

OPTIMISATION DU SECHAGE DES COSSETTES D'IGNAME PAR MODELISATION COUPLEE TRANSFERTS – REACTIONS

Jean-Michel Méot^{1*}, Olivier Gibert¹, Komlan Métowanou²

1- CIRAD, UMR QualiSud, F-34398 Montpellier

2- Etudiant en DEA, Cirad

* jean-michel.meot@cirad.fr

Mots clés : igname ; séchage ; modélisation ; transferts ; qualité

1. RESUME

L'impact du blanchiment, de la découpe et du séchage des tubercules d'ignames (*dioscorea rotundata*, cultivar *kokoro* du Bénin) sur la couleur de la pâte reconstituée à partir de la farine de cossettes broyées a été étudié par modélisation couplée des transferts de chaleur et d'eau et de réaction de brunissement. Le modèle de transferts utilisant les équations de Fourier et de Fick permet une bonne description du séchage. Un modèle cinétique de modification de la couleur en fonction de la température et de l'activité d'eau a été développé. Ses paramètres ont été identifiés à partir d'expériences originales. Les modèles ont été implémentés sous COMSOL[®] en 2D. Les modifications de qualité prédites par le modèle couplé correspondent aux observations de terrain des partenaires du projet. Il vaut mieux sécher doucement à basse température que vite à haute température.

2. INTRODUCTION

Les ignames (*dioscorea spp.*) sont traditionnellement cultivées et consommées en Afrique de l'Ouest. Leur saisonnalité et leur forte susceptibilité au transport limitent leur place dans la diète. Depuis une vingtaine d'années, leur transformation en cossettes et en farine s'est développée au Nigeria, au Bénin et dans une moindre mesure au Togo [1]. Lors de tentatives de transfert direct du procédé vers d'autres pays de la région, il est ressorti que l'acceptabilité serait meilleure pour une couleur plus claire. Des essais d'ajouts d'additifs dans l'eau de blanchiment, de découpe et de conditions de séchage ont donné des résultats intéressants mais limités aux conditions testées [2] [3].

L'objectif de cette étude est de modéliser des transferts de chaleur et d'eau, de déterminer les paramètres cinétiques de modification de couleur en fonction de la température et de l'activité d'eau et de réaliser le couplage des modèles. L'outil obtenu permet de réaliser une optimisation par simulation et, ultérieurement, de ne devoir qu'adapter certains paramètres pour élargir le domaine à d'autres variétés, à des conditions de traitement différentes et à des critères de qualité complémentaires. Dans le cadre de cette communication, les résultats concernant la modélisation des transferts sont abordés rapidement, l'attention étant focalisée sur la cinétique de brunissement.

3. MATERIELS ET METHODES

Les essais ont été réalisés avec des tubercules de *dioscorea. rotundata*, variété *kokoro* approvisionnés auprès de l'IITA Cotonou, Bénin. Pour l'étude des cinétiques de brunissement, deux farines d'ignames référence ont été préparées, une à partir d'ignames pelées et précuites à 65°C pendant 1h30, l'autre sans précuisson. Les cossettes ont été

congelées à l'azote liquide, lyophilisées, broyées grossièrement au Thermomix® puis leur granulométrie a été réduite à moins de 100 µm par passage au broyeur à broches de laboratoire Alpine®.

Le traitement hydrothermique des farines a été fait selon la méthode de Nellist et Bruce [4]. 10 g environ de farine d'igname sont réhydratés dans un lit fluidisé à air saturé en eau conçu et réalisé au Cirad. La farine réhydratée est introduite dans un sachet plastique qui est thermoscellé sous vide. Le sachet est immergé dans un bain d'eau agité et régulé en température pendant le temps de traitement choisi. Il est ensuite refroidi dans un bac d'eau.

L'activité de l'eau des échantillons a été mesurée sur les échantillons après réhydratation et après traitement hydrothermique à l'aide d'un awmètre Aqualab CX-2. En l'absence de mesure biochimique représentative de la couleur des farines d'ignames, la couleur a été mesurée avec un colorimètre Minolta CR-300. Une bouillie de farine est préparée selon un protocole à agitation manuelle et cuisson en bain-marie dérivé de celui utilisant un Rapid Visco Analyser [5] afin d'en réduire la durée. Les résultats sont exprimés en système CIELAB 1976. Seuls les résultats concernant le brun (100-L*) sont présentés.

