

PII: S0017-9310(96)00131-7

Séchage intermittent de maïs en lit fluidisé à flottation : étude expérimentale et modélisation

M. MOURAD, M. HEMATI† et C. LAGUERIE

Laboratoire de Génie Chimique (URA-CNRS, 192), ENSIGC, 18,
Chemin de la Loge, 31078 Toulouse, France

(Reçu le 26 mai 1995 et sous forme finale le 17 avril 1996)

Abstract—Ce travail concerne le séchage de maïs dans un lit fluidisé à flottation soumis à un débit intermittent d'air chaud. Les objectifs de cette étude sont d'une part de mettre en évidence l'effet de ce mode de séchage sur la consommation énergétique du processus ainsi que sur la qualité des grains, et d'autre part d'établir un modèle mathématique permettant de simuler les phénomènes observés. L'influence des conditions du séchage intermittent tels que les durées des périodes d'aération et de repos, respectivement t_a et t_r , a été examinée. Le rapport t_r/t_a n'a aucune influence sur la cinétique de séchage lorsque sa valeur est supérieure à 2. Par ailleurs, le séchage intermittent consomme moins d'énergie que celui à débit continu d'air, car il réduit la durée du séchage de 50%. Cependant, pour les conditions opératoires retenues dans cette étude, ce mode de séchage ne conduit pas à une amélioration de la qualité amidonnaire de maïs. Nous avons proposé un modèle mathématique adapté au cas du séchage intermittent. Ce modèle représente d'une manière fiable l'humidité de l'air, la température du séchoir, la teneur en eau et la température des grains ainsi que les évolutions de leurs qualités amidonnaire et protéique. Ce modèle pourra être utilisé pour le pilotage d'un tel procédé dans les conditions optimales. Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd.

INTRODUCTION

L'optimisation des conditions de séchage des céréales est une nécessité pour pouvoir réduire le plus possible la consommation d'énergie de cette opération. Dans le cas plus particulier du séchage du maïs, les travaux antérieurs [1–3] effectués dans des conditions stables de chauffe à débit continu d'air, ont montré que l'opération se fait dans la période à vitesse décroissante et que la migration de l'eau dans le grain est l'étape limitante. Ainsi, cette opération devient de moins en moins efficace suite à l'existence des gradients internes de teneur en eau. L'efficacité énergétique devient alors de plus en plus faible. Afin de réduire la consommation énergétique du processus, le séchage intermittent de maïs devient couramment utilisé.

Cette technique consiste à soumettre les grains à des variations pseudo-cycliques de chauffe réalisées par alternance des périodes d'aération par de l'air chaud et des périodes de repos. La phase de repos peut être réalisée de différentes façons : soit en gardant les grains dans le séchoir non irrigué par de l'air chaud, soit en les exposant à l'air ambiant (phase de relaxation ou de ressuage) soit encore en les irriguant par de l'air ambiant (phase de refroidissement).

Pendant la période de repos, l'évaporation de l'eau à la surface du grain devient plus faible devant la migration interne conduisant ainsi à une redis-

tribution de l'humidité en son sein. Cette dernière permet une augmentation de la vitesse de séchage lors de la reprise d'une période ultérieure d'aération. D'ailleurs, il est possible que le séchage intermittent ait une influence favorable non seulement sur la cinétique de déshydratation mais aussi sur la qualité du produit.

Les travaux bibliographiques relatifs au séchage intermittent de grains ne sont pas abondants. Cette technique a été d'abord appliquée au cas du séchage des engrais chimiques [4]. Dans le cas du séchage des grains d'arachide, Troeger et Butler [5] ont noté une réduction de la consommation énergétique de 34% lors de l'arrêt du courant de l'air chaud pendant une durée de 45 min après 15 min d'aération. Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Zhang et Mujumdar [6] et ceux de Lebert [7] lors du séchage de maïs avec une seule période de repos.

Peu de résultats ont été rapportés dans la littérature sur l'influence des conditions du séchage intermittent. Toutefois, Zhang et Mujumdar [6] ont constaté que pour une durée de séchage de maïs de 20 minutes, la durée optimale de la période de repos, de l'ordre de 60 minutes, est pratiquement indépendante de la température. Cependant, Kulshreshtha *et al.* [8] ont signalé que la durée optimale de repos peut être influencée par la température et la durée de la phase d'aération.

Par ailleurs, Foster [9] a rapporté que le séchage intermittent peut conduire à une meilleure préservation de la qualité des grains séchés (taux de fissuration, de germination, etc). Toutefois, on ne trouve

† Author to whom correspondence should be addressed.

NOMENCLATURE

A	absorbance de l'extrait protéinique	V_g	volume d'un grain
A_0	absorbance initiale	X	teneur en eau instantanée du grain
A_c	aire de section droite de la colonne	\bar{X}	teneur en eau moyenne
A_g	surface d'un grain	X_e	teneur en eau du grain à l'équilibre
c_{pa}	chaleur massique de l'air	X_{gi}	teneur en eau à la surface du grain
c_{pg}	chaleur massique du grain	X_0	teneur en eau initiale du grain
c_{pl}	chaleur massique de l'eau	Y_a	humidité de l'air
c_{ps}	chaleur massique de sable	Y_{ac}	humidité de l'air à l'entrée du séchoir
c_{pv}	chaleur massique de la vapeur	Y_{as}	humidité de l'air au voisinage du grain ou à la sortie du séchoir
d_g	diamètre du grain obtenu par tamisage	Y_R	humidité de l'air à la surface humide du grain
d_s	diamètre du sable obtenu par tamisage	Y_{sat}	humidité de l'air à saturation.
\mathcal{D}	coefficient de diffusion de l'eau interne au grain		
D	coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air		
g	accélération de la pesanteur		
G_a	débit d'air dans le séchoir		
h	coefficient d'échange convectif externe de chaleur		
H	hauteur de la couche de solides		
HR	humidité relative de l'air		
IS	indice de séparation amidon-protéines		
IS_0	valeur initiale de l'indice de séparation		
J_{XS}	densité de flux de matière au niveau de la surface du grain		
k	coefficient d'échange convectif externe de matière		
m_s	masse de sable présente dans le lit		
N_g	nombre de grains		
r	position spatiale dans le grain		
R	rayon du grain		
\mathcal{R}	constante des gaz parfaits		
t	temps		
t_a	durée de la période d'aération		
t_g	durée totale de l'opération du séchage		
t_r	durée de la période de repos		
t_{ta}	durée totale des périodes d'aération		
T	température instantanée du grain		
T_0	température initiale du grain		
T_a	température de l'air		
T_{ac}	température de l'air à l'entrée du séchoir		
T_{as}	température de l'air à la sortie du séchoir		
T_g	température moyenne du grain		
T_{gi}	température de la surface du grain		
T^*	température de référence		
U_a	vitesse de l'air		

Symboles grecs	
ΔH_v	enthalpie d'évaporation de l'eau déterminée à 25°C
ε	degré de vide de la couche de solides
λ_a	conductivité thermique de l'air
λ_g	conductivité thermique des grains de maïs
ρ_a	masse volumique de l'air
ρ_g	masse volumique des grains de maïs
ρ_{gs}	masse volumique des grains de maïs sec
ρ_v	masse volumique de la vapeur d'eau.

