, en prenant en compte les modèles RVB et HSI, la croûte apparaît comme une zone de teinte ocre saturée plus sombre que la mie dans le canal bleu. Les petites et moyennes alvéoles ont la même teinte que la croûte, elles montrent aussi de la saturation mais avec une intensité plus faible. Au vu de ses résultats, nous proposons de combiner l'ensemble de ces informations. Les images de tranches ont été analysées en prenant en compte la saturation avec les trois composantes couleur rouge, vert et bleu.

Les images RVB sont converties en HSI la fonction Matlab *rgb2hsi* programmée en utilisant l'algorithme décrit dans Smith (1978).

1.3.3 Analyse en Composantes Principales d'images multivariées

L'Analyse en Composantes Principales est issue du domaine du traitement de données multidimensionnelles (Jolliffe, 1986). Des composantes synthétiques, orthogonales entre-elles, sont calculées comme des combinaisons linéaires d'un ensemble de variables observées pour une collection d'échantillons de façon à mettre en évidence les variations les plus importantes. Appliquée à nos images, les individus sont les pixels et les variables sont les intensités de couleur pour les quatre canaux, rouge, vert, bleu et saturation. Les valeurs de saturation, codées entre 0 et 1, sont converties entre 0 et 255 de manière à couvrir la même plage de variation que les autres images. L'analyse n'est ni centrée, ni normalisée. Les composantes principales sont représentées comme des images synthétiques. Les vecteurs propres indiquent le poids des images de départ dans le calcul des combinaisons linéaires (Geladi, 1996).

L'analyse peut être appliquée à l'ensemble ou à un sous-ensemble des pixels d'une image ou à des pixels provenant de plusieurs images. Dans ce travail, des images étalons ont été sélectionnées dans la collection et les vecteurs propres ont été calculés sur les pixels des régions de calcul contenant de la croûte et de la mie en proportions relativement équilibrées. Deux images étalons ont été retenues par temps d'acquisition, soit 20 images au total. Les huit

autres images par temps d'acquisition sont considérées comme des individus supplémentaires pouvant être projetés dans le même espace que les images étalons. L'image exemple de **la figure 1** est une image supplémentaire.

1.3.4 Segmentation des composantes principales

Le pouvoir discriminant de chaque composante principale a été déterminé en réalisant une segmentation automatique en deux régions. Le seuil de segmentation est calculé par la méthode des « *k-mean* » programmée pour obtenir deux classes de pixels ($k=2$). La valeur moyenne de la composante pour l'ensemble des pixels étalons est choisie comme seuil initial et les pixels sont répartis en deux classes en fonction de leur niveau de gris inférieur ou supérieur à ce seuil. Le niveau de gris moyen de chaque classe est calculé. La valeur moyenne des deux moyennes devient la nouvelle valeur du seuil. L'opération est répétée jusqu'à obtenir un seuil stable. Un seuil par composante est obtenu qui est appliqué aux pixels des régions de calcul de l'ensemble des images étalon et supplémentaire.

Le résultat du seuillage est un ensemble d'images binaires. Après analyse et interprétation des résultats, les images binaires des composantes principales sont combinées pour obtenir une image binaire finale de la croûte appelée *masque de croûte*.

Des opérations de lissage ont ensuite été effectuées pour boucher les alvéoles de la croûte et éliminer les petits objets isolés :

- *fermeture* (une *dilatation*, opération duale de l'érosion, suivie d'une érosion) morphologique du masque de croûte avec un élément structurant carré de taille 3*3 pixels pour fermer les plus petites alvéoles ;
- fermeture des plus grosses alvéoles par *reconstruction morphologique* du masque de croûte. La procédure Matlab est donnée en annexe ;
- *ouverture morphologique* avec un élément structurant carré de taille 5*5 pixels pour éliminer les plus petits objets isolés et lisser le contour de la croûte.

