

## GESTION THERMO-HYGROMETRIQUE DES STRUCTURES DE STOCKAGE DU MAÏS EN ZONE EQUATORIALE HUMIDE

**M. Banna, PhD**

Laboratoire Sur L'Energie Solaire (L.E.S)  
Université du Bénin, BP 1515, Lomé, Togo

### RESUMÉ

*Dans les zones humides et chaudes comme au Togo, où les pertes post-récoltes sont importantes, l'auteur montre qu'il est possible de conserver correctement le maïs pendant une très longue période, en associant deux modes de stockage:*

- *Stockage du maïs en spathe dans des greniers traditionnels améliorés, soumis à un régime intermittent d'enfumage, pendant au moins 155 jours.*
- *Stockage du maïs grain en silo sous atmosphère contrôlée, soumis aux cycles alternés de 12 à 15 jours de ventilation continue d'air chaud et des cycles de 65 à 70 jours sans ventilation.*

*La stabilité de l'indice d'iode enregistré indique la conservation des principales valeurs nutritives des grains au cours de la période de stockage. Les résultats expérimentaux et ceux déduits du modèle théorique de transfert d'énergie et d'humidité dans l'amas de maïs sont présentés et discutés.*

**Mots clés :** Stockage, ventilation, teneur en eau, humidité, énergie solaire

### ABSTRACT

*In the humid and hot zones like Togo, where post-harvesting losses are considerable, the author shows that it is possible to preserve maize for a very long period by using two modes of storage:*

- *Storing the maize (in spathe) in improved traditional granary which is subjected to intermittent regime of 'smoking' for at least 155 days.*
- *Storing the grains of the maize in silos under controlled atmospheric conditions and subjecting it to alternate cycles of 12 to 15 days of continuous hot air ventilation and 65 to 70 days without hot air ventilation.*

*The stability of iodine index recorded indicates that the principal nutritional values of grain have been preserved during the period of storage. The experimental results and those deduced from the theoretical model of energy and humidity transfer in the heap of maize are presented and discussed.*

**Keywords :** Storage, ventilation, moisture content, humidity, solar energy.

### INTRODUCTION

La température, l'humidité de l'air et la teneur en eau jouent un rôle très important dans les processus de dégradation des denrées agricoles stockées. Pour chaque produit, des courbes peuvent être établies en laboratoire qui donnent le délai maximum de conservation en fonction de l'humidité des grains et de leur température.

En zone équatoriale humide comme au Togo [1], les températures sont très élevées et l'humidité relative de l'air ambiant est très importante, 90% à 100%, la nuit et 50% à 60% à midi par beau temps. Dans ces régions, les difficultés rencontrées au cours du stockage des denrées agricoles résultent principalement de l'inadaptation des structures de stockage à ces conditions climatiques locales.

Des travaux en vue d'améliorer les greniers paysans ont été entrepris au Togo [2,3], et ont proposé la modification des greniers existants. C'est en complément à cette importante étude, que la recherche d'un moyen de stockage du maïs grain en silos est entreprise. Ces structures offrent la possibilité d'agir à tout moment sur les différents facteurs physiques et biologiques responsables de la dégradation du maïs ensilé.

Pour agir sur la température, l'humidité de l'air et la teneur en eau du produit, il faut assurer aux silos une ventilation pour atteindre les objectifs suivants :

- Eviter l'échauffement des grains en évacuant la chaleur dégagée au cours de la transpiration du maïs dans les silos [3,4].

En effet, la conductibilité thermique des grains étant faible, la chaleur produite s'accumule et provoque l'auto-accélération des phénomènes



Dr. M. Banna

de dégradations. Pour éviter ces inconvénients, il est nécessaire de procéder à une ventilation de maintien dont le but n'est pas de bloquer le métabolisme, mais seulement d'évacuer la chaleur qu'il dégage afin d'éviter son accélération. La ventilation de maintien doit permettre également d'évacuer l'eau de transpiration en assurant une dessiccation progressive du produit.

- Réduire le taux d'humidité relative de l'air ambiant du grain à une valeur inférieure à 65% en entretenant dans les silos, du maïs grain à une température supérieure de 15°C au point de rosée (25°C) dans la zone équatoriale humide. La courbe d'équilibre hygroscopique (Figure 1) du maïs et de l'air ambiant indique que pour des humidités élevées, la teneur en eau du maïs est élevée et entraîne des détériorations biologiques [3].

Nous proposons dans ce travail:

- d'expérimenter des structures de stockage du maïs sous atmosphère contrôlée,
- d'analyser l'influence des paramètres fonctionnels de la structure retenue (débit, température, humidité) grâce à un modèle mathématique en vue de faciliter le passage à des structures de taille plus grande.

### STOCKAGE TRADITIONNEL DU MAÏS EN SPATHE

Dans les régions chaudes et humides, comme au Togo, le maïs en spathe est à plus de 80% stocké en grenier traditionnel en milieu rural. La technique consiste à laisser la récolte sur pied pendant parfois plus d'un mois après maturité des grains. Après la récolte, le produit encore humide est alors stocké en épis dans les structures aérées qui doivent permettre une finition du séchage au cours du stockage en grenier.

Les importantes pertes enregistrées au cours du stockage traditionnel ont conduit à mettre au point des systèmes traditionnels améliorés. Au Togo, trois types de greniers ont été identifiés et améliorés. Ils sont généralement de forme cylindrique, constitués d'un empilement de maïs

en spathes sur une plate-forme recouvert d'un toit conique en paille. La plate-forme située à environ 50 cm du sol, est fabriquée en rondins de bois reposant sur de nombreux pieux. Au cours de récents travaux, la plate-forme traditionnelle a été modifiée et un ou plusieurs cheminées coniques sont introduits afin d'assurer une distribution plus importante et homogène de la fumée au cours de l'enfumage du grenier.

Des séries d'expériences réalisées sur ces structures de stockage traditionnelles ont permis de montrer que les greniers hauts améliorés munis de cheminées coniques d'enfumage sont mieux adaptés en milieu rural. L'utilisation d'une bâche plastique au niveau du toit du grenier à des périodes de pluies tout comme l'enfumage après les pluies et en période de ciel couvert ont été recommandés [2,3].