Indices	
a	air
a	aération
c	colonne
e	entrée, équilibre
g	grain
i	au niveau de la surface du grain
0	initial
l	liquide
r	repos
R	au niveau de la surface du grain
s	sable
sat	saturation
S	surface d'un grain
v	vapeur d'eau
r	repos
t	total.

Exposant	
*	référence.

aucune information concrète dans la littérature concernant l'influence de ce mode de séchage sur la qualité amidonnière et protéinique des grains de maïs.

L'étude présentée ici consiste à analyser le séchage de grains de maïs soumis à des variations psuedo-cycliques des conditions de chauffe en vue d'obtenir

des données exploitables pour le pilotage d'une telle opération dans les conditions optimales. Dans un premier temps, nous présenterons et analyserons les résultats théoriques obtenus à partir d'un modèle diffusif-conductif adapté au séchage intermittent, puis les résultats expérimentaux qui à leur tour ont permis

non seulement de valider les résultats théoriques, mais aussi de mieux comprendre l'influence de différents paramètres opératoires sur la performance de ce mode de séchage.

PRESENTATION DU SECHOIR A LIT FLUIDISE A FLOTTATION

Le principe du séchage de maïs en lit fluidisé à flottation repose sur l'immersion des grains dont le diamètre moyen est de 7 mm dans un lit fluidisé chaud de particules inertes de sable de granulométrie entre 250 et 315 μm . Cette technique présente beaucoup d'intérêt tant sur le plan thermique qu'hydrodynamique. En effet, par comparaison avec la fluidisation directe, cette technique permet une réduction de 80% du débit d'air nécessaire à la mise en suspension des grains [2]. Par ailleurs, au-delà d'une vitesse de l'air de 0,2 m s^{-1} correspondant à 2 fois la vitesse minimale de fluidisation du sable, les grains de maïs sont uniformément répartis dans le lit de sable. Les mesures de la température de lit à différents niveaux ont confirmé l'isothermicité du séchoir, ce qui permet un traitement uniforme des grains. Il s'agit d'ailleurs là d'un sérieux avantage par rapport aux séchoirs discontinus habituellement utilisés à l'échelle de laboratoire puisque la technique de flottation permet de réaliser les cinétiques de séchage d'une manière fiable avec des masses de grains relativement importantes.

Le séchoir à lit fluidisé à flottation que nous avons utilisé est schématisé sur la Fig. 1. Il comprend le

séchoir, le circuit d'air et les organes de mesure et de contrôle de température. Le séchoir est une colonne en acier inoxydable à section rectangulaire contenant 8 kg de fines particules de sable. La colonne est équipée d'un distributeur à plaque perforée dont la porosité est de 1,42%. L'air ambiant aspiré à l'aide d'un surpresseur et chauffé dans un four électrique, est introduit à la base du séchoir dans une section pyramidale de même dimension que la colonne.

Deux vannes pneumatiques ont été placées sur le circuit d'air avant son passage dans le séchoir. Elles sont reliées à un relais électromécanique assurant une action alternative de ces vannes. Ainsi, on peut fixer la durée de mise en suspension du maïs et du sable dans le courant d'air chaud (temps d'aération) et celle de relaxation (temps de repos). Cette dernière correspond à l'immobilisation instantanée de la couche de solides par fermeture de l'entrée de l'air (vanne A) et par ouverture simultanée d'une sortie libre (vanne B). Cette situation est donc inversée dans le cas de la période d'aération.

La régulation de la température du séchoir est effectuée à l'aide d'un thermocouple PT100 placé au dessus du distributeur et relié à un régulateur PID qui commande la puissance de chauffe du four. Par ailleurs, le suivi de l'évolution de la température du lit au cours de la manipulation est réalisé moyennant deux thermocouples de type fer-constantan placés respectivement à 0,03 et 0,30 m du distributeur. Nous avons aussi enregistré la température du grain au cours du séchage. Pour ce faire, un autre thermocouple fer-constantan le long duquel sont enfilés

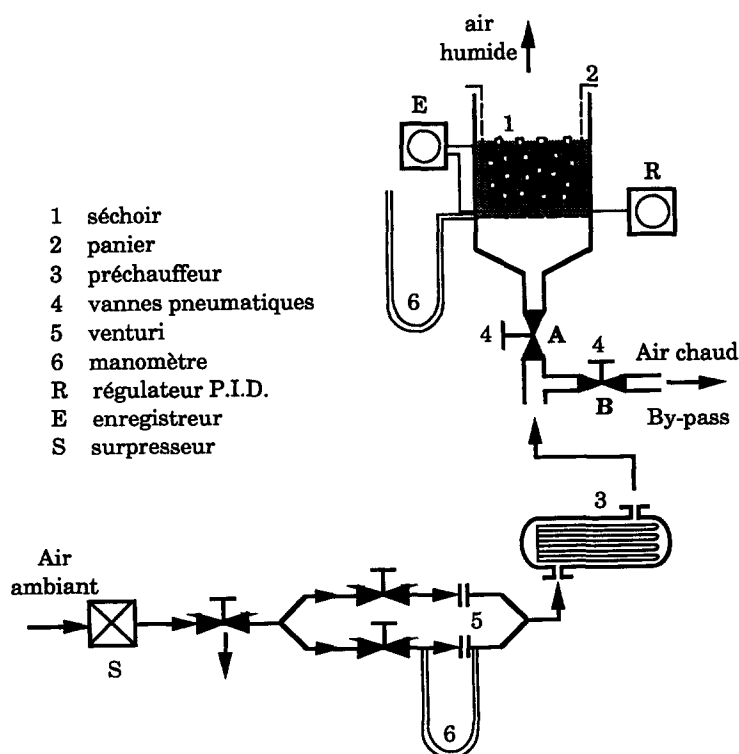


Fig. 1. Schéma du dispositif expérimental.