1.3.5 Mesures

La surface de la tranche, son périmètre et la surface de la croûte ont été mesurés. L'épaisseur de la croûte a été mesurée par *granulométrie* par morphologie mathématique selon la méthode définie par Serra (Serra, 1982). L'*ouverture* morphologique avec un carré comme élément structurant a pour effet de supprimer les objets blancs dont l'une des dimensions est inférieure à la largeur du carré sans modifier la surface des autres. Cette opération peut être comparée à un tamisage d'image (**figure 6**) :



Figure 6. *Masque avant et après une ouverture de 30*30 pixels.*

En répétant les ouvertures avec un élément structurant de taille croissante, les objets blancs disparaissent progressivement en fonction de leurs dimensions. Une courbe de type granulométrique est obtenue en calculant le pourcentage de variation de surface d'objet après chaque étape.

Les traitements d'images ont été programmés sous MATLAB 7.9 (<http://www.mathworks.com>).

2 Résultats

Des exemples d'images pour chaque temps de cuisson sont donnés dans la **figure 7**. Sur les images exemple, à 10 min de cuisson, nous observons un début de coloration à la base de la tranche. La croûte est visible en haut de la tranche à partir de 17,5 min. Elle apparaît sur les côtés à 25 et s'épaissit ensuite.



Figure 7. *Exemples de tranches à différents temps de cuisson.*

2.1 Analyse en composantes principales

L'Analyse en Composantes Principales a été appliquée sur les pixels des régions de calcul des 20 images étalons en considérant les quatre canaux rouge, vert, bleu et saturation. Les vecteurs propres sont donnés **figure 8** :

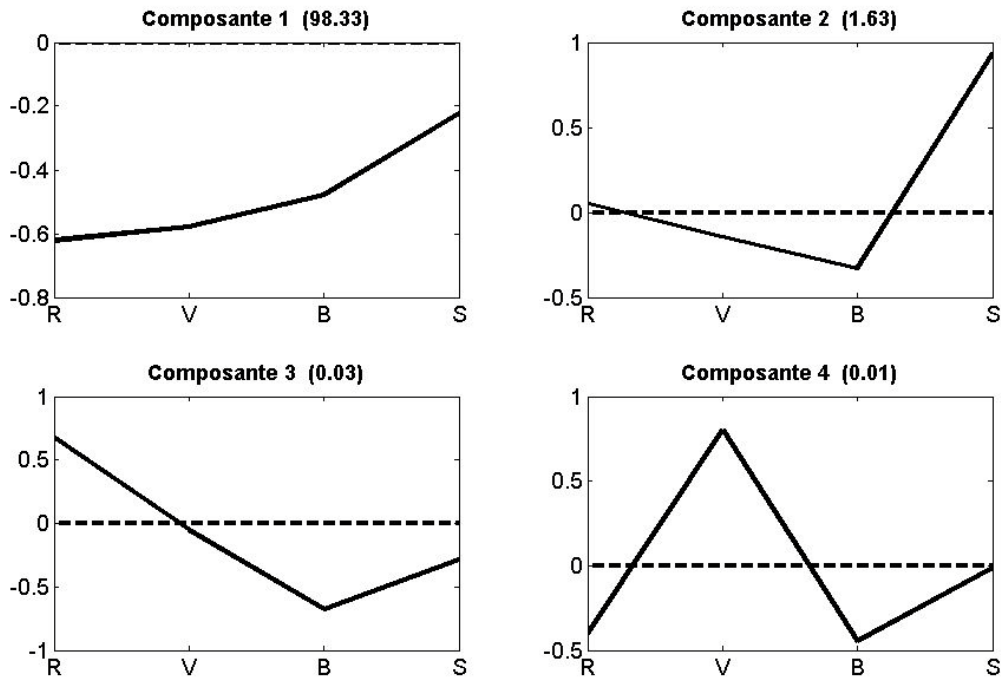


Figure 8. Profils des vecteurs propres pour les 4 premières composantes principales. R =rouge, V =vert, B=bleu, S=saturation.