L'implantation des thermocouples dans les greniers et l'échantillonnage ont permis de relever respectivement les profils de température et d'humidité du produit au cours du stockage [2]. Sur les Figures 2 et 3, on remarque que la teneur en eau du maïs grain des couches supérieures atteignent une teneur en eau de 13% au bout de 155 jours environ. Au delà, le maïs grain reprend progressivement de l'humidité.

Ce résultat est très important. Car il montre que le maïs peut être séché très lentement sur des structures de stockage traditionnelles améliorées pendant au moins 155 jours. A très long terme, il est préférable d'égrener le maïs et de le conserver dans des structures de stockage bien adaptées.

### ESSAI DE STOCKAGE DU MAÏS GRAIN EN SILO SOUS ATMOSPHERE CONTROLEE

Nous avons testé deux structures de silo de même tonnage de 25000 kg de maïs. Il s'agit d'un silo métallique fait de tôle noire de 3mm et un silo à double parois en tôle noire et en béton, séparées d'une couche d'isolation en kapok de 10 cm d'épaisseur.

Les silos cylindriques expérimentés ont 3m de hauteur et 4m de diamètre et une charge totale de 25 tonnes de maïs grain ensilé en une couche

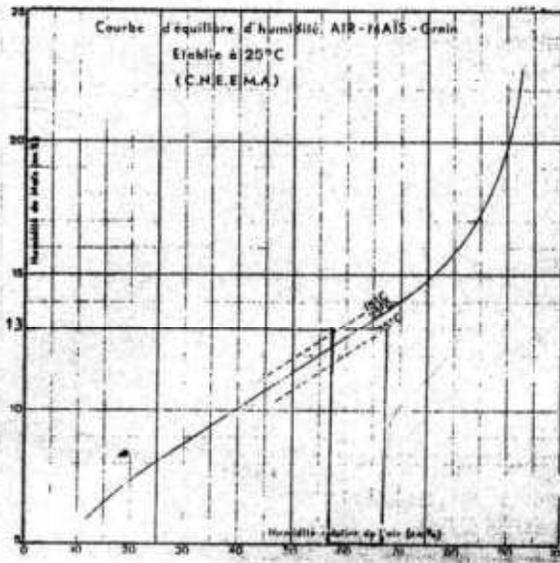


Figure 1: Courbe d'équilibre hygrosopique Air- Maïs

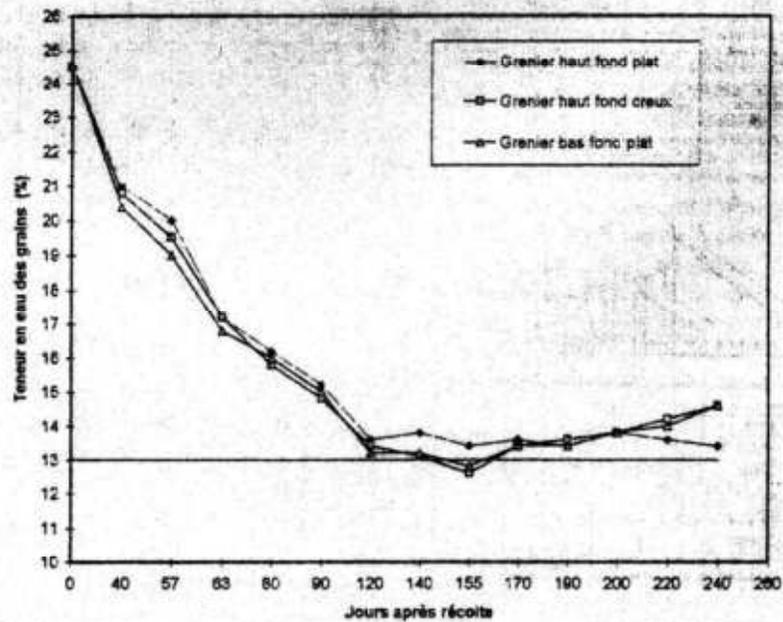


Figure 2: Evolution de la teneur en eau du maïs (variété locale) du grenier traditionnel amélioré