plusieurs grains secs et un grain humide placé à son extrémité est aussi introduit dans le lit.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Après l'établissement du régime thermique avec le sable seul, pour une température de consigne et une vitesse de l'air données, on fixe les durées des périodes d'aération et de relaxation à l'aide du relais électromécanique qui actionne d'une manière automatique l'ouverture et la fermeture des vannes A et B, puis on introduit une masse connue de maïs dans le lit de sable. En plus de l'enregistrement de la température du lit et celle du grain au cours de l'opération, nous avons suivi sur des échantillons prélevés régulièrement pendant les périodes d'aération les évolutions simultanées de la teneur en eau des grains, de la qualité des protéines de maïs salino-solubles et de la qualité amidonnaire.

A cet effet, un échantillon de 35 g de maïs est broyé dont 7 g sont étuvés à 130°C pendant 24 h permettant de connaître la teneur en eau des grains.

La qualité des protéines salino-solubles est associée à l'absorbance de l'extrait protéique obtenu par filtration d'une suspension constituée de 5 g du broyat de maïs et de 100 cm³ d'une solution saline à 1% en NaCl. Quant à la qualité amidonnaire, elle représente la facilité de séparation de l'amidon et des protéines du grain et est caractérisée par un indice (IS) obtenu moyennant un abaque exprimant la variation de la netteté de séparation en fonction du rapport du volume d'amidon déposé au volume total de la suspension.

Ces différentes procédures décrites en détail dans la réf. [3] ont été répétées deux fois sur le même échantillon prélevé, ce qui permet de calculer des valeurs moyennes pour les différents grandeurs; l'écart étant inférieur à 5%. Signalons que des procédures similaires complétées par d'autres analyses sont utilisées par l'Association Générale des Producteurs de Maïs (AGPM) pour estimer la valeur commerciale du grain.

MODELISATION DU COUPLAGE DYNAMIQUE SECHAGE-QUALITE DE MAÏS

Les résultats d'études précédentes de séchage de maïs en couche fluidisée à flottation et à débit continu d'air chaud [3, 10] ont permis de conclure d'une part que la cinétique de séchage est contrôlée par la diffusion de l'humidité sous forme liquide à l'intérieur du grain, et d'autre part de proposer un modèle de type conductif-diffusif parfaitement adapté à l'évolution de teneur en eau et deux lois empiriques expérimentant l'évolution au cours de séchage respectivement de la dénaturation des protéines salino-solubles et de l'indice de séparation de l'amidon et des protéines (qualité amidonnaire). Ces différentes lois sont regroupées dans le tableau 1.

Le modèle développé couple la dynamique de la cinétique de déshydratation du maïs et celle de la

dégradation de la qualité des grains au cours de l'opération. Il repose sur :

- l'écriture des bilans différentiels couplés de matière et de chaleur sur un élément de volume du grain ;
- l'écriture des bilans globaux de matière et de chaleur sur l'ensemble du séchoir permettant ainsi le couplage entre le modèle local (grain) et celui du séchoir ;
- la prise en compte des différentes transformations que subissent les constituants du grain, à savoir la dénaturation des protéines et la dégradation de sa qualité amidonnaire.

Les principales hypothèses de ce modèle sont les suivantes :

- (1) Les grains de maïs sont sphériques, isotropes et leur taille n'évolue pas au cours de séchage.
- (2) La chaleur massique des grains et le coefficient de diffusion de l'humidité à l'intérieur du grain varient en fonction de la teneur en eau et la température des grains. Par contre, la conductivité thermique est supposée constante.
- (3) Les transferts sont considérés unidirectionnels, l'eau diffuse sous forme condensée, et la chaleur se propage par conduction.
- (4) Les phases gaz et solide dans le séchoir sont considérées bien mélangées.
- (5) Le séchoir est adiabatique.
- (6) La dégradation de la qualité des grains ne consomme pas d'humidité.

Les équations du modèle (6)–(9) sont consignées dans le tableau 2. Elles sont complétées par les conditions initiales et aux limites au niveau du grain exprimées par les équations (10)–(13) (tableau 3).

Le modèle est donc constitué d'un système de six équations (2), (5), et (6)–(9), dont la résolution fournit l'évolution des profils de température et de teneur en eau au cours du temps, leurs valeurs moyennes, la température du séchoir et l'humidité de l'air, ainsi que l'évolution de la qualité des grains au cours du séchage exprimée par la variation de l'absorbance et celle de l'indice de séparation.

Le traitement des équations nécessite une estimation de ses paramètres. L'équilibre de sorption, l'humidité de l'air à saturation et les coefficients de transferts convectifs de chaleur et de matière sont évalués à l'aide des relations (14)–(17) (tableau 4). Quant aux expressions des propriétés physiques de l'air et de celles du maïs, elles sont présentées dans l'annexe.

Le traitement des équations du modèle a été réalisé par une méthode itérative. Les équations différentielles aux dérivées partielles sont d'abord linéarisées, puis intégrées par la méthode de différences finies de type Crank–Nicolson, alors que l'intégration des autres équations est faite par la méthode de Newton.

Notons que ce modèle a été validé, tant sur le plan de transfert thermique (évolution des températures de

Tableau 1. Expressions du coefficient de diffusion, de la vitesse de dénaturation des protéines salino-solubles et celle de la dégradation de la qualité amidonnaire de maïs

	Equations	Références
Coefficient de diffusion	$\mathcal{D} = 1,905 \times 10^{-7} X_0 \exp\left(-\frac{17875}{\mathcal{R}(T+275)}\right) \times \exp[(1,83 \times 10^{-2}(T+273) - 2,37)X]$	(1) [3]
Cinétique de dénaturation des protéines de maïs	$-\frac{dA}{dt} = 1,7 \times 10^{17} \exp\left[-\frac{131,810^3}{\mathcal{R}(T_g+273)}\right] (A-A^*)^2 (\bar{X}-\bar{X}_e)$	(2) [3]
Absorbance limite	$A^* = 1,350 - 5,349 \times 10^{-2} (T_a - 60) + 8,233 \times 10^{-4} (T_a - 60)^2 - 4,902 \times 10^{-6} (T_a - 60)^3 \text{ pour } 60 < T_a \leq 120^\circ\text{C}$	(3) [3]
Humidité du solide à l'équilibre	$\bar{X}_e = \left[-\frac{\ln(1-HR)}{1,395 \times 10^{-5} T^{4,3}}\right]^{1/3,28}$	(4) [1]
Cinétique de dégradation de la qualité amidonnaire	$-\frac{d(IS)}{dt} = 6,947 \times 10^{11} \exp\left[-\frac{2,786 \times 10^5}{T_g+273}\right] X_0 (\bar{X}-\bar{X}_e) IS$	(5) [3]