Les images composantes principales pour l'image de la **figure 1** sont données **figure 9** :

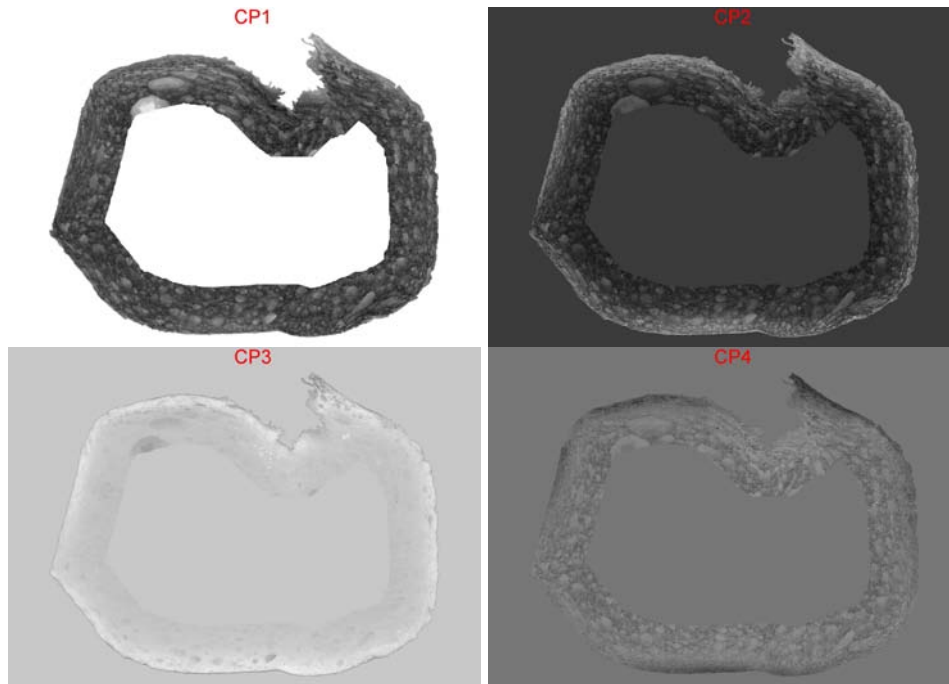


Figure 9. Images composantes principales 1 à 4 de l'image de la figure 1. Les pixels du fond de l'image apparaissent avec des intensités variables en fonction de la dynamique des composantes. Ils n'entrent pas en compte dans le calcul des composantes principales.

La composante 1 représente plus de 98% de la variance totale et est calculée en prenant en compte principalement les canaux rouge, vert et bleu de l'image. Elle correspond à une image d'intensité inversée et oppose les pixels sombres des grosses alvéoles à ceux de la mie. La composante 1 ne permet pas de distinguer la mie de la croûte. La seconde composante est calculée en combinant la saturation en positif et le canal bleu en négatif. Elle oppose la croûte saturée et plus sombre en bleu (voir **figures 2 et 3**) à la mie, les alvéoles ayant une valeur de composante intermédiaire. Le vecteur propre 3 oppose le canal rouge au canal bleu et à la saturation dans une moindre mesure. Sur l'image de cette composante (**figure 9**) la croûte apparaît plus claire que la mie sauf pour les pixels les plus près du bord et en particulier en haut de la tranche au niveau de la scarification du pain. La composante 4 est calculée en opposant le canal vert aux canaux rouge et bleu. Elle révèle des régions de croûte plus cuite en contraste avec les alvéoles.

2.2 Masque de croûte

Chacune des images composantes principales a été segmentée en utilisant le seuil obtenu par la méthode des « k-mean » sur les pixels de la région d'intérêt croûte avec mie (**figure 10**).