Les modifications de couleur ont été modélisées sous la forme de cinétiques d'ordre 1. Le traitement des données a été réalisé sous Matlab®. Les modèles de transferts et de cinétiques de modifications de couleur ont été implémentés sous COMSOL multiphysic®, logiciel commercial de modélisation par éléments finis.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Modélisation des transferts

Les mesures de caractéristiques thermophysiques des ignames réalisées dans le cadre de ce travail sont très proches de celles rapportées par Njie, Rumsey et Singh [6]. Les isothermes de désorption de la farine d'ignames ont l'allure classique des isothermes de sorption des produits amylacés. Des explorations préliminaires ont montré qu'il existe un gradient de teneur en eau dans les tubercules. La teneur en eau diminue d'environ 30%MS de l'extrémité du tubercule vers sa tige et de l'axe vers la surface externe des tubercules. Par ailleurs, le produit est isotrope. Enfin, lors de séchage à des vitesses d'air supérieures à 2 m/s, le séchage est interne limitant. Ces trois résultats sont similaires à ceux obtenus par Kolawole *et al* [7]. La précuisson de 90 min à 65°C n'a pas d'effet significatif sur le comportement en séchage. La diffusivité apparente varie de $5 \cdot 10^{-10}$ à $17 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ pour des températures de 45°C à 80°C.

Le modèle de transferts couplés (énergie, eau) a été implémenté sous COMSOL®. Les équations constitutives du modèle le 2D sont les suivantes, exprimées avec les notations conventionnelles :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

avec T : température
 x et y : coordonnées
 ρ : masse volumique

t : temps
 λ : conductivité thermique
 C_p : capacité calorifique massique

$$\frac{\partial N_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial N_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial N_s}{\partial y} \right)$$

avec N_s : teneur en eau

D_{eff} : diffusivité apparente de l'eau

Les conditions aux limites ont été choisies comme suit :

$N_s = N_{s_{eq}}$ avec $N_{s_{eq}}$: teneur en eau à l'équilibre avec l'air

$$\vec{J}_{th} = -\left[h(T_\infty - T)\vec{n} - Lv \times D_{eff} \operatorname{div}(\vec{N}_s \times \rho_{s0})\right]$$

avec \vec{J}_{th} : flux thermique \vec{n} : vecteur unitaire normal à la surface
 T_∞ : température de l'air ρ_{s0} : masse volumique à $N_s=0$
 h : coefficient d'échange convectif à la surface
 Lv : chaleur latente de vaporisation de l'eau

Le modèle obtenu a été validé par des essais de séchage conduits sur la boucle de séchage pilote du Cirad. La représentation des transferts est correcte comme sur l'exemple représenté à la Figure 1. Le travail de modélisation des transferts présenté brièvement dans ce document doit être publié prochainement de manière plus complète.

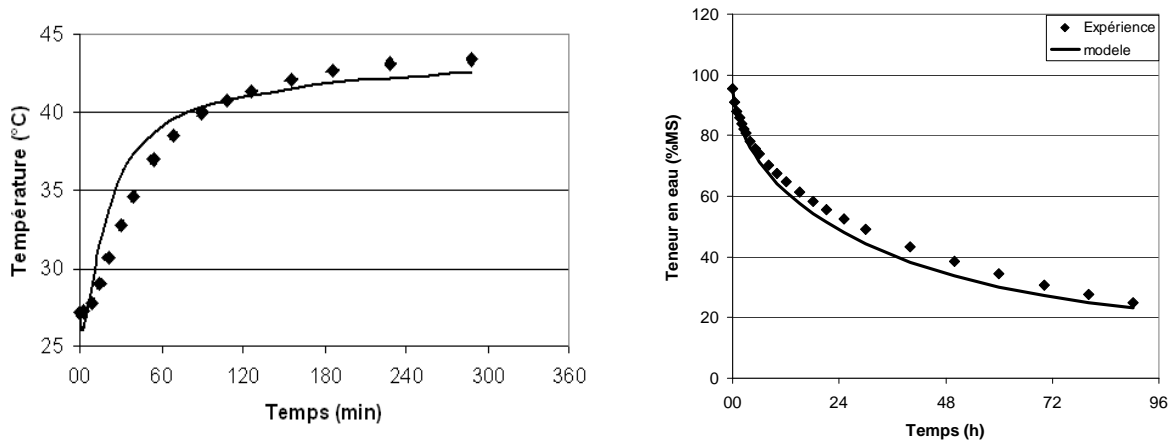


Figure 1: Comparaison expérience - modèle pour le séchage à 45°C, 23%HR et 4,1 m/s d'un tubercule d'igname de 2 cm de rayon moyen et de longueur 14 cm

4.2. Cinétiques de développement du brun

Les essais se sont avérés difficiles avec des écart-types élevés, de l'ordre de 1 unité d'indice de luminance (L^*). Néanmoins, on constate que le brunissement de la farine précuite est un peu plus lent que celui de la farine native et que l'asymptote est un peu plus basse. Le protocole et les outils utilisés n'ont pas permis de travailler dans l'intervalle d'activité d'eau [0,95 0,99] car les particules de farines s'agglomèrent et forment des boules.

