

# LE SÉCHAGE ARTIFICIEL DES FÈVES DE CACAO



M. JACQUET, J.-C. VINCENT

Laboratoire de chimie-technologie de l'IFCC à Montpellier

J. HAHN

Centre de recherches de l'IFCC en Côte d'Ivoire

R. LOTODÉ

Service de biométrie de l'IFCC à Montpellier

## INTRODUCTION

Après fermentation, les fèves de cacao sont raménées de 55 à 7 % de teneur en eau m. t. q. \*. Ce séchage permet une bonne conservation du produit en bloquant les réactions enzymatiques et en limitant les risques de développement des micro-organismes.

La majeure partie de la production est séchée au soleil. Les fèves sont disposées sur des claies, en couche mince. Cette façon de faire, qui est celle pratiquée dans les plantations de petite taille, ne peut être envisagée à l'échelle industrielle. Elle implique en effet de grandes surfaces et une main-d'œuvre abondante. Par ailleurs, elle est insuffisante lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables, le produit reprenant de l'eau en atmosphère humide (cf. isothermes de sorption). Dans ce cas un séchage artificiel complémentaire est nécessaire. Le cacao insuffisamment sec se dégrade rapidement sous l'action des moisissures et des insectes. Des réactions enzymatiques dues aux lipases et aux lipoxygénases sont possibles. Le séchage artificiel tendant à se développer, il est nécessaire d'en étudier les conséquences sur les transferts de masse et de chaleur et sur les qualités du produit obtenu.

Le but de l'étude consiste à :

— tracer les courbes de séchage pour différentes conditions expérimentales de manière à préciser les coefficients de transfert,

(\*) m. t. q. : matière telle quelle.

— comparer les caractéristiques des cacaos obtenus par séchage artificiel à des témoins, de même origine, soumis à un séchage solaire.

## Données bibliographiques

### Types de séchoirs utilisés

— Séchoirs Samoa (1, 2, 3)

De conception rustique, les appareils Samoa assurent le séchage des fèves par convection naturelle de l'air à partir d'un calorifère (échangeur constitué par des fûts soudés bout à bout). La source de chaleur est un foyer à bois.

— Séchoirs mécaniques

Dans les séchoirs mécaniques, le produit humide est traversé par un courant d'air chaud. On utilise des séchoirs à tambour (3, 4) ou de type statique (3, 4, 5, 6).

### Caractéristiques des cacaos séchés artificiellement

Si le séchage artificiel permet une économie de temps et conduit à un produit fini plus homogène, de teneur en eau suffisamment basse, il pose, en revanche, un problème de qualité des fèves de cacao.

De nombreux auteurs signalent que les fèves de cacao obtenues par séchage artificiel présentent :

10 AVRIL 1981

Café Cacao Thé, vol. XXIV, n° 1, janv.-mars 1980

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 2M ex 1

Cote : B

— une acidité plus forte que celles qui sont obtenues par séchage solaire (7),

— un goût « fruité » caractéristique qui semble dû à une teneur plus forte en acide acétique (3, 7).

Il est généralement recommandé de sécher le cacao à une température modérée (inférieure à 80 °C) (1, 3, 6, 8), car une température plus haute

favorise la rétention de l'acidité dans les cotylédons (7).

#### Cinétiques de séchage

A notre connaissance, les cinétiques de séchage artificiel du cacao ont été peu étudiées. Quelques courbes de séchage sont néanmoins fournies par la littérature (1, 9, 10, 11, 12).

## ÉTUDE CINÉTIQUE

Matériel et méthodes expérimentales

Le séchoir utilisé est un appareil pilote de type

— un générateur d'air chaud direct (brûleur à fuel et ventilateur centrifuge),

— un venturi, situé entre le générateur et le caisson, permettant la mesure du débit d'air chaud.

Le produit à sécher est contenu dans la caisse ; pour effectuer les brassages nécessaires, afin d'éviter les prises en masse, on dispose la caisse sur un jeu de tréteaux et on lui fait subir un mouvement de rotation.

Des sondes thermométriques sont mises en place :

— dans le caisson (température de l'air de séchage incident),

— dans la masse de cacao (température du mélange air-produit),

— au-dessus du produit (température de l'air à la sortie du lit de fèves).

On relève également la température et l'hygrométrie de l'air ambiant.

### Conduite d'un essai de séchage

Une quantité connue de fèves de cacao fermentées et humides est placée dans la caisse ; on note l'épaisseur de produit.

Un échantillon de ce cacao est mis à sécher au soleil pour constituer le témoin, « séchage solaire » ; il est affecté de la référence S.

La teneur en eau du cacao fermenté humide est déterminée à l'étuve (13).

On met en route le séchage en fixant la température et le débit de l'air de séchage.

Toutes les trente minutes, le contenu de la caisse est brassé et celle-ci pesée afin de suivre l'évolution de la masse du produit.

En fin d'expérience, on prélève un échantillon, qui est affecté de la référence A. On détermine sa teneur en eau à l'étuve (13).

## Résultats expérimentaux

### Courbes de séchage

On a présenté sous forme de graphiques, en fonction du temps :

— l'évolution de la teneur en eau m. t. q. du produit (courbe de séchage),

— la température de l'air de séchage,

— la température du mélange air-produit,

— la température de l'air à la sortie du lit.

Douze expérimentations ont été réalisées sur cacao : les courbes tracées pour chacune d'entre elles (teneurs en eau m. t. q., fig. 2 à 13) sont données.