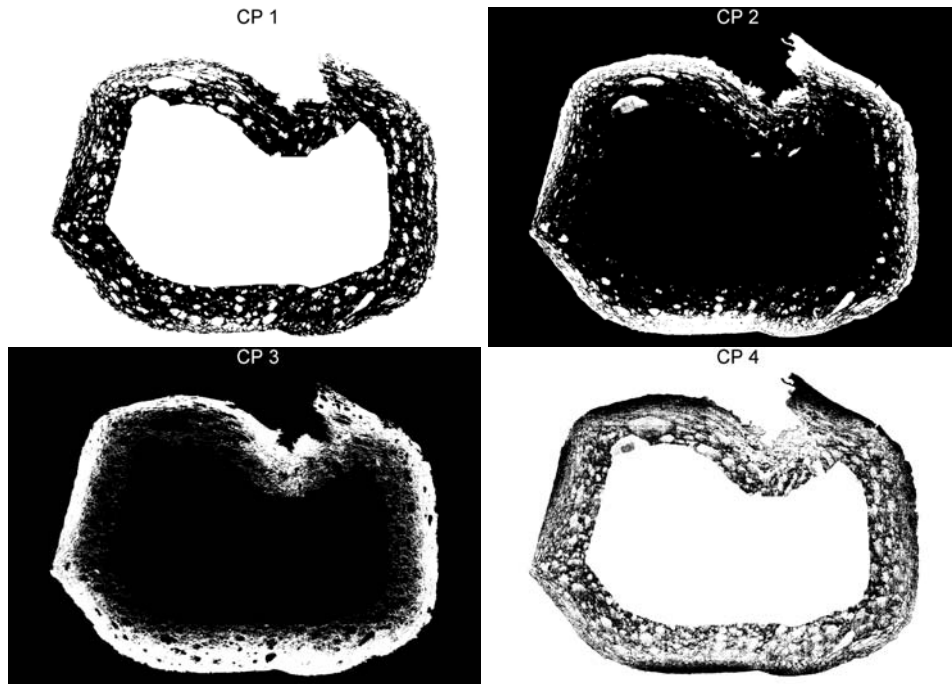


Figure 10. Composantes après application d'un seuil obtenu par k-mean.

Pour chaque image, le masque de croûte a été obtenu en combinant les images binaires des composantes 2, 3 et 4. Les pixels blancs (valeur 1) des composantes 2 et 3 sont ajoutés aux pixels noirs (valeur 0) de la composante 4 :

$$\text{Croûte} = (\text{CP2}=1) \text{ ET } (\text{CP3}=1) \text{ ET } (\text{CP4}=0)$$

Pour l'image exemple de la **figure 1**, nous obtenons le masque de croûte représenté dans la **figure 11**. Après lissage, seuls les éléments dont la distance par rapport au bord de la tranche est inférieure à 1,5 cm sont retenus.

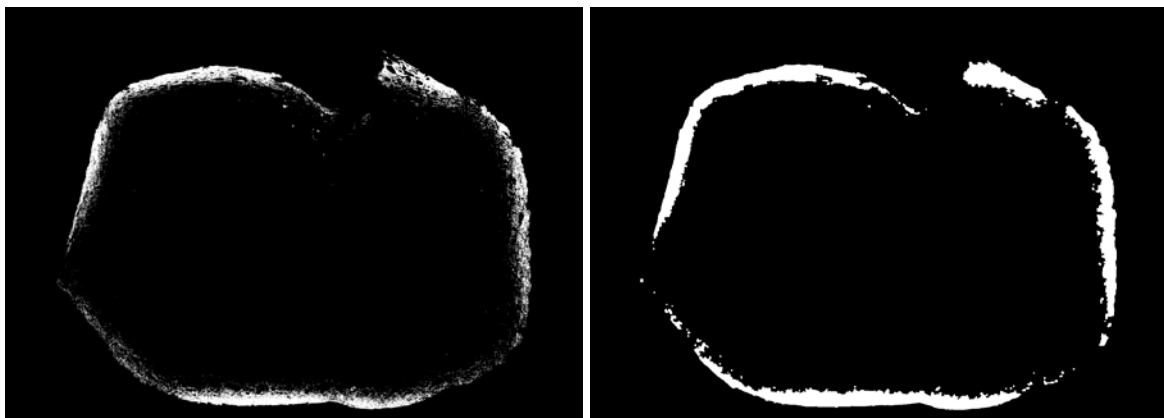


Figure 11. Masque de croûte avant et après lissage.

Cette méthode est appliquée à l'ensemble des images. Les masques de croûte des images de la **figure 7** sont représentés **figure 12**, en noir sur fond blanc :