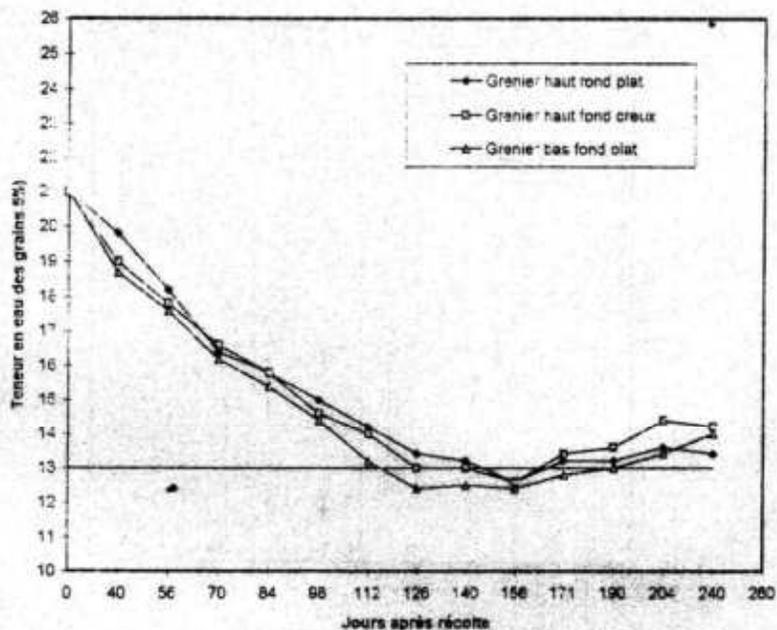


Figure 3: Evolution de la teneur en eau du maïs (variété améliorée) du grenier

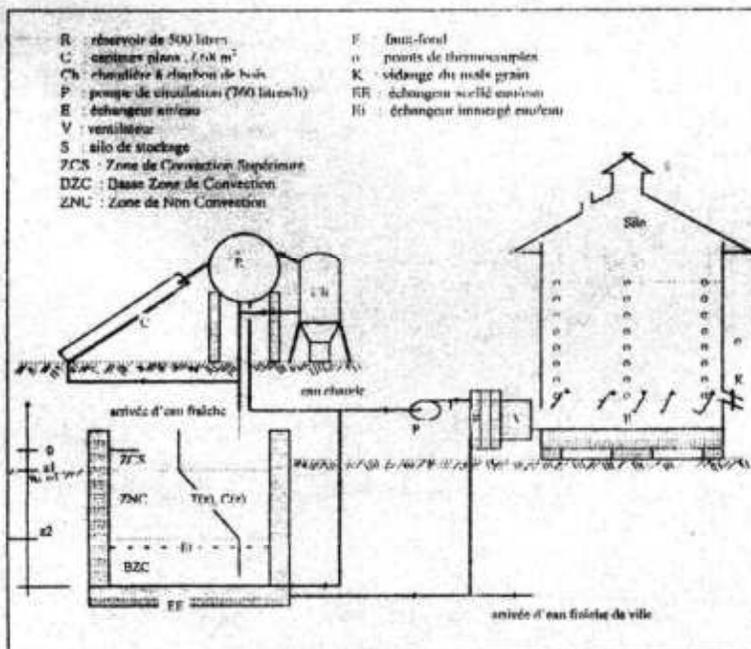


Figure 4: Système Chauffe-eau solaire. Bassin-silo emplacement des thermocouples et points de prélèvement du maïs dans le silo.

de 1.8m d'épaisseur. Chaque silo dispose d'un faux-fond plat perforé à 30% ; la hauteur de la chambre de mise en charge étant de 40cm. Un réseau de thermocouples a été installé (Figure 4) pour contrôler la répartition des températures. Des prélèvements périodiques à des niveaux réguliers ont été effectués pour contrôler la teneur en eau du maïs et sa qualité.

Le maïs égrené est préalablement homogénéisé à la teneur en eau à 13% par un séchage rapide dans un séchoir de 3 tonnes dans lequel est soufflé de l'air chaud par un ventilateur axial. Cet air chaud provient d'un échangeur eau/air qui utilise l'eau chaude du bassin ou du chauffe-eau solaire.

Au cours du chargement, le maïs est traité à titre préventif avec un mélange de pyrimiphos-méthyl et de k-othrine à raison de 50g pour 100kg du produit et une fumigation au photoxin à raison de 1 à 2 g/m<sup>3</sup> de maïs est réalisé après l'ensilage.

L'énergie utilisée pour générer de l'air chaud nécessaire à la ventilation a été extraite respectivement du bassin solaire et un chauffe-eau solaire construits et expérimentés au laboratoire.

#### Bassin Solaire à Gradient de Salinité : performances thermiques

Le bassin expérimenté est construit à Lomé. Son profil est cylindrique et construit en béton armé. Il a 16.8m de diamètre, 0.20m d'épaisseur et 4,5m de profondeur utile rempli à 3.7m d'eau. L'intérieur de la paroi verticale est garnie d'une couche isolante de kapok de 0.20 m d'épaisseur. Une bâche d'étanchéité fabriquée sur mesure par Seaman Corporation (USA) recouvre tout le bassin. Elle est faite d'un tissu plastique noir conçu pour une bonne résistance aux agents chimiques et aux températures élevées que l'on peut atteindre dans les bassins. Deux échangeurs de chaleur fermés en tuyaux galvanisés sont installés, L'un scellé dans la couche de béton recouvrant le fond du bassin, l'autre dans la saumure à 1.60m du fond à l'interface de la zone de stockage et de la zone de gradient (Figure 4). Un réseau de thermocouple permet de mesurer les températures à différents niveaux dans la saumure et dans le sous-sol. Ces

thermocouples sont reliés à une centrale de mesure, placé à l'abri.

Nous avons montré dans les travaux antérieurs [5] que dans les conditions de stabilité des zones de convection supérieure et de basse convection, le rendement optimal du bassin évolue sous la forme linéaire suivante :

$$\eta = \frac{\alpha_0 + U_1}{H_0} T_0 + \frac{U_1 T_1 + \alpha_0 T_2 + \alpha \tau (1 - t_0)}{H_0} \quad \text{ou} \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \left\{ 0,99 \left[ \frac{K_g}{L_g} \right] + 0,9 \text{ Kg} \left[ \frac{Pe}{Ac} \right] \right\}$$

$$\alpha \tau = \int_{z_1}^{z_2} h(z) dz \quad \text{avec} \quad h(z) = 0,36 - 0,08 \cdot \ln(z) \quad b=0,08$$

Dans les conditions optimales de fonctionnement et pour si fixé, l'épaisseur optimale  $z_m$  de la zone de gradient est calculée par la méthode de résolution itérative de Newton à l'aide de l'équation (2) [5].

$$z_m + z_1 [\ln(z_1) - \ln(z_m) - 1] = K \frac{T_0 - T_s}{(1 - \epsilon_0) b H_0} \quad (2)$$

La Figure 5 illustre l'évolution de la température dans le bassin au cours de l'expérimentation. Sur cette Figure, on note l'influence des conditions atmosphériques (vent, pluies poussière etc.) sur le profil de température. La stabilité du bassin est alors perturbée en période de pluies et d'harmattan. En période d'harmattan, les vents forts entraînent des perturbations de la zone de convection supérieure et réduisent l'absorption de l'énergie par le fond du bassin à cause du dépôt régulier de débris et de poussière. Ainsi, l'équilibre thermique du bassin se situe aux environs de 84°C. Cette température est inférieure à celle espérée (95°). Cependant les températures enregistrées sont assez importantes pour générer l'air chaud nécessaire au séchage et à la conservation du maïs grain en silo.

La Figure 6 illustre l'évolution du rendement maximum en fonction du rapport  $\Delta\theta/H_0$ , pour différentes épaisseurs de la zone de convection supérieure (ZCS) et de la zone de basse convection (ZBC).

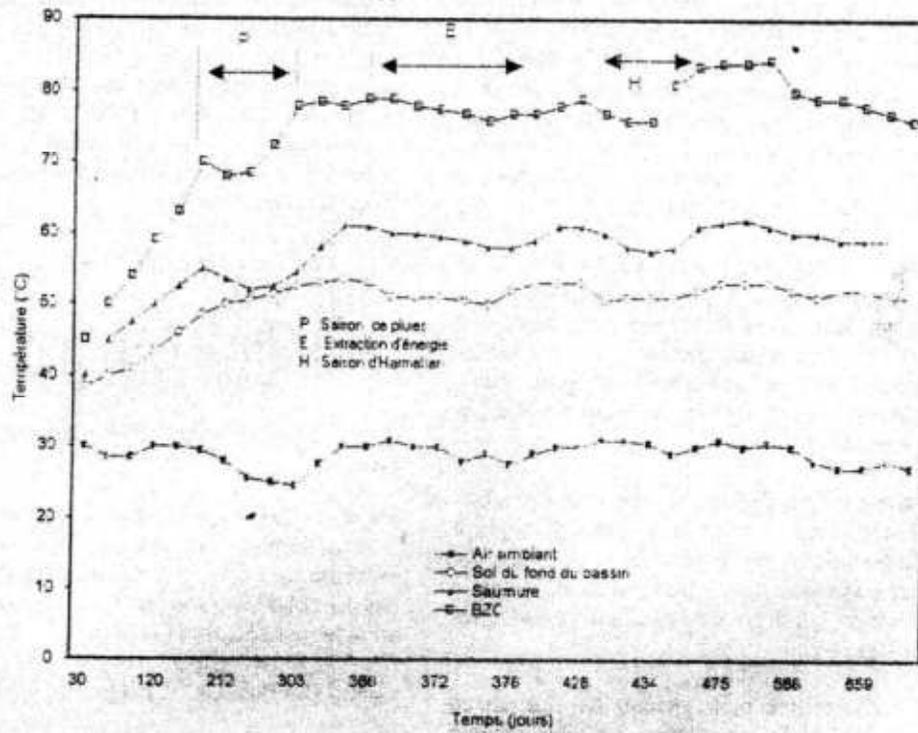


Figure 5 : Evolution du profil de température dans le bassin dans le sol et dans le temps

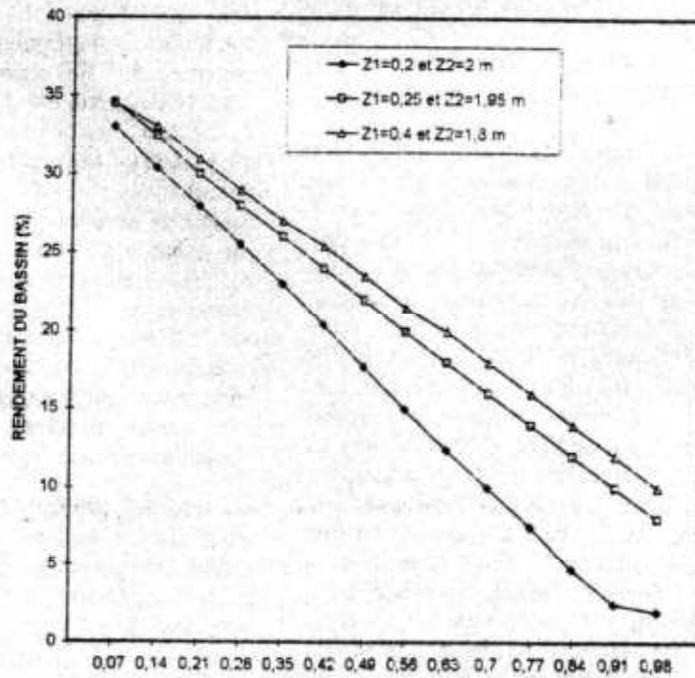


Figure 6 : Rendement du bassin en fonction de  $\Delta \theta / H_0 = 186 \text{ W / m}^2$ ,  $E_0 = 0$

**Système chauffe-eau solaire chaudière a charbon de bois : performances thermiques**

L'expérimentation du bassin solaire au Togo a montré que le bassin pouvait fournir une énergie importante pour la ventilation du silo. Cependant, sa gestion nécessite un suivi régulier, et surtout un fond financier d'entretien important pour l'achat de sel à introduire régulièrement dans le bassin afin d'assurer sa reprofilation. L'investissement initial important du bassin, nous a donc conduit à expérimenter une autre source d'énergie capable de générer de l'air chaud nécessaire à la ventilation. Il s'agit d'un système de chauffe-eau solaire de 500 litres à capteurs plans couplés à une chaudière à charbon de bois (Figure 4). Le système a été dimensionné de manière à fournir de l'air chaud à une température moyenne de 40°C ; soit une énergie de 12 Kwh/m<sup>3</sup> fournie par jour et pour un ensoleillement moyen de 4,4 Kwh/m<sup>2</sup>/jour correspondant à un temps d'ensoleillement moyen de 5,5 heures.

La Figure 7 illustre l'évolution de la température de l'eau à la sortie du réservoir, et celle de l'air à l'entrée de la chambre de mise en charge. On note que par beau temps, le chauffe-eau a une autonomie de fonctionnement de 6 heures environ.

Lorsque la température de l'air à la sortie de l'échangeur descend en dessous de 33°C, la chaudière à charbon de bois est mise en marche. Trois [3] chargements de 900g de charbon chacun sont nécessaires pour couvrir les besoins énergiques journaliers. En milieu rural, le charbon peut être remplacé par les résidus de récolte par exemple les rafles de maïs etc.

**MODELISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS LE MAIS ENSILE SOUS LE REGIME DE VENTILATION**

Les équations de transfert dans la masse de maïs ensilé sont celles de la conservation de l'impulsion, de l'énergie et de la masse dans les milieux poreux granulaires faiblement humides. Ces équations sont simplifiées en utilisant les hypothèses restrictives suivantes :

- la colonne de maïs dans le silo est un lit poreux, humide, immobile, constitué de grains supposés identiques et sphériques.
- dans la phase gazeuse, il n'y a pas d'accumulation de chaleur ni d'humidité au cours de la ventilation.
- dans la masse ventilée se forme un front de séchage uniforme qui se déplace dans le sens du flux d'air. Le problème est donc considéré unidimensionnel.
- la chaleur de transpiration du maïs due au dégagement du gaz carbonique est négligée.
- la condensation de la vapeur d'eau sur la parois est négligée.

$$0 = \frac{dP}{dx} - 150(1-\epsilon)^2 \frac{U_a}{\epsilon^3 d^2} <U_a> - 1,75 \left[ \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \right] \rho_a <U_a>^2 \quad (3)$$

L'équation ci-dessus traduit la conservation de l'impulsion dans la matrice poreuse