Tableau 2. Equations de bilans de matière et de chaleur pour le grain et le séchoir

	Grain
Bilan matière	$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \mathcal{D} \frac{\partial X}{\partial r} \right) = \frac{\partial X}{\partial t}$
Bilan thermique	$\frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial t}$
	Sechoir
Bilan global de matière	$\frac{dY_{as}}{dt} = \frac{J_{xs} A_g N_g - G_a (Y_{as} - Y_{ae})}{\rho_a H A_c \varepsilon}$
Bilan global de chaleur	$\frac{dT_{as}}{dt} = \frac{G_a \int_{T_{as}}^T c_{pa} dT + G_a Y_{ae} \int_{T_{as}}^{T_{ae}} c_{pv} dT - h A_g N_g (T_{as} - T_{gi})}{m_s c_{ps} + \rho_a H A_c \varepsilon c_{pv} Y_{as}}$

Tableau 3. Expressions des conditions initiales et aux limites relatives au grain

	Condition initiale
	$t = 0, \quad 0 \leq r \leq R: \quad X = X_0 \quad \text{et} \quad T = T_0$
	Conditions aux limites
au centre du grain :	$\forall t, \quad r = 0: \quad \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0$
à la surface :	$h(T_{as} - T_{gi}) = \lambda_g \left[\frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r=R} + J_{XS} \left[\Delta H_v - \int_{T^*}^{T_{ps}} (c_{pl} - c_{pv}) dT \right]$
	$\text{et} \quad J_{XS} = -\mathcal{D} \rho_{ps} \left[\frac{\partial X}{\partial r} \right]_{r=R} = k(Y_R - Y_{as}) \rho_a$

Tableau 4. Expressions des paramètres du modèle

	Equations		Références
Humidité de l'air à la surface du grain (équilibre de sorption)	$Y_R = Y_{sat}[1 - \exp(-1,35 \times 10^{-5} T^{4,3} X_{gi}^{3,28})]$	(14)	[3]
Humidité de l'air à saturation	$Y_{sat} = \frac{1,0 \cdot 10^5}{8,32(T+273)} \exp\left(14,02 - \frac{5215}{(T+273)}\right)$	(15)	[11]
Coefficient d'échange de chaleur par convection	$h = 3,254 \frac{\lambda_g (d_s^3 g (\rho_s - \rho_a) \rho_a)^{0,104}}{\mu_a^2} \left(\frac{d_g}{d_s}\right)^{0,464}$	(16)	[12]
Coefficient d'échange de matière par convection	$k = 34,565 \frac{D}{d_g} \left(\frac{\mu_g}{\lambda_g D}\right)^{0,333}$	(17)	[12]

grains et du lit) que sur le plan des cinétiques de déshydratation, sur des résultats de séchage de maïs en lit fluidisé à flottation obtenus pour différentes conditions opératoires [3].

SIMULATION DU SECHAGE INTERMITTENT

Nous avons adapté le modèle pour simuler le séchage intermittent. Au niveau des paramètres, la seule modification réside dans l'estimation des coefficients de transferts. Pendant la période d'aération, ces grandeurs sont calculées au moyen des équations (16) et (17) du tableau 4, comme dans le cas du séchage à débit continu d'air chaud. Cependant, pendant la phase de repos, le manque d'informations concernant les coefficients de transferts autour des particules humides immergées dans un lit fixe de particules inertes non irriguées par le gaz nous a conduits comme d'autres auteurs [6, 7, 12] à prendre des valeurs nulles pour ces coefficients.

Signalons que cette hypothèse peut conduire à une sous-estimation de la teneur en eau des grains pendant les premières minutes de la période de repos où l'humidité de l'air entourant les grains n'a pas encore atteint sa valeur à saturation.

Les essais de la simulation ont été réalisés à 60 et 90°C. Le choix de la température de 60°C a été guidé par le fait que pour des températures inférieures à 70°C les qualités amidonnière et protéique sont intactes [3]. Ainsi, le séchage à cette température permet le découplage des cinétiques de déshydratation et de dégradation de la qualité des grains. Elle doit permettre de mettre en évidence l'intérêt du séchage intermittent sur le plan énergétique. Par contre, les essais effectués à 90°C devraient nous permettre de vérifier les avantages du séchage intermittent non seulement sur la vitesse de déshydratation mais aussi sur la qualité du produit.

RESULTATS DE LA SIMULATION

La Figure 2a et b correspondent à des résultats de simulation obtenus à 60°C pour des durées des périodes d'aération de 20 min et de repos de 60 min. Elles

traduisent l'évolution de la teneur en eau des grains respectivement en fonction du temps écoulé depuis le début de l'opération (temps global correspondant à sept cycles de séchage) et de la durée totale d'aération. Nous avons porté également sur la Fig. 2b les résultats correspondant au séchage à débit continu d'air.