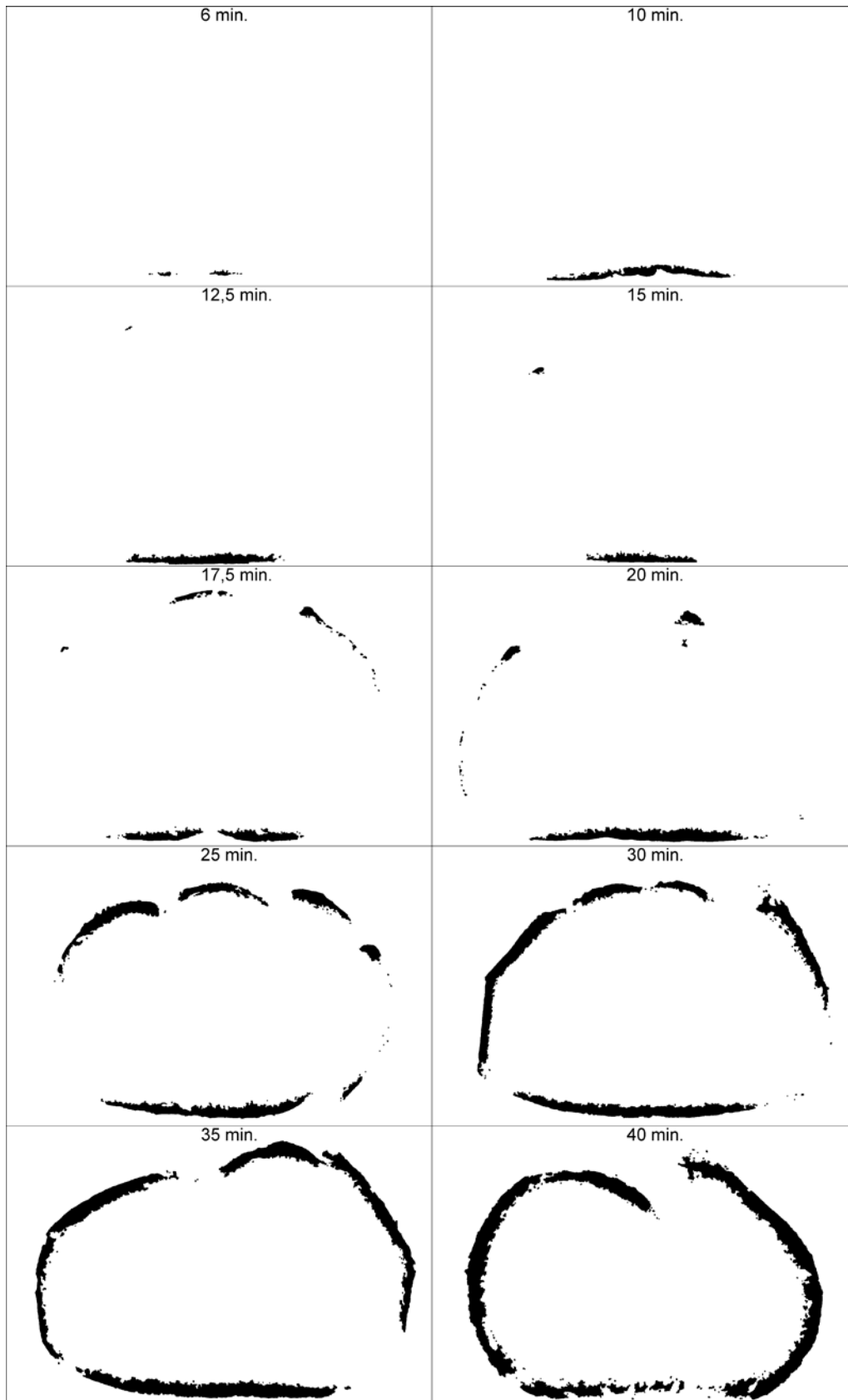


Figure 12. Masques des croûtes, au cours de la cuisson pour les images de la *figure 7*.

Les pains sur-cuits (au-delà de 35 min pour une masse de 350 g de pâte crue) présentent sur un petit nombre d'images une base très sombre.