Dans l'air intergranulaire

$$\epsilon \rho_a C_{p_a} <U> \frac{\partial <T>}{\partial z} = \epsilon \lambda_a \frac{\partial^2 <T>}{\partial z^2} + \alpha h (<T> - <\theta>) \quad (4)$$

$$\epsilon \rho_a <U> \frac{\partial <C>}{\partial z} = \epsilon \rho_a D_a \frac{\partial^2 <C>}{\partial z^2} - <m> \quad (5)$$

Dans la matrice solide :

$$(1-\epsilon) \rho_s C_{p_s} \frac{\partial <T>}{\partial t} = (1-\epsilon) \lambda_s \frac{\partial^2 <T>}{\partial z^2} + \alpha h (<\theta> - <T>) - \Delta H_s <\dot{m}> \quad (6)$$

où :

$$<\dot{m}> = (1-\epsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t}; \alpha = 6(1-\epsilon) / d \quad (7)$$

Dans ce modèle dynamique la vitesse de séchage à mat est une donnée expérimentale. Elle est calculée à partir de la relation semi-empirique de Roa et Macedo [6] :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = m \cdot q (X - X_e) (P_{vs} - P_v)^n t^{\alpha-1} \quad (8)$$

$$X - X_e = \exp [-m(P_{vs} - P_v)^n t^\alpha] \quad (9)$$

$P_{vs} = f(<T>)$  est la pression saturante donnée par la formule de Bertrand.

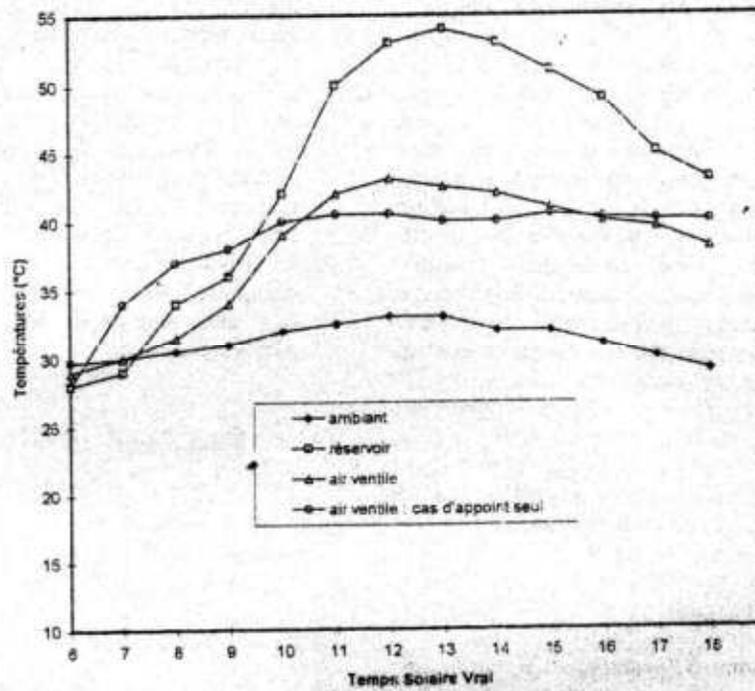


Figure 7 : Evolution des températures de l'eau du réservoir de l'air ambiant et de l'air ventilé en fonction du temps.

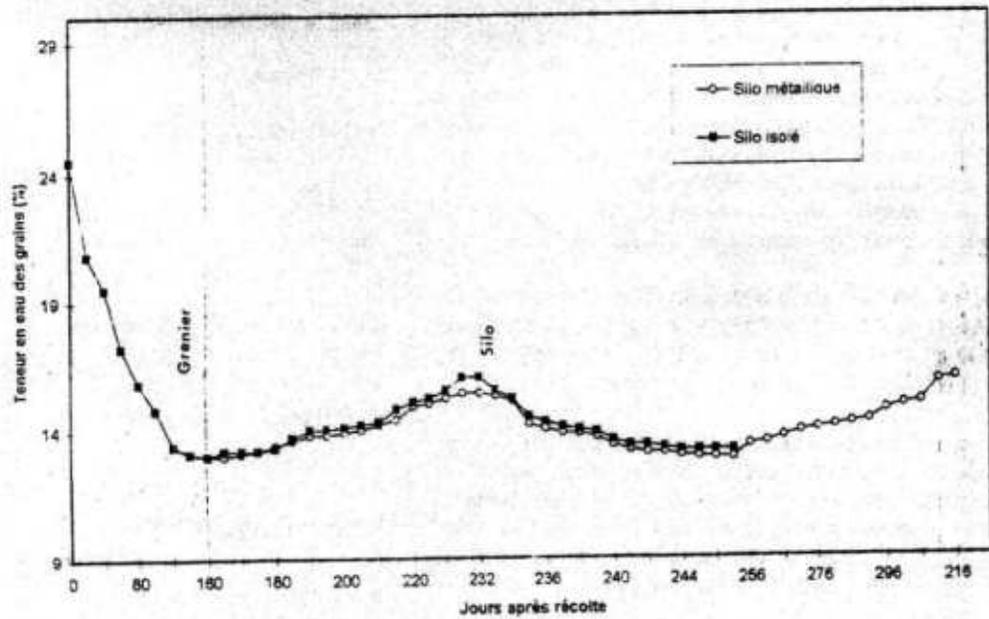


Figure 8 : Comparaison de l'évolution des teneurs en eau des grains en fonction du temps de stockage dans deux structure de silo.

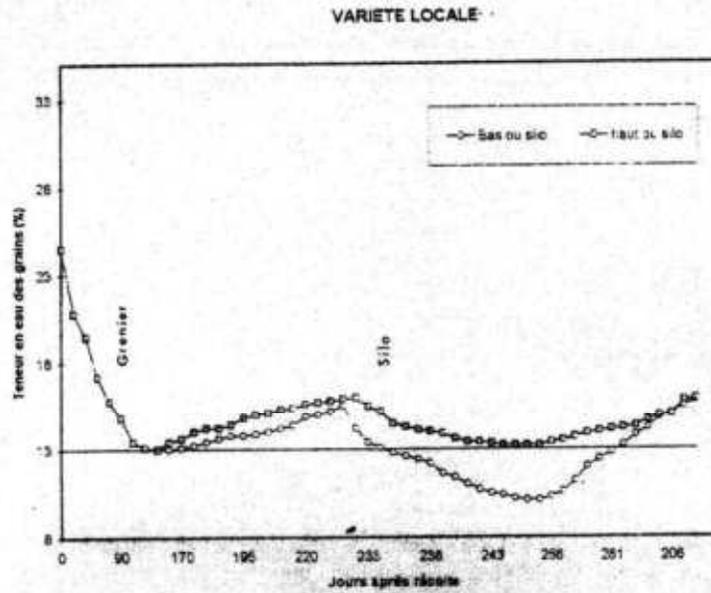


Figure 9 : Evolution des teneurs en eau des grains durant les deux modes de stockage

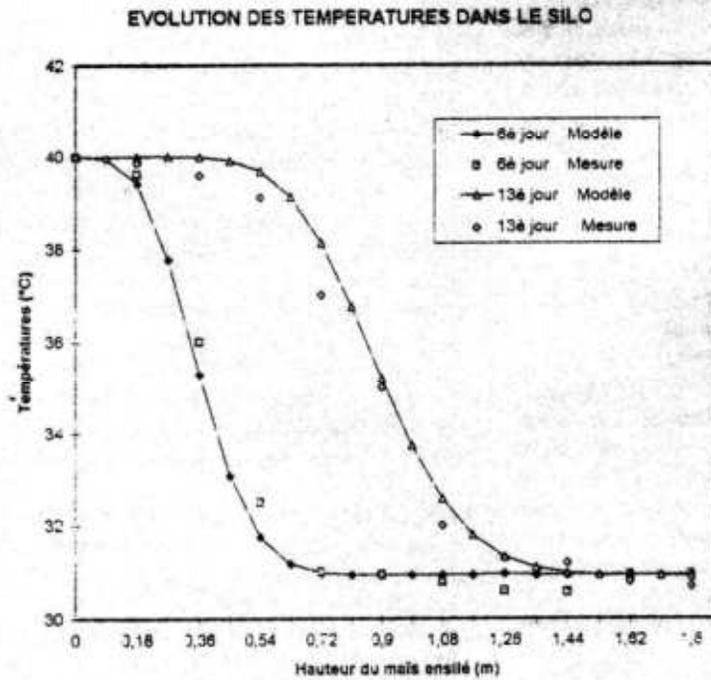


Figure 10: Comparaison des températures mesurées dans le silo à celles déduit du modèle :  $H_0 = 60\%$ ,  $D = 753 \text{ m}^3 \text{ d'air / mn}$

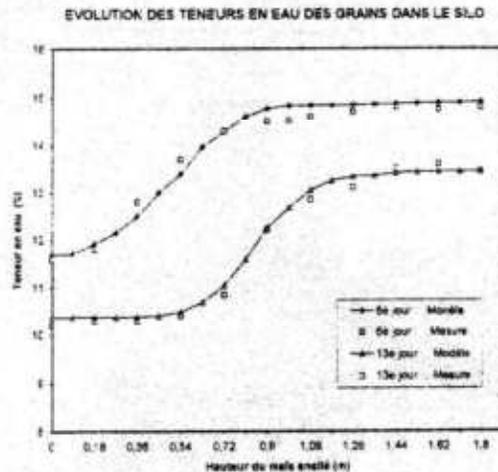


Figure 11: Comparaison de la teneur en eau du maïs mesurées dans le silo à celles déduites du modèle :  $H_0 = 60\%$   $D = 753 \text{ m}^3 \text{ d'air / mn}$ .

Ces expressions ont l'avantage d'avoir été testées pour plusieurs produits [5]. Pour le maïs grain,  $m = 0,0109$ ,  $n = 0,465$ ,  $q = 0.752$

La résolution des équations ci-dessus nécessite la connaissance des conditions initiales et des conditions aux limites. Au cours des essais de stockage, le régime de ventilation est déclenché à chaque fois que la teneur en eau moyenne des grains atteint la valeur critique de 15%. Soit " $t_0$ " l'instant à partir duquel commence la ventilation de maintien. Il vient :

pour  $t \leq t_0$  :  $M(z, t_0) = M_0$ ,  $\langle T(z, t_0) \rangle = T_0$   
 pour  $t > t_0$  : les conditions aux limites s'écrivent :  
 - en  $z = 0$  (conditions à l'entrée) :  
 $\langle T(0, t) \rangle = \theta$ ;  $\langle \theta(0, t) \rangle = \theta$ ;  $\langle C(0, t) \rangle = C$  (10)

En effet, l'énergie stockée dans le bassin est largement supérieure à celle nécessaire à la ventilation ; de même, la chaudière est toujours mise en marche pendant les périodes de ciel couvert et de pluies ; de sorte que les paramètres à l'entrée du silo sont pratiquement constantes au cours d'une journée de ventilation.

- en  $z = h$ , nous posons que les flux sortant sont nuls.

Ces conditions sont justifiées par l'existence de la couche épaisse de maïs (1,80 m) dans le silo et confirmés par les résultats expérimentaux obtenus.

$$\left. \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial z} \right|_{z=h} = 0; \left. \frac{\partial \langle \theta \rangle}{\partial z} \right|_{z=h} = 0; \left. \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial z} \right|_{z=h} = 0; P(z=h) = P\alpha \quad (11)$$

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

Sur la Figure 8 nous comparons les résultats obtenus sur les deux structures de silo. Ces résultats sont très peu différents en régime de ventilation. La conduction de chaleur dans le maïs étant très faible, la ventilation, entretenue dans les deux silos, maintient un front de séchage presque uniforme. En régime de sans ventilation, un léger séchage est observé au niveau des parois du silo métallique sans apporter une modification significative du front de séchage.

La Figure 9 illustre l'évolution des teneurs en eau du maïs grain enregistrées au cours de toute la période de stockage depuis la récolte en Août.

Dans les silos, les couches supérieures et celles du bas ont atteint une teneur en eau critique de 15% au bout de 65 à 70 jours de stockage en silo. La ventilation continue déclenchée, à cet instant, pendant 12 à 15 jours a permis de réduire la teneur en eau du maïs en dessous de 13%. Cependant, les couches du bas ont subi un surséchage important et ont atteint une teneur en eau de 10 à 11% de teneur en eau. Dans ces conditions le risque de brisure est assez

important, et rendu possible par la fragilisation des grains surséchés. Pour pallier à cet inconvénient, un transilage a été réalisé et a permis d'homogénéiser le maïs grain dans le silo.

Un autre régime sans ventilation a été ensuite maintenu, et le maïs a atteint au bout de 60 jours de stockage une teneur en eau critique de 15% pour les couches supérieures et du bas. La saison des pluies et l'humidité importante de l'air expliquent la réhumidification rapide du maïs ensilé.

On note que la durée totale de stockage est alors d'environ 316 jours puisque dans les greniers traditionnels, les grains des couches supérieures atteignent une teneur en eau de 13% au bout de 155 jours environ. Cette durée couvre la période de soudure (de Février à Mai) au cours de laquelle la valeur marchande du maïs est assez élevée. Au cours de cette période, 15 jours maximum de ventilation continue seulement ont été suffisants.

Les durées des régimes sans ventilation enregistrées sont en accord avec les courbes établies par Bewer et Kosmina [3] qui permettent d'estimer la durée maximale de conservation des céréales en fonction de la température et de la teneur en eau hydrique des grains.

L'association du stockage en grenier traditionnel et du stockage en silo métallique peut réduire considérablement les dépenses énergétiques et certaines difficultés techniques : telle que la gestion des grandes quantités de maïs à stocker à la récolte. En effet, au Togo, [5] mois après la récolte, plus de la moitié des stocks de récolte est déjà consommée et les quantités à stocker en silo sont donc considérablement réduites.

#### Efficacité du processus de dessiccation progressive du maïs grain en silo couplé au bassin solaire

L'énergie extraite du bassin est évaluée par la relation :

$$W_e = 24 \frac{mC}{\epsilon_e} \sum_{i=1}^N \Delta\theta_i \quad (12)$$

où  $\Delta\theta_i$ , est l'écart de température moyen journalier enregistré au niveau de l'échangeur  $m$  est le débit d'eau fixé à 630 l/h et  $E_0$  est l'efficacité de l'échangeur scellé dans le bassin estimée à 46% par la méthode de J. Hull [7]. Celui de l'échangeur air/eau est estimé à environ  $E_1 = 62\%$ .

L'énergie extraite du bassin pendant 12 jours de ventilation continue est estimée à 2331,4 KWh tandis que la pompe et le ventilateur de puissance nominale totale de 590 W, ont fourni une énergie électrique totale de 169,92 Kwh. La ventilation d'air chaud pour sécher 25 tonnes de maïs a donc nécessité une énergie totale de 1412,28 KWh dont presque la totalité provient du bassin solaire.

La quantité d'eau enlevée au cours de la ventilation est calculée par la relation :

$$E = Q \frac{M_r - M_i}{100 - M_i} \quad (13)$$

où  $Q$  est la quantité de maïs ensilé égale à 25 tonnes.

Pour  $M_r = 13\%$  et  $M_i = 15\%$  on obtient  $E = 574,71$  kg d'eau, soit 2,16 KWh/kg d'eau enlevée. L'efficacité de l'opération évaluée par le rapport de la chaleur latente de l'eau sur l'énergie par kg d'eau enlevée est estimée à  $E_r = 32\%$ .

#### Rôles des paramètres de stockage

Sur les Figures 10-11, nous comparons les résultats du modèle théorique à ceux enregistrés au cours des essais de stockage. Les conditions aux limites utilisées sont celles relevées au cours de l'expérimentation. On remarque un bon accord entre les deux profils. Les écarts sont moins importants dans les couches supérieures et du bas qu'au milieu du maïs ensilé. Nous avons donc utilisé le modèle pour simuler l'influence de quelques paramètres sur le processus de dessiccation.

Si les températures élevées peuvent accélérer la dessiccation du maïs grain réhumidifié, elles occasionnent un surséchage et des brisures importantes et par conséquent, la détérioration des qualités nutritives et germinatives du maïs. La température recommandée pour le séchage

**Tableau 1 : Evolution des taux des principales qualités biologique et nutritive du grain de maïs au cours du stockage.**

	Bas du silo		Milieu du silo		Haut du silo	
	1	206	1	206	1	206
Nombres du jours						
Teneur en eau (%)	13	12.5	13	12.6	13	12.5
Amidon (g/100 gs)	71	69.6	71	70	71	70.1
Sucres réducteurs (g/100 gs)	03	04	03	04	03	04
Lipides totaux (g/100 gss)	4.9	3.9	4.9	4.1	4.9	4.2
Acide grasse (mg de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> / 100 gss)	0.04	0.06	0.04	0.05	0.04	0.05
Indice d'Iode IO (mg KOH / 100 gss)	108.2	112.6	108.2	112.8	108.2	112.8
Indice d'acide IA (g/100gss)	2.3	0.06	3.3	0.05	2.3	0.05

de la plupart des produits de récoltes est toujours inférieure à 60°C. Cependant la valeur fixée (40°C) dans ce travail est déduite de la courbe d'équilibre hygroscopique. Elle permet, pour une humidité de l'air inférieure à 65%, de maintenir la teneur en eau du maïs grain à 13% environ.

La simulation du modèle a permis de montrer que le débit de l'air et son humidité ont une influence assez notable sur les flux thermique et massique dans le silo. Les grands débits d'air et les faibles humidités de l'air permettent la desiccation des couches supérieures, mais cependant, provoque un surséchage au niveau des couches inférieures. Il faut donc éviter d'assurer aux silos : des forts débits spécifiques de même que de l'air asséchant à de très faible humidité ou à des températures élevées.

La chute pression étant importante dans le maïs, les différents ensilages simulés ont permis de noter que la couche de maïs ne devait pas dépasser 2 m de hauteur afin de permettre que les couches supérieures ne subissent une réhumidification.

Pour un ventilateur donné, il est nécessaire de rechercher un compromis entre la hauteur et le diamètre du silo afin d'assurer une distribution homogène de l'air asséchant. Les silos multi-étagés à plusieurs faux-fonds muni chacun d'un ventilateur semblent alors appropriés pour le stockage d'une grande quantité de maïs grain.

#### Contrôle de qualité du maïs ensilé

A la fin du stockage, le maïs a subi un contrôle de qualité organoleptique, biologique,

biochimique et nutritionnelle. L'observation attentive de la masse de grain ne révèle aucun changement de couleur ou d'odeur et aucune présence de grains chauffés, moisiss, germés ou gravement endommagés. Le contrôle microbiologique a permis le dénombrement des colonies de germes développés. Elles varient de 2 à 3,5 germes/g et se situent dans la zone d'acceptabilité de Stanwicki [8] qui recommande un taux de 10 germes/g. Cependant, il faut souligner que le maïs ensilé a subi à titre préventif un traitement préalable d'un mélange de pyrimiphosmethyl et k-othrine. Le Tableau 1 indique les taux des principales qualités des grains notamment l'amidon, les protéines et les lipides obtenus. La teneur en amidon n'a pas été affectée par les conditions d'essai ; elle est restée aux environs de 71% valeur proche de celle indiquées dans la littérature. Le taux de lipide totaux du maïs est d'environ 4% et l'acidité grasse est très faible.

#### CONCLUSION

Les différents résultats montrent que pour résoudre le problème de pertes après récoltes enregistrées au cours de la conservation, le maïs en spathe peut être séché très lentement sur des greniers traditionnels améliorés pendant au moins 155 jours. Pour un stockage à long terme, le maïs égrené peut être conservé dans les silos.

L'énergie nécessaire pour générer l'air chaud de ventilation peut être fournie par un système de chauffe-eau solaire facile à construire et à gérer que par le bassin solaire à gradient de salinité.

Le système de stockage mis au point permet de conserver le maïs grain en bon état physique,

biologique et nutritionnel pendant au moins 316 jours en associant : le stockage en greniers traditionnels améliorés soumis à des régimes d'enfumage intermittente, et le stockage en silos métalliques soumis à des cycles alternés de 12 à 15 jours de ventilation continue d'air chaud et des cycles de 65 à 70 jours sans ventilation. Le contrôle de qualité effectué montre que le mode de gestion proposé permet de stocker le maïs en zone équatoriale humide sur une période assez longue (au moins 316 jours) sans détériorations significatives de qualités organoleptiques, biochimiques et nutritionnelles du maïs.

L'accord obtenu entre le modèle théorique et expérimental a permis de simuler la dessiccation du maïs ensilé et de mettre en évidence le rôle des différents facteurs de stockage (débit d'air, température et humidité de l'air asséchant).

#### REMERCIEMENTS

L'auteur exprime ses vifs remerciements :

- à Michael Basse au CRDI - Dakar pour sa contribution scientifique et financière qui ont permis de réaliser ce travail.
- à Madame Homa Smith pour avoir fourni les résultats sur le stockage traditionnel, et
- au stagiaire Daniel Massamba pour la réalisation des analyses biochimiques et nutritionnelles.

#### NOMENCLATURE :

Ac	surface du bassin (m <sup>2</sup> )
<C>	fraction massique de l'air humide (kg/kg d'air)
C..	fraction massique de l'air asséchant à l'entrée du silo (kg/kg d'air)
Da	coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air (m <sup>2</sup> /s)
d	diamètre équivalent des grains (m)
h	épaisseur de couche du maïs ensilé (m)
Ho	rayonnement solaire à la surface du bassin (W/m <sup>2</sup> )
K	conductibilité thermique dans la saumure (W/m/°C)
Lg	profondeur de la nappe phréatique (m)
P	pression totale dans le maïs (atm)
Pa	pression atmosphérique (atm)
Pvs	pression de vapeur saturante dans le

	maïs (atm)
Pv	pression de vapeur dans le maïs (atm)
Pe	périmètre du bassin (m)
To	température de zone de stockage dans le bassin (°C)
t	temps (s)
T	température de la saumure (°C)
<T>	température de produit dans le silo (°C)
Tg	température de la nappe phréatique (°C)
Ts	température de la surface du bassin (°C)
Ta	température de l'air ambiant (°C)
To	température initial du produit (°C)
<U>	vitesse moyenne de l'air (m/s)
<Ua>	vitesse moyenne de l'air à l'entrée du silo (m/s)
M	teneur en eau du produit base humide (kg/kg)
X	teneur en eau du produit base sèche (kg/kg)
Xe	teneur en eau d'équilibre du produit base sèche (kg/kg)
Xo	teneur en eau initial du produit base sèche (kg/kg)
z	cordonnée verticale
ε	porosité du produit
ε <sub>o</sub>	coefficient de réflexion à la surface du bassin
ρ <sub>a</sub>	Masse volumique de l'air (kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>s</sub>	Masse volumique du solide (kg/m <sup>3</sup> )
λ <sub>a</sub>	Conductivité thermique de l'air (w/m/°c)
λ <sub>s</sub>	Conductivité thermique apparente du solide (w/m/°c)
λ <sub>a</sub>	Conductivité thermique de l'air (w/m/°c)
<θ>	Température de l'air intergranulaire (°C)
<θ>	Température de l'air à l'entrée du silo (°C)

#### BIBLIOGRAPHIE

- 1) Gnininvi, M. *et al.* Etude de la Conservation du maïs à une température supérieure de 15 °C au point de rosée (25 °C) dans la zone équatoriale humide, Rapport final du projet 3-p-85-0271/CRDI-Dakar, 139 p, 1992.
- 2) Smith, H. S. *et al.* Etudes Togolaises des systèmes traditionnels de stockage du maïs. Rapport technique du Projet 3-P-83-0272 et 3-P-87-0130/CRDI-Dakar, 32 p, 1990

- 3) CEEMAT : Conservation des grains en régions chaudes. Centre d'Etude et d'Expérimentation du Machinisme Agricole et Tropicale (CEEMAT) Collection Techniques rurales en Afrique, II<sup>ème</sup> édition, 1988.
- 4) Chung, Sup and Fleske, L. F. Development of a simple grain storage unit and storage method applicable to humid areas. Research Report No. 37, Kansas State University, April 1973.
- 5) Banna, M. ; Zeghmati, B. ; Gnininvi, M. Expérimentation d'un bassin solaire à gradient de salinité au Togo : Performance Physiques d'un Bassin découvert et d'un bassin couvert d'une couverture transparente, Soumis pour publication dans les annales de l'Université de Ouagadougou, 1996.
- 6) Daguinet, M. Les séchoirs solaires : théorie et pratique. Edition Unesco 1985, 578p.
- 7) Hull J.R. Physics of the solar pond PhD. Thesis, IOWA State University, 1979.
- 8) Stanwicki S. M. The effect of microflora on the formation of ofors in grain during storage. Communication au symposium International sur la conservation des grains récoltés humides. Paris, 1973.