### Interprétation des courbes de séchage

[approche de Loncin (14)]

Une courbe de séchage peut être divisée en trois périodes distinctes :

— le produit se met en température ;

### NOMENCLATURE DES NOTATIONS

$A_s$	surface spécifique d'échange.....	( $m^2/kg$ )
$e$	épaisseur de la couche de produit.....	( $m$ )
ERH	degré hygrométrique d'équilibre.....	(sans dimension)
$E_{op}$	coefficient de transfert de matière.....	( $kg/m^2 \cdot s \cdot \Delta p$ )
$K$	coefficient de transfert de chaleur.....	( $kcal/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ )
$l$	demi-épaisseur de la fève de cacao.....	( $m$ )
$n_s$	concentration du produit en eau.....	( $kg \text{ d'eau/kg de m. s.}^*$ )
$n_{sa}$	concentration moyenne du produit en eau.....	( $kg \text{ d'eau/kg de m. s.}$ )
$n_{ss}$	concentration superficielle du produit en eau.....	( $kg \text{ d'eau/kg de m. s.}$ )
$n_{sl}$	concentration en eau limite.....	( $kg \text{ d'eau/kg de m. s.}$ )
$n_{scr}$	teneur en eau critique.....	( $kg \text{ d'eau/kg de m. s.}$ )
$p$	pression partielle de l'eau dans l'air de séchage.....	(Pascal)
$p_e$	tension de vapeur de l'eau à la température $t_e$ du thermomètre humide ...	(Pascal)
$p_e'$	tension de vapeur de l'eau à la température $t_e'$ .....	(Pascal)
$r_d$	résistance à la diffusion.....	(MKS)
$r_s$	résistance au séchage.....	(MKS)
$t$	température de l'air de séchage.....	( $^\circ C$ )
$t_e$	température du thermomètre humide.....	( $^\circ C$ )
$t_e'$	température du produit (séchage non adiabatique).....	( $^\circ C$ )
$v$	vitesse de l'air.....	( $m/s$ )
$\epsilon_{ns}$	coefficient de diffusion du liquide dans le solide.....	( $kg/m^2 \cdot s$ )
$\theta$	temps.....	( $s$ )
$\lambda$	chaleur de vaporisation de l'eau.....	( $kcal/kg$ )
$\Phi$	quantité de chaleur transférée par $kg$ de m. s.....	( $kcal/kg$ )

\* m. s. : matière sèche

CACAO 8/11/78

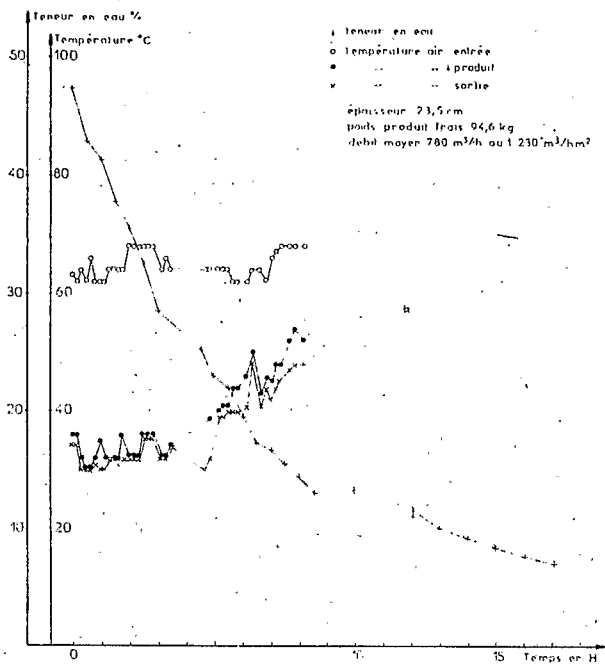


Fig. 2

CACAO 14/11/78

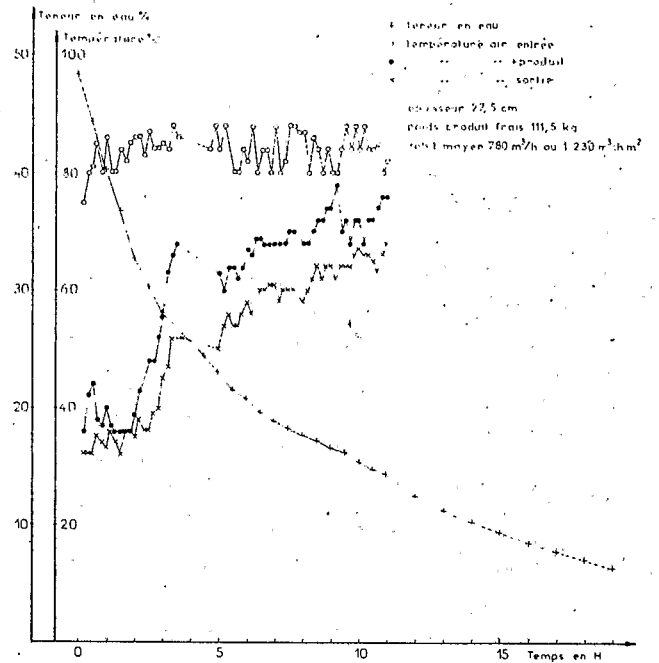


Fig. 4

CACAO 13/11/78

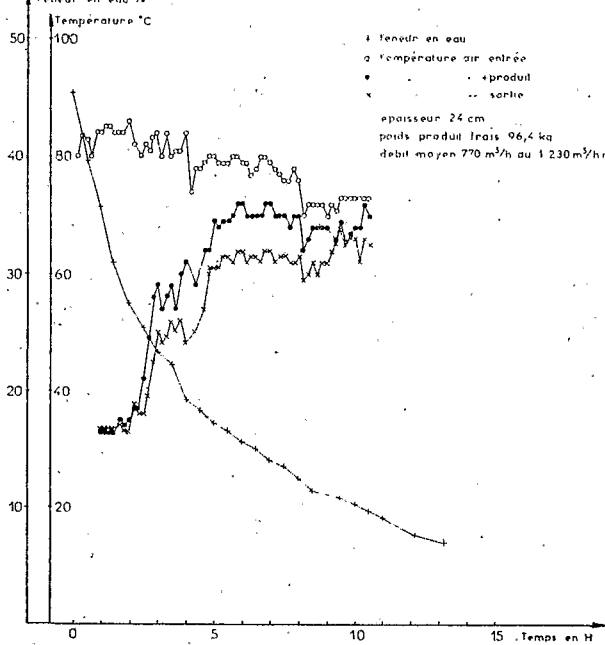


Fig. 3

CACAO 15/11/78

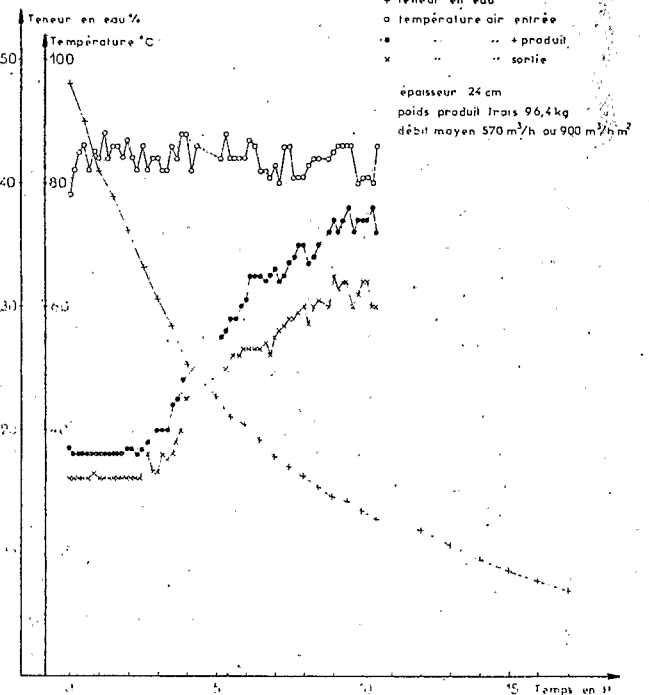


Fig. 5

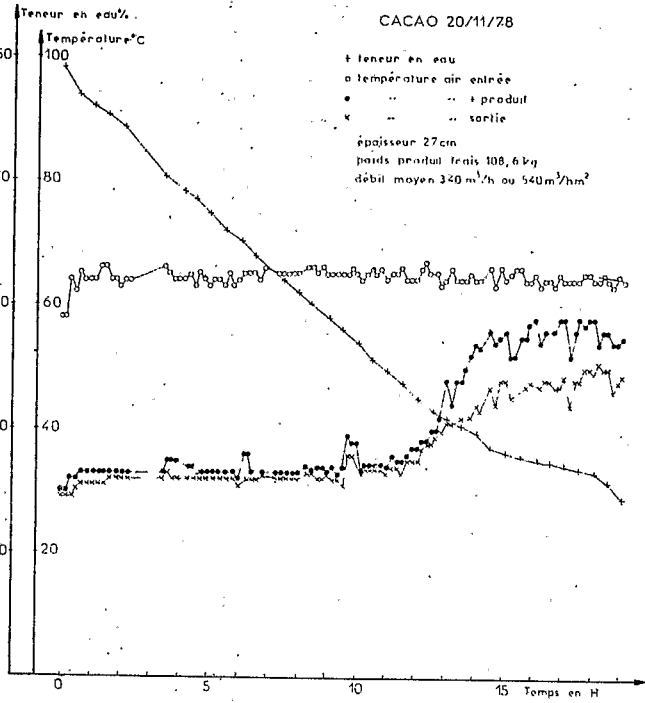


Fig. 6

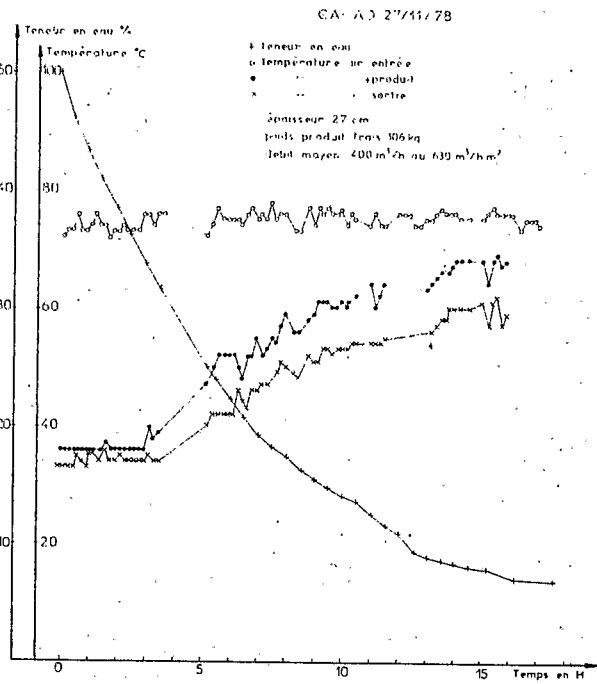


Fig. 8

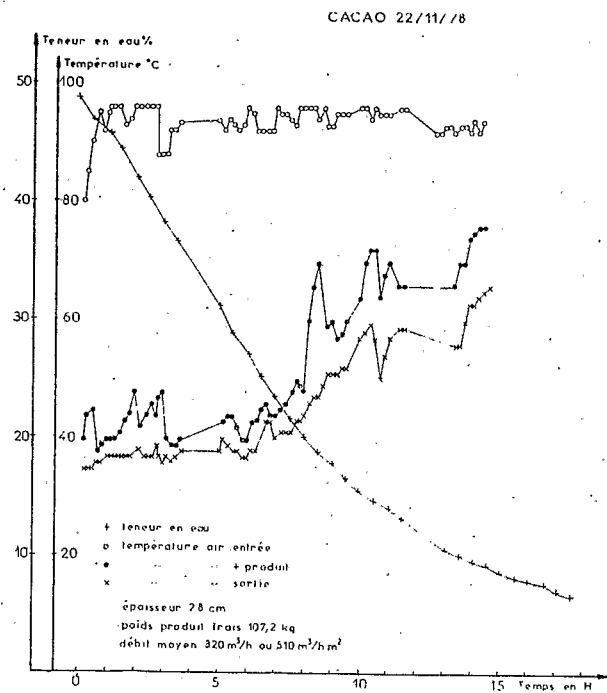


Fig. 7

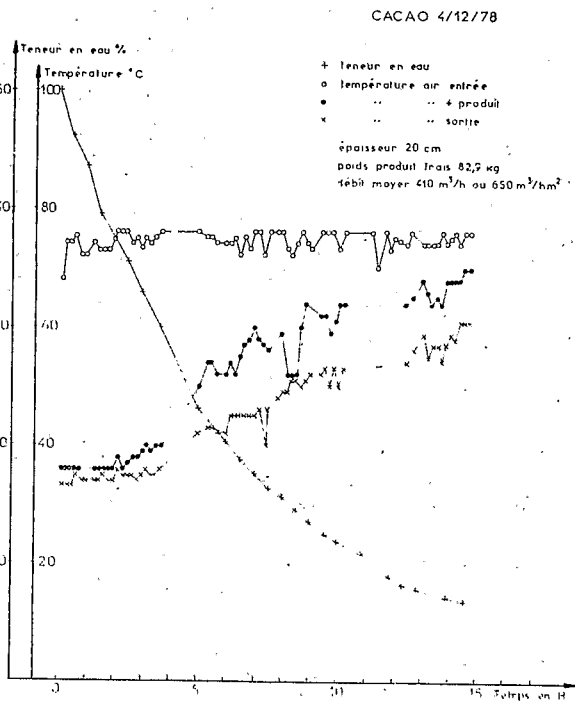
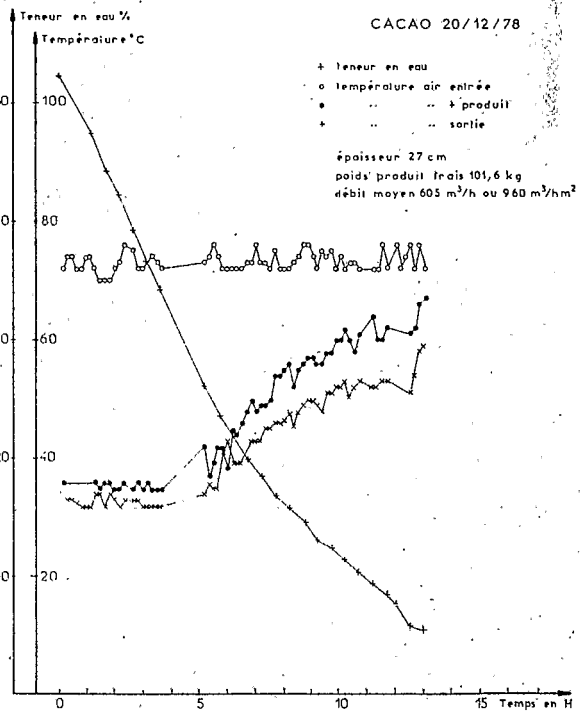
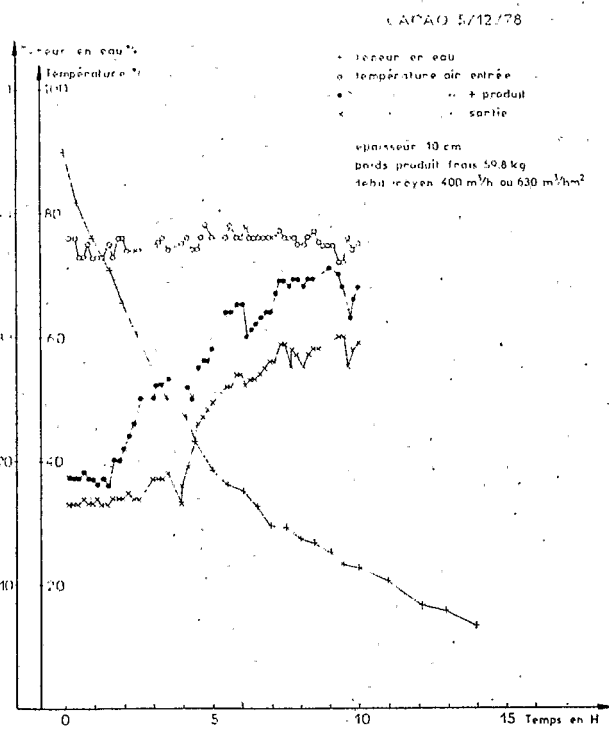
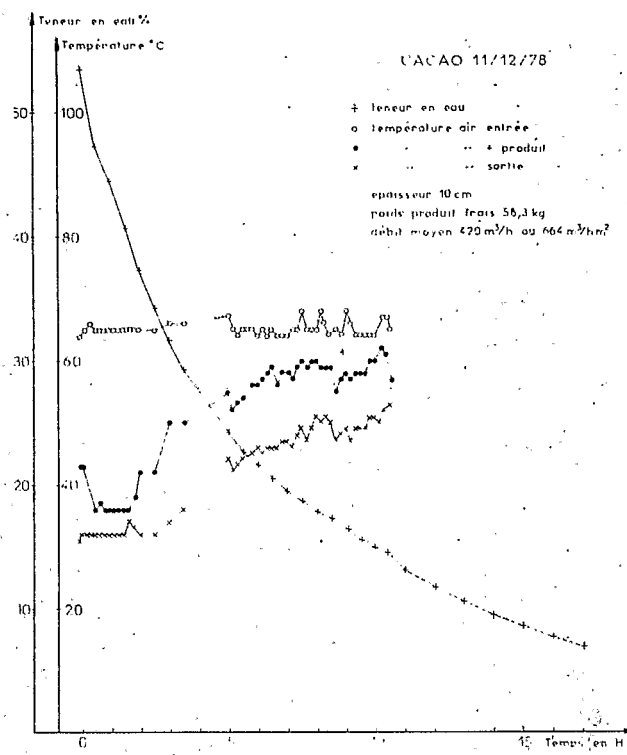
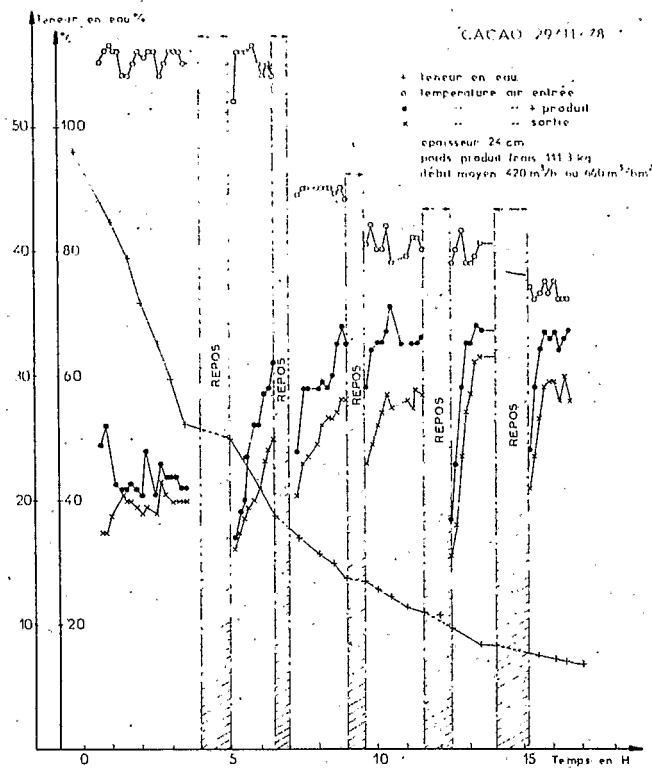


Fig. 9



— l'allure de séchage est constante (la température du produit est également constante) ;

— l'allure du séchage diminue en fonction du temps et tend vers zéro ; la teneur en eau du produit tend vers une limite (correspondant à l'équilibre du produit avec l'air de séchage) ; la température du produit augmente et ne se stabiliserait que si le séchage était poussé jusqu'à l'équilibre.

### Période à allure constante

Le transfert de matière s'exprime par :

$$\frac{dn_s}{d\theta} = A_s E_{op}(p'_e - p) \quad (a)$$

Ce transfert de matière est compensé par un transfert de chaleur :

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = A_s \cdot K(t - t_c)$$

Dans le cas d'un séchage adiabatique (c'est-à-dire quand la matière se trouve à la température du thermomètre humide), l'expression (a) est équivalente à :

$$\frac{dn_s}{d\theta} = A_s \frac{K}{\lambda} (t - t_c) \quad (b)$$

Dans le cas d'un séchage adiabatique, on utilisera l'équation (b), les valeurs de  $K/\lambda$  sont données (14) en fonction de la vitesse  $v$  de l'air au niveau des fèves dans l'intervalle  $0,5 \leq v \leq 8$  m/s (fig. 14).

• Si la vitesse de l'air se trouve dans cet intervalle,  $t$ ,  $t_c$  et  $dn_s/d\theta$  étant déterminés par l'expérience, on peut calculer  $A_s$  puis  $E_{op}$ .

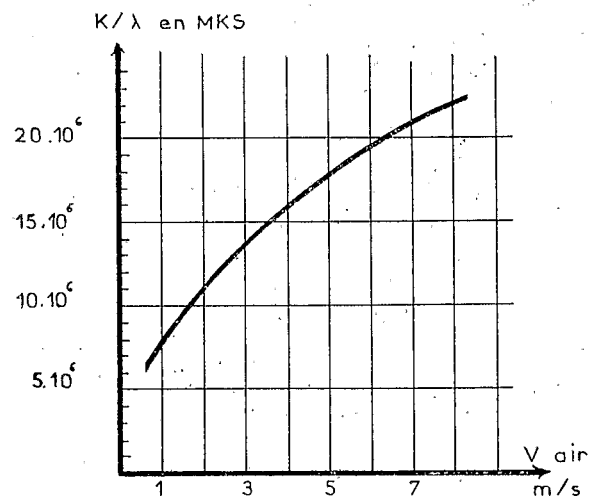


Fig. 14. — Evolution du rapport  $K/\lambda$  en fonction de la vitesse de l'air

• Si  $v < 0,5$  m/s,  $A_s$  étant fixé, on estimera  $K/\lambda$ .

Dans le cas d'un séchage non adiabatique, le cacao se trouve à une température  $t_c''$  supérieure à  $t_c$ .

L'allure du transfert s'écrit :

$$\frac{dn_s}{d\theta} = A_s E_{op}(p_c'' - p_c)$$

$A_s$ ,  $p_c''$  et  $t_c$  étant déterminés expérimentalement,  $dn_s/d\theta$  étant donné par l'expérience, on peut calculer  $E_{op}$ .

$K/\lambda E_{op}$  variant peu avec  $v$  et étant estimé par les points obtenus en séchage adiabatique ou à vitesse élevée, on pourra évaluer  $K/\lambda$  pour les faibles vitesses.

La vitesse de l'air est calculée connaissant le débit d'air (mesuré) et la porosité  $P_r$  du cacao :

— cacao fermenté (53 % de teneur en eau m. t. q.) :  $P_r = 0,333$ ,

— cacao sec (6,5 % de teneur en eau m. t. q.) :  $P_r = 0,540$ .

Une porosité moyenne a été calculée pour chaque phase constante.

### Période à allure ralentie

Le séchage s'effectue à allure constante tant que la tension de vapeur de l'eau à la surface des fèves est égale à celle de l'eau pure (ERH = 1). A partir du moment où la tension de vapeur de l'eau contenue dans la matière à la surface de la fève devient plus faible que celle de l'eau pure (ERH devient alors inférieur à 1), on entre dans la période de séchage ralenti.

Par ailleurs, le liquide, à l'intérieur de la phase solide, se répartit de façon parabolique. Le gradient de concentration devient, en surface :

$$\frac{dn_s}{dz_{surface}} = \frac{-3(n_{sa} - n_{ss})}{1}$$

avec

$n_{ss}$  : concentration superficielle (généralement inconnue) du cacao en eau (en kg d'eau/kg m. s.).

Deux phénomènes expliquent donc le ralentissement de l'allure de séchage :

- abaissement du ERH du produit au-dessous de 1,
- diffusion du centre vers la surface de la fève.

Ainsi l'allure de la courbe de séchage peut s'écrire (pour la phase ralentie) (14) :

$$n_{sa} - n_{st} = C e \left( -\frac{A_s}{r_d + r_s} \right) \theta$$

avec

$C$  : constante d'intégration ;

$n_{sl}$  : teneur en eau limite vers laquelle tend le produit dans les conditions de séchage appliquées (en kg d'eau/kg m. s.). Nous avons déterminé  $n_{sl}$  à l'étuve.

Température de l'air en °C	65	75	85	95
$n_{sl}$	0,021 3	0,017 3	0,011 7	0,009 5

•  $r_d = 1/3 \epsilon_{ns}$  résistance à la diffusion ;  
 $\epsilon_{ns}$  dépend de la matière et reste constant tout au long du séchage ;  
 cependant si l'on travaille dans des conditions trop drastiques, on observe une décroissance de  $\epsilon_{ns}$  quand  $n_s$  décroît. C'est le phénomène de « croûtage ».

$$r_s = \frac{n_{scr} - n_{sl}}{(dH_2O/d\theta)_{11\text{hrc}}}$$

avec

$n_{scr}$  : teneur en eau critique au passage de l'allure constante à l'allure ralentie (en kg d'eau/kg de m. s.) ;

$(dH_2O/d\theta)_{11\text{hrc}}$  : quantité d'eau évaporée en kg par  $m^2$  de surface de contact.

Pour chaque courbe de séchage, une exponentielle a été ajustée donnant  $(n_s - n_{sl})$  en fonction du temps à partir du seuil  $n_{scr}$ .

On peut tirer de l'équation obtenue  $r_s$ ,  $r_d$  et  $\epsilon_{ns}$ .

Le seuil moyen de passage de la phase constante à la phase ralentie est de 42 % de teneur en eau (sur m. s.), soit près de 30 % m. t. q.

Ce seuil semble relativement élevé. L'ERH devient inférieur à 1, alors que la teneur en eau des fèves est encore forte. Ce phénomène est dû à la résistance à la diffusion et surtout au « croûtage » qui peut intervenir pour des vitesses de l'air élevées, compte tenu du fait que la fève constitue un matériau relativement épais. En étuve (système stationnaire), on observerait un seuil plus faible.

Loncín montre que l'humidité relative de l'air de séchage est voisine de  $i = n_{sl}/n_{scr}$ .

Température de l'air de séchage (°C)	$n_{sl}$	$i$ moyen estimé en % (diagramme enthalpique)	$n_{scr}$
65	0,021 3	12,5	0,17
75	0,017 8	9,2	0,18
85	0,011 7	6	0,20
95	0,009 5	5	0,19

Ces valeurs critiques théoriques calculées voisines de 0,20 sont bien inférieures aux valeurs observées qui varient de 0,31 à 0,52. Elles recou-

pent les valeurs données par Loncín (14), trouvées en système stationnaire. Ici, une imperméabilisation partielle en surface des fèves, se produisant au cours d'un séchage dynamique, a nettement élevé les seuils.

## Influence des paramètres de travail sur l'allure des courbes de séchage

### Période à allure constante

Nous avons obtenu douze valeurs d'évolution de  $dn_s/d\theta$ , qui varie en fonction de trois facteurs essentiels :

- vitesse au niveau des fèves,  $v$  en m/s,
- température de l'air de séchage,  $t$  en °C,
- épaisseur du produit, dans le séchoir,  $e$  en cm.

Une analyse de régression multiple a été réalisée. Elle montre que 66 % de la variance des données est expliquée par ces trois facteurs ( $F = 5,23$ , significatif au seuil de 0,03 ;  $r$  multiple = 0,81).

On obtient l'expression (approximative) suivante :

$$\text{perte d'eau (en \% sur m. s. par h)} = 0,082 3 + 15,68 v - 0,42 e + 0,177 2 t.$$

### Période à allure ralentie

Une régression linéaire multiple a été effectuée afin d'étudier la liaison éventuelle entre les caractéristiques de l'air de séchage (vitesse, température), l'épaisseur du cacao au séchage, la demi-épaisseur  $l$  des fèves à sécher d'une part et les paramètres  $r_s$ ,  $r_d$  et  $\epsilon_{ns}$  d'autre part.

La vitesse moyenne au niveau des fèves a été calculée, pour chaque expérience, à une teneur en eau moyenne de 18 % m. t. q. (seuil théorique de passage de l'allure constante à l'allure ralentie). De même, c'est la température moyenne de l'air de séchage, calculée sur l'ensemble de l'opération, qui est intervenue.

#### • Résistance au séchage ( $r_s$ )

L'épaisseur de la fève intervient tout d'abord et explique 55 % de la variation de  $r_s$ .

La corrélation est négative, c'est-à-dire que si l'épaisseur des fèves augmente, la résistance au séchage diminue du fait d'une augmentation de  $A_s$ . La résistance serait minimale si l'on avait affaire à des sphères et maximale pour des parallélépipèdes de faible épaisseur.

Pour la seule variable  $l$  la valeur  $t$  (test de Student) est égale à 3,10 pour 8 ddl ; significatif au seuil de 0,01.



TABLEAU I  
Coefficients calculés pour les deux périodes

	REFERENCE DE L'ESSAI	8/11A	13/11A	14/11A	15/11A	20/11A	22/11A	27/11A	29/11A	4/12A	5/12A	11/12A	20/12A
	PARAMETRES												
CONDITIONS EXPERIMENTALES	Epaisseur produit e (cm)	23,5	24	27,5	25	27	28	27	27	20	10	10	27
	Température moyenne de l'air séchant t(°C)	65	83,5	83	84,5	64,5	92,5	74	111	74	74	65	72,5
	Débit d'air (m3/h)	780	802	795	590	370	318	405	422	411	412	421	606
	Hygrométrie moyenne de l'air ambiant (%)	79	76	86,5	80,5	76,5	70,5	74,5	80,5	74	87	84,5	75
	Température moyenne de l'air ambiant (°C)	29	31	24	27,5	29,5	30,5	30	30	30,5	28,5	28	30,3
ALLURE CONSTANTE	Vitesse de l'air v (m/s)	0,9	0,92	0,94	0,70	0,43	0,37	0,48	0,48	0,49	0,48	0,51	0,72
	Température thermomètre humide te (°C)	33		35,5	36	33	37	35	40	35	35	33,2	35
	Température moyenne produit t <sub>e</sub> (°C)	33		38	36,5	33	42,6	36,5	43	37,2	38	38,7	36,5
	Mode de séchage	Adiab.		Non Adiab.	Adiab.	Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.	Non Adiab.
	dn <sub>s</sub> /de (en 10 <sup>-6</sup> kg/kg.s )	30,4	58,61	57,04	39,64	15,5	25,25	36,11	42,47	38,42	37,44	52,28	37,56
	K/λ (en 10 <sup>-6</sup> MKS)	7,1		7,5	6,2	3,7	2,4	4,7	5,5	5,4	4,8	5,6	6,2
	A <sub>s</sub> (m2/kg)	0,134		0,134	0,133	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134	0,134
	K/λ · E <sub>op</sub> (MKs)	60,3		63,2	56,25	55,9	55	56	56		56	56	62
E <sub>op</sub> (en 10 <sup>-6</sup> kg/m2.s. Δp)	0,118		0,114	0,110	0,066	0,043	0,084	0,099	0,096	0,086	0,100	0,100	
ALLURE RALENTIE.	Epaisseur moyenne des fèves (en mm)	7,92	8,44	8,42	8,15	7,68	8,11	8,03	8,60	8,07	8,09	8,56	8,31
	Vitesse de l'air (m/s)	0,81	0,81	0,82	0,61		0,34	0,41		0,43	0,42	0,42	0,63
	r <sub>s</sub> = $\frac{n_{scr} - n_{s1}}{(dH20/d\theta) \cdot \text{libre}}$ (MKS)	1 409	994	1 123	1 448		1 588	1 651		1 436	1 684	1 288	1 191
	r <sub>d</sub> = $\frac{1}{3\epsilon_{ns}}$	2 324	2 371	2 947	2 106		1 525	1 807		1 494	1 463	1 998	1 022
	ε <sub>ns</sub> (10 <sup>-6</sup> kg/m2.s)	0,57	0,59	0,48	0,65		0,89	0,74		0,90	0,92	0,71	1,36

La vitesse de l'air au niveau des fèves intervient aussi significativement (corrélation négative) et ajoute 34 % d'explication. Les deux facteurs expliquent ensemble 89 % de la variation de  $r_s$ .

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Pour } l ; t = -4,72 \text{ (significatif au seuil de } 0,003). \\ \text{Pour } v ; t = -4,67 \text{ (significatif au seuil de } 0,003). \end{array} \right.$

Le coefficient de corrélation multiple est de 0,94. Comme les coefficients  $K$  et  $E_{op}$ ,  $r_s$  est donc très dépendant de la vitesse  $v$ .

Aucun autre facteur n'intervient ensuite.

L'équation de régression multiple est assez proche de la réalité du fait de la bonne explication fournie par l'ensemble des deux facteurs :

$$r_s \approx 7.284 - 1.337 l - 726,5 v \quad (l \text{ en mm. et } v \text{ en m/s}).$$

#### • Coefficient de diffusion du liquide dans le solide ( $\epsilon_{ns}$ )

La même régression multiple, effectuée pour le  $\epsilon_{ns}$  calculé, ne donne aucun résultat significatif, le facteur vitesse n'explique que 19 % de la variation des  $n_s$  (non significatif ;  $r = 0,43$  pour 8 ddl ;

$r_{0,05} = 0,63$ ). Les autres facteurs n'interviennent pas.

Le coefficient de diffusion est donc pratiquement constant et peut être estimé à  $0,78 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ .

#### • Résistance à la diffusion $r_d$

La vitesse de l'air au niveau des fèves a une influence positive significative sur  $r_d$ . Elle explique 45 % de la variation de  $r_d$  ( $t = 2,54$  ;  $r = 0,67$  ; significatif à un seuil proche de 0,04 pour 8 ddl).

Les autres facteurs n'interviennent pas :

$$r_d \approx 785 + 1.966 v \text{ (m/s)}.$$

Lorsque la vitesse de l'air augmente au niveau des fèves, il se produit un phénomène croissant de « croûtage » qui imperméabilise partiellement la couche externe et augmente la résistance à la diffusion lors du séchage en phase ralentie.

$\epsilon_{ns}$  étant constant, il semble que le phénomène de « croûtage » soit d'autant plus grand que  $l$  croît, c'est-à-dire que les fèves sont plus épaisses. Les temps de transfert s'allongent en effet et favorisent le croûtage.

Pour une vitesse donnée, si  $l$  croît, le croûtage apparaît plus nettement et  $r_d$  croît de telle façon que le rapport  $\epsilon_{ns} = 1/3 r_d$  reste sensiblement constant.

## CARACTÉRISTIQUES DES CACAOS OBTENUS

### Méthodes analytiques

Les échantillons de cacao séchés au soleil (référence S) et séchés artificiellement (référence A) ont été acheminés vers le laboratoire de l'IFCC à Montpellier.

On a procédé aux déterminations chimiques suivantes :

— sur cotylédons : pH (15), acidité volatile (16) et acidité totale (15) (les acidités sont exprimées en ml de NaOH 0,1 N par g de matière sèche) ;

— sur fèves entières : teneur en micro-organismes (17) (levures, bactéries et moisissures) en nombre de colonies par g de matière sèche.

Des chocolats ont été préparés à partir de ces échantillons (18). Ils ont été soumis à un jury de dégustateurs, qui a coté leurs caractéristiques organoleptiques de la manière suivante :

— amertume, astringence, acidité organoleptique et arôme ;

cotation	0	absence
	1	très faible
	2	faible
	3	net
	4	prononcé
	5	très prononcé

note de synthèse	1	très bon
	2	bon
	3	acceptable
	4	médiocre
	5	mauvais

### Résultats des analyses de laboratoire

(cf. tableau II)

TABLEAU II

REF	TEMP °C	VITESSE en m/s	EPAIS- SEUR (cm)	DUREE	ANALYSES ORGANOLEPTIQUES					pH	ACIDITE VOLATILE *	ACIDITE TOTALE *	BACTE- RIES col./g	PENI- CILLIUM col./g	MYCELIUM col./g	LEVURES col./g
					AMER- TUME	ASTRIN- GENCE	ACIDITE	AROME	SYN- THESE							
8/11S					2,50	0,94	2,28	2,67	2,83	5,42	1,18	3,64	5,3.10 <sup>6</sup>			2,9.10 <sup>4</sup>
8/11A	65	0,90	23,50	17h00mn	2,17	1,50	3,17	2,44	3,56	5,08	1,60	4,10	4,9.10 <sup>6</sup>			1,2.10 <sup>4</sup>
13/11S					2,17	1,22	1,00	2,33	3,89	5,54	1,07	2,89	2,5.10 <sup>6</sup>			2,9.10 <sup>4</sup>
13/11A	83,5	0,92	24,00	13h10mn	2,22	1,61	2,94	2,50	3,61	5,01	1,56	4,88	2,1.10 <sup>6</sup>			1,1.10 <sup>5</sup>
14/11S					1,44	0,55	1,94	1,56	3,94	5,45	1,14	3,57	4,5.10 <sup>6</sup>			
14/11A	83	0,94	27,50	18h00mn	1,22	0,89	3,17	1,33	4,28	4,84	2,33	5,75	1,3.10 <sup>6</sup>			
15/11S					1,11	0,44	1,06	1,17	4,11	5,41	0,93	3,66	6,0.10 <sup>6</sup>	9.10 <sup>2</sup>		1,8.10 <sup>3</sup>
15/11A	84,5	0,70	25,00	17h00mn	1,39	1,11	3,33	1,72	4,17	5,06	1,63	4,78	1,6.10 <sup>5</sup>			1,9.10 <sup>4</sup>
20/11S					2,00	0,89	1,11	2,44	2,89	5,46	0,91	3,27	3,4.10 <sup>6</sup>			7,7.10 <sup>3</sup>
20/11A	64,5	0,43	27,00	19h05mn	1,67	1,50	3,44	2,00	4,00	5,03	1,90	5,01	6,3.10 <sup>6</sup>			2,6.10 <sup>5</sup>
22/11S					1,94	1,28	2,11	2,50	2,94	5,38	1,04	3,45	1,8.10 <sup>7</sup>			7,2.10 <sup>4</sup>
22/11A	92,5	0,37	28,00	17h00mn	2,00	1,44	3,44	2,39	3,72	4,89	2,52	4,55	3,1.10 <sup>7</sup>			6,2.10 <sup>5</sup>
27/11S					2,28	0,83	1,89	3,22	2,39	5,39	0,97	3,35	2,8.10 <sup>6</sup>			2,6.10 <sup>4</sup>
27/11A	74	0,48	27,00	17h35mn	2,06	1,72	3,39	2,61	3,78	4,80	2,25	5,56	1,3.10 <sup>7</sup>	9.10 <sup>4</sup>		6.10 <sup>5</sup>
29/11S					2,22	1,06	1,72	2,78	2,56	5,42	0,89	2,94	1,6.10 <sup>7</sup>	9.10 <sup>3</sup>		5,9.10 <sup>4</sup>
29/11A	111	0,48	27,00	16h35mn	2,11	1,50	3,22	2,61	3,33	4,96	2,21	5,18	2,2.10 <sup>7</sup>			5,2.10 <sup>5</sup>
4/12S					1,94	1,28	2,39	2,33	3,56	5,26	0,99	3,40	1,9.10 <sup>5</sup>			
4/12A	74	0,49	20,00	14h20mn	1,78	1,61	3,39	2,50	3,72	5,04	1,67	4,98	2,1.10 <sup>7</sup>			
5/12S					2,44	0,78	1,00	3,22	2,72	5,73	0,72	2,53	3,0.10 <sup>6</sup>			
5/12A	74	0,48	10,00	13h40mn	2,22	1,33	2,78	2,50	3,56	4,89	1,37	4,50	4,6.10 <sup>7</sup>	9.10 <sup>2</sup>		6,2.10 <sup>5</sup>
11/12S					1,83	1,17	2,50	2,00	3,78	5,34	1,28	3,16	5,5.10 <sup>6</sup>	9.10 <sup>3</sup>		3,3.10 <sup>4</sup>
11/12A	65	0,51	10,00	17h00mn	1,83	1,28	3,44	1,83	3,89	5,03	1,90	4,38	9,8.10 <sup>6</sup>	1,8.10 <sup>4</sup>		7,7.10 <sup>4</sup>
20/12S					2,00	1,00	1,83	2,83	2,83	5,01	1,14	4,08	1,1.10 <sup>6</sup>			
20/12A	72,5	0,72	27,00	12h15mn	2,22	1,11	2,67	2,78	3,06	4,75	1,93	4,67	3,2.10 <sup>6</sup>			

\* en ml NaOH N/10 par g

## Interprétation des résultats

### Influence des conditions de séchage artificiel sur les caractéristiques des cacao

Une régression multiple a été effectuée pour chaque essai avec comme variable expliquée la différence séchage artificiel-séchage solaire et comme variables explicatives :

- la température de l'air de séchage,
- la vitesse de l'air de séchage au niveau des fèves,
- l'épaisseur du produit dans le séchoir,
- la durée de l'opération de séchage.

Les seuls effets significatifs sont les suivants :

- augmentation de l'acidité volatile quand la température de l'air de séchage croît (seuil de 4 %) et quand la durée du séchage croît (seuil de 8 %) ;
- la quantité de levures observée décroît quand la température croît (seuil de 2 %).

### Comparaison entre le séchage solaire et le séchage artificiel

Pour chacune des douze expérimentations, nous disposons :

- d'un échantillon séché artificiellement (référence A),
- d'un échantillon du même cacao, séché au soleil (référence S).

La comparaison des deux types de séchage peut donc être faite par couple, le facteur origine du cacao étant éliminé et les caractéristiques du séchage artificiel n'étant pas prises en compte.

Pour chaque caractéristique, les différences « séchage artificiel-séchage solaire » ont été calculées ainsi que leur écart-type. L'analyse statistique suivant la méthode des couples ou de l'appariement a donné les résultats suivants :

Caractéristiques des cacao	Différence moyenne	Ecart-type de la différence moyenne	t Student
Amertume .....	- 0,08	0,059	- 1,37 NS
Astringence .....	+ 0,43	0,069	+ 6,20****
Acidité .....	+ 1,48	0,148	+ 10****
Arôme .....	- 0,15	0,101	- 1,49 NS
Note de synthèse .....	+ 0,52	0,142	+ 3,67***
pH .....	- 0,45	0,050 5	- 8,9****
Acidité volatile .....	+ 0,88	0,102 5	+ 8,59****
Acidité totale .....	+ 1,53	0,181	+ 8,45****
Bactéries .....	$- 10 \times 10^6$	$3,475 \times 10^6$	+ 2,88**
Levures .....	$+ 21,5 \times 10^4$	$7,508 \times 10^4$	+ 2,86**

$\alpha$  = seuil de probabilité.

\*  $\alpha$  = 0,05.

\*\*  $\alpha$  = 0,01.

\*\*\*  $\alpha$  = 0,001.

\*\*\*\*  $\alpha$  < 0,001.

Ainsi le séchage artificiel :

- n'influe ni sur l'amertume, ni sur l'arôme du chocolat,
- augmente très significativement l'acidité et l'astringence (seuil très élevé,  $\alpha < 0,001$ ),
- diminue la note de synthèse globale, seuil de 1 % (l'abaissement de la note de synthèse est souvent liée à une forte acidité),
- augmente très significativement les acidités volatile et totale (seuil de 1‰),
- augmente la quantité résiduelle de bactéries et de levures (seuil de 2 %).

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La présente étude nous a permis de tracer une série de courbes de séchage pour des conditions opératoires différentes (débit d'air, température de l'air, épaisseur de la couche de cacao).

La mise en équation de ces courbes permet de préciser :

— les coefficients de transfert pour la période à allure constante (variant de  $0,043 \cdot 10^{-6}$  à  $0,118 \cdot 10^{-6}$  kg/m<sup>2</sup> . s.  $\Delta p$  dans le cadre de nos essais),

— les résistances au séchage et à la diffusion dans le cas de la période à allure ralentie (coefficient de diffusion  $0,78 \cdot 10^{-6}$  kg/m<sup>2</sup> . s).

On peut ainsi calculer les durées de séchage  
compte tenu des conditions adoptées.

conclure que dans tous les cas les échantillons S  
sont préférés aux échantillons A.