2.3 Mesures

Nos mesures n'ont pas mis en évidence de variations de la surface des tranches mais une augmentation de la surface de croûte. Nous avons calculé les ratios de surface de croûte par rapport à la surface de tranche et avons obtenu l'évolution moyenne de ce ratio au cours du temps, **figure 13** :

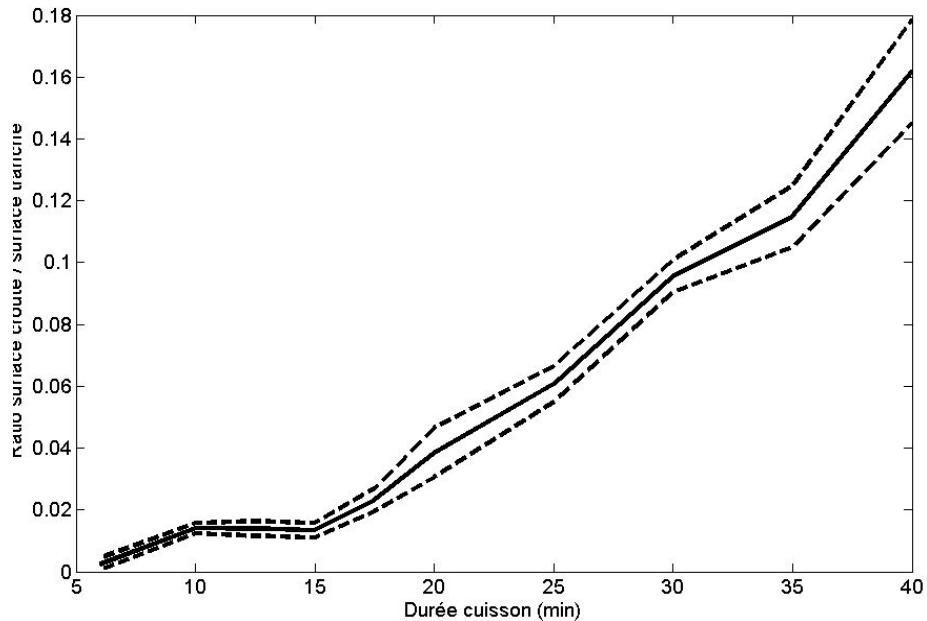


Figure 13. Evolution du ratio surface croûte / surface tranche.

Les images des 15 premières minutes de cuisson montrent très peu de croûte, juste un début de coloration. Sa surface augmente régulièrement ensuite.

2.4 Granulométrie par tamisage d'images

Les courbes moyennes de granulométrie sont représentées dans les **figures 14 à 16** :

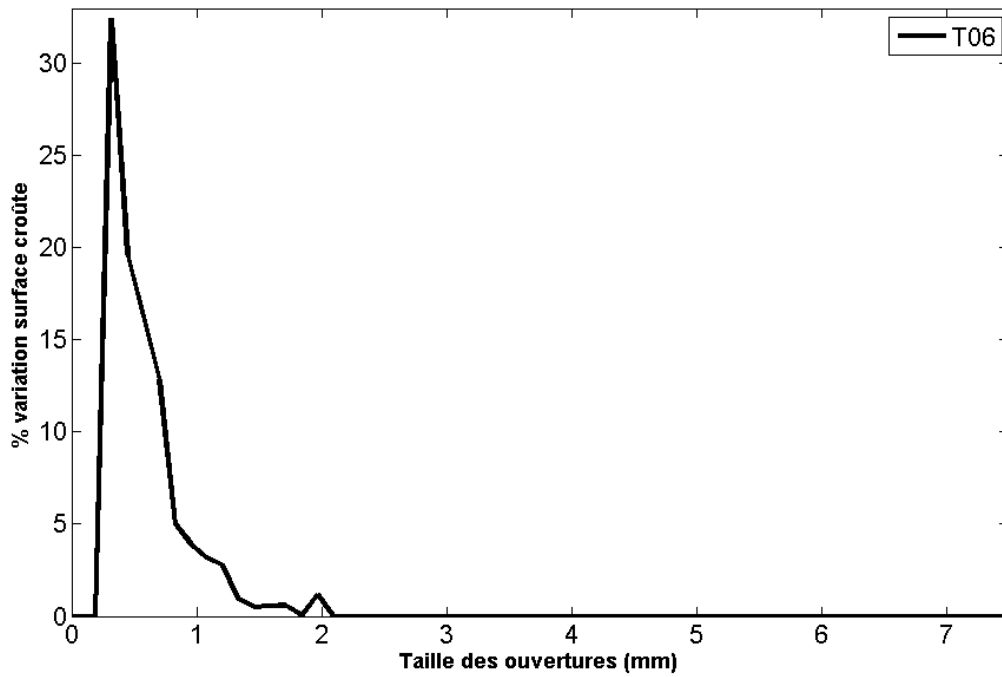


Figure 14 . Moyenne des courbes granulométriques des croûtes pour 6 min de cuisson.