On remarque que, bien que le temps global soit plus long (Fig. 2a), le séchage intermittent nécessite un temps total d'aération plus court pour obtenir la même teneur en eau finale (Fig. 2b). A titre d'exemple,

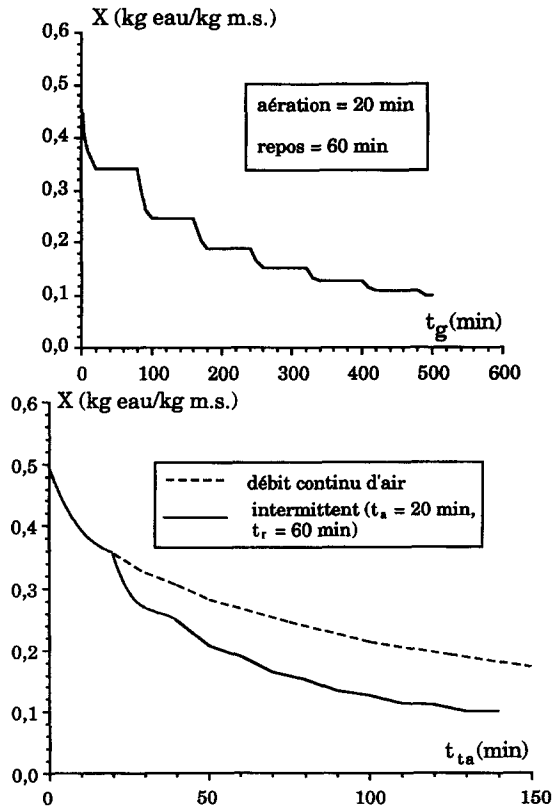


Fig. 2. (a) Evolution de la teneur en eau lors du séchage intermittent en lit fluidisé à flottation (simulation, $X_0 = 51,2\%$, $T_a = 60^\circ\text{C}$, $t_a = 20$ min, $t_r = 40$ min), (b) comparaison entre le séchage intermittent et à débit continu d'air chaud (simulation, $X_0 = 51,2\%$, $T_a = 60^\circ\text{C}$, $t_a = 20$ min, $t_r = 40$ min).

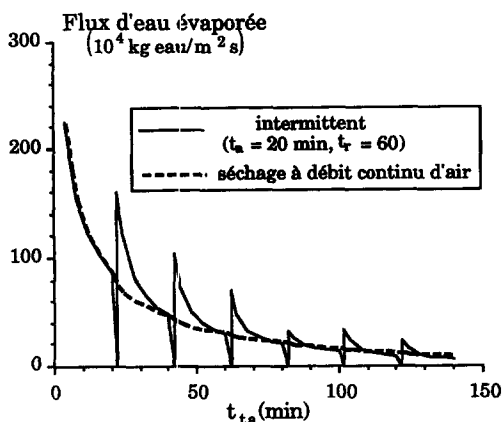


Fig. 3. Evolution de la densité de flux d'eau évaporée lors des séchages intermittent et continu (simulation, X₀ = 51,2%, T_a = 60°C).

pour atteindre une teneur en eau finale des grains de 13%, le temps total d'aération est de l'ordre de 110 min alors que le temps correspondant lors du séchage continu est de 250 min, ce qui correspond à une réduction significative de la consommation énergétique.

Les conséquences de l'alternance des périodes d'aération et de repos sur la déshydratation des grains par rapport au séchage à débit continu d'air sont bien illustrées sur la Fig. 3. On constate que la reprise d'une période d'aération après une phase de repos conduit à une augmentation de la vitesse de séchage par rapport à celle relevée à la fin de la période d'aération précédente. Le séchage intermittent conduit donc à une déshydratation plus rapide que le séchage à débit continu d'air chaud.

Nous avons porté aussi sur la Fig. 4 le profil de teneur en eau dans le grain avant et après la première période de repos (premier cycle de séchage). On remarque un fort gradient d'humidité à la périphérie du grain au début de la période de repos, alors qu'à la fin de celle-ci le profil de teneur en eau dans le grain devient pratiquement uniforme suite à la migration de l'humidité.

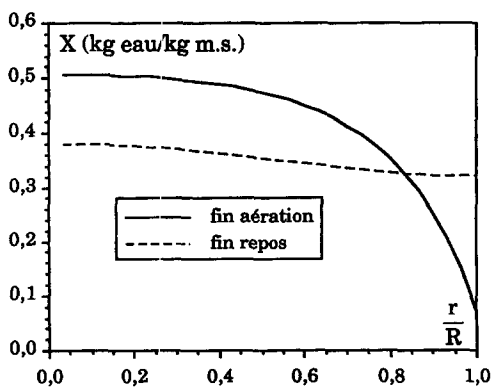


Fig. 4. Profil de teneur en eau dans le grain à la fin du premier cycle aération/repos (simulation, X₀ = 51,2%, T_a = 60°C, t_a = 20 min, t_r = 60 min).

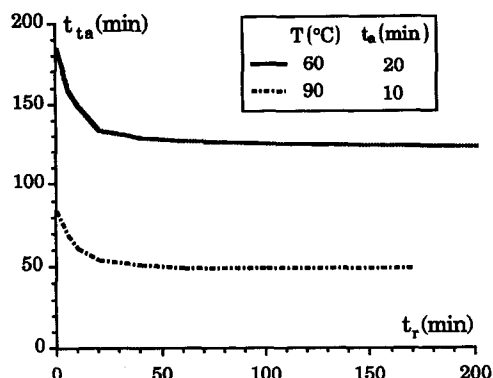


Fig. 5. Evolution du temps total d'aération pour X = 13,2% en fonction de la durée de la période de repos (X₀ = 51,2 et 41,2%).

Pour étudier l'influence de la durée de la période de repos sur le processus de déshydratation, le séchage intermittent a été simulé pour les températures de 60 et 90°C en fixant les durées de la période d'aération respectivement à 20 et 10 minutes.

Nous avons porté sur la Fig. 5 l'évolution du temps total d'aération nécessaire pour atteindre une teneur en eau du grain de 13% en fonction de la durée de repos. Nous remarquons que le temps total d'aération diminue brutalement avec la durée de la période de repos pour des valeurs de ce facteur inférieures ou égales à 20 et 40 minutes (deux fois la durée d'aération) respectivement pour les températures de 90 et 60°C. Notons qu'au delà de cette valeur, le temps total d'aération tend vers une valeur constante. Ainsi, le rapport t_r/t_a pourrait avoir une influence sur la cinétique de déshydratation pour des valeurs variant entre 0 et 2.

Un autre essai de simulation a été réalisé à 90°C pour examiner l'influence de la durée de la période d'aération sur la cinétique de séchage. Le rapport t_r/t_a a été maintenu constant et égal à 6. Plusieurs valeurs de la durée de la période d'aération entre 2 et 25 min ont été retenues.