Le traitement de l'ensemble des données (81 expériences pour la farine native, 86 pour la farine précuite) a conduit à modéliser les cinétiques de brunissement sous la forme de l'équation (1). La représentation en 3D se trouve en Figure 2. La comparaison entre les résultats fournis par le modèle et ceux obtenus expérimentalement faite à la Figure 3 montre que le modèle donne une bonne idée des phénomènes avec une reconstitution de plus de 80% des variations.

$$100 - L^* = k_1 - k_2 \exp(-Kt) \text{ avec } K = k_3 \exp\left(\frac{k_4}{T}\right) \exp(k_5 10^{-9} (100a_w)^{k_6}) \quad (1)$$

Avec K constante de réaction $100-L^*$: indice de brun k_1 à k_6 : constantes
 t : temps T : température a_w : activité de l'eau

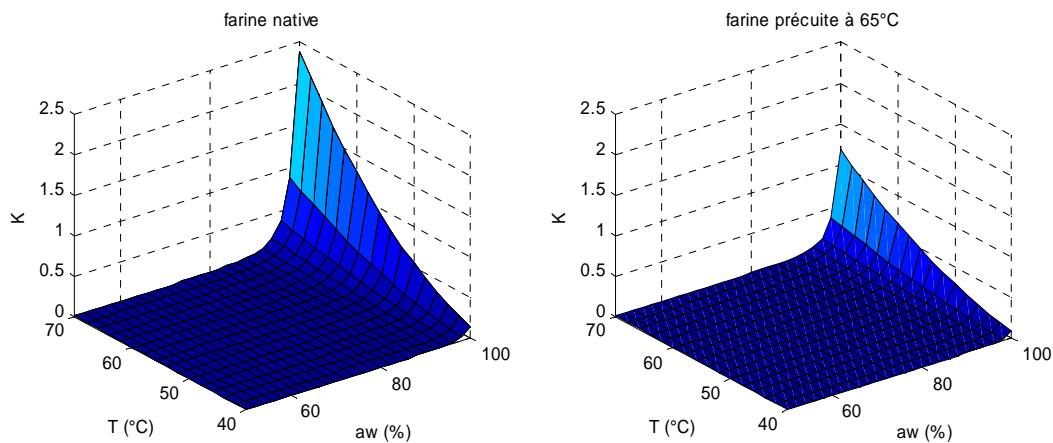


Figure 2: Evolution de la constante de réaction K en fonction de la température et de l'aw pour les farines native et précuite

L'allure des surfaces montre que le brunissement se produit uniquement à des activités d'eau supérieures à 0,85. Cela est logique puisque les réactions enzymatiques auxquelles il est attribué nécessitent la présence d'eau. Par ailleurs, l'augmentation de la température induit une augmentation de la vitesse de réaction. Cependant, on peut supposer que la forme continûment croissante vient de la limitation de nos expériences à 65°C, une dénaturation des enzymes pouvant se produire à des températures plus élevées. Enfin, l'effet de la précuisson est tout à fait visible avec une division par 2 de la constante de réaction.

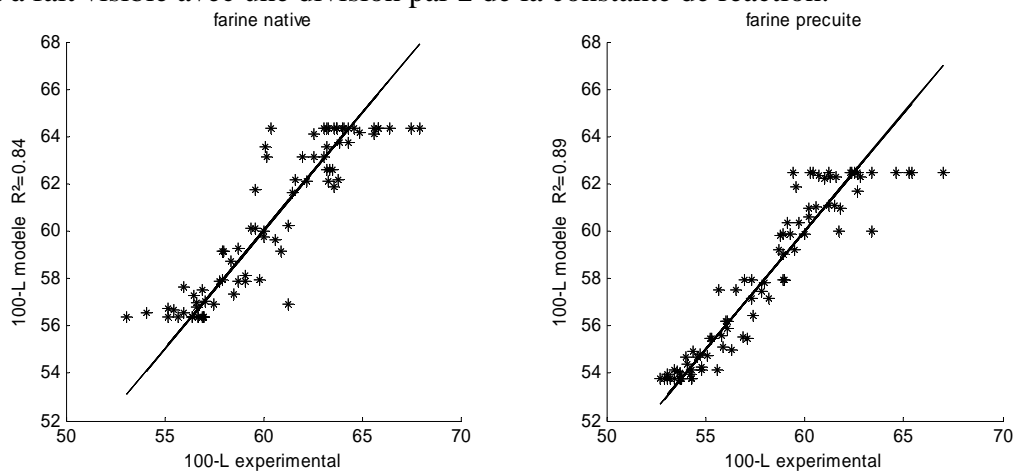


Figure 3: Comparaison des indices de brun fournis par le modèle avec ceux obtenus expérimentalement

4.3. Couplage transferts – réactions

A partir des données de dépendance du brunissement en fonction de l'activité de l'eau, il est possible de conclure sur l'intérêt de la découpe : Pour des conditions externes similaires, plus le séchage est rapide, plus clairs sont les produits. En revanche, le couplage est nécessaire pour conclure sur l'intérêt d'augmenter la température de l'air de séchage : la plus faible durée du séchage compense-t-elle l'accélération du brunissement ? La Figure 4 représente la teneur en eau (axe vertical) et l'indice de brun (couleur) de quatre formats de pièces, précuite ou non, séchées à 45°C et 65°C, l'humidité et la vitesse d'air restant

constantes, pour une durée de séchage de 10 heures. Le séchage est logiquement plus rapide pour les pièces les plus petites et pour la température d'air la plus élevée. Par ailleurs, les pièces précuites sont moins brunes que les pièces natives. Enfin, il s'avère que l'effet de l'accélération du brunissement par l'élévation de température ne soit pas compensé par l'abaissement plus rapide de la teneur en eau. Ces résultats correspondent aux observations faites sur le terrain par les partenaires du projet et sont cohérents avec les résultats rapportés par Akissoe *et al* [2] [3].

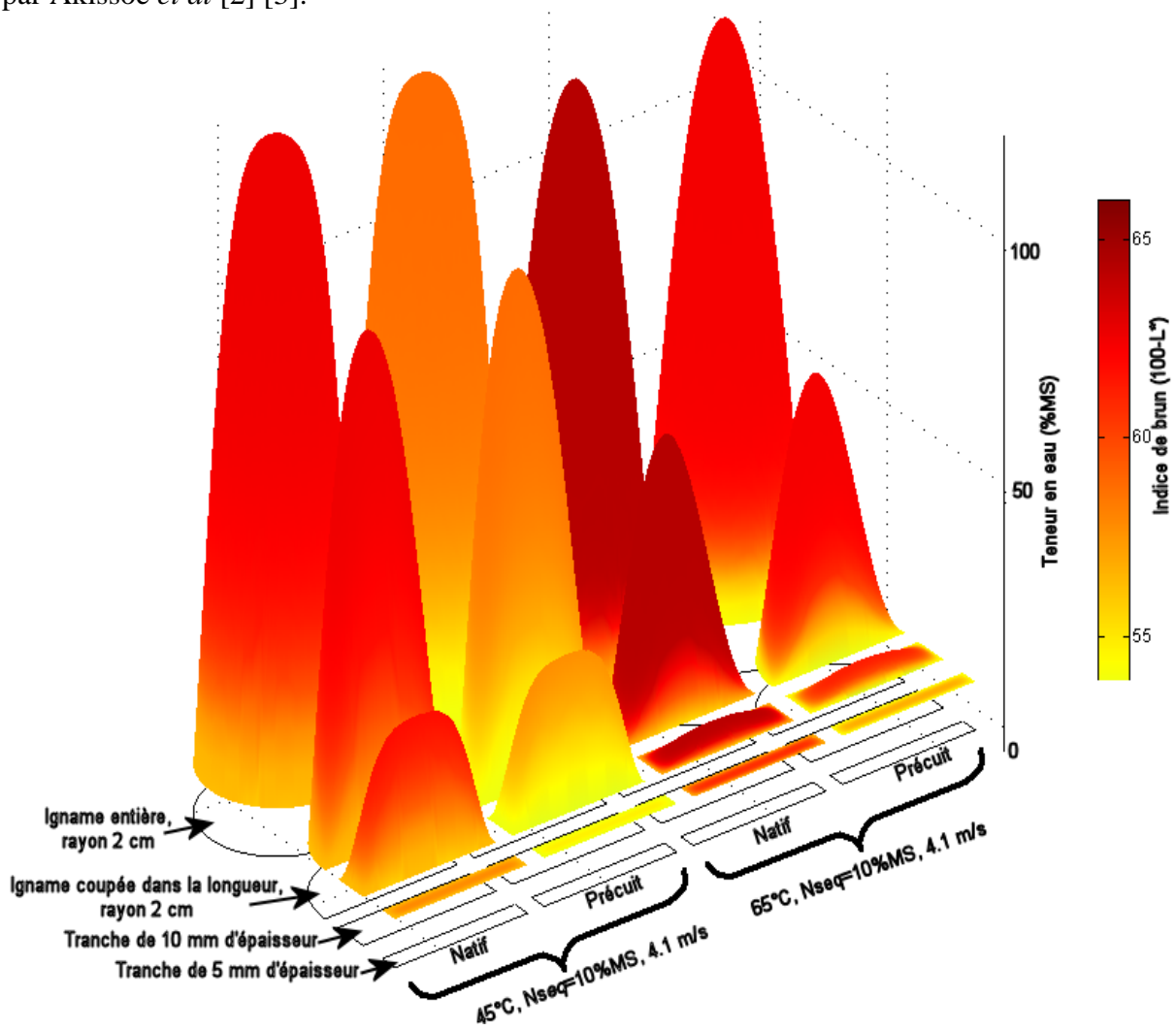


Figure 4: exemple de simulation couplée transferts réactions

5. CONCLUSION

La modélisation des transferts d'énergie et d'eau lors du séchage à l'air chaud de pièces de tubercules de *dioscorea rotundata*, variété *kokoro* par des modèles respectivement conductif et diffusif permet une représentation correcte des phénomènes. Les méthodes et outils de détermination des propriétés sont connus et il existe quelques données dans la littérature. La détermination de cinétiques de réaction en fonction de la température et de l'activité d'eau a pu être réalisée pour le brunissement. Les outils et méthodes développés permettent un travail correct dans le domaine d'activité d'eau [0,2 0,95] mais il reste à trouver une voie pour étudier le domaine [0,95 0,99]. Le modèle couplé (transferts,

réactions) donne des résultats cohérents avec les connaissances existantes. Il peut être utilisé pour l'optimisation de l'utilisation d'équipements existants et pour la création de nouveaux séchoirs. L'ajout d'un autre paramètre de qualité ne demande que l'introduction d'une cinétique complémentaire. L'adaptation à de nouvelles variétés d'ignames se limite à l'identification de leurs propriétés de transferts ou de brunissement différentes de celles de kokoro.

Ce type de démarche permet une bonne capitalisation de connaissances mais la mesure de la qualité peut être une limite. Par exemple, les indices colorimétriques utilisés dans ce travail présentent le défaut d'être difficilement moyennés pour calculer l'indice de brun de la farine obtenue par broyage des cossettes. Un indicateur du type concentration aurait été préférable s'il avait été disponible.

Remerciements

Les auteurs remercient la Communauté Européenne pour le soutien financier de cette étude dans le cadre du projet INCOYAM [8].

-
- [1]. Anonyme ; Dossier : la transformation des ignames ; Bulletin du réseau TPA, décembre 2000 ; 31p ; Consulté sur le site <http://www.infotpa.org/fileadmin/bulletin/bulletin18.pdf> le 12 septembre 2007.
- [2]. Akissoé N.; Hounhouigan J.; Mestres C. et M. Nago, How blanching and drying affect the colour and functional characteristics of yam (*Dioscorea cayenensis-rotundata*) flour.; *Food Chem.* 82(2) (2003) 257-264.
- [3]. Akissoe N.; Hounhouigan J.; Mestres C. et M. Nago, Effect of tuber storage and pre- and post-blanching treatments on the physicochemical and pasting properties of dry yam flour.; *Food Chem.* 85(1) (2004) 141-149.
- [4]. Nellist M.E. et M.D. Bruce, 1987, Drying and cereal quality, *Aspects of Applied Biology, Cereal Quality*, 15 (1987) 439-455.
- [5]. Mestres C., Nago M., Akissoe N., Matencio F., End use quality of some african corn kernels. 2. Cooking behavior of whole dry-milled maize flours ; incidence of storage, *J. Agric Food Chem.* 45(3) (1997) 565-571
- [6]. Njie D.N.; Rumsey T.R. et R.P. Singh, Thermal Properties of Cassava, Yam and Plantain, *J. Food Eng.* 37 (1998) 63-76.
- [7]. Falade K.O.; Olurin T.O.; Ike, E.A. et O.C. Aworh, Effect of pretreatment and temperature on air-drying of *Dioscorea alata* and *Dioscorea rotundata* slices, *J. Food Eng.* 80(4) (2007).1002-1010
- [8]. Projet européen INCO DC IC18-CT-98-0302 ; Post-récolte et consommation des ignames : Réduction des pertes et amélioration de la qualité des tubercules conservés frais et des produits transformés secs pour les marchés africains.