Au temps 6 minutes, très peu de croûte est observée et son épaisseur est très fine.

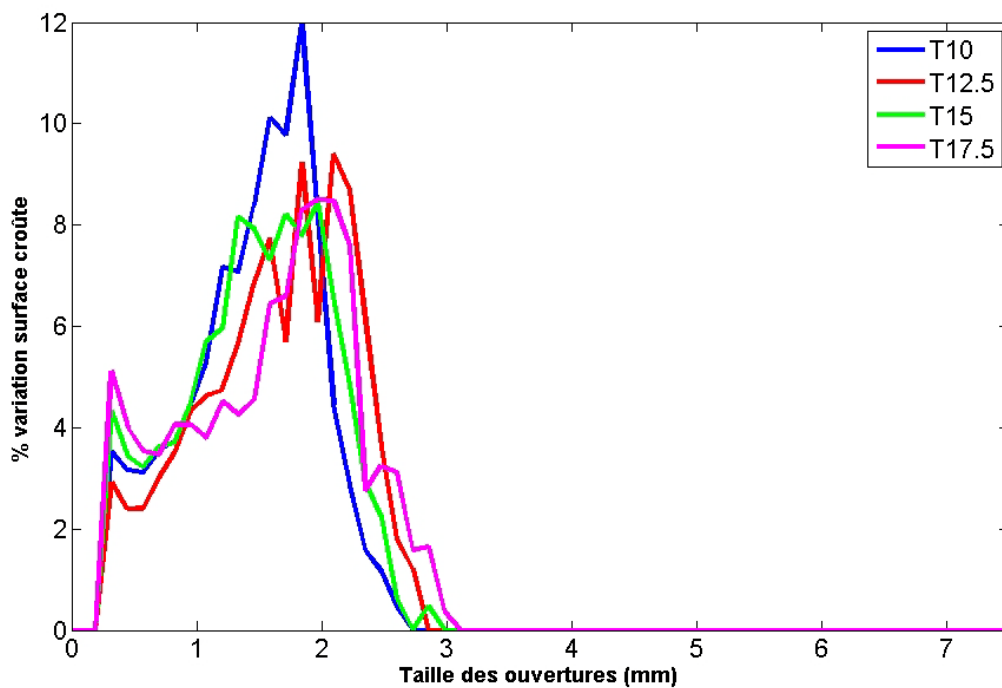


Figure 15. Moyenne des courbes granulométriques des croûtes pour 10 à 17,5 min de cuisson.

De 10 à 17,5 min, la croûte observée a une épaisseur de l'ordre de 2 mm. En pratique, elle est d'abord observée à la base de la tranche puis autour.