On remarque sur la Fig. 6 que le séchage est d'au-

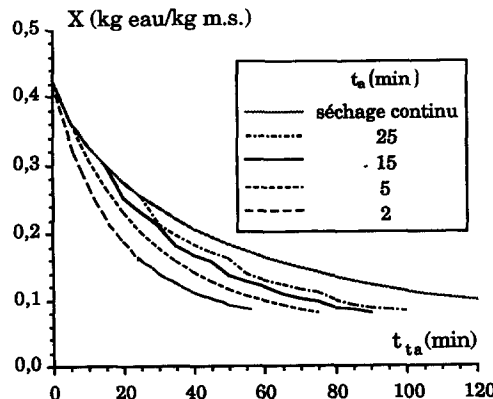


Fig. 6. Influence de la durée de la période d'aération sur l'évolution de la teneur en eau lors du séchage intermittent (simulation, X₀ = 42,5%, T_a = 90°C, t_r/t_a = 6).

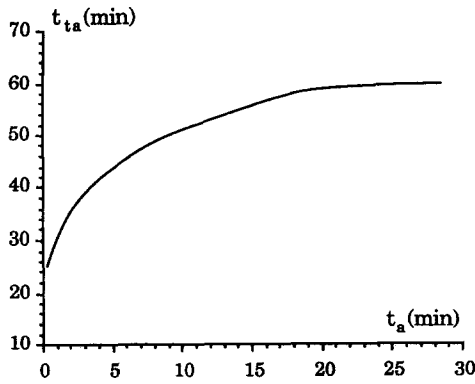


Fig. 7. Evolution du temps total d'aération pour $X = 13,2\%$ en fonction de la durée de la période d'aération (simulation, $X_0 = 42,2\%$, $T_a = 90^\circ\text{C}$, $t_r/t_a = 6$).

tant plus rapid que la durée d'aération est plus courte. Par ailleurs, la Fig. 7 illustre l'évolution du temps total d'aération correspondant à une teneur en eau finale des grains de 13% en fonction de la durée de la période d'aération. On constate qu'il passe de 60 à 25 min lorsque la durée d'aération passe de 25 à 1 min. De plus, on remarque que ce paramètre n'a pas d'influence considérable sur le temps total d'aération pour des valeurs supérieures à 15min. Les mêmes résultats ont été observés à d'autres températures.

Cette analyse théorique permet de tirer les constatations suivantes :

- la durée de la période de repos a une influence considérable sur la cinétique de séchage pour des valeurs inférieures à deux fois la durée de la phase d'aération ;
- la cinétique de séchage est influencée aussi par la durée d'aération pour des valeurs inférieures à 20 min.

ETUDE EXPERIMENTALE ET VALIDATION DES RESULTATS THEORIQUES

L'ensemble des conditions opératoires retenues pour cette étude a été regroupé dans le tableau 5. Les

essais ont été effectués aux deux températures de 60 et 90°C avec du maïs réhumidifié de teneur en eau initiale variant entre 42 et 50%.

La difficulté de la prise d'échantillon du sein du lit, pour des périodes d'aération de courtes durées, a conduit à retenir une gamme de variation de ce paramètre entre 5 et 20 min.

Par ailleurs, grâce aux conclusions tirées de la simulation, nous avons étudié l'influence de la durée de la période de repos entre 20 et 60 min.

Signalons qu'afin de ne pas charger le texte par un nombre excessif de figures, nous nous limiterons à présenter uniquement l'évolution de différentes grandeurs de l'étude en fonction du temps total d'aération.

Influence de la durée de la période de repos

L'influence du temps de repos sur la cinétique de séchage peut être dégagée d'une part des expériences 1, 2 et 3 réalisées à 60°C pour une durée d'aération de 20 min (Fig. 8) et d'autre part des expériences 5, 6 et 7 effectuées à 90°C pour une durée d'aération de 10 min (Fig. 9). Sur les mêmes figures, nous avons aussi représenté les résultats du séchage continu et les prédictions du modèle.

Nous constatons tout d'abord que le séchage inter-

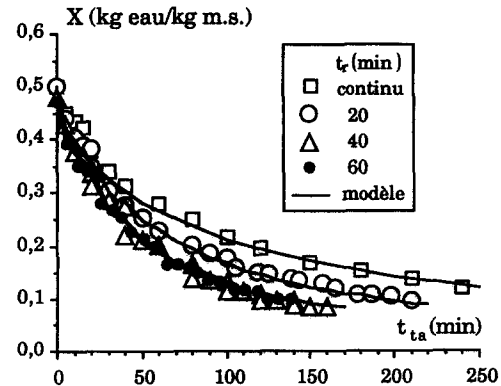


Fig. 8. Comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle. Influence de la période de repos lors du séchage intermittent en lit fluidisé à flottation (maïs réhumidifié, $X_0 = 48,3\%$, $T_a = 60^\circ\text{C}$, $t_a = 20$ min).

Tableau 5. Conditions opératoires lors du séchage intermittent de maïs en lit fluidisé à flottation

Nombre de l'essai	T_a [°C]	Aération		Repos		X_0 [b.s.]	m_g [kg]
		t [min]	U_a [m s^{-1}]	t [min]	U_a [m s^{-1}]		
1	60	20	0,26	20	0	0,500	1,8
2		20		40		0,480	
3		20		60		0,470	
4		10		40		0,418	
5	90	10	0,30	20	0	0,427	
6		10		30		0,400	
7		10		60		0,422	
8		5		30		0,455	

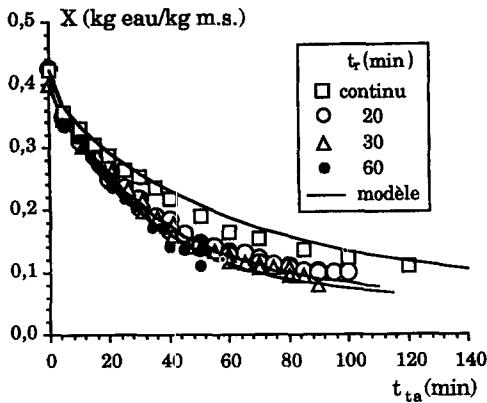


Fig. 9. Comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle. Influence de la durée de la période de repos lors du séchage intermittent en lit fluidisé à flottation (maïs réhumidifié, $\bar{X}_0 = 42\%$, $T_a = 90^\circ\text{C}$, $t_a = 10$ min).

mittent conduit à une déshydratation plus rapide que le séchage continu. Par ailleurs, le modèle prédit convenablement les résultats expérimentaux avec un écart relatif moyen qui ne dépasse jamais 5%.

En ce qui concerne l'influence de la durée de la période de repos, les résultats expérimentaux confirment les conclusions préalablement reportées lors de la simulation : ce facteur n'a pas d'influence sur la déshydratation pour des rapports t_r/t_a supérieurs à 2.