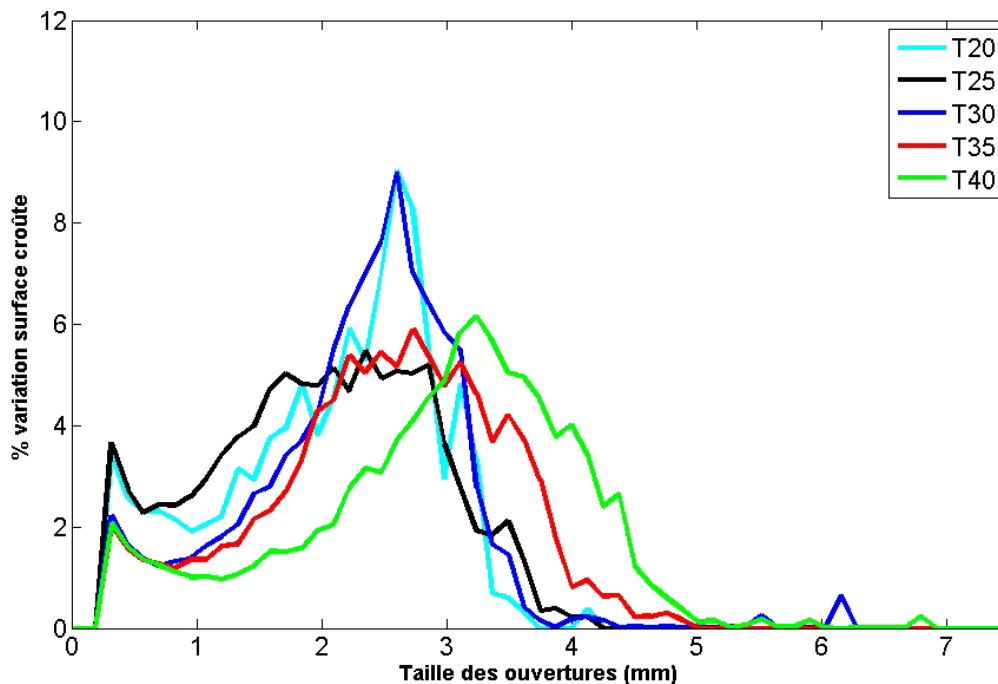


Figure 16. Moyenne des courbes granulométriques des croûtes pour 20 à 40 min de cuisson.

Entre 20 et 30 min, l'épaisseur augmente pour atteindre environ 3 mm et les portions de croûte d'épaisseur comprise entre 1 et 2 mm diminuent : la croûte apparaît et s'épaissit sur les côtés. Pour les temps de 35 et 40 min, la croûte est observée pratiquement sur tout le pourtour de la tranche et son épaisseur augmente encore. Les pains obtenus à 25 min et 30 min de cuisson, temps proches de l'idéal, montrent une croûte dont l'épaisseur est essentiellement autour de 2,5 - 3 mm mais peut atteindre jusqu'à 4 mm.

3 Conclusion

Les moyens utilisés pour caractériser la croûte : trancheuse mécanique puis imagerie, donnent des résultats répétables. Nous avons utilisé deux paramètres pour définir la croûte : la couleur et la distance par rapport au bord de la tranche. Une Analyse en Composantes Principales de la couleur nous a permis de séparer dans la tranche les pixels de la mie de ceux de la croûte. Elle est calculée sur un panel d'images qui doit être choisi le plus représentatif possible. La mise au point de cette méthode a surtout nécessité de développer des outils d'analyse d'images, les données images étant déjà obtenues en routine au laboratoire. Elle a été testée sur d'autres pains de recettes différentes et donne de bons résultats. Elle vient compléter les résultats pour caractériser une dimension hédonique essentielle des pains français.

Bibliographie

Devaux MF, Réguerre AL, Chiron H, Lassoued N (2005) Caractérisation par analyse d'images de produits céréaliers alvéolaires selon leur texture visuelle. *Cah.Tech. INRA*,56 : 17-32.

Geladi P (1996) *Multivariate Image Analysis*. John Wiley & Sons Ltd.

Jolliffe IT (1986) *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag, New-York.

Rouille J, Della Valle G, Devaux MF, Marion D, Dubreil L (2005) French bread loaf volume variations and digital image analysis of crumb grain changes induced by the minor components of wheat flour. *Cereal Chemistry*,82-1:20–27.

Roussel P, Chiron H (2002) *Les pains français, évolution, qualité, production*. Ed. MAE ERTI.

Serra J (1982) *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Vol. 1, Academic Press, New York (1982) pp. 375–377.

Smith A R (1978), Color Gamut Transform Pairs, SIGGRAPH '78.

Soille P (2003) *Morphological Image Analysis. Principles and Application*. Springer, 391 p.

Annexe

Fermeture des alvéoles de la croûte par reconstruction

```
% fermeture des alvéoles de la croûte par reconstruction
% marqueur de l'intérieur de la tranche (figure 2a)
marker = roi ;
% marqueur de l'extérieur de la tranche : bords inférieur,
% supérieur, gauche et droit de l'image
marker([1 end],:)=1;
marker(:,[1 end])=1;
% masque complémentaire de la croûte (masquecroute = roi
figure 11)
mask = ~MasqueCroute;
% reconstruction du masque complémentaire à partir des
% marqueurs intérieurs et extérieurs de la croûte
MasqueCroute = imreconstruct(marker, mask);
% récupération du masque de la croûte avec les alvéoles
% fermées
MasqueCroute=~MasqueCroute;
```