L'effet de ce paramètre sur la dégradation de la qualité du grain (dénaturation des protéines salin-solubles et facilité de la séparation amidon-protéines) étudié à 90°C (essais 5-7) est illustré sur les Figs 10 et 11.

L'observation de ces figures nous permet de tirer les constatations suivantes :

(1) L'absorbance reste pratiquement constante pendant les deux premiers cycles aération/repos. Ceci est dû au fait que le séchage pendant ces cycles a été réalisé à des températures inférieures à 70°C suite à l'introduction d'une masse importante du maïs hum-

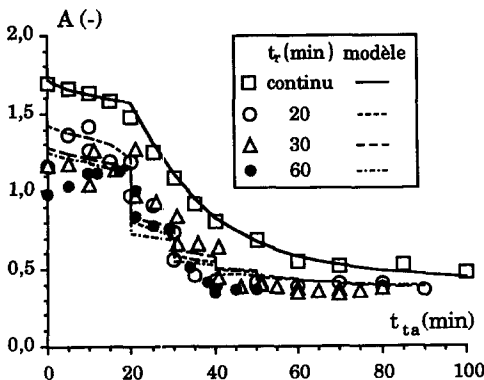


Fig. 10. Influence de la durée de la période de repos sur l'évolution de l'absorbance de l'extrait protéique en fonction du temps total d'aération lors du séchage en lit fluidisé à flottation ($M_g = 1,8$ kg, $\bar{X}_0 = 41,6\%$, $T_a = 90^\circ\text{C}$, $t_a = 10$ min).

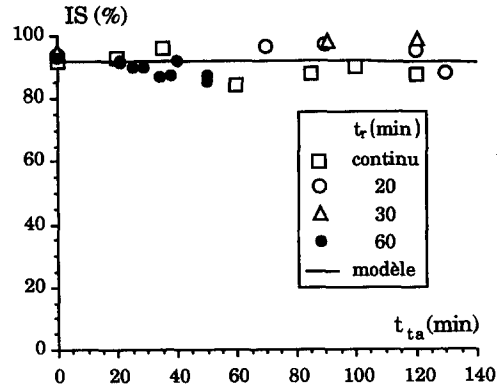


Fig. 11. Influence de la durée de la période de repos sur l'évolution de l'indice de séparation. Comparaison avec le modèle et le séchage à débit continu ($M_g = 1,8$ kg, $\bar{X}_0 = 41,6\%$, $T_a = 90^\circ\text{C}$, $t_a = 10$ min).

ide de 1,8 kg. Notons que la dénaturation des protéines ne commence qu'à partir de 75°C .

(2) L'absorbance diminue continuellement même pendant les périodes de repos pour atteindre une valeur limite après un temps total d'aération de 40 min. Notons que la température du lit pendant la phase de repos reste pratiquement constante.

(3) La durée de la phase de repos n'a pas une influence considérable sur la dénaturation des protéines.

(4) L'indice de séparation amidon-protéines, caractérisant la qualité amidonnière des grains, est d'une part pratiquement constant tout le long de l'opération et d'autre part indépendant de la durée de la phase de repos.

(5) La loi cinétique représentée par l'équation (13) prédit assez bien la cinétique de dénaturation des protéines de maïs au cours du séchage.

(6) Le séchage intermittent ne permet pas d'améliorer la qualité du grain par rapport au séchage à débit continu d'air. Ces résultats ne sont pas tout à fait surprenant à partir du moment où la dégradation de la qualité amidonnière débute à des températures supérieures ou égales à 90°C . Quant à la dénaturation des protéines, les résultats montrent une fois de plus que ce phénomène est fortement lié à la température du grain et faiblement influencée par le mode du séchage.

Influence de la durée de la phase d'aération

L'influence de ce paramètre sur la cinétique de déshydratation peut être déduite des résultats des expériences 2 et 4 réalisées à 60°C (Fig. 12) et des expériences 6 et 8 à 90°C (Fig. 13). Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les prédictions du modèle pour les deux températures considérées. On peut signaler que dans la gamme de variation de la durée d'aération, ce paramètre a une moindre influence que celle de la durée de repos.

En ce qui concerne l'influence de la durée de la période d'aération sur l'évolution de la qualité amidonnière, nos résultats expérimentaux ont montré que la qualité du maïs n'est pas affectée par ce paramètre.

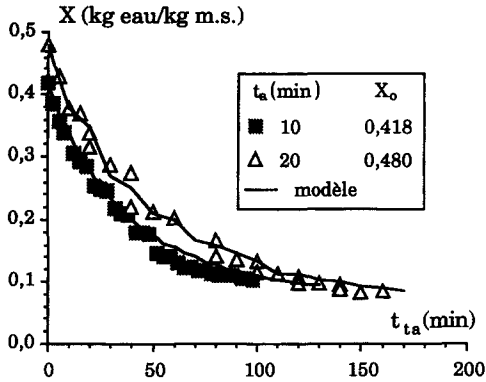


Fig. 12. Influence de la durée de la période d'aération sur l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps total d'aération lors du séchage intermittent en lit fluidisé à flottation. Comparaison avec le modèle ($M_g = 0,8$ kg, $T_a = 60^\circ\text{C}$, $t_a = 40$ min).

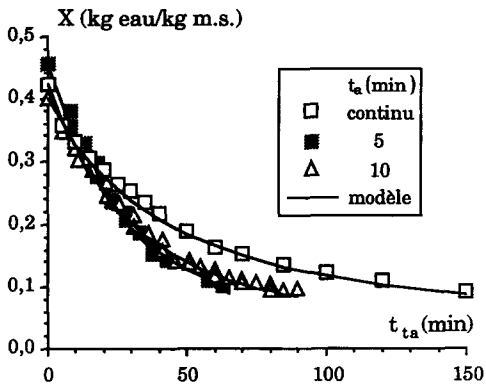


Fig. 13. Influence de la durée de la période d'aération sur l'évolution de la teneur en eau lors du séchage intermittent et continu en lit fluidisé à flottation. Comparaison avec le modèle ($M_g = 1,8$ kg, $X_0 = 42,6\%$, $T_a = 90^\circ\text{C}$, $t_r = 30$ min).

CONCLUSION

Les résultats relatifs à l'étude du séchage intermittent ont montré que :

(1) La possibilité de redistribution interne de l'humidité pendant les périodes de repos permet de débiter les périodes de séchage avec des gradients d'humidité restaurés à une forte valeur. Ce qui conduit à une augmentation de la vitesse de déshydratation lors des phases d'aération.

(2) Pour les conditions opératoires retenues, le temps de repos n'a pratiquement pas d'influence sur le temps total d'aération pour des valeurs supérieures à deux fois la durée d'aération.

(3) La durée du repos ainsi que celle de la phase d'aération n'ont pratiquement pas d'influence sur l'évolution de la qualité du maïs au cours de séchage.

(4) Le séchage intermittent permet de réduire le temps de déshydratation de plus de moitié par référence au séchage à débit continu d'air chaud, ce qui permet une réduction significative de la con-

sommation énergétique de l'ordre de 50% en comparaison avec le séchage en absence de recyclage d'air. Cependant, le séchage intermittent ne conduit pas à une amélioration de la qualité du maïs, en particulier la qualité protéique.

(5) Le modèle de simulation prédit convenablement la cinétique de séchage et d'évolution de la qualité protéique et amidonnaire des grains lors du séchage intermittent.

Remerciements—Nous tenons à remercier le Conseil Régional de Midi-Pyrénées pour avoir financé en partie ces travaux de recherches.

REFERENCES

1. M. Abid, H. Gibert et C. Laguérie, An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed, *Int. Chem. Engng* **30**, 632–642 (1990).
2. S. Cobbinah, M. Abid, C. Laguérie et H. Gibert, Application of the non-linear diffusion model to the drying of cereals: a step function approximation of the variable diffusivity, in *Drying '87* (Edited by A. S. Mujumdar), Section I, pp. 24–28. Hemisphere, New York (1987).
3. M. Mourad, Contribution à l'étude des cinétiques de déshydratation et d'évolution de la qualité commerciale de maïs au cours du séchage en lit fluidisé à flottation. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique de Toulouse, I.N.P., Toulouse (1992).
4. J. F. Davidson, M. W. L. Robson et F. C. Roesler, Drying of granular solids subjected to alternating boundary conditions, *Chem. Engng Sci.* **24**, 815–828 (1969).
5. J. M. Troeger et J. L. Butler, Drying peanuts with intermittent air flow, *Trans. ASAE* **23**, 197–199 (1980).
6. Q. Zhang et A. S. Mujumdar, An optimization on intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer, *Drying Technol.* **9**, 233–244 (1991).
7. A. Lebert, Dossier d'habilitation à diriger des recherches. Institut National Polytechnique de Toulouse, France (1992).
8. M. Kulshreshtha, R. D. Singh et S. K. Srivastava, Grain drying with intermittently heated air—a simulation approach, In *Proceedings of the sixth Int. Drying Symp.* Versailles, Vol. 2, pp. PA65–67 (1988).
9. G. H. Foster, Dryaeration: heated air drying and corn quality, *Ann. Technol. Agric.* **22**, 233–244 (1973).
10. M. Mourad, M. Hémati et C. Laguérie, Séchage du maïs en lit fluidisé à flottation. étude expérimentale de la cinétique de séchage, *Chem. Engng J.* **59**, 221–228 (1995).
11. P. E. Liley, R. C. Reid et E. Buck, Physical and Chemical Data, in *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Edited by R. H. Perry, D. W. Green and J. O. Maloney), 6th edn, Chap. 3, Chem. Engng Series. McGraw-Hill, New York (1984).
12. S. Cobbinah, C. Laguérie et H. Gibert, Simultaneous heat and mass transfer between a fluidized bed of fine particles and immersed coarse porous particles, *Int. J. Heat mass Transfer* **30**, 395–400 (1987).
13. M. S. Abid, Etude du séchage en couche fluidisée à flottation. Etude des mécanismes et acquisition de données. Thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Génie Chimique de Toulouse, I.N.P., Toulouse (1983).

ANNEXE

Les propriétés physiques de l'air de séchage ont été calculées à partir des corrélations proposées dans Handbook of Chemical Engineers [11]:

$$c_{pa} = 0,9774 + 0,1124 \times 10^{-3}(T+273) + 0,19035 \times 10^{-7}(T+273)^2 \quad (\text{A1})$$

$$c_{pa} = 0,9774 + 0,1124 \times 10^{-3}(T+273) + 0,19035 \times 10^{-7}(T+273)^2 - 2,7 \times 10^{-3}(T+273)^3 \quad (\text{A2})$$

$$\rho_a = \frac{341,25}{T+273} \quad (\text{A3})$$

$$\lambda_a = 4 \times 10^{-5}(T+273) + 0,0246 \quad (\text{A4})$$

$$\mu_a = 1,66 \times 10^{-5} \left(\frac{T+273}{273} \right)^{0,756} \quad (\text{A5})$$

La chaleur massique des grains fonction de leurs température et teneur en eau est donnée par [13]:

$$c_{pg} = 5,2459 \times 10^{-2} + 2,896 \times 10^{-2}T + 1,0863X + 0,01084X^2 - 0,0195TX^2 \quad (\text{A6})$$

Les autres propriétés physiques du maïs sont récapitulées ci dessous:

$$\rho_g = 1000 \text{ kg m}^{-3} \quad R_g = 0,004 \text{ m}$$

et

$$\lambda_g = 0,142 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

INTERMITTENT DRYING OF CORN KERNELS IN A FLOTATION FLUIDIZED BED. EXPERIMENTAL STUDY AND MODELING

Abstract—This work concerns the drying of maize in a flotation fluidized bed by intermittent blowing of hot air. The aim of the study was on the one hand to determine the effect of this drying technique not only on the energy consumption, but also on the grain quality, and on the other hand to develop a mathematical model which simulates the observed phenomena. The effect of the conditions of intermittent drying as the duration of aeration and rest periods, respectively, t_a and t_r , has been examined. The ratio t_r/t_a does not affect the drying kinetics for values greater than 2. Besides, intermittent drying consumes less energy than drying with a continuous air flow because it reduces the actual drying duration by 50%. However, for the operating conditions of this study, this technique did not allow an improvement in the wet-milling quality. A mathematical model adapted to intermittent drying has been developed. This model leads to very good predictions on the evolution of air humidity, dryer temperature, grain moisture content and temperature, but also the variation of maize wet-milling and proteic qualities. This model can be used for the control of drying process under optimal conditions. Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd.