

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BATNA

Faculté des Sciences de L'Ingénieur

Département de Mécanique

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTERE**

Spécialité : **Mécanique**

Option : **Énergétique**

PAR

**Hannachi Ibtissem**

THEME

---

ETUDE DE TRANSFERT COUPLÉ DANS UNE CAVITE  
CONTENANT UN PRODUIT GRANULAIRE AVEC UNE SOURCE DE  
CHALEUR : CAS DE FERMENTATION  
APPLICATION AGROALIMENTAIRE

---

Soutenu le : 04 Juillet 2007.

**Membres du jury :**

- |                         |                          |            |
|-------------------------|--------------------------|------------|
| ➤ -Dr. Mohamed SI AMEUR | Professeur., Univ. Batna | Président  |
| ➤ -Dr. Hocine BENMOUSSA | M.C, Univ. Batna         | Rapporteur |
| ➤ -Dr. Mabrouk HECINI   | M.C, Univ. Biskra        | Examineur  |
| ➤ -Dr. Chérif BOUGRIOU  | M.C, Univ. Batna         | Examineur  |
| ➤ -Dr. Saâdi BOUGOUL    | M.C, Univ. Batna         | Examineur  |

*À tous ceux qui me sont chers pour leur amour et leur patience. . . .*

## Table des matières

Introduction générale. ....	05	
<b>Chapitre I:Etude bibliographique</b>		
Introduction.....	06	
I.1.Généralités... ..	07	
I.2. Fondement des formulations mathématiques.....	17	
I.3.Présentation de quelques modèles.....	23	
Conclusion.....	31	
<b>Chapitre II: Théorie des dattes</b>		
Introduction.....	33	
II.1.Historique.....	33	
II.2.Patrimoine phoenicol Algérien .....	34	
II.3.Composition et qualité.....	34	
II.4.Technologie de la datte.....	36	
II.5.Problème de conservation .....	37	
II.6. Caractéristiques de Deglet Nour.....	40	
Conclusion .....	42	
<b>Chapitre III: Modélisation et résolution</b>		
Introduction.....	54	
III.1. système d'équations.....	55	
III.2.Adimensionnalisation des équations.....	58	
III.3.Les procédures de la solution numérique.....	61	
III.4.L'effet de respiration.....	68	
<b>Chapitre IV: Résultats et interprétations</b>		
Introduction.....	72	
IV.1-Validation.....	72	
IV.2-Interpretation.....	79	
IV.3-Commentaires généraux.....	80	
<b>Conclusion générale. ....</b>		<b>84</b>
Nomenclature générale. ....	86	
Bibliographie.....	88	

# INTRODUCTION GENERALE

## Introduction Générale :

De nombreuses études ont été réalisées en utilisant l'expérimentation numérique (la simulation numérique) et pratique (expérience du laboratoire), ainsi que les développements théoriques. Il est vraisemblable que l'expérimentation du laboratoire est d'une importance cruciale pour valider les deux autres approches, néanmoins elle reste handicapée par le coût élevé du matériel et la difficulté de la réalisation.

La simulation numérique est confrontée aux problèmes de calcul et de stockage dans la mémoire dans le cas du calcul tridimensionnel, particulièrement à géométrie complexe, et en présence des phénomènes complexes. Mais elle reste la méthode la moins coûteuse, et la plus utilisable. L'évolution rapide des capacités des calculateurs au cours de ces vingt dernières années, a permis un progrès notable dans la compréhension des phénomènes.

La datte a été depuis des temps immémoriaux, un élément très important de l'alimentation, tant pour les humains que pour les animaux, L'emballeur, ou le négociant sont affrontés avec le problème d'apporter au marché un produit périssable pour qu'il aimerait une vie de stockage prolongée sans affaiblir la qualité originale du fruit. La connaissance des phénomènes régissant la conservation des dattes et la maîtrise des techniques de leur stockage sont déterminantes.

Les opérations de germination des produits agroalimentaires stockés se produisent en plusieurs étapes à cause de la modification chimique des substances et l'augmentation des activités enzymatiques. Les mécanismes d'altération font un ensemble de phénomènes bio physicochimique, communs, qu'il faut prendre en considération pour envisager les risques de stockage, et selon les conditions imposées à fin de lutter et protéger d'une manière plus appropriée.

Parmi les phénomènes les plus importants prenant naissance lors du stockage , on trouve l'élévation de température due à plusieurs facteurs dont la respiration des produits , le dégagement du gaz carbonique et les activités biologiques ( fermentation) présentent les aspects les plus dominants.

Plusieurs modèles numériques prédictifs sont développés mais dans la plupart de ces modèles, la transpiration et la respiration sont négligées

Dans notre présent travail, on propose de simuler les effets du transfert de chaleur et de masse avec une génération de chaleur cas de fermentation (transpiration - respiration) dans une maquette remplie de dattes (Deglet Noor) produit granulaire biologique. Pour atteindre ces objectifs, on a résolu les équations de conservation : de masse, d'énergie, et de mouvement.

La résolution numérique s'appuie sur la méthode des différences finies et les équations discrétisées obtenues ont été résolues en utilisant l'algorithme de Thomas (TDMA). Le choix des conditions aux limites a été basé sur des études antérieures.

Notre étude est réalisée logiquement en quatre chapitres, chacun des deux premiers peut être une référence indépendante des autres chapitres.

Le premier chapitre représente des notions sur le stockage, le séchage ainsi qu'une synthèse théorique et bibliographique des transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux.

Le deuxième chapitre est dédié aux théories des dattes (propriétés, valorisation et conservation de la datte : Deglet Noor).

La présentation du problème dans son aspect physique, sa modélisation, et la méthode de résolution ont été l'objet du troisième chapitre

Dans le dernier chapitre on a exposé les résultats issus de cette étude et leurs interprétations.

En conclusion, on estime le travail réalisé et on a ouvert des perspectives sur la suite de ce sujet.

## CHAPITRE I

### Etude theorique et bibliographique des transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux

## Introduction:

La production mondiale des céréales approche plus de deux milliards de tonnes [4]. Ces céréales constituent la base de l'alimentation humaine et représentent un enjeu économique primordial.

La récolte ayant lieu une fois (par fois deux) dans l'année, alors que la consommation est quotidienne, le stockage est une opération indispensable qui pose le problème de la conservation de ces grains, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, problème dans la gravité est énorme accrue dans certains pays. La croyance, généralement répandue que ces produits sont faciles à entreposer, est tout à fait erronée; les accidents de stockage sont assez nombreux et les pertes liées à cette opération sont loin d'être négligeables.

Une partie significative de la production mondiale faisant l'objet d'échanges internationaux, la conservation pendant le transport pose le même type de problème, notamment pour le transport maritime de longue durée.

La présence de gradient de températures est une cause de déstabilisation. Le problème, dans sa généralité est extrêmement complexe puisqu'il s'agit de phénomènes instationnaires en milieu poreux, mettre en jeu des transferts couplés de chaleur et de masse, transferts à la fois diffusifs et convectifs dans une géométrie tridimensionnelle si l'on veut tenir compte de sollicitations thermiques externes.

De plus le matériau biologique stocké se comporte comme une source (ou un puits) thermique.

Des modélisations de ces transferts sont apparues mais la plupart d'entre elles sont de type diffusifs, le plus souvent monodimensionnel.

La tendance consiste à utiliser des modèles très simplifiés associés à des conditions aux limites complexes. Ce n'est que dernièrement que des modèles plus élaborés ont été mis au point.

Vu la complexité de ce problème, une recherche bibliographique est indispensable pour mieux approcher les connaissances.

## I.1-GENERALITES:

- **le séchage :**

Selon le dictionnaire Larousse: (Le séchage est le traitement qui a pour objet d'éliminer d'un corps, en totalité ou en partie, l'eau qui s'y trouve incorporée. Dans un sens plus large du terme le séchage est une opération qui consiste à traiter un produit pour en éliminer une substance absorbée, cette dernière étant généralement liquide mais parfois gazeuse. Le produit traité peut être solide (céréale, bois, minerais), liquide (solution saline, savon liquide, graisse fondue,...) ou gazeux (air humide, fumée de combustion,...etc.) Le séchage est donc un sujet très vaste. Nous nous limiterons au cas de l'élimination de l'eau de produit hygroscopique [1].

Le séchage des produits hygroscopiques est défini comme l'opération d'élimination de l'eau par vaporisation. Bien que restrictive cette définition correspond aux processus de séchage le plus répandu dans le domaine agricole; Il consiste à ventiler un produit avec de l'air ambiant ou réchauffé de quelques degrés jusqu'à obtenir un produit plus sec capable d'être transporté ou emmagasiné dans les meilleures conditions de préservation de ses propriétés germinatives ou alimentaires. [2]

Ce type de séchage correspond physiquement à la diffusion de la vapeur d'eau de la surface du produit au fluide en mouvement. Lorsque la pression de la vapeur d'eau à la surface du produit devient égale à celle existant dans l'air ambiant le produit hygroscopique est en équilibre avec l'air qui l'entoure. La relation entre la teneur en eau d'équilibre  $M_e$  du produit et la pression de vapeur de l'air (ou l'humidité relative) à une température donnée constitue l'isotherme de désorption (cas du séchage) ou de sorption (cas de la réhumidification).

L'expérience de base permettant de caractériser la cinétique de séchage consiste à soumettre une couche mince d'un produit à l'action d'un courant d'air de température, humidité et vitesse fixées et de mesurer la masse du produit en fonction du temps.

- **le stockage :**

Les céréales constituent une part prépondérante de l'alimentation humaine et parmi les nombreuses opérations intervenant entre la récolte et la consommation, le stockage peut occasionner, contrairement à une idée largement répandue, de lourdes

pertes dont les causes sont nombreuses (respiration du produit, germination,...etc) mais qui ont toutes en commun d'être favorisées par une température de stockage élevée. [3]

La présence de gradients thermiques au sein d'un silo est une cause importante de déstabilisation. On distingue deux types de cause de l'apparition de ces gradients :

#### Causes externes :

Ce sont principalement les alternances de température diurne et nocturne, ou saisonnières (été, hiver) et les écarts de température entre deux faces d'un silo (l'une exposée au soleil, l'autre à l'ombre). Le même type de phénomène se produit lors du transport maritime de longue durée à la traversée de mer chaude.

#### Causes internes :

Une zone chaude au sein d'un silo peut apparaître, correspond à une masse de grain insuffisamment séchée qui devient le siège d'un dégagement de chaleur et d'humidité par effet biologique.

- **L'effet de gradient de température dans un silo [4]:**

Un gradient de température résulte de la présence d'un point froid ou d'un point chaud, mais dans tous les cas, la faible capacité calorifique et la faible conductivité thermique des grains tendent à rendre les phénomènes très lents, et autorisent des élévations de températures fortes et localisées. Les gradients de températures ainsi créés engendrent un double transfert de chaleur et de masse, légèrement décalés chronologiquement, du point le plus chaud vers le point le plus froid.

On peut en distinguer deux effets principaux, qui se réalisent souvent en pratique dans les silos de stockage :

Effet de paroi froide: peut se produire en différentes circonstances, ces phénomènes sont particulièrement accentués dans les pays très ensoleillés, ou de climat très contrasté. Si l'air entraîné par les courants de convection intergranulaires a une température de rosée supérieure de la température des couches de grains qu'il atteint au cours du transfert, il y a condensation d'eau liquide à la surface des grains qui absorbe cette eau (mécanisme identique à celui de la condensation d'eau en hiver sur une vitre froide). Si non l'air chaud et humide qui diffuse se refroidit sans condensation au contact des grains : son H.R augmente et devient supérieur à l'H.R.E. des grains froids qui absorbent la vapeur d'eau jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre des  $A_w$  soit atteint.

Si la condensation est abondante, l'eau peut se ruisseler avant d'être réabsorbée par des grains situés plus bas le long des parois et dans la partie inférieure de la cellule, notamment dans le cône de vidange. Il peut y avoir également condensation sur le toit du silo, l'eau condensée retombant en pluie sur les grains situés à la partie supérieure du silo. Il y a lieu de noter que la paroi froide coïncide en général avec l'une des parois des silos; Il peut toute fois arriver que les parois et les grains avoisinants soient plus chauds que ceux du centre de la cellule qui constituent alors la paroi froide : la vapeur d'eau et la chaleur migrent ainsi de la périphérie vers le centre de la cellule. Ce cas peut se produire lorsqu'un silo a été exposé à des températures très basses pendant un temps suffisamment long pour que le centre soit froid.

Si l'humidité et la température dépassent les seuils critiques dans les zones réhumidifiées, on assiste au développement des moisissures toujours présent voir de bactéries, éventuellement des insectes, dans les métabolismes actifs vont libérer les quantités supplémentaires de chaleur et de vapeur d'eau : au phénomène purement physique de transfert, se superpose alors un processus biologique.

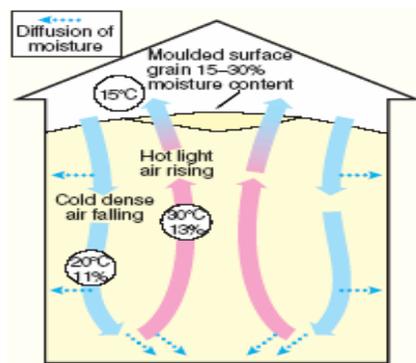


Figure I-1 : mouvement d'air dans les grains [5].

L'effet du point chaud [4]. : Lorsqu'il y a une zone de production importante localisée de chaleur par effet biologique (respiration des insectes des microorganismes et/ou des grains) dans ce cas il apparaît un phénomène de convection ascensionnelle et verticale, l'air intergranulaire chargé de chaleur et de vapeur d'eau migrant de puis le point chaud vers les masses de grains plus secs et plus frais situé au-dessus, qui se rehumidifient selon le double mécanisme.

La zone ainsi réhumidifiée et tiédie peut être à son tour le siège d'un échauffement biologique (respiration), qui provoque un nouveau transfert de chaleur et de vapeur d'eau puis haut dans la masse. Le phénomène peut ainsi propager de proche en proche vers le haut du silo ou, la chaleur et l'humidité vont s'accumuler. Ce milieu chaud, humide et oxygéné (proche de l'air extérieur), est très favorable à un développement explosif des moisissures.

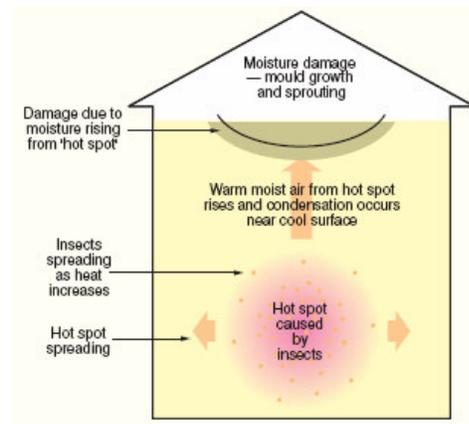


Figure I-2 : l'invasion des insectes dans un silo de grains [5].

- **Milieu poreux et approches macroscopiques:**

On appelle milieu poreux, un corps comportant un squelette solide englobant des cavités appelées pores, en général, interconnectées, susceptibles de contenir une ou plusieurs phase fluides. [3]

Des phénomènes de transfert de matière peuvent avoir lieu dans les phases fluides contenues dans les pores, ainsi que de transfert de chaleur dans les phases fluide et la phase solide.

A l'échelle des pores ces phénomènes sont mathématiquement décrits par les équations classiques de la mécanique des fluides, de la diffusion et de transfert de chaleur. Mais le problème se pose au niveau des conditions aux limites imposées par la géométrie exacte des pores. L'approche macroscopique s'avère alors nécessaire de manière que les utilisateurs puissent s'intéresser aux aspects globaux.

En effet depuis plus d'un siècle, les chercheurs ont procédé à la description des phénomènes en milieu poreux au moyen d'équations valables à l'échelle macroscopique. Dans telle équation le milieu poreux est traité comme un milieu

continu fictif décrit à l'aide d'un certain nombre de paramètres, tels que vitesse de filtration, perméabilité, viscosité qui n'ont de sens qu'à l'échelle macroscopique.

L'échelle macroscopique du milieu continu fictif équivalent est définie à partir d'un élément de volume poreux, dit volume élémentaire représentatif (V.E.R), dont les dimensions sont grandes auprès des dimensions des pores.

### 1. Caractéristiques géométriques :

Granulométrie : Pour un milieu poreux non consolidé, il est facile de déterminer le diamètre moyen des grains ainsi que la dispersion des diamètres des grains par rapport à ce diamètre moyen.

Porosité : étant donné une sphère  $S(m, r)$  de centre  $m$ , de rayon  $r$ , on définit la porosité au point  $m$  par :

$$\varepsilon(m, r) = \frac{\text{Volume du fluide à l'intérieur de la sphère}}{\text{volume de la sphère}} = \frac{V_f}{V} \quad (\text{I.1})$$

Pour des milieux non consolidés comme les poudres, les sables, la terre, la porosité varie entre 0.37 et 0.54 et pour des milieux consolidés comme les grès, les calcaires, les briques, elle varie de 0.04 à 0.38.

Surface spécifique : la surface spécifique d'un milieu poreux est le quotient de la surface de la phase solide par le volume total du milieu poreux, elle est d'autant plus grande que le milieu est plus finement divisé.

Tortuosité: en définissant la tortuosité comme le rapport de la longueur d'un capillaire à la distance entre ses extrémités

### 2. Perméabilité du milieu poreux : loi de Darcy [6]

Considérons un milieu poreux homogène saturé par un fluide newtonien. Soit un écoulement unidirectionnel de section droite  $S$  et de débit volumique  $Q$ , on définit :

-La vitesse de filtration  $|V| = Q/S$

-La vitesse interstitielle qui est la vitesse moyenne réelle du fluide dans les pores  $|V_i| = Q/S \varepsilon$ .

La loi de Darcy est une relation phénoménologique qui relie la vitesse de filtration, le gradient de pression et la force de gravité. Cette loi établie empiriquement en 1856 :

$$\bar{V} = - \frac{K}{\mu} (\overline{\text{grad } p} - \rho \bar{g}) \quad (\text{I.2})$$

Dans cette relation  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide,  $K$  une constante, appelée perméabilité du milieu poreux considéré. Elle s'exprime en Darcy (1 Darcy=  $9,87 \cdot 10^9 \text{cm}^2$ )

Remarque : un milieu homogène peut manifester du point de vue de l'écoulement de filtration un comportement anisotrope. On a alors :  $\bar{v} = \frac{K}{\mu} (\overline{grad} p - \rho \bar{g})$  (I.3)

### 3. La dispersion dans le milieu poreux :

La dispersion est due à l'action combinée d'un phénomène purement mécanique et d'un phénomène physico-chimique.

#### Dispersion mécanique :

1. la vitesse est nulle à la surface du solide, ce qui crée un gradient de vitesse dans la phase fluide, comme dans un capillaire.
2. la variation des dimensions des pores provoque des disparités entre les vitesses maximales le long de l'axe des pores.
3. les lignes d'écoulement fluctuent autour de la direction moyenne d'écoulement.

#### Dispersion physico-chimique :

Elle résulte de gradient de potentiels chimiques liés à la concentration. Évidemment, ce mécanisme existe même si le fluide est au repos.

### 4 .la convection dans le milieu poreux :

Le mouvement de convection se développant dans le milieu poreux dépend des conditions aux limites hydrodynamiques, thermiques et de la forme contenant le milieu poreux.

#### Conditions aux limites hydrodynamiques :

La vitesse moyenne pour le fluide saturant à travers tout le volume est nulle et deux sortes de conditions aux limites peuvent exister :

- le milieu poreux est limité par une surface rigide et imperméable
- une surface libre pour le fluide existe soit à l'intérieur soit à l'extérieur.

#### Conditions aux limites thermiques :

Deux types de conditions aux limites extrêmes sont possibles :

- frontière isotherme
- frontière isolée

#### Forme de volume contenant le milieu poreux :

La nature est complexe mais d'évidence les recherches sont menées sur des configurations géométriques simples.

- **Corrélation entre l'activité de l'eau et la teneur en eau [4]:**

Lorsque un produit humide est placé dans une atmosphère gazeuse contenant de la vapeur d'eau il y a en générale des échanges de chaleur et de vapeur d'eau entre les deux phases, soit que le produit absorbe de l'eau et se ré humidifie, soit au contraire qu'il perde de l'eau au profit de l'atmosphère, jusqu'à ce que l'équilibre thermodynamique s'établisse ; les températures et les pressions sont alors constantes et égales dans les deux phases, l'eau étant quantitativement distribuée entre la phase solide( où l'on peut définir la teneur en eau et l'activité de l'eau), et la phase vapeur où l'on peut mesurer la pression partielle de vapeur d'eau (p), ou encore l'humidité relative (H.R) qui est le rapport de la pression p à la pression saturante p' de l'eau pure à la même température (T) : 
$$H.R. = \left( \frac{p}{p'} \right)_T \times 100 \quad (I.4)$$

Dans les conditions d'équilibre, et en admettant que l'eau soit un gaz parfait, on montre que l'activité d'eau  $A_w$  peut être numériquement identifiée au rapport de pression partielles de vapeur d'eau : 
$$A_w = \frac{p}{p'} = \frac{H.R.E\%}{100} \quad (I.5)$$

- **Aperçu bibliographique :**

Les premières études théoriques sont celle de Lewis et de Sherwood. Lewis (1921) décrit le séchage comme étant la conjugaison de deux processus : évaporation de l'humidité à la surface de milieux poreux et diffusion de l'humidité de l'intérieur du solide vers la surface. Sherwood en 1929 décrit en détail la période de séchage à vitesse décroissante: le mécanisme de transport interne est assimilé à une diffusion décrite par une simple loi de Fick sans préciser d'avantage le mécanisme physique de cette migration. La force motrice choisie est la concentration C. En considérant un coefficient de diffusion  $D_c$  constant pour obtenir des solutions analytiques, le séchage est décrit par : 
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \nabla^2 C \quad [7] \quad (I.6)$$

En 1937, Ceaglske et Hougen ont démontré clairement les limitations de l'équation de la diffusion et le rôle capital joué par la capillarité en étudiant le séchage de solides granulaires (lit de sable). Ils ont calculé les profils de l'humidité dans le solide à partir de la relation succion capillaire-teneur en eau : le système est supposé à l'équilibre avec une pression de la phase gazeuse constante et une répartition hydrostatique de la pression de la phase liquide. Hougen a effectué des travaux

montrant pour plusieurs matériaux que la théorie capillaire est bien adaptée, mais conclut qu'aucune de ces deux théories n'est satisfaisante pour tous les matériaux.

Durant les années cinquante, Krischer a examiné les différents aspects du transport en milieu poreux hygroscopiques : une période à vitesse de séchage constante, tant que la surface est alimentée par les forces capillaires, une deuxième période à vitesse décroissante lorsque la surface entre dans le domaine hygroscopique et la dernière qui accuse une chute plus marquée de la vitesse lorsque toute l'eau libre a disparu. Tous les travaux de Krischer sont regroupés dans un ouvrage qui, encore aujourd'hui, constitue la base des connaissances sur le séchage.

Luikov en 1954, puis De Vries et Philip en 1957, ont proposé une modélisation mathématique prenant en considération la coexistence des phases liquide et vapeur au sein du milieu poreux et faisant apparaître les effets de couplage entre le transfert de masse et le transfert de chaleur. Une grande contribution est apportée par De Vries et Philip sur la description des transferts couplés en milieu poreux non saturé à partir d'études sur les sols ; ils ont formulé sur des bases physiques claires les équations constitutives pour les densités de flux de liquide et de vapeur en fonction des gradients de concentration volumique d'eau liquide, de température et de l'intensité de la

pesanteur. [8]

$$\frac{q_l}{\rho_l} = -D_{cl} \nabla C_l - D_{Tl} \nabla T - \frac{k_l}{\mu} \rho_l g \quad (I.7)$$

$$\frac{q_v}{\rho_v} = -D_{cv} \nabla C_l - D_{Tv} \nabla T$$

Les coefficients phénoménologiques  $D_{cl}$  et  $D_{il}$  de migration en phase liquide sont simplement reliés à la courbe de succion capillaire. De même les coefficients  $D_{cv}$  et  $D_{Tv}$  de migration à l'état vapeur dépendent du coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air et de la relation de Kelvin-Luikov introduit dans son modèle un terme de changement de phase

$$\dot{m} = -\varepsilon \rho_s \frac{\partial X}{\partial t}$$

L'inconvénient de ce modèle et que le taux de changement de phase  $\varepsilon$  est très difficile à déterminer expérimentalement et ceci constitue une limitation réelle au système différentiel proposé par Luikov. Ce modèle a été étendu à partir de la méthode de la thermodynamique des processus irréversible par Cary et Taylor en 1962.

Cette approche ne permet pas d'obtenir l'explication physique des mécanismes du séchage.

Les méthodes plus modernes sont basées sur une macroscopisation des équations physiques relatives à l'état microscopique de chaque phase. Cette opération dépend de la technique de prise de moyenne utilisée introduite un certain nombre de termes supplémentaires.

Tv.Nguyen étudie numériquement les transferts couplés par convection naturelle dans une cavité rectangulaire remplie de grains, à l'aide d'un modèle mathématique instationnaire bidimensionnel qui exprime une température et deux humidités (air et grain). Les distributions de température, de vitesse et d'humidité sont obtenues pour une boîte rectangulaire à section carrée avec et sans espace libre en haut.

G.Lauriat présente une synthèse des travaux qui ont marqué le développement des théories de couche limite en milieux poreux le long de la dernière décennie. La participation de l'auteur fut présentée sous forme de résultats numériques en excellent accord avec les solutions analytiques. L'étude montre le nombre de Rayleigh  $Ra$  et le facteur de forme  $A$  comme directeur des phénomènes. Sur le plan d'études expérimentales I. Catton a signé dans son rapport de nombreuses difficultés d'expérimentation encore rencontrées dans le domaine de transferts en milieux poreux.

R.Syarief expérimente les transferts de chaleur et d'humidité en laboratoire dans un caisson contenant du Riz-Raddy pour simuler les variations diurnes, une paroi du caisson est soumise à un gradient de température alterné. Les résultats montrent que la convection naturelle entraîne un déplacement d'humidité du bas vers le haut. L'air se sature au cours de son déplacement donc réduit la teneur en eau d'équilibre, cette eau vaporisée se condense plus loin de la paroi supérieure.

Griffthe (1964) [9] observe que les grains stockés avec une teneur d'eau [9-11]%(b.h) à une température  $T=40^{\circ}\text{C}$ , la face supérieure des grains s'agglutine après six mois, il a observé aussi en Australie que telle agglutination ne se produit pas avec une température initiale inférieure à  $15^{\circ}\text{C}$ . En 1971 Pixton et Griffthe déterminent que le coefficient de diffusion apparente de la masse à travers les grains est  $10^{-11}\text{m}^2/\text{s}$ .

Thorpe (1980-1981) a reconnu que la majorité de la diffusion de masse se déroule dans l'air intergranulaire et il détermine une valeur empirique de la tortuosité du silo des

grains. La validité de cette approche est confirmée par Khankaria et al (1994) et est complétée par une étude théorique portée par Thorpe et al (1991) la masse déplacée par les courants convectifs sont modélisés en 2D par Nguyen(1987). Et après par Dona et Stewart (1988), Freer et al(1990) et Khankaria et al (1993). Ce travail est étendu à 2D avec des formes arbitraires par Singh et Thorpe (1993a) et Cascada et Young (1994). Une méthode basée sur le vecteur potentiel pour quantifier la convection naturelle dans un silo en 3D est présentée par Singh et al (1993a). Cela est généralisé pour simuler la migration de masse dans un silo d'une forme arbitraire par Singh et Thorpe (1993).

Thorpe (1996) a raffiné les analyses des processus de transfert de chaleur et de masse qui se produisent dans un silo pour inclure les implications de la conservation de masse et d'énergie quand les grains respirent. Cette analyse est utilisée pour décrire les phénomènes de respiration associés les convections naturelles et forcées dans des formes arbitraires.

## I.2-Fondement des formulations mathématiques :

On considère un volume poreux limité par la surface  $\Sigma$ . Le substrat solide immobile de chaleur volumique  $(\rho c)_s$ , est de conductivité thermique  $\lambda_s$ , est caractérisé par sa porosité  $\varepsilon$  et sa perméabilité  $k$ . Le fluide saturant totalement le substrat a une chaleur volumique  $(\rho c)_f$ , une conductivité thermique  $\lambda_f$ , un coefficient d'expansion thermique  $\beta$  et une viscosité cinématique  $\nu$ .

Le milieu poreux ainsi constitué possède une chaleur volumique  $(\rho c)^*$  telle que :

$$(\rho c)^* = \varepsilon(\rho c)_f + (1 - \varepsilon)(\rho c)_s \quad (I.9)$$

La conductivité thermique équivalente  $\lambda^*$  est une fonction complexe des conductivités thermiques du solide et du fluide ainsi que d'un certain nombre de paramètres. Tels que la texture du milieu poreux. [7]

$$(1/\lambda^*)_{\text{série}} = \frac{\varepsilon}{\lambda_f} + \frac{1-\varepsilon}{\lambda_s} \quad (I.10)$$

$$\lambda^*_{\text{parallèle}} = \varepsilon\lambda_f + (1 - \varepsilon)\lambda_s \quad (I.11)$$

La complexité des échanges au niveau des pores entraîne par nécessiter l'introduction de la notion d'équation modèle, la résolution de ce type de problèmes se fait sur la base de l'un des modèles suivants :

- Écoulement de type potentiel soumis à la loi de Darcy

- Écoulement en régime de couche limite

Dans ce qui suit, nous allons exposer brièvement les équations de base de chaque type. On considère d'abord le cas de transfert de chaleur seul puis un modèle d'écoulement obéissant à la loi de Darcy considère le transfert couplé de chaleur et de masse :

### 1.2.1 Transfert de chaleur simple :

#### a) Écoulement potentiel suivant la loi de Darcy [8]:

- *Equation de mouvement :*

L'équation de Darcy généralisée déduit d'une opération de macroscopisation des équations ponctuelles appliquées au fluide interstitiel, s'écrit :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon} \bar{V} \text{grad} \bar{V} = -\text{grad} p + \rho \bar{g} - \frac{\mu}{k} \bar{V} \quad (\text{I.12})$$

Forcheimer avait par ailleurs introduit empiriquement le terme proportionnel au carré de la vitesse. Cette formulation a été confirmée expérimentalement. La loi de Darcy-Forcheimer :

$$\text{grad} p = \rho \bar{g} - \frac{\mu}{K} \bar{V} - \rho b \frac{|\bar{V}|}{K} \bar{V} \quad (\text{I.13})$$

Où le paramètre  $b$  déterminé en convection forcée (Ergun), caractérise le milieu poreux.

Par exemple pour un lit de diamètre  $d$  et de porosité  $\varepsilon$  :  $K = \frac{d^2 \varepsilon^2}{150(1-\varepsilon)^2}$  et  $b = \frac{1,75 d}{150(1-\varepsilon)}$

Lorsque la perméabilité est importante, la loi de Darcy devient insuffisante car il faut tenir compte des forces visqueuses. A cet effet, Brinkman a modifié cette loi en ajoutant un terme représentant les contraintes visqueuses soit :  $\text{grad} p = \rho \bar{g} - \frac{\mu}{K} \bar{V} + \mu' \nabla^2 \bar{V}$  (I.14)

Où  $\mu'$  est une viscosité effective. L'intérêt principal de cette loi est de permettre de satisfaire la condition d'adhérence sur une paroi et de tenir compte de l'augmentation de la porosité au voisinage de la paroi.

Lorsque les vitesses de filtration sont faibles (nombre de Reynolds basé sur une dimension caractéristique des pores inférieur à l'unité) et la perméabilité du milieu est petite, les forces d'inertie sont négligeables devant les forces visqueuses. La loi de Darcy appropriée, avec un terme instationnaire peut être écrite comme suit:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = -\text{grad} p + \rho \bar{g} - \frac{\mu}{k} \bar{V} \quad (\text{I.15})$$

La perméabilité des milieux poreux rencontrés en pratique est de l'ordre de  $10^{-8} \text{m}^2$  de sorte que le terme en  $(\delta t)$  se trouve quasiment négligeable. A cet effet dans la plus parts

des résolutions numériques, l'équation de Darcy sera utilisée en négligeant le terme transitoire.

- Équation d'énergie :

La description du transfert de chaleur dans un milieu poreux amène à l'écriture de la conservation d'énergie suivant l'un des modèles suivants :

- Modèle de fluide fictif unique :

$$(\rho c)^* \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \bar{V} \cdot \nabla T = \lambda^* \nabla^2 T \quad (I.16)$$

- Modèle à deux températures :

M.Combarbons et S.Bories ont donné une description plus fine du transfert de chaleur et distinguent les températures  $T_s$  et  $T_f$  des phases fluide et solide.

Pour le fluide :

$$\varepsilon (\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c)_f \bar{V} \cdot \nabla T_f = \lambda_f^* \nabla^2 T_f - h (T_f - T_s) \quad (I.17)$$

Pour le solide :

$$(1 - \varepsilon) (\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s^* \nabla^2 T_s - h (T_s - T_f) \quad (I.18)$$

- Equation de conservation de masse :

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \quad (I.19)$$

- Equation d'état du fluide :

Elle s'obtient à partir de l'équation du gaz parfait appliquée à, l'air sec et à la vapeur d'eau. Dans un volume élémentaire d'air humide, les masses volumiques s'écrivent [8] :

$$\rho_v = \frac{M_v P_v}{RT} \quad \text{Et} \quad \rho_a = \frac{M_a P_a}{RT}$$

$$\rho = \rho_a + \rho_v = \frac{1}{RT} (M_v P_v + M_a P_a) \quad (I.20)$$

Avec les indices v pour vapeur et a pour air sec.

D'après la première loi de Dalton applicable aux gaz parfaits, si la pression totale P est la somme des pressions partielles de l'air sec ( $p_a$ ) et de la vapeur ( $p_v$ ) du rapport des

équations il vient :

$$Y = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{a P_v}{P - P_v} \quad \text{où} \quad a = \frac{M_v}{M_a}$$

La masse volumique de l'air humide peut s'écrire :

$$\rho = \frac{M_a P}{RT} \cdot \left( \frac{1 + Y}{1 + Y/a} \right) \quad (I.21)$$

L'expression de  $\rho$  peut se linéariser et s'écrire :

$$\rho \cong \rho_o + \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{p,y} (T - T_o) + \left( \frac{\partial \rho}{\partial Y} \right)_{T,p} (Y - Y_o) + \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{Y,T} (P - P_o) \quad (I.22)$$

La pression  $P$  peut être considérée constante et si on néglige la dilatation massique l'équation d'état du fluide peut se mettre sous la forme suivante :  $\rho = \rho_0 [1 - \beta(T_f - T_0)]$

Où  $\rho_0$  représente la masse volumique du fluide à une température de référence  $T_0$ , et  $\beta$  représente le coefficient d'expansion thermique donné par la relation :  $\beta = - \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]$

**Remarque :** simplifications de Boussinesq [7]

L'expérience a montré que les valeurs du coefficient  $\beta$  pour les liquides et les gaz sont généralement très petites (ordre de  $10^{-4}$ ) de sorte que si les écarts de température enregistrés dans le système physique sont petits, il est possible de négliger les variations de la masse volumique en fonction de la température dans les équations posées sauf dans le terme  $\rho g$  de l'équation de Darcy, terme moteur de la convection naturelle. Les autres caractéristiques sont supposées indépendantes de la température.

#### b) Ecoulement en régime de couche limite dans une cavité [7]:

Cette méthode permet de décrire les champs de vitesses et de températures bidimensionnelles.

Les hypothèses à satisfaire pour cette résolution sont:

- Le mouvement vertical est confiné dans deux couches limites d'épaisseur  $\delta$  négligeable devant  $H, D$  la hauteur et la largeur de la cavité, respectivement.
- La région centrale de la cavité est stratifiée thermiquement.

Introduisons la fonction de courant définie par :  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$  ;  $v = - \frac{\partial \psi}{\partial x}$

Considérant les simplifications de Boussinesq, les équations de bilans pour régime stationnaire s'écrivent alors :  $\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = a \left[ \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} \right]$  (I.23)

Où  $a$  représente la diffusivité thermique équivalente de la matrice poreuse.

**Equation de mouvement :**  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = - \frac{\rho g \beta K}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x}$  (I.24)

Si  $\delta$  dénote l'épaisseur de la couche limite verticale, les équations précédentes entraînent les équations approximatives suivantes :

$$\frac{\psi}{\delta^2} \approx \frac{\rho g \beta K}{\mu} \frac{\Delta T}{\delta} \quad \text{Et} \quad \frac{\psi}{\delta} \cdot \frac{\Delta T}{H} \approx a \frac{\Delta T}{\delta^2} \quad \text{D'où} \quad \psi \approx \frac{aH}{\delta}$$

La combinaison des équations nous donne : 
$$\delta^2 \approx \frac{aH}{\rho g \beta K} \frac{\mu}{\Delta T} \quad (I.25)$$

En introduisant le nombre de Rayleigh de filtration construit sur la hauteur H de la cavité, l'équation devient : 
$$\delta^2 \approx H R \frac{1}{a} \quad \text{Avec} \quad Ra = \frac{\rho g \beta K \Delta T}{a \mu}$$

### 1.2.2- Transfert couplé de chaleur et de masse [7]:

Dans un tel cas s'impose un mécanisme de séchage (ou d'humidification), une étude de base de ce problème a été donnée par Banks en 1972.

Le modèle mathématique permettant de décrire ce genre de transferts pour un phénomène bidimensionnel instationnaire, se base sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- a- le tassement du produit au cours du séchage est négligeable.
- b- Du fait de faible vitesse d'air mise en jeu par la convection naturelle, la différence entre les températures de l'air et de produit est négligeable (modèle à une température).
- c- La masse volumique de l'air est considérée constante. Cependant, les faibles variations de celle-ci sont conservées seulement lorsqu'elles provoquent le mouvement (approximation de boussinesq)
- d- Les gradients de température sont faibles à l'intérieur des particules solides.

#### a- Formulation des équations de base :

Si  $f$  représente une grandeur physique dispersée en volume dans l'air et le produit, on peut écrire : 
$$f = \varepsilon f_a + (1-\varepsilon) f_p \quad (I.26)$$

Le bilan de conservation de  $f$  dans le volume élémentaire représentatif  $V$  s'écrit :

$$\frac{D}{Dt} \iiint_V [\varepsilon f_a + (1-\varepsilon) f_p] dv = \iiint_V \Phi dv + \iint_S \bar{\varphi} \bar{n} ds \quad (I.27)$$

Où  $\Phi$  et  $\varphi$  sont respectivement la production volumique et surfacique de  $f$ .

D'après Gauss-Ostrogradski on peut écrire : 
$$\iint_S \bar{\varphi} \bar{n} ds = \iiint_V \text{div} \bar{\varphi} dv$$

L'identification des deux membres de l'équation donne alors :

$$\varepsilon \frac{\partial f_a}{\partial t} + \text{div} f_a \bar{V} + (1-\varepsilon) \frac{\partial f_p}{\partial t} = \Phi + \text{div} \bar{\varphi} \quad (I.28)$$

Équation de conservation de masse :

Suivant la formulation précédente on a :  $\begin{cases} f_a = \rho_a Y \\ f_p = \rho_p X \end{cases} \Rightarrow f = \varepsilon \rho_a Y + (1 - \varepsilon) \rho_p X$  (I.29)

L'écriture de l'équation dans ce cas donne :  $\rho_a \varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho_a \left[ u \frac{\partial Y}{\partial x} + v \frac{\partial Y}{\partial y} \right] + (1 - \varepsilon) \rho_p \frac{\partial X}{\partial t} = 0$  (I.30)

Un certain arrangement des termes de cette équation conduit à la forme suivante :

$$\varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + \varepsilon \gamma \frac{\partial X}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} + v \frac{\partial Y}{\partial y} = 0 \quad (I.31)$$

Où  $\gamma$  est un facteur adimensionnel donné par :  $\gamma = \frac{(1 - \varepsilon) \rho_p}{\varepsilon \rho_a}$  (I.32)

Équation de conservation d'énergie :

Suivant la formulation de base, on peut écrire pour le bilan d'énergie :

$$\begin{cases} f_a = \rho_a [c_a T_a + Y(c_w T_a + L_v)] \\ f_p = \rho_p (c_p + X c_w) T_p \\ \Phi = 0 \\ \varphi = \lambda_a \overline{\text{grad}} T_a + \lambda_p \overline{\text{grad}} T_p \end{cases} \quad (I.33)$$

Avec  $L_v$  chaleur latente de vaporisation de l'eau.

Suivant la même logique on a :  $\frac{\partial f_a}{\partial t} = \rho_a \left[ (c_a + Y c_w) \frac{\partial T_a}{\partial t} + (c_w T_a + L_v) \frac{\partial Y}{\partial t} \right]$  (I.34)

$$\text{div} f_a \vec{V} = \rho_a \left[ (c_a + Y c_w) \text{div} \vec{V} T_a + (c_w T_a + L_v) \text{div} \vec{V} Y \right] \quad (I.35)$$

$$\frac{\partial f_p}{\partial t} = \rho_p \left[ (c_p + X c_w) \frac{\partial T_p}{\partial t} + c_w T_p \frac{\partial X}{\partial t} \right] \quad (I.36)$$

Considérant les hypothèses simplificatrices (modèle à une température ( $T_a = T_p$ )), le regroupement de ces équations, aboutit à l'équation de conservation d'énergie suivante :

$$(\rho \varepsilon)^* \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a (c_a + Y c_w) \text{div} T \vec{V} = \lambda^* \nabla^2 T + L_v (1 - \varepsilon) \rho_p \frac{\partial X}{\partial t} \quad (I.37)$$

Où  $(\rho \varepsilon)^*$  représente la chaleur volumique du milieu poreux donnée par :

$$(\rho \varepsilon)^* = \varepsilon \rho_a (c_a + Y c_w) + (1 - \varepsilon) \rho_p (c_p + X c_w) \quad (I.38)$$

Equation de conservation de mouvement :

Le genre d'écoulement mis en jeu par la convection naturelle dans un milieu poreux peut être régi par la loi de Darcy.

Equation d'état du fluide :

La même forme linéarisée donnée précédemment.

### I.3 Présentation de quelques modèles :

Tous les phénomènes peuvent être modélisés avec grands détails dans différentes formes; mais pour la description de comportement dynamique du sécheur avec plusieurs particules seulement la forme simple est utilisée à cause de l'insuffisance des propriétés thermodynamiques.

Le modèle désirable n'est pas nécessairement le plus complété mais celui qui a les caractéristiques essentielles (généralité, simplicité, robustesse, temps de calcul...).

#### a )- Modèle de Luikov [3]:

Luikov et al ont développé un modèle mathématique global pour décrire le séchage des corps capillaires. Le déplacement de l'eau ou de la vapeur à l'intérieur du produit s'effectue sous l'action des forces de capillarité et de la diffusion provoquée par l'existence des gradients d'humidité  $M$ , température  $T_p$  ou pression totale  $P$ .

$$\text{Le système d'équations s'écrit :} \quad \begin{cases} \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} T_p + \nabla^2 K_{13} P \\ \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T_p + \nabla^2 K_{23} P \\ \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} M + \nabla^2 K_{32} T_p + \nabla^2 K_{33} P \end{cases} \quad (\text{I.39})$$

Les coefficients  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$ , sont les coefficients phénoménologiques tandis que les autres représentent les coefficients du couplage. Ils sont largement fonction de l'humidité et de la température et très difficilement accessibles à l'expérience. Un certain nombre de simplifications peut être apporté à ce système au moins dans le cas du séchage de grains. Par exemple l'influence des gradients de pression n'est importante que pour des températures bien au dessus de celles couramment utilisées dans le séchage des grains de céréales.

Il est souvent possible de faire l'hypothèse que les gradients de température sont faibles devant les gradients d'humidité et de réduire les équations à la forme qui se

$$\text{trouve être la loi de Fick :} \quad \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 D M \quad (\text{I.40})$$

Le coefficient  $D$  est un coefficient de diffusion équivalent qui dépend fortement des niveaux de température et de humidité.

Dans le cas des hypothèses simplificatrices suivantes :

Le coefficient  $D$  est constant, les grains sont sphériques de rayon  $r$ , la diffusion est radiale et l'humidité initiale du produit est uniformément répartie; l'équation admet une solution de la forme :

$$\frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-D \frac{n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (\text{I.41})$$

Cette solution va servir à justifier des formulations semi empiriques.

### b)- Modèle instationnaire à une température et deux humidités [7]:

Le modèle de transfert couplé est adopté pour le problème de transfert par convection naturelle dans une boîte de dattes Deglet Nour [7] :

Système d'équations :

*Equation de conservation d'humidité :*

$$\varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + \varepsilon \gamma \frac{\partial X}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} + v \frac{\partial Y}{\partial y} = 0 \quad (\text{I.42})$$

*Equation d'énergie :*

$$\frac{(\rho\varepsilon)^*}{\varepsilon\rho_a} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} (c_a + \gamma c_w) \left[ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\lambda^2}{\varepsilon\rho_a} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + \gamma L_v \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{I.43})$$

*Equation du mouvement :*

L'équation régissant le mouvement d'air à travers les pores, suivant le modèle choisi, est l'équation de Darcy donnée précédemment. Une simplification peut être apportée sur l'équation par l'introduction d'une fonction de vorticité  $\zeta$  telle que :  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$

Où  $v$  et  $u$  représentent les composantes horizontale et verticale de la vitesse de filtration.

Ainsi la projection de l'équation donne :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\mu}{k} u \quad (\text{I.44})$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\mu}{k} v + \rho g \quad (\text{I.45})$$

En dérivant la première équation par rapport à  $y$  et la deuxième par rapport à  $x$ , en faisant la soustraction terme à terme et en considérant les simplifications de Boussinesq, on est conduit à l'équation de mouvement sous la forme :

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\mu}{\kappa} \zeta - \rho \cdot g \cdot \beta \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I.46})$$

En vue de faciliter la résolution numérique et permettre le calcul des composantes de vitesse  $u, v$  à partir de la vorticité  $\zeta$  on va introduire la fonction de courant  $\psi$ .

Alors c'est la combinaison des équations qui nous donne l'équation elliptique dite de

Poisson :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\zeta \quad (\text{I.47})$$

c) -Modèle de Parry [10] :

Parry (1985) présente des mathématiques générales pour la description des transferts de chaleur et de masse dans le séchage des particules solides et obtient un modèle général pour la simulation dans le cas du lit fixe présenté dans la figure suivante :

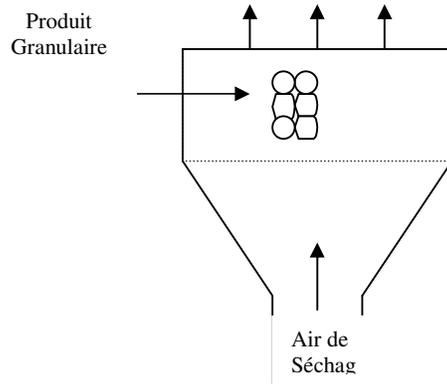


Fig I.1.schema représente un sécheur à lit fixé.

L'idée clé consiste à la supposition d'une superposition des minces couches de particules solides. Le comportement dynamique est décrit par quatre variables indépendantes

- la teneur en eau du solide  $M$
- la température d'air de séchage  $T_s$
- humidité spécifique de l'air  $W$
- la température du produit  $T_p$

Les hypothèses proposées sont :

- l'écoulement d'air est unidimensionnel et à vitesse constante;
- les parois latérales sont adiabatiques et imperméables;
- la conduction de chaleur et de masse est négligeable entre les particules;
- produit indéformable;
- la pression totale à travers le lit est constante;
- les propriétés thermo physiques (densité, chaleur spécifique) de l'air et du produit sont constantes;
- la dispersion longitudinale de masse et de chaleur est négligeable;
- IL n'existe pas de gradient de masse et de température dans les particules;
- le taux de transfert du solide à l'air est décrit par l'équation de cinétique de séchage ;

Equation de conservation de masse : 
$$\rho_a \varepsilon \left[ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{V}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial y} \right] = -\rho_p (1 - \varepsilon) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (I.48)$$

Equation de conservation d'énergie :

$$\text{Du solide: } \rho_a (1-\varepsilon)(c_p + M c_w) \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_c a_v (T_a - T_p) + \rho_p (1-\varepsilon) [(c_v - c_w) T_p + \Delta H_v^\circ + \Delta H_w] \frac{\partial M}{\partial t} \quad (\text{I.49})$$

$$\text{De l'air: } \rho_a \varepsilon (c_a + W c_v) \left[ \frac{\partial T_a}{\partial t} + \frac{V}{\varepsilon} \frac{\partial T_a}{\partial y} \right] = -h_c a_v (T_a - T_p) + \rho_p (1-\varepsilon) c_v (T_a - T_p) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (\text{I.50})$$

### Quelques considérations :

A partir des suppositions précédentes on peut considérer :

- l'écoulement d'air est unidimensionnel et de vitesse constante; la unidimensionnalité est largement acceptée pour un grand nombre de Reynolds basé sur le diamètre du particule, la vitesse constante a travers le lit peut être supposée seulement si l'enlèvement de la vapeur d'eau réalisé par le produit est très petit d'un changement significatif de flux d'écoulement.

En utilisant le concept de volume humide (Treybal, 1980). La relation suivante sera établit : Pour la vitesse

$$\frac{V_{réelle}}{V_{gaz}} = \frac{V_{gaz} + V_{vapeur}}{V_{gaz}} = 1 + \frac{M_a W_v}{M_v} \quad (\text{I.51})$$

Dans les conditions de séchage usuelles l'influence de la vapeur d'eau sur la vitesse est négligeable dans ce cas la vitesse réelle peut être facilement obtenue de l'équation précédente et le coefficient de transfert de chaleur doit être adopté.

- les parois latérales sont adiabatiques et imperméables: consiste à l'unidimensionnalité de l'écoulement d'air et ses isolations thermiques perfectives.
- La conduction de chaleur et de masse est négligeable entre les particules; la surface de contact est notamment un point.
- produit indéformable: les particules sont indéformables et chacune particule à une position fixée dans le lit c'est à dire que la vitesse d'air est toujours inférieur à la vitesse naissante de vibration du lit.

- la pression totale à travers le lit est constante: si la pression totale change de  $P_t$  (avec une humidité relative  $\phi$ ) à  $P'_t$  la valeur d'humidité relative correspondante  $\phi'$  peut être évalué par l'expression posée par Keey (1977) :  $\phi' = \frac{P'_t}{P} \phi$  (I.52)
- les propriétés thermo physiques (densité, chaleur spécifique) de l'air et du produit sont constantes; cette hypothèse est raisonnable pour une gamme des températures.
- la dispersion longitudinale de masse et de chaleur est négligeable: il est nécessaire de noter que sous le plein développement de l'écoulement turbulent à travers les particules, la dispersion longitudinale de chaleur et de masse qui sont une combinaison de diffusion moléculaire turbulente et mélange convectif sont substantiellement équivalents. La validité de cette hypothèse est basé sur l'analyse du nombre de Peclet (le nombre de  $P_e$  doit être grand).
- le taux de transfert du solide à l'air est décrit par l'équation de cinétique de séchage; ou l'équation de la couche mince.

L'adaptation de cette équation est la supposition essentielle, plusieurs théories étaient proposées pour expliquer le transfert de masse dans les produits biologiques:

La version simplifiée de la forme d'une équation de diffusion est utilisée pour trouver les profils de température et de masse dans une particule singulière, ce modèle nécessite toujours des suppositions concernant la géométrie et la diffusion.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = f(M, W, T_a, V). \quad (I.53)$$

Dans ce modèle ils ont adapté l'équation proposée par Nellist (1987) pour l'orge qu'est une forme particulière :  $\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_c) \quad k = k(T_a) \quad M_c = M_c(W, T_a)$

Cette équation est similaire à la loi de Newton de refroidissement, cette équation montre que  $T_{a(\text{air})}$  est la variable la plus importante.

Si  $\phi \sim 1$  l'équation se remplace par l'équation de saturation :  $\phi = 1 = \frac{W P_t}{P_{vs} [W + (M_v / M_a)]}$ . (I.54)

**d)-Modèle de Courtois (dans un lit fixé en coordonnées cylindriques, sphériques) [11]:**

Courtois (1997) a étudié le modèle dynamique du séchage d'une mince couche de blé ou le grain est divisé en trois compartiments internes supposés uniformes.

Le modèle transitoire de transfert de chaleur et de masse a 2D dans la phase du gaz du séchage considère le mécanisme de diffusion et de convection dont le modèle à 1D dans les grains considère le mécanisme de diffusion dans les particules. La conservation de mouvement sera construite par la considération de l'état stationnaire

La complexité des phénomènes physiques implique la complexité du modèle mathématique a cet effet les suppositions mises pour simplifier le modèle sont :

- Pas de dispersion axiale : on prend en compte la résistance de transport des particules dans le silo (type-Luikov) distribue les paramètres modèle pour chaque cellule.
- Produit indéformable.
- Les grains sont de tailles uniformes et homogènes à l'intérieure (sphères isotropiques)
- L'allure de migration de la masse dans chaque particules est radiale due seulement à la diffusion du liquide.
- L'écoulement de l'air dans le lit et dans la direction axiale et uniforme dans la section transversale :  $v=0$ .
- Pas de conduction dans les grains proches.
- Les propriétés de l'air de séchage ( $C_{p_a}$ ,  $D_{af}$ ,  $D_{az}$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ) sont constantes dans les deux directions
- Les propriétés du blé à sécher sont constantes.
- On considère la vitesse superficielle dans l'air de séchage, dont la vitesse de l'air dans les pores est négligeable.
- Pas de vitesse près des parois (aux limites).

*Equation de conservation de mouvement :*

La diminution de pression de l'air est due à la friction entre les gaz et les parois bien que les pertes de mouvement causées par la collision avec les particules. La vitesse aux limites entre les particules et le gaz est contrôlée par la corrélation de Ergun.

Les équations gouvernantes de la continuité et les équations de Navier Stocks de mouvement appliquées au fluide dans les milieux poreux sont développées par la proche du volume moyenné (développé par Lui et al 1999). L'équation de 2D de mouvement peut être écrite pour un état stationnaire comme suite :

$$\text{Equation de continuité : } \frac{1}{\varepsilon_b} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a u) + \frac{1}{\varepsilon_b} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_a v) = 0 \quad (\text{I.55})$$

$$\text{Equation de mouvement axiale : } \frac{\rho_a u}{\varepsilon_b} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\rho_a v}{\varepsilon_b} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\mu}{\varepsilon_b} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\mu}{\varepsilon_b r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_a g_z - F_b \quad (\text{I.56})$$

$$\text{Equation de mouvement radiale : } \frac{\rho_a u}{\varepsilon_b} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\rho_a v}{\varepsilon_b} \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\mu}{\varepsilon_b} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\mu}{\varepsilon_b} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} \right) - \frac{\partial p}{\partial r} + \rho_a g_r - F_b \quad (\text{I.57})$$

Equation de conservation de masse :

- *Phase de l'air de séchage* : L'équation gouvernante du bilan de masse pour décrire l'humidité dans les coordonnées cylindriques en 2D (radiale r, et axiale z) est :

$$\frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{az, \text{eff}} \frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_{az, \text{eff}} \frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a u Y) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_a v Y) + k_m (Y^* - Y) \quad a_v \left( \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right) \quad (\text{I.58})$$

$D_{az}$  : diffusion effective axiale.

$Y$  : humidité de l'air.

$k_m$  : coefficient de transfert de masse.

$a_v$  : surface spécifique du lit des grains.

$Y^*$  : teneur de masse dans la surface à l'équilibre.

Le champ de vitesse superficielle de l'air dans les deux directions est obtenu par la solution des équations de mouvement.

- *Phase des grains* : Elle est écrite en coordonnée sphérique radiale ( $r_p$ ). Cette équation est résolue dans toutes les positions, le bilan de la teneur en eau  $X$  des grains s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho_p X)}{\partial t} = \frac{1}{r_p^2} \frac{\partial}{\partial r_p} \left( r_p^2 D_p \text{eff} \rho_p \frac{\partial X}{\partial r_p} \right) + \frac{\delta}{r_p^2} \frac{\partial}{\partial r_p} \left( r_p^2 D_p \text{eff} \rho_p \frac{\partial T_p}{\partial r_p} \right) \quad (\text{I.59})$$

$\delta$  : Coefficient de thermomigration.

$D_p$  : Coefficient de diffusion des grains.

$T_p$  : Température de grains.

$X$  : teneur d'eau dans les grains

Equation de conservation d'énergie :

- Phase de l'air de séchage : L'équation est écrite dans le système des coordonnées

$$\text{cylindriques en 2D } \frac{\partial(\rho_a(Cp_a + YCp_v)T_b)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{a,eff} \frac{\partial T_b}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{a,eff} \frac{\partial T_b}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\rho_a(Cp_a + YCp_v)T_b) \quad (I.60)$$

$$- \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r_a \rho_a (Cp_a + YCp_v) v T_b) - (k_m \Delta H_v (Y^* - Y) + h(T_b - T_p)) a_v \left( \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right)$$

- Phase des grains : L'équation dynamique simule la distribution de profil de température dans les grains internes est écrite dans la direction sphérique radiale.

$$\rho_p C p_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\lambda_{p,eff}}{r_p^2} \frac{\partial}{\partial r_p} \left( r_p^2 \frac{\partial T_p}{\partial r_p} \right) - \zeta \rho_p \varepsilon_p \Delta H_v \frac{\partial X}{\partial t} \quad (I.61)$$

Equation de transport des interphases :

Les propriétés de transport de l'interphase sont une fonction de vitesse et des propriétés physiques de l'air de séchage. Ces propriétés sont exprimées par des corrélations des facteurs de transfert de chaleur et de masse.

Le coefficient de transfert de masse  $k_m$  est exprimé empiriquement par le facteur de transfert de masse et associé avec la vitesse de l'air par ( $Re_p$ ) et les propriétés physiques de masse par le nombre de Schmidt ( $Sc$ ).

Le transfert contrôlé par le coefficient de transfert de chaleur ( $h$ ) dans les couches limites de l'air et associé avec le nombre de ( $Re$ ) et le nombre de Prandtl dans les

$$\text{corrélations suivantes : } \frac{k_m}{\rho_a u} = \left( \frac{1.9548}{\varepsilon_b} \right) (Re_p)^{-0.857} (Sc)^{-2/3} \quad \text{e} \quad St = \left( \frac{2.0048}{h} \right) (Re_p)^{-0.957} (Pr)^{-2/3}$$

La diffusivité effective de masse est influencée par la teneur en eau et de température

$$D_{p,eff} = 0.2022 \exp \left( \left( \frac{-2513}{T_p} \right) + (0.035T_b - 8.5) X \right) \left( \frac{1}{600000} \right) \quad (I.62)$$

La corrélation de Ergun est :

$$F_b = \frac{\partial P}{\partial n} = \left[ \frac{150 \mu}{d_p^2} \left( \frac{(1 - \varepsilon_b)^2}{\varepsilon_b^3} \right) U + \frac{1.75 \rho_a}{d_p} \left( \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b^3} \right) U^2 \right] \quad (I.63)$$

## Conclusion :

L'étude bibliographique menée dans ce chapitre a présenté les problèmes spécifiques à la conservation de produits agricoles en silos et mis en évidence l'aspect convectif des transferts dans le milieu poreux, l'étude s'est alors poursuivie dans deux directions complémentaires :

- étude du milieu poreux.
- Présentation de la modélisation des transferts en milieu poreux.

Il est apparu, à l'issue de cette recherche que tous les phénomènes peuvent être modélisés avec grands détails dans différentes formes; mais pour la description du comportement dynamique des particules seulement la forme simple est utilisée à cause de l'insuffisance des propriétés thermodynamiques.

Le modèle désirable n'est pas nécessairement le plus complet, mais celui qui a les caractéristiques essentielles (généralité, simplicité, robustesse, temps de calcul...).

La relevance de chaque phénomène de particule pour le processus global et ses quantifications est un aspect fondamental.

Le phénomène relevant dans le séchage peut être évalué raisonnablement par des formes simples et faciles de quantification, et que les petits phénomènes incluent comme une partie intégrale du phénomène relevant.

# CHAPITRE II

## Théories des dattes

## Introduction :

La technologie du stockage des grains, des fruits et des légumes a toujours confronté le problème de migration de l'humidité, facteur de dégradation et d'accidents de conservation.

La datte a toujours été, depuis des temps immémoriaux, un élément très important de l'alimentation, tant pour les humains que pour les animaux. Cependant, actuellement, on constate une évolution dans les habitudes alimentaires des pays phoenicicoles et dans les diverses utilisations de la datte.

L'évolution de diverses utilisations de la datte nous amènent à rechercher les meilleurs moyens de répondre à cette évolution en vue d'une valorisation maximale de cette matière première si importante dans l'économie des pays producteurs.

La variété de Deglet Nour étant de plus en plus appréciée et demandée pour l'exportation, cette variété pose de sérieuses difficultés de conservation. Elle est très sensible aux altérations et à la particularité essentielle d'avoir une maturation échelonnée sur un même régime.

Dans ce qui suit avant de poser le problème dans son aspect physique, il convient d'avancer quelques généralités concernant l'histoire, la production, la valorisation et la conservation de la datte.

## II.1 Historique[12] :

L'origine exacte du palmier a été perdue dans l'histoire, son évidence de culture va loin que 4000 avant J-C, mais des références de dattes ont été trouvées en Ancienne Egypte, et là paraît aussi que la forme la plus tôt de la culture des palmiers a coïncidé avec les plus vieilles civilisations en Afrique du nord-est.

Il y a eu des nombreux exemples de distribution accidentelle facilité par le fait que les dattes sont prêtes à être portées, parfaitement comme une nourriture de haute calorie, avec une longue garde de qualité.

Le palmier se trouve cité dix sept fois dans le CORAN, ce qui prouve l'intérêt historique, traditionnel et religieux de cette plante.

## II.2 Patrimoine phoenicol Algérien [7]:

Selon les estimations récentes des études et des statistiques agronomiques, le patrimoine phoenicol Algérien compte, dans son ensemble, quelques huit millions de palmiers dont 73% constituent le potentiel productif. Ce potentiel a connu une croissance de 8,3% pour atteindre les 6 412 090 durant la période 1967- 1970 puis a régressé de 8,4% soit une perte de 540 000 palmiers les treize années qui suivent.

La production dattière de l'Algérie est estimée à quelques 186000 tonnes pour une campagne normale. Cette production se compose de 46% de dattes "Deglet-Nour" et 54% de dattes communes. Une bonne partie de cette production est exportable en raison de sa qualité très appréciée en dehors de l'Algérie.

La production dattière nationale se compose de :

A / Deglet-Nour : 86 000 tonnes.

- . Consommation à l'état : 17000 tonnes (20%). . Quantité à conditionner : 35 000 tonnes (15%).
- . Quantité à exporter : 13 000 tonnes (15%). . Dattes à transformer : 21 000 tonnes (24%).

B / Dattes communes : 100 000 tonnes.

- . Consommation nationale: 25 000 tonnes (25%).
- . Quantité à conditionner: 25 000 tonnes (25%).
- . Dattes de faible valeur marchande: 50 000 tonnes (50%).

La quantité de dattes exportables peut atteindre 25 000 tonnes dont :

- . 13 000 tonnes de Deglet-Nour à l'état (non conditionnées).
- . 10 000 tonnes de Deglet-Nour conditionnées.
- . 2 000 tonnes de dattes communes.

Les quantités exportables de Deglet-Nour (23 000 tonnes) représentent près de 27% de la production nationale de cette variété, alors que les dattes communes ne dépassent pas 2%.

## II.3 Composition et Qualité [13] :

La connaissance de la composition chimique qualitative et quantitative de la datte est d'importance principale à l'utilisateur et l'emballleur en particulier, processeur ou négociant, parce qu'il affecte les possibilités et les limitations de la matière première pour le fin usage projeté. L'intérêt des consommateurs se concentrera principalement sur les organoleptiques et les propriétés alimentaires du produit. Il y a beaucoup de

renseignements qui peut être trouvés dans la littérature, principalement sur les variétés individuelles

La datte va d'un extrême de contenu de l'humidité (85% à l'étape du têt kimri) à un autre (5-10% dans les dattes du désert sèches). Entre ces deux extrémités il y a plusieurs niveaux importants, approximativement 50-60% pour khalaal sucré, 35-40% pour rutab, autour de 24% pour entrer à la zone d'instinct de conservation, et 20% pour des dattes sûrs d'entreposer. Les observations pratiques précitées sont confirmées par la courbe de l'humidité d'équilibre suivante :

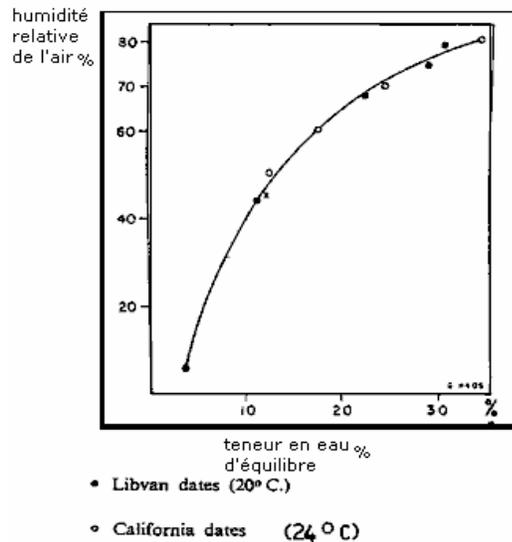


Figure II-1 Courbe de l'humidité d'équilibre des dattes [13]

Connaissant que les moisissures sont incapables de grandir dans une atmosphère en dessous de 70% d'humidité relative (pour les levures et les bactéries même plus haut), la courbe indique un contenu d'humidité de 24% où les dattes sont dans un équilibre avec l'air environnant de 70%. Rutab à 35% est bien précité ce niveau et doit être considéré périssable. La courbe est en outre utile quand étant donné les conditions du stockage et du séchage de dattes. Le contenu de l'humidité peut être changée en séchant le produit artificiellement (dans le soleil ou par la déshydratation), ou par (vide) hydratation et cuire à la vapeur, pour ajouter de l'eau. À part l'attaque microbienne l'humidité croissante a la tendance d'augmenter des processus biochimiques dans les dattes aussi de diminuer la douceur relative et apporter en plus à la datte un parfume spécifique.

## II.4 Technologie de la datte [13] :

Les dattes entières sont moissonnées et ont vendu à trois étapes de leur développement. Le choix pour moissonner à un ou toute autre étape dépend des caractéristiques des variétés, des conditions climatologiques et de la demande du marché.

La technologie de la datte recouvre toutes les opérations qui, de la récolte à la commercialisation, ont pour objet de préserver toutes les qualités des fruits et de transformer ceux qui ne sont pas consommables à l'état, en divers produits, bruts ou finis, destinés à la consommation humaine ou animale et à l'industrie.

On distingue les opérations effectuées entre la récolte et la livraison à l'usine, d'une part, et les opérations industrielles qui précèdent la commercialisation des produits, d'autre part.

Après la récolte, plusieurs types d'opérations peuvent être pratiquées sur les lieux de cueillette : (égrenage a triage ; dénoyautage; séchage ; maturation ; fumigation conservation ; emballage)

Ces opérations, lorsqu'elles sont effectuées, elles sont le plus souvent de façon artisanale pour des dattes destinées à l'autoconsommation ou au commerce local. Quant aux dattes destinées à l'usine, elles doivent être conservées, si elles ne sont pas livrées immédiatement, dans des conditions telles que soient évités dans toute la mesure du possible :

- o attaques d'insectes,
- o exposition à la poussière et au sable,
- o mélanges de dattes incomplètement mûres, avariées, ou parthénocarpiques, avec les dattes de bonne qualité.

Le transport vers l'usine se fera de préférence dans des sacs ou des cagettes en matière plastique propres. Arrivant à l'usine les dattes sont pesées puis dirigées vers deux voies possibles :

- o soit le traitement immédiat
- o soit l'entreposage en vue d'un traitement différé

Les emballages sont très variés en unités de poids allant le plus souvent de 250 g à 10 kg on trouve parmi les plus courants: sachets ; raviers ; barquettes ; boîtes ; cartons ; caisses.

Les opérations de conditionnement comportent plusieurs aspects :

- o Confection des emballages : caisses
- o Formage d'emballage à partir d'ébauches : barquettes, cartons
- o Pesée des lots à conditionner
- o Remplissage des unités de conditionnement
- o Fermeture des unités de conditionnement (Couvercles des barquettes, soudure des sachets, agrafage des caisses ...)
- o Mise en cartons, étiquetage,...

Les produits ainsi conditionnés sont ensuite désinsectisés et conservés en chambres froides avant commercialisation

## II.5 Problème de conservation [14]:

La datte est un fruit de grande valeur nutritive, sujet de nombreuses altérations qui modifient ses qualités. Entre autre la conservation des caractères de la datte pose encore un problème important.

Prévenir l'invasion de l'insecte est une majeure inquiétude après la récolte. Traditionnellement, le fermier faisait l'usage de matières localement disponibles pour fournir la protection. Le tamr doux est pressé normalement dans des récipients tels que peaux de chèvre, petit à grands pots d'argile, les paniers faites des feuillet du palmier ou autres matières semblables. Pour le stockage prolongé les régions exposées sont couvertes par un tissu, argile ou une couche d'huile.

Les insectes du stockage incontrôlé peuvent dévaster le produit. Les plus notoires sont le Papillon de nuit, le Coléoptère du Fruit Séché, mais il y en a beaucoup d'autres.

Le climat dominant pendant la saison de la moisson des dattes est chaud et souvent humide, rend les conditions idéales pour l'invasion. Les altérations en question peuvent être de différents types dont on cite ici les plus couramment rencontrées [14].

a)-Altérations d'ordre physique : telles que les chocs, dessèchements, éclatements,...

b)- Altérations d'ordre biologique : sont des conséquences de l'activité métabolique de l'écosystème constitué par les arthropodes, des petits vertébrés, les microorganismes, et

les dattes eux-mêmes. Échanges d'énergie et de masse, effectués avec le milieu extérieur. (Attaques d'insectes).

c)- **Altérations d'ordre microbiologique** : telles que les fermentations. La dissipation de chaleur dans le processus de fermentation est environ dix fois faible que celui de la respiration

d)- **Altérations d'ordre biochimique** : par les oxydations qui provoquent les brunissements et par l'inversion du saccharose qui provoque une modification de saveur.

Ces métabolismes résultent, la consommation et la perte de matière sèche des grains avec ou sans décomposition biochimique des constituants, la libération des nouvelles substances (enzyme, toxines, métabolite divers) en fin le dégagement de vapeur d'eau, et de chaleur dont l'accumulation accélère les processus d'altération, en permettant l'extension progressives des zones contaminées. Les caractéristiques inhérentes de la dattes, le microbe ou insecte, le contenu d'humidité de la matière première, et la température. Un exemple dans la figure suivante présente la relation entre la température et la teneur en eau pour un bon stockage de la qualité de Deglet Noor :

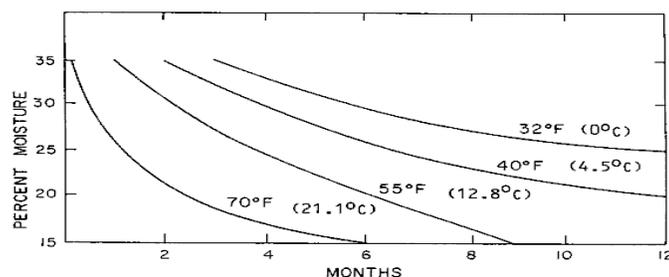


Figure II-3 : la relation entre le temps, la température pour le stockage des dattes [13].

Par exemple, les dattes de 20% d'humidité peuvent être bien gardées pour une année à 40F. Maintenir l'humidité relative correcte dans le stockage froid à la température dominante est important pour prévenir le séchage dehors (à moins que ceux-ci soient emballés dans les récipients étanches).

Une idée peut être obtenue de l'effet de stockage froid: une dattes de 30% d'humidité gâterait dans une matière de jours à température de pièce (21°C) pour rester approximativement 4 mois à 5°C et 6 mois à 0°C. Mais le coût de réfrigération et de

transport réfrigéré est haut, en plus on doit être assuré du chemin des canaux de la distribution approprié jusqu'au consommateur.

A présent, les deux meilleures méthodes de conservation de la datte sont :

**I\_ L'entreposage** frigorifique à des températures inférieures à 2 °C et une humidité relative supérieure à 80% pour des fruits ayant une teneur en eau comprise entre [23%-27%]. Les essais menés par les chercheurs aux U.S.A ont permis de définir une température de conservation de dattes Deglet-Nour pour des temps déterminés, montrés dans le tableau suivant [13]:

Température de conservation	Durée maximale
+°C à - 27°C	01 mois
+ 15°C à -16°C	03 mois
+ 04°C à - 05°C	08 mois
-02°C à -03 °C	01 an
-17°C à -18°C	plus d'un an.

**Tableau II-1 :** Températures et temps de conservation de Deglet-Nour .

**ii \_** La mise en boîte hermétique en atmosphère neutre d'Azote.

Ces deux procédés permettent d'accroître la durée de conservation de la datte Deglet-Nour au delà d'une année facilitant son transport lointain ainsi que le report d'une récolte d'une année sur l'autre, stabilisant ainsi les prix et les fixant à une valeur énumératrice.

Un autre problème se pose en cas d'une année pluvieuse ou légèrement humide où la teneur en eau des dattes dépasse les normes admises pour la conservation (soit 25 %). dans ces conditions le séchage permettra de sauver une partie de la récolte.

En pratique les meilleurs résultats sont obtenus par un séchage en couche mince avec circulation d'air chaud de température 65 °C et humidité relative de 20 % à 50 %. La vitesse de circulation de l'air doit être 2 - 5 m/s.

Des traitements supplémentaires dans plusieurs cas améliorent la qualité des dattes et prolongent leur vie du stockage. Ces traitements qui varient d'après le besoin

sont basés sur la manipulation de la température, l'humidité, et ils ont incorporé des traitements de chaleur. On va les discuter brièvement [12]:

i. *Maturation*: la maturation artificielle imite les conditions optimales, le processus est délicat et exige des pièces où la température, l'humidité et la ventilation de l'air peuvent être contrôlées. Elle est souvent accompagnée par la déshydratation.

ii. *La déshydratation*: Le but de la déshydratation est d'enlever l'humidité du fruit sans affecter ses qualités désirables artificiellement. C'est un processus commun dans l'industrie du fruit séché. Elle devient nécessaire quand les dattes contiennent trop d'humidité et ne seront pas consommées immédiatement ou a entreposé sous réfrigération.

iii. *L'hydratation*: les dattes restées plus longtemps qu'habituel sur le palmier sont considérées trop sèches et elles seront restaurées à un fruit docile, doux dans beaucoup de cas par l'hydratation (l'humidité additionneuse).

iv. *Vitrage*: Un court traitement de haute température, souvent à la fin d'hydratation, avec le mouvement de l'air vigoureux fera la cire sur la surface de la datte. 5 minutes à 130-140°C est recommandé pour Deglet Nour .Ce lustre disparaîtra finalement, surtout pendant le stockage aéré.

v. *Enduire*: Plusieurs matières ont été utilisées pour améliorer l'apparence de la datte en lui donnant plus de lustre et de protection et réduire la nature gluante pour les dattes douces

vi. *Dénoyautage*: Traditionnellement, le dénoyautage était fait manuellement avec l'usage d'une coupure du couteau. Cette méthode peut être considérée l'avant-coureur manuel du pitters de la datte mécanique qui a été imaginé.

## II.6 Caractéristiques de Deglet Nour [15]:

Des études expérimentales de la qualité (Physico-chimique, Biochimique et Microbiologique) de Deglet Nour a été faites dans les régions : Ourgla, Oued , Biskra, Ghardaïa.

### a) Caractéristiques morphologiques de Deglet Nour [15] :

1/Wilaya : Ouargla

Régions	Déterminations								
	Couleur	Consistance.	PD(g)	PP(g)	PN(g)	LD(cm)	LN(cm)	DD(cm)	DN(cm)
Chott	Marron	Seche	10.23	9.4	0.83	3.69	2.2	1.48	0.74
Beni thour	Marron	Sèche	7.1	6.35	0.75	3.9	2.34	1.79	0.76
Mekhadma	Marron	Sèche	7.01	6.24	0.77	3.78	2.35	1.84	0.78
Bamendil	Marron	Sèche	7.04	7.88	0.84	4.15	2.48	1.94	1.26
N'goussa	Marron	Sèche	6.37	5.7	0.64	3.5	2.09	1.82	0.75
Frane	Marron	Sèche	6.68	5.9	0.78	3.68	2.61	1.93	0.75

2/Wilaya : Ghardaïa :

Régions	Déterminations								
	Couleur	Consistance.	PD(g)	PP(g)	PN(g)	LD(cm)	LN(cm)	DD(cm)	DN(cm)
El Menia	Marron	Demi-molle	10.65	9.83	0.82	4.32	2.32	2.09	0.72
Berriane	Marron	Demi-molle	9.97	9.12	0.85	3.99	2.46	1.98	0.82
Metlili	Marron	Sèche	7.93	7.24	0.69	3.87	2.35	1.84	0.77
Daïaa en Daoïne	Marron	Demi-molle	8.7	8.08	0.62	3.82	2.83	1.9	0.8
Sibseb	Marron	Sèche	8.59	7.8	0.79	4.38	2.5	1.89	0.75
Guerara	Marron	Demi-molle	10.6	9.8	0.8	4.27	2.88	2.08	0.79

b) Caractéristiques Physico-chimiques de Deglet Nour :

1/Wilaya : Ouargla

Régions	Déterminations											
	PH%	Humidité%	Cendres%	Sucres(%)			Eléments minéraux					
				Réducteurs	Saccharose	Totaux	Na	K	Ca	Mg	Fe	F
Chott	5.75	12.56	1.9355	37.97	38.05	76.02	50	600	0	0	3	7.5
Beni thour	6.03	14.64	2.1749	41.85	28.4	70.25	30	669	40	0	1.3	7.7
Mekhadma	5.24	12.16	1.945	30	30	76.14	40	810	80	0	1.7	8.1
Bamendil	5.07	14.18	2.6557	22.86	36.35	75.01	40	1020	100	0	1.6	7.8
N'goussa	5.35	13.46	2.5996	38.2	40.3	78.5	20	920	0	0	0.6	8.2

Frane	5.63	12.59	2.2059	30.8	48.8	79.6	30	930	60	0	0.8	8.2
-------	------	-------	--------	------	------	------	----	-----	----	---	-----	-----

2/Wilaya : Ghardaïa

Régions	Déterminations										
	PH%	Humidité %	Cendres%	Sucres(%)			Eléments minéraux				
				Réducteurs	Saccharose	Totaux	Na	K	Ca	Fe	F
El Menia	5.02	14.06	1.828	39.01	39.01	78.02	10	960	60	0.3	8.2
Berriane	5.04	21.29	1.9581	38.14	35.92	74.06	30	530	0	1.9	8.5
4Metlili	5.06	14.27	1.7072	41	35.03	76.03	30	530	40	1	8.3
Daïaa en Daoïne	5.18	24.87	2.1961	38.5	40.45	78.06	20	460	40	1.7	8.3
Sibseb	5.29	17.22	2.1641	34.02	45.02	79.04	20	450	40	0.3	8.6
Guerara	5.4	17.58	1.6979	40.22	38.23	78.45	20	948	40	0.3	8.7

3/Wilaya : EL-Oued

Régions	Déterminations											
	PH%	Humidité%	Cendres%	Sucres(%)			Eléments minéraux					
				Réducteurs	Saccharose	Totaux	Na	K	Ca	Mg	Fe	F
Dhaouia	5.3	14.64	1.2416	50.30	22	72.03	20	370	40	0	2.2	8.1
ELM'ghaïer	5.1	15.8	1.388	45.04	30	75.04	30	450	100	0	1	8.9

4/Wilaya: Biskra

Régions	Déterminations											
	PH %	Humidité%	Cendres%	Sucres (%)			Eléments minéraux					
				Réducteurs	Saccharose	Totaux	Na	K	Ca	Mg	Fe	F
EL-ghrouss	5.21	26.09	1.862	43.85	34.05	77.9	20	520	0	0	0.8	9.6
Tolga	5.17	24.92	1.6546	40.99	37.1	78.09	30	460	60	0	0.6	10.8
Biskra	5.4	28.47	1.649	43.96	29.08	73.04	40	486	60	0	0.4	10.9

Na : Sodium    K :Potassium    Ca : Calcium    Mg :Magnésium    Fe : Fer    F : F

c) Caractéristiques Microbiologiques de Deglet Nour [16]

1/ Ouargla:

Region	E.Coli	Levures	Moisissures	Résultats
Chott	Abs	Abs	Abs	Conforme
Beni tour	Abs	Abs	Abs	Conforme
Mekhadma	Abs	Abs	Abs	Conforme
Bamendil	Abs	Abs	$2.10^2$	Non Conforme
N'goussa	Abs	Abs	$1.6. 10^2$	Non Conforme
Frane	Abs	Abs	$4. 10^2$	Non Conforme

## 2/ *Ghardaïa* :

Région	E.Coli	Levures	Moisissures	Résultats
El Menèa	Abs	Abs	$3,6.10^2$	Non Conforme
Berriane	Abs	Abs	Abs	Conforme
Metlilé	Abs	Abs	$2.10^2$	Non Conforme
Daiaa en Daoine	Abs	Abs	$3.10^2$	Conforme
Slbseb	Abs	Abs	Abs	Non Conforme
Guerara	Abs	Abs	$5,6.10^2$	

## 3/ *El-Oued* :

Région	E.Coli	Levures	Moisissures	Résultats
Dhaouia	Abs	Abs	<100	Conforme
El-M'ghaier	Abs	Abs	$10^2$	Non Conforme

## 4/ *Biskra* :

Région	E.Coli	Levures	Moisissures	Résultats
El-ghrous	Abs	$2.10^4$	$3,4.10^2$	Non Conforme
Tolga	Abs	$2.10^4$	$2,6.10^2$	Non Conforme
Biskra	Abs	$2,2.10^4$	$1,6.10^2$	Non Conforme

Les résultats Physico-chimiques d'analyse de Deglet Nour ont montré une faible teneur en eau par rapport à la normale, ceci est dû à la période estivale très longue durant cette année. Pour les autres paramètres on note une similitude entre les différentes régions, à l'exception de la teneur en éléments minéraux qui se diffère selon le lieu de leur provenance.

D'après les résultats Microbiologiques, seules les dattes molles présentent un taux élevé de levures et de moisissures par contre les dattes desséchées ne montrent aucune croissance fongique.

### d) Propriétés thermiques de la datte:

Les données de la littérature sur les propriétés thermiques des dattes sont peu nombreuses, elles se réduisent à quelques valeurs de chaleur spécifique. En outre, d'un

auteur à l'autre, on relève des différences importantes, particulièrement remarquées pour des fruits hétérogènes comme la datte.

- Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la quantité de chaleur  $Q$  nécessaires pour augmenter de  $1^{\circ}\text{C}$  la température de l'unité de masse du produit. Cette grandeur est donc définie par la relation suivante :

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (\text{II.1})$$

Lorsque la composition biochimique des produits est connue, la chaleur massique peut être estimée de façon précise à l'aide d'un modèle de type additif, de la forme :

$$C_p = \sum_i C_{p_i} \cdot x_i \quad (\text{II.2})$$

Avec  $C_{p_i}$  chaleur spécifique de la composante  $i$  et  $x_i$  sa proportion dans l'échantillon.

La chaleur spécifique est déterminée par calorimétrie différentielle à balayage. L'appareil produit un graphique de la variation du flux de chaleur  $[dH/dt]$  en fonction de l'évolution de température  $[dT/dt]$ , dont la pente dans sa partie rectiligne permet l'évaluation de  $C_p$  (par unité de masse de l'échantillon):  $C_p = \text{pente} / m = \left[ \frac{(dH / dt)}{(dT / dt)} \right] \cdot \frac{1}{m}$  (II.3)

Avec  $C_p$  chaleur spécifique en  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $m$  masse de l'échantillon en  $\text{kg}$ ;  $[dH/dt]_T$  flux de chaleur exprimée en  $\text{W}$ ;  $[dT/dt]$  vitesse de chauffe  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Connaissant les proportions des constituants de la datte, noyau et pulpe et leurs chaleurs spécifiques respectives, on peut calculer par additivité la chaleur spécifique de la datte entière en utilisant la relation d'additivité donnée précédemment, ce qui nous a conduit à la relation suivante :

$$C_p = 1,551 \pm 10^2 \text{ kJ}^{\circ}\text{K}^{-1}\text{kg}^{-1} \quad (\text{II.4})$$

- Conductibilité thermique :

La conductibilité thermique est définie par la première loi de Fourier régissant les transferts de chaleur par conduction au sein d'un corps immobile et isotrope. Cette grandeur a été mesurée par la méthode de la "sonde à choc thermique" de Sweat (1976), pour les produits complexes. Le principe de la méthode est de soumettre l'échantillon à un échelon de puissance thermique généré par un élément chauffant cylindrique disposé suivant l'axe de symétrie du système. L'enregistrement de l'évolution de la température à

la surface de contact sonde-milieu, notée ( $T_1$ ) fournit un thermo gramme dont l'analyse permet de déterminer la conductibilité  $\lambda$  du milieu.

Les essais ont été effectués sur la pulpe et le noyau broyés et homogénéisés séparément. La sonde est introduite dans l'échantillon maintenu à une température homogène et constante.

L'échantillon témoin utilisé avant les mesures est l'eau dont la conductibilité thermique est connue :  $Q=9,684W.m^{-1}$ .

La pente  $A$  relevée sur chaque graphe reliée à la conductibilité thermique  $\lambda$  par [15]:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi.A} \quad (II.6)$$

$\dot{Q}$  : Puissance dissipée par unité de longueur de sonde [ $Wm^{-1}$ ]

Les mesures effectuées sur la pulpe broyée (humidité 0,37 kg d'eau.  $Kg^{-1}$  de matière humide); la conductivité thermique mesurée est égale à 0,404  $W.m^{-1}.^{\circ}k^{-1}$ . le noyau broyé (granulométrie  $<25\mu m$ ) et homogénéisé après hydratation (humidité 0,58 kg d'eau. $kg^{-1}$  de matière humide) indispensable pour cette opération. La conductivité thermique mesurée dans ces conditions est de 0,506  $Wm^{-1}.^{\circ}k^{-1}$ . la conductivité thermique de la datte entière anhydre, déduite, est de l'ordre de 0,297  $Wm^{-1}.^{\circ}k^{-1}$ . [15]

La diffusivité thermique :

La diffusivité thermique,  $a$  ( $m^2. s^{-1}$ ) régit la pénétration de la chaleur par conduction dans un milieu. Ce coefficient est défini par la seconde loi de Fourier (conditions non stationnaires) :

$$\frac{dT}{dt} = a \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad (II.7)$$

Cette relation provient de l'expression générale de la loi de d'accumulation de chaleur, lorsque les transferts de chaleur par conduction ont lieu dans un corps homogène isotrope, de conductibilité thermique et capacité thermique volumique respectivement indépendantes de la température et du temps.

La diffusivité thermique peut être reliée aux autres propriétés thermiques du matériau telles que la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la capacité thermique volumique ( $Cp.\rho$ ) selon la relation :

$$a = \frac{\lambda}{Cp.\rho} \quad (II.8)$$

Les valeurs calculées pour la pulpe et le noyau de datte sont respectivement de 0,209 et 1,47 m<sup>2</sup>/s. La diffusivité thermique de la datte entière a été déterminée par additivité elle est de l'ordre de 0,24 m<sup>2</sup>/s.

Une solution de l'équation de diffusion dans laquelle la diffusivité dépend de la température et la teneur en eau est proposée pour étudier le mouvement de masse dans la datte par la supposition que l'échantillon soit une infinité de cylindres homogènes.

Les courbes calculées sont comparées avec les courbes observées et les équations empiriques. Peu d'équations empiriques de diffusivité sont testées en modèle de simulation, ont conduit les expérimentateurs de proposer l'expression suivante [14] :

$$a(X, T) = 8 \cdot 10^{-9} \exp \left[ -\frac{19 \times 10^4}{RT} \left[ \frac{2.5 + \frac{1}{X}}{70 + \frac{T_o - T}{X_o}} \right] \right] \quad (\text{II.9})$$

Cette relation est applicable dans la gamme :  $303 \leq T_a \leq 342\text{K}$  ;  $39\% \leq X_o \leq 98\%$  (b.s)

• [Production de la chaleur](#) : [14]

En condition favorable, la datte à l'état de vie ralentie, peut reprendre ses activités physiologiques et en particulier la respiration. Le complexe microorganisme datte est, en effet le siège d'une intense activité respiratoire. Ce phénomène est exothermique, c'est-à-dire, qu'il s'accompagne d'un dégagement de chaleur, il existe une dépendance entre le dégagement du gaz carbonique et la quantité de chaleur produite exprimée par la relation suivante :

$$q = 1.7d \quad (\text{II.10})$$

Avec q est la quantité de chaleur produite par tonne de matière sèche et par heure et d est le dégagement du gaz carbonique exprimé en mg par 100g de matière sèche et par 24heures.

Cette relation est tirée de l'équation de la combustion d'un hexose, elle est vérifiée avec une assez bonne précision [15]



La combustion ou l'oxydation biologique d'une molécule de glucose dégage environ 2817 kj (654kcal) au cours de ce processus d'oxydation, la chaleur libérée est accumulée par les grains dont la température s'élève, d'autant plus que leurs capacités calorifiques et

leurs conductivités thermiques sont faibles de même, une partie de  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau produite sont absorbées par les dattes dont la teneur en eau augmente.

(On note que la dégradation de 180 g de glucose (1 mole) conduit à la libération de 108g d'eau (6 moles) qui pondéralement très important. Il est à noter aussi que l'accroissement de la teneur en eau et de la température conduit, dans un premier temps à une accélération des métabolismes, le milieu tiède et humide favorise la multiplication des microorganismes et les diverses réactions biochimiques.

L'énergie dissipée rapportée à la quantité d'oxygène, consommée et de  $\text{CO}_2$  produite varie considérablement selon la substance oxydée et même en absence d'oxygène la destruction de l'énergie chimique (glucides) passe par un processus très différent, celui de la fermentation)

#### f) La masse volumique et le volume spécifique [18]:

L'évolution de la masse volumique de la datte en fonction de la teneur en eau est déterminé pour différentes conditions de séchage (les expériences sont effectuées en séchage convectif).

Deux procédures expérimentales ont été utilisées pour la mesure du volume [18] :

La première par immersion c'est une procédure très précise, mais souvent destructive selon le choix du liquide.

- la mesure des dimensions de l'échantillon (dans le cas d'une datte, on l'assimile à une ellipsoïde). Cette méthode a le mérite d'être non destructive et permet d'évaluer aussi la surface extérieure de l'échantillon (surface d'échange), paramètre indispensable pour les simulations numériques

L'évolution de la masse volumique de la datte en fonction de la teneur en eau pour différentes conditions de séchage est présentée dans la figure suivante :

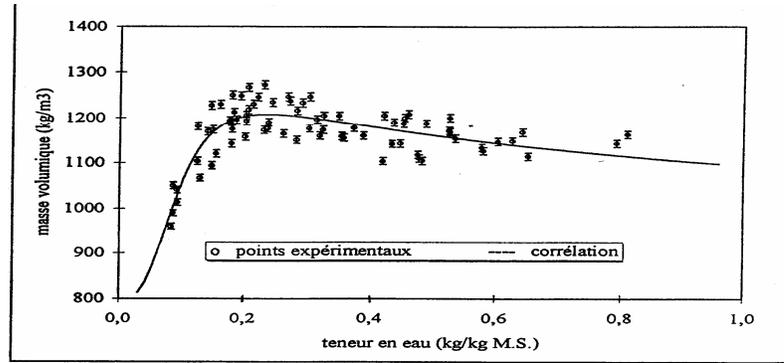


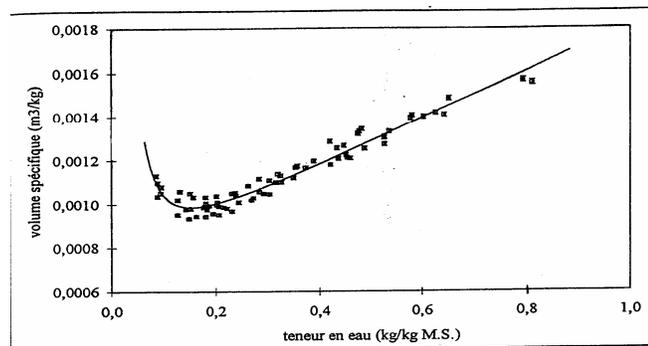
Fig. II.1 : Évolution de la masse volumique en fonction de la teneur en eau [18].

Les résultats des expériences montrent que cette évolution dépend pratiquement de la quantité d'eau dans le produit. La courbe en continu est une corrélation du comportement expérimental, elle a pour expression [18]:

$$\rho(X) = \frac{1 + 1101,12X^{2,935}}{0,00119 + X^{3,018}} \quad (II.12)$$

Il est intéressant de remarquer que la masse volumique présente un maximum pour les faibles teneurs en eau <0,236 kg/kg M.S. Des résultats similaires ont été signalés par d'autres auteurs (Lozano et al, 1980 ; Marousis et Saravacos, 1990 ; Wang et Brennan, 1995 ; Khraisheh et al, 1997)

Le volume spécifique partiel de la datte ramené à un kg de produit sec est exprimé par la relation suivante:

$$\bar{V} = \frac{\text{volume de la datte à une teneur } X}{\text{masse sèche de la datte}} = \frac{(1+X)}{\rho(X)} \quad (II.13)$$


figII.2 : Evolution du volume spécifique partiel en fonction de la teneur en eau [18].

D'après cette courbe, on voit que les points expérimentaux ne suivent la loi d'additivité des volumes qu'au delà d'une teneur en eau égale à 0,236 kg d'eau/kg MS; la loi est représentée par la droite suivante :

$$\bar{V} = \bar{V}_2 + \bar{V}_1 X = 10^{-3} (0,795 + 0,991X) \quad (II.14)$$

Où  $\bar{V}_1$  : volume spécifique intrinsèque de l'eau pure (la vapeur étant de 1,0028 cm<sup>3</sup>/g à 25°C

[Weast, 1982])

$\bar{V}_2$  : Volume spécifique intrinsèque de la matière sèche de la datte seule ( $X=0$ )

A l'aide des équations précédentes la masse volumique de la datte pour une humidité supérieure à 0,236kg/kg M.S peut prendre la forme :

$$\rho(X) = \rho_2^0 \frac{1+X}{1+\varepsilon X} = 1258 \frac{1+X}{1+1,2475X} \quad (\text{II.15})$$

Notons que cette relation est d'une grande importance lors de l'écriture des équations du bilan de matière et de chaleur.

**G) la courbe caractéristique de séchage** (pour la variété Deglet Nour) [20] :

Notre produit ne présente pas de période à vitesse constante. La méthode suivie est dans son principe proche de celles préconisées par Van Meel (1957) et par Schlunder (1976) pour des produits présentant la période I.

La datte (produit biologique) est suspendue dans le courant d'air sans rotation. Cette démarche consiste à établir une loi de séchage à partir des expérimentations et s'inspirer des connaissances acquises dans le domaine du séchage. Van Meel (1958) a proposé de transformer les abscisses et les ordonnées pour rassembler toutes les courbes expérimentales sur une courbe caractéristique de séchage unique.

La détermination d'une courbe de variables réduites moyennant la transformation de Van Meel, apparaît ici très délicate devant l'impossibilité d'atteindre les valeurs de  $\bar{X}_{cr}$  et de  $\left[-\frac{d\bar{X}}{dt}\right]_l$  ; ceci conduit à formuler une transformation, inspirée de celle de Van Meel :

$$\begin{aligned} \left[-\frac{d\bar{X}}{dt}\right] &\rightarrow f = \frac{-(d\bar{X}/dt)}{-(d\bar{X}/dt)_0}, & 0 \leq f \leq 1 \\ x &\rightarrow \phi = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}, & 0 \leq \phi \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{II.16})$$

La figure II.3 représente des courbes expérimentales de séchage (essais 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8) après application de la transformation ci-dessus. Les expérimentateurs ont obtenu a priori un assez bon regroupement des allures de séchage en dépit des variations des propriétés de l'air et du produit.

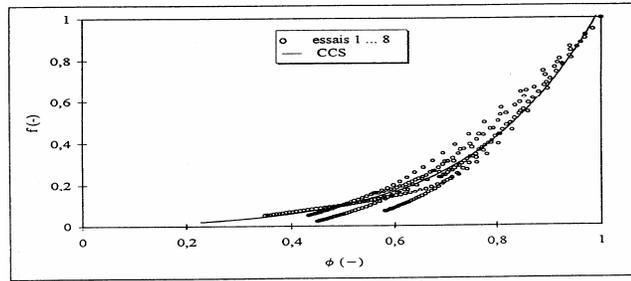


Fig. II.3 : Courbes expérimentales de séchage

Cependant, ils remarquent une certaine dispersion vers les extrémités de courbes qui pourrait s'expliquer par le fait que, dans cette zone (faibles teneur en eau), les vitesses de séchage  $\left[-\frac{d\bar{X}}{dt}\right]$  se confondent et puisque les vitesses initiales  $\left[-\frac{d\bar{X}}{dt}\right]_0$  ne sont pas les mêmes pour tous les essais, a vitesse réduite "f" n'est pas unique, d'où le mauvais regroupement des cinétiques de séchage près de l'axe des humidités réduites. Ils ont pu trouver une C.C.S pour la datte au moyen d'une normalisation convenable des résultats et pour la gamme des conditions expérimentales pour l'air et le produit suivantes :

$$\begin{aligned}
 33 &\leq T_a \leq 69^\circ C \\
 1,2 &\leq V_a \leq 2,7 m / s \\
 11.6 &\leq HR \leq 47,1\% \\
 0,437 &\leq X_0 \leq 0,983 kg / kgM .S \\
 1,52 &\leq d_0 \leq 1,84 cm \\
 3,20 &\leq L_0 \leq 3,90 cm
 \end{aligned}
 \tag{II.17}$$

Cependant, afin de tester la précision du calcul et la possibilité d'utilisation pratique de la courbe caractéristique de séchage, ils ont procédé au calcul de courbe de séchage pour d'autres conditions expérimentales.

Le calcul nécessite l'évaluation de la vitesse initiale de séchage  $\left[-\frac{d\bar{X}}{dt}\right]_0$  ainsi que la valeur de teneur en eau à l'équilibre  $X_{eq}$  cette dernière est facile à calculer grâce aux isothermes de désorption alors que la vitesse initiale de séchage sera évaluée théoriquement par un simple calcul aérothermique à partir de la période I.

Dans le cas de l'absence de la première période de séchage, une hypothèse souvent adoptée (Desmorieux et Moyne, 1992) consiste à supposer que la vitesse initiale

$\left[ -\frac{d\bar{X}}{dt} \right]_0$  est celle de la première phase au moins pendant les premiers instants du séchage.

La température de la surface du produit est égale à la température humide de l'air. L'équilibre thermique à l'interface peut s'écrire de cette façon [18]:

$$\left[ -\frac{d\bar{X}}{dt} \right]_0 = \frac{h(T_a - T_h)}{\Delta h_{vap}} \left[ \frac{A}{m_s} \right] \quad (\text{II.18})$$

Où  $A$  représente la surface d'échange et  $m_s$  la masse du produit sec.

Pour une datte ayant une surface d'échange de forme géométrique non classique; il est difficile d'estimer cette surface d'échange  $A$  avec exactitude, d'autant que le produit se déforme légèrement au cours du séchage, ainsi que le coefficient d'échange de chaleur "h".

Pour remédier à ces handicaps, ils ont proposé la relation suivante [18] :

$$\left[ -\frac{d\bar{X}}{dt} \right]_0 = 2,554 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{-0,259} \cdot Pr^{1/3} \cdot X_0^{-1,431} (T_a - T_h) \quad (\text{II.19})$$

Dans cette corrélation, le nombre de Reynolds est fondé sur le diamètre hydraulique de la veine d'essai ( $D_H=0,254\text{m}$ ) et la vitesse moyenne de l'écoulement.

Des courbes expérimentales de séchage de Deglet Nour de Tunisie sont obtenues dans un laboratoire de séchage sous différentes conditions. La température de l'air varie de 30 à 69°C, l'humidité relative de 11.6 à 47.1% et la vitesse de l'air de 0.9 à 2.7 m/s.

Le résultat indique que la diffusion est le mécanisme physique gouvernant le mouvement de masse dans la datte.

### Caractéristiques générales de deglet Noor : [21]

*Distribution géographique* : Abondant aux Aurès, Ziban, Oued Righ, Souf, Ouargla et dans le Mزاب. Fréquent à Metlili et à El-Méniaa. Rare au Tidikelt, Touat et au Tassili.

*Datte de maturité* : Août- Septembre au Mزاب, Metlili, El-Méniaa, Tidikelt et au Tassili. Octobre-Novembre ailleurs.

*Utilisation de la datte* : fraîche et conservée.

*Mode de conservation* : dans de sac et cagettes. Parfois écrasé ou pilé.

*Appréciation* : excellente à bonne.

*Digestibilité* : Froide en général, mais chaude à Metlili, Mزاب et dans le Souf.

*Commercialisation* : importante.

*Sensibilité à la fusariose* : sensible.

*Capacité à rejeter* : moyenne à importante.

*Forme du fruit* : ovoïde et parfois droite.

*Taille du fruit* : Très petite à moyenne.

*Poids de vingt fruits* : 82 à 230g.

*Couleur 'Bser'* : rouge

*Couleur 'Tmar'* : Variable.

*Aspect de l'épicarpe* : très variable.

*Altération* : Parfois collet ou marbrée.

*Consistance* : Demi-molle à sèche.

*Plasticité* : Tendre, Parfois élastique.

*Texture* : Souvent fibreuse.

*Goût* : Parfumé.

*Forme du calice*: Souvent proéminent

- **Conclusion :**

Les dattes sont des fruits très connus qui étaient consommés à travers le monde pour une longue période.

Comme la plupart des produits agricoles, la teneur en eau des dattes est très importante.

A la récolte, des palmiers contiennent des dattes de large classe de teneur en eau et elles ont besoin d'être stockées rapidement, alors ceux de teneur élevée doivent être séchées avant les stockées.

La teneur désirée est rapportée entre 23 et 25% ( b.s), cependant la gamme admissible varie avec les conditions de l'agriculture et la qualité de la récolte d'une année à une autre.

L'expérience montre que la vapeur dégagée se transporte par des courants convectifs dus au gradient de température d'une part et au gradient de pression partielle (de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la datte) d'autre part.

## CHAPITRE III

- Modélisation et résolution du problème

## Introduction :

La maintenance de la qualité des produits agro-alimentaires et le prolongement de la durée de stockage sont indispensables, cette procédure implique la convection, la conduction dans le produit, la génération de chaleur due à la respiration, et la masse perdue due à la transpiration.

Décrire mathématiquement ce processus de transfert de chaleur et de masse est un besoin. Il existe des solutions analytiques théoriques valables pour les produits homogènes avec une génération de chaleur constante ou avec perte de masse qui est une fonction de temps.

Les anciens modèles numériques ne sont pas bien précis comme il faut, les effets de transpiration et de respiration ont été négligés plusieurs fois malgré leur rôle important dans la détérioration des produits stockés.

Le but de notre étude est d'apporter une meilleure compréhension sur les mécanismes des transferts de masse et de chaleur par convection naturelle avec une source de chaleur dans une boîte de dattes en adoptant le modèle de [Thorpe \(1996a\)](#)

Un modèle numérique bidimensionnel transitoire dont la masse perdue par la respiration est incluse. Ce modèle nous permettra de déterminer la redistribution des fonctions de courant, de température et d'humidité dans un système de simple géométrie.

Il est possible de décrire les équations différentielles gouvernantes en un maillage orthogonal, de cette façon le problème se réduit à une méthode de solution standard et bien connu, cette méthode a été employée avec succès par Thorpe.

La loi de Darcy est utilisée pour résoudre l'équation de mouvement qui est exprimée en termes de fonction de courant pour la simplification. Des solutions des équations d'énergie et de mouvement sont obtenues par les différences finies en utilisant la méthode implicite à direction alternée ([ADI](#)).

Pour cela on considère une boîte rectangulaire ([figure III.1](#)) de hauteur H et de largeur L remplie de Deglet Nour.

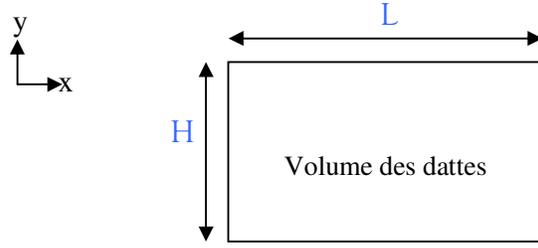


Figure III.1 : Une boîte de dattes de simple géométrie.

### III.1. système d'équations :

#### III.1.1-Le bilan d'énergie :

On utilise l'équation thermique présentée par Thorpe (1996a) [9]:

$$\rho_{\sigma} \varepsilon_{\sigma} \left\{ c_{\sigma} + W c_l + \frac{\partial H_w}{\partial t} \right\} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_a \varepsilon_v \left\{ c_a + w \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial t} \right) \right\} \frac{\partial T}{\partial t} - h_s \varepsilon_{\sigma} \rho_{\sigma} \frac{\partial W}{\partial t} + \rho_a c_a v_a \cdot \nabla T + \rho_a v_a w \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \cdot \nabla T = k_{eff} \nabla^2 T + Q_r - h_v S_l \quad (3.1)$$

Les deux premiers termes du coté gauche représentent le taux à lequel l'énergie d'une région de datte change quand sa température varie avec le temps, et le terme  $\frac{\partial H_w}{\partial t}$  survenu du fait de la chaleur intégrante des dattes mouillés dépend de la température; la présence de ce terme est strictement nécessaire mais il est généralement difficile à évaluer car il doit être calculé à partir des isothermes de sorption qui sont déterminés sur une large gamme de teneur en eau.

Le troisième terme à gauche représente l'énergie associée à la masse qui sera absorbée ou désorbée des dattes.

Le quatrième et le cinquième termes à gauche représentent la convection de l'énergie thermique pour l'air sec et la vapeur respectivement.

Le premier terme à droite gouverne le taux de conduction de chaleur à travers les dattes, le deuxième terme à droite est la chaleur de respiration,

Le dernier terme est le terme de Correction de la chaleur de respiration.

#### Conditions aux limites :

On suppose que la paroi inférieure est isolée thermiquement tandis que les parois latérales et la paroi supérieure sont maintenues à des températures constantes  $T_1, T_2, T_3$ .

les conditions aux limites peuvent être écrites :

$$T(0, y) - f_1(y) = 0; \quad 0 \leq y \leq H \quad (CL1)$$

$$T(L, y) - f_2(y) = 0; \quad 0 \leq y \leq H \quad (CL2)$$

$$T(x, H) - f_3(x) = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (CL3)$$

$$\frac{\partial T(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad 0 \leq x \leq L \quad (CL4)$$

Les fonctions  $f_1(y)$ ,  $f_2(y)$  et  $f_3(x)$  sont des températures qui dépendent essentiellement d'un bilan d'énergie retenu de la surface externe des dattes. Dans cette étude on va les considérer comme des constantes, les surfaces sont isothermiques.

### III.1.2-Bilan de masse :

Il prend en compte l'humidité délivrée par la respiration aussi celle qui survient de l'eau délivrée de la masse consommée par les moisissures. Il peut être écrit comme

suit: 
$$\varepsilon \rho_\sigma \frac{\partial W}{\partial t} + \rho_a v_a \cdot \nabla w = D_{eff} \rho_a \nabla^2 w + S_i (1 + 1.6 w) \quad (3.2)$$

$\rho_a$ : la masse volumique de l'air  $\text{kg/m}^3$

$\rho_\sigma$ : la masse volumique des dattes  $\text{kg/m}^3$

$\varepsilon$ : fraction de volume ou la porosité

$w$ : l'humidité de l'air  $\text{kg/kg}$

$W$ : teneur en eau des dattes  $\text{kg/kg}$

$v$ : la composante verticale de la vitesse  
 $\text{m/s}$

$D_{eff}$ : diffusivité effective de la vapeur  
d'eau a travers les dattes

$S$ : le taux volumique de la génération de  
masse  $\text{kg/m}^3$ .

- **Les conditions initiales :**

On considère le moment du stockage des dattes comme instant initial.

Les conditions à cet instant correspondent en réalité à celles régnantes au mois d'Octobre. a tel moment la teneur en eau des dattes Deglet Nour est aux environs de 24,6%, l'humidité relative de l'air est de l'ordre de 50% et la température ambiante moyenne est de 20-25°C [7] :

$$W(x, y) = 0.246$$

$$r(x, y) = 0.5$$

- **Les conditions aux limites :**

On suppose que les surfaces externes du stock des dattes sont imperméables à la vapeur donc les conditions aux limites sont :

$$\frac{\partial w(0, y)}{\partial x} = 0 ; 0 \leq y \leq H \quad CL5$$

$$\frac{\partial w(L, y)}{\partial x} = 0 ; 0 \leq y \leq H \quad CL6$$

$$\frac{\partial w(x, 0)}{\partial y} = 0 ; 0 \leq x \leq L \quad CL7$$

$$\frac{\partial w(x, H)}{\partial y} = 0 ; 0 \leq x \leq L \quad CL8$$

### III.2.3-Bilan de mouvement :

Les courants convectifs transporteurs qui se produisent dans la boîte sont caractérisés par des vitesses d'air intergranulaire suffisamment petites que le gradient de pression est directement proportionnel à la pression hydrostatique et au gradient des vitesses, cela peut être exprimé mathématiquement par la loi de Darcy :

$$\nabla p = \frac{\mu}{k} v - \rho g \quad (3.3)$$

Où  $\mu$  : est la viscosité dynamique de l'air intergranulaire.

$k$  : est la perméabilité.

$g$  : le vecteur de gravité.

On suppose que la perméabilité de la boîte des dattes est petite car la résistance à l'écoulement est inférieure avec des particules de large diamètre.

Des petits réarrangements dans l'équation expriment le résultat dans les formes des

composantes :

$$u = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.4)$$

$$v = - \frac{k}{\mu} \left[ \frac{\partial p}{\partial y} + \rho_a g_y \right] \quad (3.5)$$

Où  $g_y$  est la y composante du vecteur gravité.

Dérivant l'équation (3.4) par rapport à y et l'équation (3.5) par rapport à x et formant la différence des deux équations on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kg_y}{\mu} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} \quad (3.6)$$

Utilisant l'approximation de Boussinesq. Dans ce cas on peut prendre en compte les forces convectives notant que la densité de l'air intergranulaire peut être approximée

par l'expression: 
$$\rho_a = (\rho_a)_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.7)$$

Introduisant l'équation de fonction de courant (Witaker, 1981)

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (3.8)$$

$$v = - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (3.9)$$

Dérivant ces deux équations par rapport à x et y respectivement et insérant le résultat à l'équation (3.6) on trouve :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = - \frac{kg_y (\rho_a)_0 \beta}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.10)$$

- Les conditions initiales :

$$u(x,y,0) = v(x,y,0) = \psi(x,y,0) = 0$$

- Les conditions aux limites :

Puisque les parois sont imperméables, la fonction de courant est constante le long du périmètre et peut être choisie arbitrairement fixé à une valeur de 0.

$$\psi(0,y) = 0 \quad ; \quad 0 \leq y \leq H \quad \text{CL9}$$

$$\psi(L,y) = 0 \quad ; \quad 0 \leq y \leq H \quad \text{CL8}$$

$$\psi(x,0) = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{CL10}$$

$$\psi(x,H) = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{CL11}$$

### III.2-Adimensionnalisation des équations:

Nous allons exprimer les équations en termes de quantités adimensionnelles, une des raisons c'est qu'elles permettent de valider et d'analyser les solutions par les expériences publiées. Une deuxième raison c'est que les termes importants des équations gouvernantes sont de magnitude similaire, et ça diminue généralement l'efficacité de leurs solutions.

Les quantités adimensionnelles seront transférées facilement aux quantités physiques.

Les composantes adimensionnelles de la vitesse sont:

$$u' = \frac{u}{u^*} \quad (3.11)$$

$$v' = \frac{v}{v^*} \quad (3.12)$$

Où  $v^*$  et  $u^*$  sont toujours les vitesses de référence, on définit similairement les autres variables adimensionnelles :

$$t' = \frac{t}{t^*} \quad (3.13)$$

$$x' = \frac{x}{L} \quad (3.14)$$

$$y' = \frac{y}{L} \quad (3.15)$$

$$T' = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{T - T_0}{\Delta T} \quad (3.16)$$

Où :  $L$  est la largeur de la boîte des dattes ;  $T_0$  et  $T_1$  sont des températures spécifiées arbitrairement,  $\Delta T$  est la différence entre ces deux températures.

L'équation d'énergie devient :

$$\begin{aligned} & \rho_\sigma \varepsilon_\sigma \left\{ c_\sigma + W c_l + \frac{\partial H_w}{\partial t} \right\} \frac{\Delta T}{t^*} \frac{\partial T'}{\partial t'} + \rho_a \varepsilon_\gamma \left\{ c_a + w \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \right\} \frac{\Delta T}{t^*} \frac{\partial T'}{\partial t'} - \frac{h_s \varepsilon_\sigma \rho_\sigma}{t^*} \frac{\partial W}{\partial t'} \\ & + \frac{\rho_a c_a \Delta T}{L} \left( u' u^* \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' v^* \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) + \frac{\rho_a w \Delta T}{L} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \left( u' u^* \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' v^* \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \\ & = \frac{k_{eff} \Delta T}{L^2} \left( \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y'^2} \right) + Q_r - h_v S_l \end{aligned} \quad (3.17)$$

Multipliant l'équation précédente par  $\frac{L^2}{K_{eff} \Delta T}$  on trouve :

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho c_p) L^2}{k_{eff}} \frac{1}{t^*} \frac{\partial T'}{\partial t'} - \frac{h_s \varepsilon_\sigma \rho_\sigma L^2}{k_{eff} \Delta T t^*} \frac{\partial W}{\partial t'} + \frac{\rho_a c_a L}{k_{eff}} \left( u' u^* \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' v^* \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \\ & + \frac{\rho_a w L}{k_{eff}} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \left( u' u^* \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' v^* \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) = \left( \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y'^2} \right) + \frac{L^2}{k_{eff} \Delta T} (Q_r - h_v S_l) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Ou on a définit la chaleur massique  $(\rho c_p)$  comme :

$$(\rho c_p) = \rho_\sigma \varepsilon_\sigma \left\{ c_\sigma + W c_l + \frac{\partial H_w}{\partial T} \right\} + \rho_a \varepsilon_\gamma \left\{ c_a + w \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \right\} \quad (3.19)$$

Nous pouvons tenter de définir  $t^*$  comme :

$$t^* = \frac{k_{eff}}{\langle \rho c_p \rangle L^2} \quad (3.20)$$

Comme ceci fait le terme principal du côté gauche de l'équation (3.18), nous devons noter que  $(\rho c_p)$  dépend de la teneur en eau des dattes qui varie considérablement avec le temps et d'un point à un autre dans la boîte.

Alors nous choisissons de définir 
$$t^* = \frac{\rho_a c_a L^2}{K_{eff}} \quad (3.21)$$

L'unité de  $u^*$  et  $v^*$  est le m/s, on peut définir les vitesses caractéristiques comme  $L/t^*$

$$u^* = v^* = \frac{k_{eff}}{\rho_a c_a L} \quad (3.22)$$

Insérant ces valeurs dans l'équation (3.18) on obtient :

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho c_p)}{\rho_a c_a} \frac{\partial T'}{\partial t'} - \frac{h_s \varepsilon_\sigma \rho_\sigma}{\rho_a c_a \Delta T} \frac{\partial W}{\partial t'} + \left( u' \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \\ & + \frac{w}{c_a} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \left( u' \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) = \left( \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y'^2} \right) + \frac{L^2}{k_{eff} \Delta T} (Q_r - h_v S_l) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Multipliant cette équation par  $(\rho_a c_a) / (\rho c_p)$  le résultat de la forme désirée sera :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T'}{\partial t'} - \frac{h_s \varepsilon_\sigma \rho_\sigma}{(\rho c_p) \Delta T} \frac{\partial W}{\partial t'} + \frac{\rho_a c_a}{(\rho c_p)} \left( u' \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) \\ & + \frac{\rho_a w}{(\rho c_p)} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \left( u' \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) = \frac{\rho_a c_a}{(\rho c_p)} \left( \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y'^2} \right) + \frac{\rho_a c_a}{(\rho c_p)} \frac{L^2}{k_{eff} \Delta T} (Q_r - h_v S_l) \end{aligned} \quad (3.24)$$

- Le bilan de masse (équation (3.23)) peut être exprimé par :

$$\frac{\varepsilon_\sigma \rho_\sigma}{t^*} \frac{\partial W}{\partial t'} + \frac{\rho_a}{L} \left[ u^* u' \frac{\partial w}{\partial x'} + v^* v' \frac{\partial w}{\partial y'} \right] = \frac{D_{eff} \rho_a}{L^2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y'^2} \right] + S_l (I + 1.6W) \quad (3.25)$$

Substituant les expressions de  $u^*$ ,  $t^*$  et  $v^*$  dans l'équation (3.25) on trouve :

$$\frac{\varepsilon_\sigma \rho_\sigma K_{eff}}{\rho_a c_a L^2} \frac{\partial W}{\partial t'} + \frac{K_{eff}}{c_a L^2} \left[ u' \frac{\partial w}{\partial x'} + v' \frac{\partial w}{\partial y'} \right] = \frac{D_{eff} \rho_a}{L^2} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y'^2} \right] + S_l (I + 1.6W) \quad (3.26)$$

Qui peut être réarrangée à une forme désirée :

$$\frac{\partial W}{\partial t'} + \frac{\rho_a}{\varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \left[ u' \frac{\partial w}{\partial x'} + v' \frac{\partial w}{\partial y'} \right] = \frac{D_{eff} \rho_a^2 c_a}{K_{eff} \varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y'^2} \right] + \frac{L^2 c_a \rho_a S_l (I + 1.6W)}{K_{eff} \varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \quad (3.27)$$

La fonction de courant dans sa forme adimensionnelle est définie par  $\psi'$ , le terme de la fonction caractérisée est  $\psi^*$ , donc : 
$$\psi' = \frac{\psi}{\psi^*} \quad (3.28)$$

De la définition de la fonction de courant on déduit que :

$$u' u^* = \frac{\partial \psi'}{\partial y'} \frac{\partial y'}{\partial y} \psi^* \quad (3.29)$$

Substituant les définitions de  $u^*$  et  $y'$  dans l'équation (3.29) on trouve :

$$\psi^* = \frac{k_{eff}}{\rho_a c_a} \quad (3.30)$$

Alors la fonction de courant peut être exprimée comme suit :

$$\frac{k_{eff}}{\rho_a c_a L^2} \left[ \frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} \right] = - \frac{K \rho_a g_y \beta \Delta T}{\mu L} \frac{\partial T'}{\partial x'} \quad (3.31)$$

Qui peut être réarrangée à la forme suivante : 
$$\left[ \frac{\partial^2 \psi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial y'^2} \right] = -Ra^* \frac{\partial T'}{\partial x'} \quad (3.32)$$

Où : 
$$Ra^* = \frac{k \rho_a^2 c_a \beta g_y \Delta T L}{\mu k_{eff}} \quad (3.33)$$

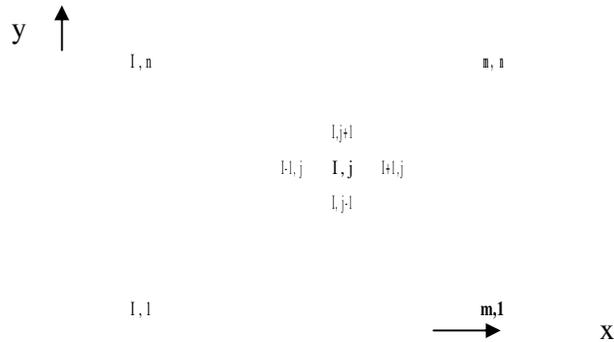
$Ra^*$  est appelé le nombre de Darcy-Rayleigh (modifié pour le distinguer du nombre de Rayleigh associé à une seule phase du fluide)

Le système d'équations à résoudre est :

$$\begin{cases} (3.24) \\ (3.27) \\ (3.32) \end{cases}$$

### III.3-Les procédures de la solution numérique :

Pour des objectifs illustratifs, on considère un stock de dattes qui a une section transversale rectangulaire. Une grille rectangulaire peut être superposée dans la section transversale dont il y a  $m$  nœuds dans la direction de  $x$  et  $n$  nœuds dans la direction de  $y$  comme nous indique la figure suivante :



**Figure III-1:** Configuration du maillage utilisé pour la résolution

On suppose que la largeur adimensionnelle égale l'unité, la hauteur est  $H$ , Alors les espaces internodales sont :

$$h_x = \frac{1}{m-1} \quad (3.34)$$

$$h_y = \frac{Ar}{n-1} \quad (3.35)$$

Utilisant cette notation, on trouve que les distances  $x$  et  $y$  sont exprimées comme :

$$x = (i-1)h_x \quad (3.36)$$

$$y = (j-1)h_y \quad (3.37)$$

Si le pas d'intégration du temps est  $h_t$ , le temps de la solution est :  $t = (p-1) h_t$

Les températures dans les nœuds sont dénotées par :  $T_{i,j}^p$ ,

i et j sont les pas de l'espace et p représente le P<sup>ième</sup> pas du temps.

Pour simplifier les souscrites et les suscrites nous écrivons (Vahl Davis,1976):

$$T_{i,j}^p \text{ comme } T \quad ; \quad T_{i,j+1}^{p+1} \text{ comme } T_{j+1}^{p+1} \quad ; \quad T_{i-1,j}^p \text{ comme } T_{i-1} \text{ et ainsi de suite.}$$

La dérivée de température par rapport au temps au noeud (i, j) au p<sup>ième</sup> pas est approximée par

$$\text{les différences à droite par : } \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^{p+1} - T^p}{h_t} \quad (3.38)$$

Les dérivées spatiales sont approximées par les différences centrées donc :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2h_x} \quad (3.39)$$

$$\text{Et} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1} - 2T + T_{i-1}}{h_x^2} \quad (3.40)$$

En substituant les équations (3.38), (3.39) et (3.40) dans les équations de chaleur, de masse et de mouvement et on entame la discrétisation.

### III.3.1-Discrétisation de l'équation d'énergie :

L'équation thermique peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + t_{pi} \left[ \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} \right] + \left[ t_{mx} \frac{\partial T}{\partial x} + t_{my} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = t_{pi} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + t_r + t_l \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} t_{pi} &= \frac{\rho_a c_a}{(\rho c_p)} \\ \text{où} \quad t_{mx} &= \frac{\rho_a w u}{(\rho c_p)} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \\ t_{my} &= \frac{\rho_a w v}{(\rho c_p)} \left( c_l + \frac{\partial h_v}{\partial T} \right) \\ t_r &= \frac{\rho_a c_a}{(\rho c_p)} \frac{L^2}{k_{eff} \Delta T} (Q_r - h_v S_l) \\ t_l &= \frac{h_v \varepsilon \rho_a}{(\rho c_p) \Delta T} \frac{\partial W}{\partial t} \end{aligned}$$

On va résoudre cette équation par la méthode de Peaceman-Rachford (1955), une méthode implicite à direction alternée qui traite le problème implicitement dans la direction

d'une des coordonnées, disant la coordonnée x durant le premier mipas du temps, l'intégration dans la direction orthogonale (la direction de y) sera trouvée explicitement.

Durant le deuxième mipas du temps, les y composantes se traitent implicitement, alors que les x composantes seront traitées explicitement. Un exemple va illustrer la méthode :

- **Implicite dans la direction de x :**

$T^*$  représente la valeur spéculative de la température après le premier mi pas du temps, dans ce cas la forme discrétisée de l'équation d'énergie est :

$$\begin{aligned} & \frac{T^* - T}{h_t / 2} + t_{pi} \left[ \frac{u_{i+1} T_{i+1}^* - u_{i-1} T_{i-1}^*}{2h_x} \right] + t_{pi} \left[ \frac{v_{j+1} T_{j+1} - v_{j-1} T_{j-1}}{2h_y} \right] + t_{mx} \left[ \frac{T_{i+1}^* - T_{i-1}^*}{2h_x} \right] + t_{my} \left[ \frac{T_{j+1} - T_{j-1}}{2h_y} \right] \\ & = t_{pi} \left[ \frac{T_{i+1}^* - 2T^* + T_{i-1}^*}{h_x^2} \right] + t_{pi} \left[ \frac{T_{j+1} - 2T + T_{j-1}}{h_y^2} \right] + t_r + t_i \end{aligned} \quad (3.42)$$

D'une autre forme :

$$\begin{aligned} & \left[ -\frac{t_{pi}}{2h_x} u_{i-1} - \frac{t_{pi}}{h_x^2} - \frac{t_{mx}}{2h_x} \right] T_{i-1}^* + \left[ \frac{2}{h_t} + \frac{2t_{pi}}{h_x^2} \right] T^* + \left[ \frac{t_{pi}}{2h_x} u_{i+1} - \frac{t_{pi}}{h_x^2} + \frac{t_{mx}}{2h_x} \right] T_{i+1}^* \\ & = \left[ \frac{t_{pi}}{2h_y} v_{j-1} + \frac{t_{pi}}{h_y^2} + \frac{t_{my}}{2h_y} \right] T_{j-1} + \left[ \frac{2}{h_t} - \frac{2t_{pd}}{h_y^2} \right] T + \left[ -\frac{t_{pi}}{2h_y} v_{j+1} + \frac{t_{pi}}{h_y^2} - \frac{t_{my}}{2h_y} \right] T_{j+1} + t_l + t_r \end{aligned} \quad (3.43)$$

Dans cette forme d'équation, tous les inconnues sont au coté gauche et le coté droit contient seulement les températures qui sont connues.(c-à-d ceux qui sont déjà calculées au début du pas du temps).

L'équation (3.43) peut être écrite sous une forme compacte par la définition des variables suivantes :

$$\begin{aligned} c_l &= 2 / h_t & c_{ip6} &= c_l - 2c_{ip5} \\ c_{ip1} &= t_{pi} / 2h_x & c_{ip7} &= c_l + 2c_{ip5} \\ c_{ip2} &= t_{pi} / h_x^2 & c_{ip8} &= c_l - 2c_{ip2} \\ c_{ip3} &= c_l + 2c_{ip2} & c_{im1} &= t_{mx} / 2h_x \\ c_{ip4} &= t_{pi} / 2h_y & c_{im2} &= t_{my} / 2h_y \\ c_{ip5} &= t_{pi} / h_y^2 & & \end{aligned}$$

Qui permettent d'écrire l'équation comme suit:

$$\begin{aligned} & (-c_{ip1} u_{i-1} - c_{ip2} - c_{im1}) T_{i-1}^* + c_{ip3} T^* + (c_{ip1} u_{i+1} - c_{ip2} + c_{im1}) T_{i+1}^* \\ & = (c_{ip4} v_{j-1} + c_{ip5} + c_{im2}) T_{j-1} + c_{ip6} T + (-c_{ip4} v_{j+1} + c_{ip5} - c_{im2}) T_{j+1} + t_l + t_r \end{aligned} \quad (3.44)$$

Au début du premier pas du temps les valeurs de tous les multiplicateurs :  $t_{pi}$ ,  $t_{mx}$ ,  $t_{my}$  et ainsi de suite peuvent être calculés car les valeurs initiales de températures et de l'humidité  $W$  des dattes ont été déclarées. Il faut alors calculer la valeur de  $T^*$  dans les points intérieurs.

Cela sera dû par l'incrémentation de j de 2 à N-1 et pour chaque valeur de j on a un système de (m-2) d'équations linéaires, écrivant :

$$a_{i-1}T_{i-1}^* + b_{i-1}T^* + c_{i-1}T_{i+1}^* = d_{i-1} \quad (3.45)$$

Dans laquelle :

$$\begin{aligned} a_{i-1} &= -c_{ip1}u_{i-1} - c_{ip2} - c_{iml} \\ b_{i-1} &= c_{ip3} \\ c_{i-1} &= c_{ip1}u_{i+1} - c_{ip2} + c_{iml} \\ d_{i-1} &= (c_{ip4}v_{j-1} + c_{ip5})T_{j-1} + c_{ip6}T + (-c_{ip4}v_{j+1} + c_{ip5})T_{j+1} + t_i + t_r \end{aligned}$$

Avec i= 2, 3,4,..., m-1. Notant que pour i=2 la première équation devient :

$$b_1T_2^* + c_1T_3^* = d_1 - a_1T_1 \quad (3.46)$$

Et pour i = m-1 on a :  $a_{m-2}T_{m-2}^* + b_{m-2}T_{m-1}^* = d_{m-2} - c_{m-2}T_m$  (3.47)

Alors Il faudra à chaque instant résoudre le système suivant

$$\left. \begin{array}{l} (3.45) \\ (3.46) \\ (3.47) \end{array} \right\}$$

La température initiale au début du pas du temps est désignée comme dite (i,j) car elles sont au début du pas du temps des anciennes températures, par rapport aux nouvelles températures calculées à la fin du pas du temps.

Après le calcul des coefficients, le système tridiagonal de m-2 équations sera résolu par le sous-programme de Thomas pour trouver les températures  $T^*$  à la fin du mi-pas du temps.  $T_1$  et  $T_m$  sont connues au début, et à la fin.

- *Implicite dans la direction de y :*

L'étape suivante est de résoudre l'équation d'énergie discrétisée implicitement dans la direction de y pour obtenir les nouvelles valeurs de  $T^{**}$  à la fin du pas du temps alors que les valeurs  $T^*$ , obtenues à la fin du mipas du temps sont traitées explicitement. Cela s'est clarifié par :

$$\begin{aligned} \frac{T^{**} - T^*}{h_y / 2} + t_{pi} \left[ \frac{u_{i+1}T_{i+1}^* - u_{i-1}T_{i-1}^*}{2h_x} \right] + t_{pi} \left[ \frac{v_{j+1}T_{j+1}^{**} - v_{j-1}T_{j-1}^{**}}{2h_y} \right] + t_{mx} \left[ \frac{T_{i+1}^* - T_{i-1}^*}{2h_x} \right] \\ + t_{my} \left[ \frac{T_{j+1}^{**} - T_{j-1}^{**}}{2h_y} \right] = t_{pi} \left[ \frac{T_{i+1}^* - 2T^* + T_{i-1}^*}{h_x^2} \right] + t_{pi} \left[ \frac{T_{j+1}^{**} - 2T^{**} + T_{j-1}^{**}}{h_y^2} \right] + t_r + t_i \end{aligned} \quad (3.48)$$

Aussi cette équation peut être simplifiée par la collection des termes inconnus à gauche et les termes connus à droite :

$$\begin{aligned} & (-c_{ip4}v_{j-1} - c_{pt5} - c_{tm2})T_{j-1}^{**} + c_{ip7}T^{**} + (c_{ip4}v_{j+1} - c_{ip5} + c_{tm2})T_{j+1}^{**} \\ & = (c_{ip1}u_{i-1} + c_{ip2} + c_{tm1})T_{i-1}^* + c_{ip8}T^* + (-c_{ip1}u_{i+1} + c_{ip2} - c_{tm1})T_{i+1}^* + t_l + t_r \end{aligned} \quad (3.49)$$

Dans ce cas on a (n-2) équations linéaires pour chacune des (m-2) colonnes intérieures résolues facilement pour  $T^{**}$ , qui sont bien sur les nouvelles températures exigées  $T^{p+1}$ , à la fin du pas du temps .

La nouvelle température devient l'ancienne, c à d, la température initiale au début de l'itération suivante. La méthode numérique décrit est utilisée pour déterminer les températures aux (m-2) x (n-2) nœuds intérieurs.

- **Conditions aux limites :**

Pour une surface adiabatique (isolation thermique parfaite) il n' y aura pas de flux de chaleur, q, a travers cette surface, cette condition est représenté par :

$$q = -keff \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}^{y=H} = 0 \quad (3.50)$$

La surface inférieure de la cavité est isolée thermiquement, on estime ses températures par l'extrapolation des températures connues des nœuds intérieurs.

L'approximation des gradients de température par le développement de Taylor est[21]:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{3T + 4T_2 - T_3}{2h_y} \quad (3.51)$$

A une surface adiabatique,  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$  donc on peut trouver la température  $T_1$  de la surface a partir

des valeurs intérieurs,  $T_2$  et  $T_3$  par l'expression :  $T_1 = \frac{4T_2 - T_3}{3}$  (3.52)

### III.3-2 Résolution de l'équation de mouvement :

L'équation (3.32) (équation générale de Poisson cas de 2D), peut être résolue par une méthode d'itération qui exige un grand nombre d'itérations. Ce processus peut se réduire par la formulation du problème d'être pseudo-transitoir par l'addition d'un pseudo terme dépend

du temps  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$  comme celui proposé par [Mallinson](#) et [De vall dadis](#) (1973) pour obtenir la

solution a un état stable. L'équation se transforme à une forme parabolique[9][22]:

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla^2 \psi + R_a^* \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.53)$$

Où :  $\alpha_p$  est un multiplicateur avec une valeur arbitraire déterminée par des expériences numériques. A chaque pas du temps, l'équation (3.53) sera résolue jusqu'à l'approche d'un état stable. Les composantes de la vitesse d'air peuvent être obtenues de l'équation (3.8) et (3.9).

Si l'équation (3.53) est discrétisée implicitement dans la direction de x, elle prend la forme :

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\psi^* - \psi}{h_x / 2} = \left[ \frac{\psi_{i-1}^* - 2\psi_i^* + \psi_{i+1}^*}{h_x^2} \right] + \left[ \frac{\psi_{j-1} - 2\psi_j + \psi_{j+1}}{h_y^2} \right] + R_a^* \frac{(T_{i+1} - T_{i-1})}{2h_x} \quad (3.54)$$

Qui peut être exprimée sous une forme plus compacte :

$$-c_{p1}\psi_{i-1}^* + c_{p2}\psi_i^* - c_{p1}\psi_{i+1}^* = c_{p3}\psi_{j-1} + c_{p4}\psi_j + c_{p3}\psi_{j+1} + c_{p7}(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (3.55)$$

Cette équation est résolue pour  $\psi^*$  pour les points intérieurs.  $i = 2, 3, 4, \dots, m-1$ , et pour chaque valeur de j on peut utiliser l'algorithme de Thomas pour résoudre l'équation (3.56) pour  $\psi_{2,j}^*, \psi_{3,j}^*, \psi_{4,j}^*, \psi_{5,j}^*, \dots, \psi_{m-2,j}^*, \psi_{m-1,j}^*$

Les valeurs aux limites de la fonction de courant,  $\psi_{1,j}^*, \psi_{m,j}^*, \psi_{i,1}^*, \psi_{i,n}^*$  sont nulles.

Après la détermination des la valeurs de  $\psi^*$  à la fin du mipas du temps, les valeurs de  $\psi^{**}$  à la fin du pas seront calculées par l'équation :

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\psi^{**} - \psi^*}{h_x / 2} = \left[ \frac{\psi_{i-1}^* - 2\psi_i^* + \psi_{i+1}^*}{h_x^2} \right] + \left[ \frac{\psi_{j-1}^{**} - 2\psi_j^{**} + \psi_{j+1}^{**}}{h_y^2} \right] + R_a^* \frac{(T_{i+1} - T_{i-1})}{2h_x} \quad (3.56)$$

Qui peut être réarrangée d'une manière plus compacte :

$$-c_{p3}\psi_{j-1}^{**} + c_{p5}\psi_j^{**} - c_{p3}\psi_{j+1}^{**} = c_{p1}\psi_{i-1}^* + c_{p6}\psi_i^* + c_{p1}\psi_{i+1}^* + c_{p7}(T_{i+1} - T_{i-1}) \quad (3.57)$$

Où, pour conformer avec la nomenclature de Vahl Davis (1976), on a défini les coefficients :

$$\begin{aligned} c_{p1} &= \alpha_p / h_x^2 & c_{p5} &= c_1 + 2c_{p3} \\ c_{p2} &= c_1 + 2c_{p1} & c_{p6} &= c_1 + 2c_{p1} \\ c_{p3} &= \alpha_p / h_y^2 & c_{p7} &= \alpha_p R^* / 2h_x \\ c_{p4} &= c_1 - 2c_{p3} \end{aligned}$$

Pour chaque pas du temps l'équation (3.55) sera avancée vers un pas d'intégration successive,  $\alpha_p h_t$ , jusqu'au quelque critère soit satisfait tel que [9] [22]:

$$\sum_{\substack{j=2 \\ i=m-1}}^{j=n-1} |\psi^{p+1} - \psi^p| < \psi_{err} \quad (3.58)$$

Dans le quel  $\psi_{err}$  est l'erreur maximale admissible prédéterminée.

Le champs de vitesse est déterminé plus correctement quand  $\psi_{err}$  est plus petite.

La discrétisation des équations (3.8) et (3.9) nous donne :

$$u = \frac{\Psi_{j+1} - \Psi_{j-1}}{2h_y} \quad (3.59)$$

ET

$$v = -\frac{\Psi_{i+1} - \Psi_{i-1}}{2h_x} \quad (3.60)$$

### III.3-3 Résolution du bilan de masse [23] :

- **L'humidité intergranulaire :**

Avant de trouver l'humidité des grains dans chaque point, il est nécessaire de calculer l'humidité de l'air intergranulaire à chaque température.

La pression de la vapeur  $P_v$  de l'eau dans l'air intergranulaire est donnée par :

$$p_v = r p_s \quad (3.61)$$

Dans laquelle l'humidité relative,  $r$  de l'air intergranulaire est donnée par l'expression [9]:

$$r = \left( \frac{p_s}{p_0} \right)^{\frac{h_s - 1}{h_v}} \quad (3.62)$$

$P_0$  est une constante empirique dépend de type des grains (voir annexes).

$h_v$  est la chaleur latente de vaporisation présentée par Hunter(1987) [9]:

$$h_v = 2502.39 - 2.3768T \quad (3.63)$$

$P_s$  est la pression de la vapeur saturée qui peut être obtenue de l'équation de Hunter

(1987)[9][23][24] :

$$p_s = \frac{6 \times 10^{25}}{(T + 273.15)^5} \exp\left(\frac{-6800}{T + 373.15}\right) \quad (3.64)$$

Les équations (3.61) à (3.63) peuvent être utilisées pour calculer l'humidité  $w$  de l'air intergranulaire par la proposition de l'expression [9][24]:  $w = \frac{0.622 p_v}{P - p_v}$  (3.65)

Où  $P$  est la pression atmosphérique, et la constante 0.622 est le rapport des poids moléculaire de l'eau et l'air.

- **la teneur en eau des grains** [9][23]: Avant de résoudre l'équation de conservation de masse (3.27), on utilise l'équation (3.64) pour déterminer l'humidité de l'air intergranulaire comme une fonction de température. La teneur en eau des dattes se change très lentement, et elle peut être calculée utilisant une méthode explicite simple. Donc, dans chaque point intérieur on a :

$$\begin{aligned} \frac{W^{p+1}}{ht} = & \frac{W^p}{ht} + \frac{D_{eff}}{k_{eff}} \frac{\rho_a^2 c_a}{\varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \left[ \frac{w_{i-1}^{p+1} - 2w^{p+1} + w_{i+1}^{p+1}}{h_x^2} + \frac{w_{j-1}^{p+1} - 2w^{p+1} + w_{j+1}^{p+1}}{h_y^2} \right] \\ & - \frac{\rho_a}{\varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \left[ \frac{u_{i+1} w_{i+1}^{p+1} - u_{i-1} w_{i-1}^{p+1}}{2h_x} + \frac{v_{i+1} w_{i+1}^{p+1} - v_{i-1} w_{i-1}^{p+1}}{2h_y} \right] + \frac{(I + I.6W^p)L^2 \rho_a c_a S_l}{k_{eff} \varepsilon_\sigma \rho_\sigma} \end{aligned} \quad (3.66)$$

$W^p$  ; les teneurs en eau calculées au  $p^{ième}$  pas du temps et  $W^{p+1}$  : au pas suivant

- **La teneur en eau a la périphérie de la boîte :**

Les valeurs périphériques de la teneur en eau des grains sont extrapolée aux limites par la proposition de l'analogie de l'équation (3.52) dans la quelle la température T, est remplacée par l'humidité  $w$ . Comme une convenance les teneurs en eau des dattes aux limites peuvent être estimées par la proposition de l'extrapolation linéaire des valeurs intérieures. Dès qu'on a choisi de travailler par un maillage uniformisé les teneurs en eau aux limites sont trouvées par l'équation:

$$W_1 = 2W_2 - W_3 \quad (3.67)$$

### III.4-L'effet de respiration :

Plusieurs travaux (Thompson 1972 ; Seib et al ; Lacy et al.1994) ont quantifié les facteurs qui affectent le taux de respiration. Dans ce travail on emploie celui de Thompson de la respiration du maïs. Il a déterminé que la masse sèche perdue est une fonction de temps, et après un temps t (secondes) la perte fractionnelle, dm, de la masse sèche est donnée par [9] [22] :

$$dm = 8.83 \times 10^{-4} \left( \exp \left[ 1.6667 \times 10^{-6} \times t \right] - 1 \right) + 2.833 \times 10^{-9} t \quad (3.68)$$

Cette équation est appliquée pour le maïs à 15,5 C°et à une teneur en eau de 25% (b.h) avec 30% de dommage, et puisque la température et la teneur en eau des dattes varient d'un point à un autre dans la boîte, il est nécessaire d'illustrer la valeur du temps réel et le temps physiologique  $t_p$  . Les deux temps sont reliés par :

$$t_p = \frac{t}{M_m M_T} \quad (3.69)$$

Dans laquelle  $M_m$  et  $M_T$  modifient le temps écoulé ( la vie des grains dépend de la température et la teneur en eau) , l'expression de Thompson converti aux unités du SI résulte à ce qui suit :

a) **température modifiée :**

Si  $T \leq 15,5^\circ\text{C}$  et  $M \leq 19\%$  :

$$M_T = 32.2 \exp(-0.1044T - 1.856) \quad (3.70)$$

Si  $T > 15,5^\circ\text{C}$  et  $19 < M \leq 28\%$  :

$$M_T = 32.2 \exp(-0.1044T - 1.856) + \{(M - 19) / 100\} \exp(0.0183T - 0.2847) \quad (3.71)$$

Si  $T > 15,5^\circ\text{C}$  et  $M > 28\%$  :

$$M_T = 32.2 \exp(-0.1044T - 1.856) + 0.09 \exp(0.0183T - 0.2847) \quad (3.72)$$

b) l'humidité modifiée :

L'humidité modifiée,  $M_m$ , est donnée par l'expression :

$$M_M = 0.103 \left( \exp(455 / M_{DB}^{1.53}) - 0.00845 M_{BD} + 1.558 \right) \quad (3.73)$$

Dans laquelle  $M_{DB}$  et la teneur en eau %(b.s).

Les équations (3.68) à (3.73) sont utilisés pour calculer la masse sèche perdue,  $dm$ , après le temps physiologique  $t_p$ , par l'expression :

$$dm = 8.83 \times 10^4 \left\{ \exp(1.667 \times 10^6 t_p - 1) \right\} + 2.833 \times 10^{-9} t_p \quad (3.74)$$

De la quelle, le taux de la masse sèche perdue est donné par :

$$\frac{ddm}{dt} = 14.72 \times 10^{-10} \left\{ \exp(1.667 \times 10^6 t_p) - 1 \right\} + 2.833 \times 10^{-9} / (M_M M_T) \quad (3.75)$$

Les taux des déchéances des pesticides appliqués aux grains stockées dépendent fortement de la température et l'humidité de l'air intergranulaire. Desmarchelier et Bengston(1979) ont élucidé les cinétiques chimiques de déchéance du pesticide et ils ont les trouvé que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -k.r.C \quad (3.76)$$

Où  $C$  est la concentration du pesticide dans les grains ;  $k$  est le taux de réaction et  $r$  l'humidité relative fractionnelle de l'air intergranulaire.

Si l'humidité relative  $r = 0,5$ , le mitemps,  $t/2$  du pesticide typique à une température  $T$  donnée par Desmarchelier et Bengston(1979) comme suit:

$$t_{1/2} = t_{1/2}^* 10^{-B(T-30)} \quad (3.77)$$

Où :  $t_{1/2}^*$  est le mi-temps à  $30^\circ\text{C}$  et  $B$  est un paramètre relié au pesticide considéré.

Les valeurs de  $t_{1/2}^*$  et  $B$  pour onze pesticides sont listées dans le tableau Annexe. Après une petite manipulation dans l'équation (3.76) et(3.77) , la concentration  $C^{p+1}$ , du pesticide à la  $(p+1)^{\text{ième}}$  pas d'intégration est donné par Thorpe (1986)[9] [22][23] :

$$C^{p+1} = C^p \exp\left[-1,3863r^p h_t \times 10^{B(T^p-30)} / t_{1/2}^*\right] \quad (3.78)$$

Le signe d'approximation est introduit puisque les cinétiques de déchéance de pesticide sont calculées en utilisant les valeurs de r et T qui se produisent au début du pas du temps, comme il est indiqué par la suscrite p. Si  $h_t$  est suffisamment petite. L'erreur est négligeable.

## CHAPITRE IV

# RESULTATS ET INTERPRETATION

## IV- Introduction :

Bien que le modèle adopté puisse être validé pour un large domaine d'application (céréale, produit granulaires, fruits sec...etc.), notre étude s'est restreinte au cas de Deglet-Noor de l'Algérie du fait de leur marchande importance et du pouvoir productif mais malheureusement on a pas pu trouvé toutes les propriétés des dattes, exemple (la chaleur différentielle de sorption, la perméabilité, le coefficient de diffusion, la porosité.. etc.) Alors on a pris un produit agroalimentaire où on connaît toutes ses caractéristiques physiques [23] qui est le maïs pour faire tourner le programme. Le modèle mathématique utilisé est appliqué pour une section transversale d'une cavité pleine de maïs. La base de la cavité est prise adiabatique et les autres parois sont isothermes et imperméables à la matière.

Dans ce simple système traité les noeuds à la limite coïncident avec la limite physique, et la maille est orthogonale.

Un programme en fortran a été développé et exécuté pour déterminer les champs bidimensionnels de température, de vitesse et les lignes de courant. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes isovaleurs. Le changement des espaces inter nodales et le pas du temps n'influent pas beaucoup sur les résultats.

Pour le stockage des grains à long terme la température et la teneur en eau seront redistribuées dans la cavité à cause des courants convectifs naturels.

Pour la clarification de l'utilité du modèle les petites variations sont négligées.

### IV.1- Validation:

La première étape consiste à valider notre simulation numérique en comparant nos résultats avec ceux publiés par d'autres auteurs.

1) Validations des résultats avec ceux de G.Thorpe [9] :

On a gardé les mêmes conditions : Le même produit granulaire (maïs), cavité rectangulaire avec un facteur de forme  $Ar=1$ , régime laminaire, La température initiale des grains est  $30^{\circ}\text{C}$ , correspond à une température adimensionnelle égale à 1.0, la teneur en eau des grains est 14% (base humide), 16% (base sèche). Une température de  $20^{\circ}\text{C}$  est imposée

sur la surface supérieure et les parois latérales,  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ . La durée de stockage est prise =200 heures (720000 s).

Voir les figures: (IV.1.a1), (IV.1.a2), (IV.1.a3), (IV.1.a4).

Nos courbes [figures:(IV.1.b1), (IV.1.b2), (IV.1.b3), (IV.1.b4) qui représentent les champs de température , vitesse verticale, vitesse horizontale, lignes de courant obtenues a l'aide du logiciel Tec plot et les figures:(IV.1.c1), (IV.1.c2), (IV.1.c3), (IV.1.c4) qui représentent les contours obtenus par le logiciel Origin 6.0] montrent qu'il y a un accord qualitatif entre les résultats qu'on a obtenus et ceux de la littérature; ce qui a permis de valider notre modélisation numérique.

➤ *Distribution de la température :*

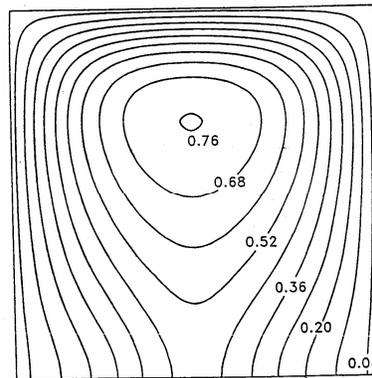


Figure (IV.1.a1): distribution de la température (Thorpe)[9].

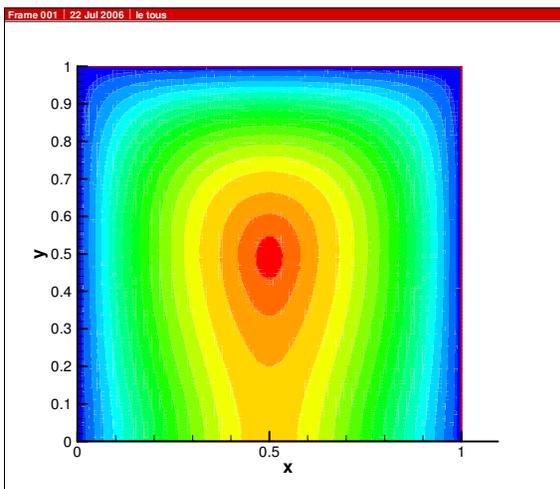


Fig. (IV.1.b1): Le champ de la température.

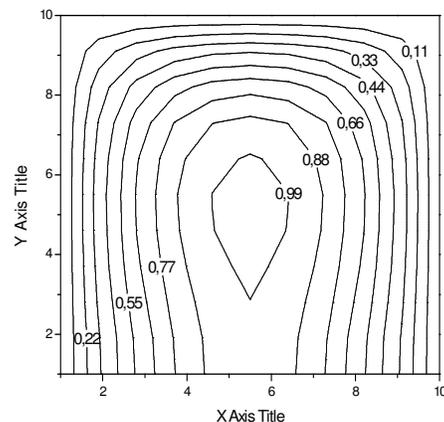


Fig. (IV.1.c1): distribution de la température

➤ La composante verticale de la vitesse :

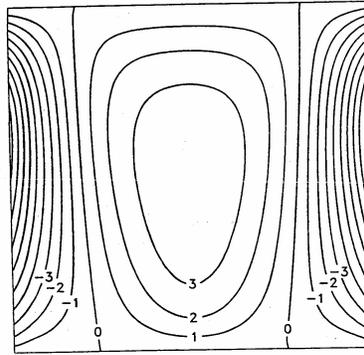


Fig. (IV.1.a2): La composante verticale de la vitesse(Thorpe) [9].

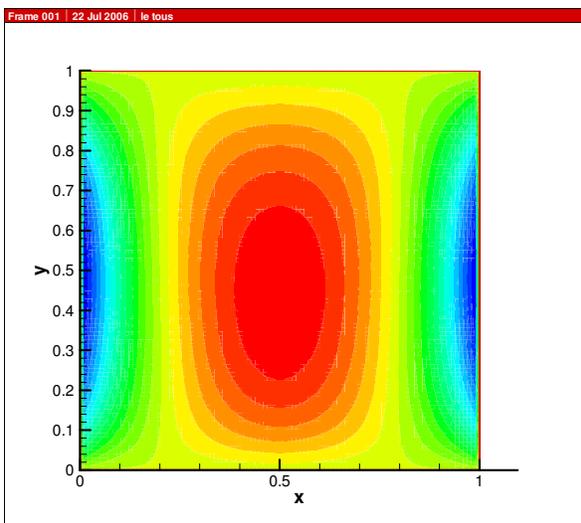


Fig. (IV.1.b2): Le champ de la vitesse verticale

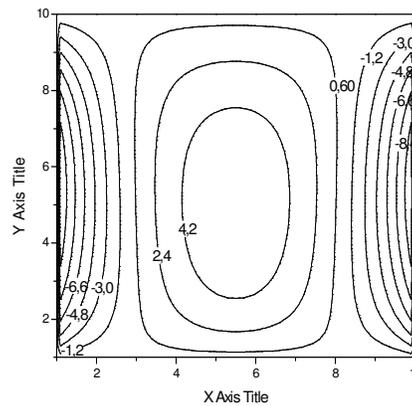


Fig. (IV.1.c2): La vitesse verticale

➤ Composante horizontale de la vitesse :

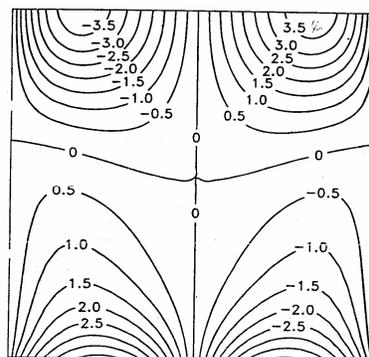


Fig. (IV.1.a3): la vitesse horizontale (Thorpe) [9].

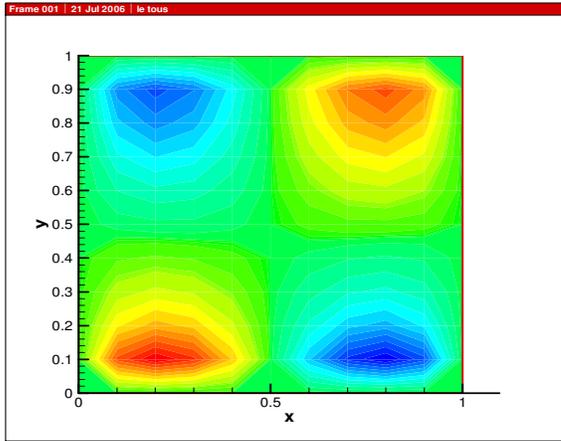


Fig. (IV.1.b3): Le champ de la vitesse horizontale

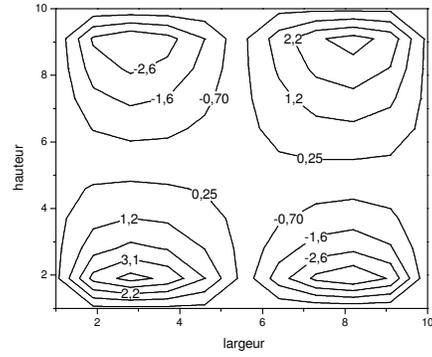


Fig. (IV.1.c3): La vitesse horizontale

➤ Lignes de courants :

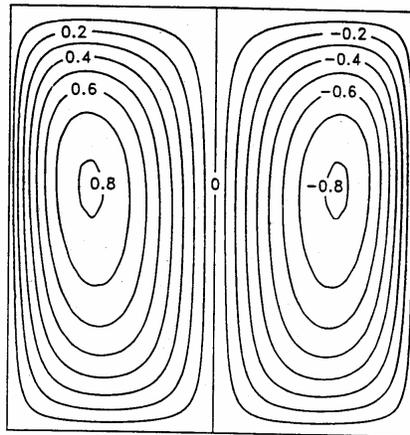


Fig. (IV.1.a4) : les lignes de courants (Thorpe) [9].

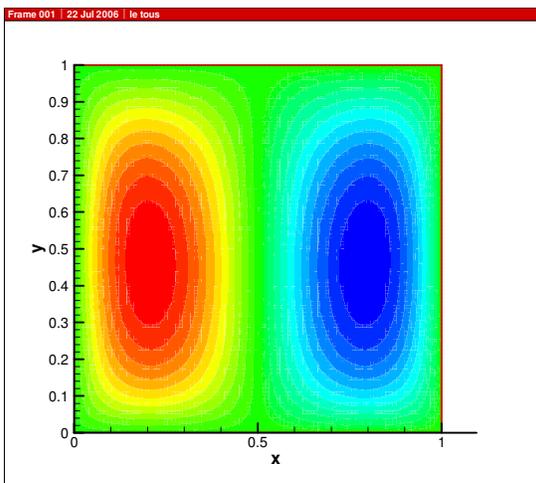


Fig. (IV.1.b4) : les lignes de courants

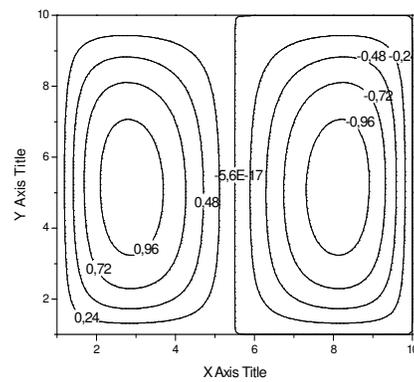


Fig. (IV.1.c4) : les lignes de courants

2) Validation des résultats avec ceux de: M.Prakash, F.Ozden, L.Yuguo et R.G.Thorpe [24]

Nos résultats sont comparés encore aux résultats des autres auteurs qui ils ont pris une configuration géométrique différente. On a pris les mêmes conditions : Le même produit granulaire (maïs), régime laminaire, température des grains =30°C, températures des parois extérieures =20°C,  $\Delta T=10^\circ\text{C}$ . La durée de stockage est prise =120 jours.

Voir les figures: (IV.2.a1), (IV.2.a2), (IV.2.a3), (IV.2.a4).

Notre cavité est rectangulaire avec un facteur de forme  $Ar=4$  ( $L=2.5\text{m}$ ,  $H=10\text{m}$ )

Nos courbes [figures:(IV.2.b1), (IV.2.b2), (IV.2.b3), (IV.2.b4) obtenus par Tec plot0.9 et les figures:(IV.2.c1), (IV.2.c2), (IV.2.c3), (IV.2.c4) Obtenus par Origin0.6] montrent qu'il y a un accord.

➤ *Distribution de la température :*

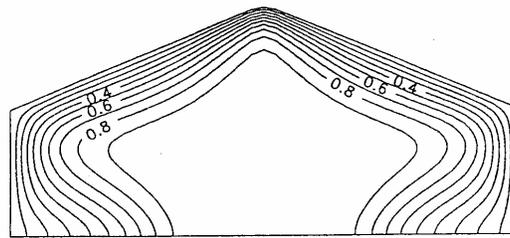


Fig IV.2.a1: Distribution de la température [24].

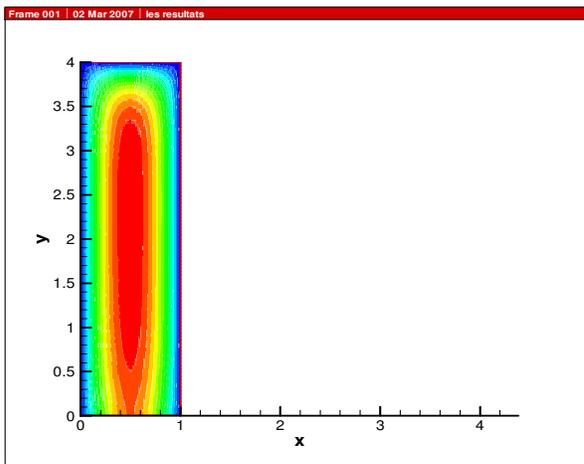


Fig IV.2.b1: Champ de la température

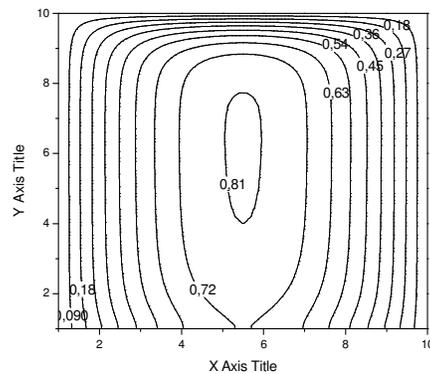


Fig IV.2.c1: Distribution de la température

➤ La composante verticale de la vitesse :

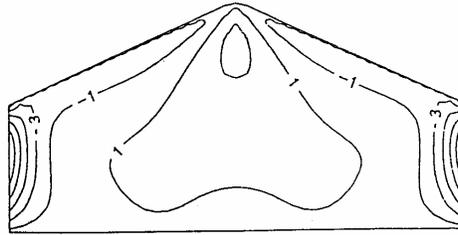
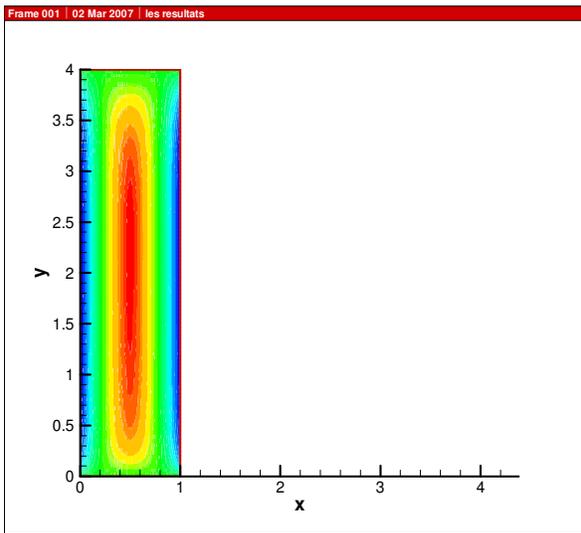
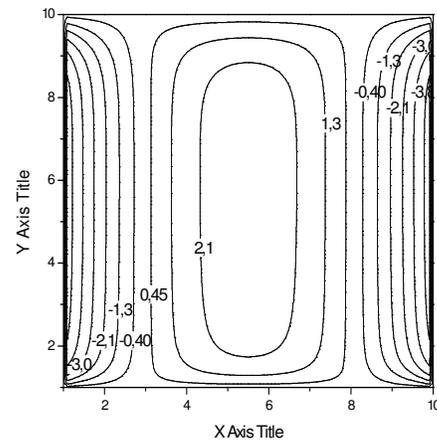


Fig IV.2.a2: Composante verticale de la vitesse [24].



Fig(IV.2.b2): Champ de vitesse verticale



Fig(IV.2.c2): La vitesse verticale

➤ La composante horizontale de la vitesse :

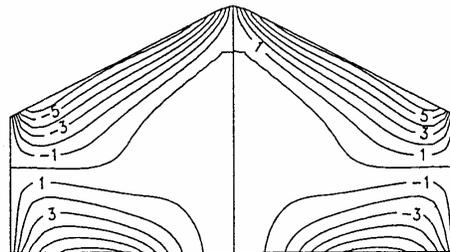


Fig IV.2.a3: Composante horizontale de la vitesse [24].

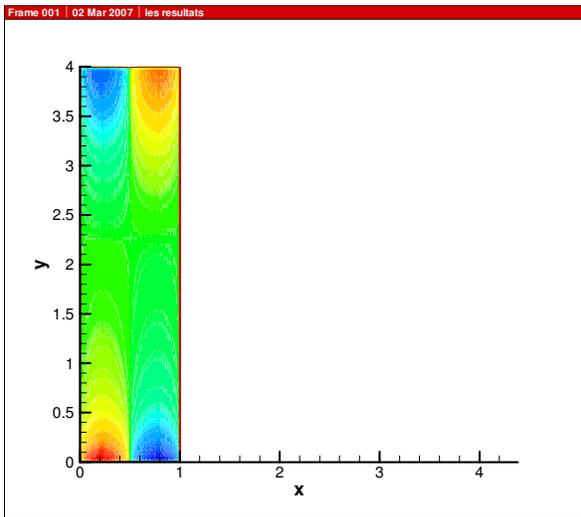


Fig (IV.2.b3) : Champ horizontal de la vitesse.

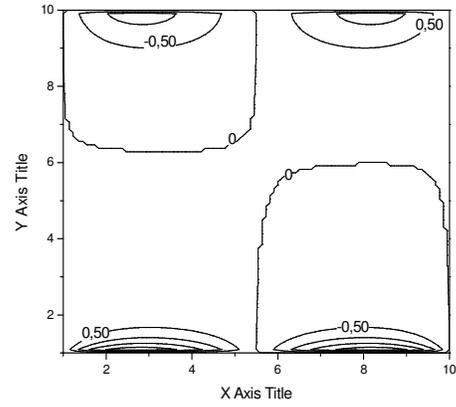


Fig (IV.2.c3): Vitesse horizontale

➤ Les lignes de courants :

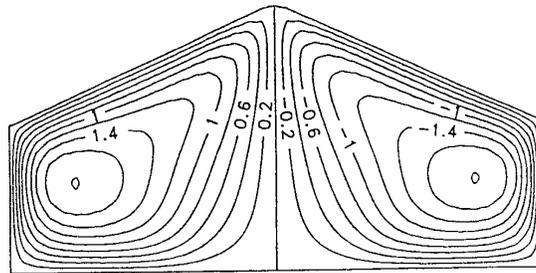


Fig (VI.2.a4): les lignes de courant [24].

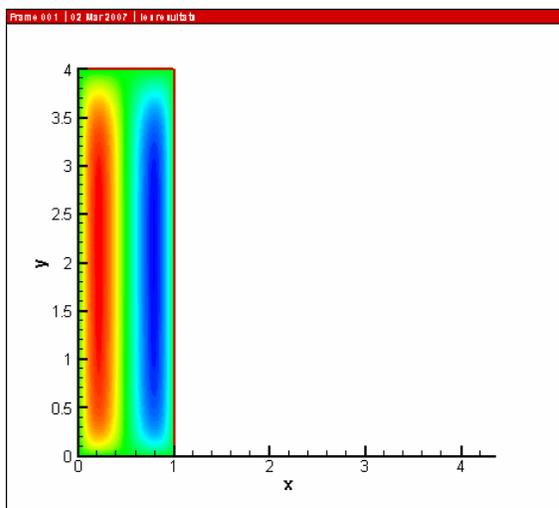


Fig (VI.2.b4) : Lignes de courant

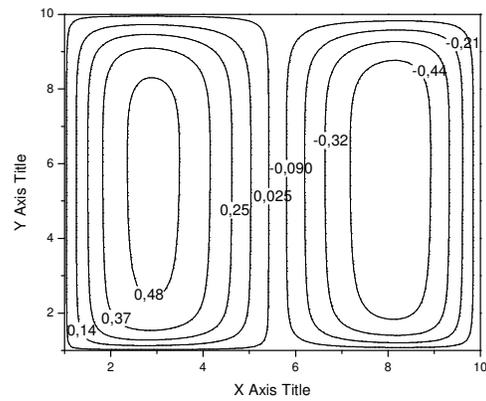


Fig (VI.2.c4) : Lignes de courant

## IV.2-Interprétation :

Les courbes sont symétriques par rapport au centre de la cavité et vu les dimensions des silos (une large masse thermique), la région centrale se refroidit lentement et les surfaces sont exposées aux fluctuations diurnes de température suivant la température de l'air ambiant, (radiation solaire, thermique) aussi en hiver les surfaces se refroidissent, le gradient de température normal au champ de gravitation crée les courants convectifs.

L'air avec son humidité absolue relativement élevée se déplace vers les surfaces froides. L'humidité relative diminue et cela cause l'adsorption d'eau par les grains (les moisissures et les insectes peuvent se développer dans des conditions similaires et les grains seront endommagés).

La distribution de la température reflète d'une part le champ du courant d'air où la température maximale est déplacée quelque part au-dessus du centre de la cavité.

Pour la fonction de courant chaque contour représente le trajet du courant convectif le long de la cavité. Le champ de vitesse est toujours obtenu de la fonction de courant (La vitesse de l'air dans la cavité est tangente à la fonction de courant). Qualitativement la vitesse verticale expectante est grande lorsque le gradient horizontal des lignes de courant est grand dans le cas de notre système cela se produit près des parois verticales

(Au milieu des parois verticales la vitesse horizontale est basse et la vitesse verticale est relativement grande où les lignes de courant sont proches). L'examen de la figure nous permet aussi de constater que la composante horizontale de la vitesse est plus grande près de la surface supérieure et dans les coins inférieurs.

Les équations (III.8), (III.9) :  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$  et  $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$  sont exploitées aisément pour faire sortir les informations quantitatives. On remarque dans le coin gauche supérieur de la figure que  $\frac{\partial \psi}{\partial y}$  est positive. Donc la composante horizontale de la vitesse est négative dans cette région. En effet l'air intergranulaire près de la paroi supérieure coule de la région centrale vers la paroi gauche. Environs de la paroi droite  $\frac{\partial \psi}{\partial y}$  est négative. Donc la composante horizontale de la vitesse est négative, l'air coule dans le mur vers le bas.

### VI.3-Commentaires généraux :

La géométrie et les conditions aux limites utilisées sont très simples, en réalité les silos sont de trois dimensions et de géométrie complexe.

Dans ce simple système traité les noeuds à la limite coïncident avec la limite physique, Ce n'est pas généralement le cas, mais une façon d'approcher ce problème est de retenir une maille orthogonale et donner un traitement spécial aux conditions aux limites. Carnahan et al décrivent en quelques détails comment c'est accompli une seconde approche qui est adoptée par Singh et Thorpe(1993a.b) et Thorpe (1996b), une technique mathématique est utilisée pour transformer la maille non orthogonale a une orthogonale. Cette méthode est efficace dans les abris du stockage des grains.

L'approche de la fonction de courant utilisée dans ce modèle ne peut être appliquée directement à un système tridimensionnel mais une approche analogue basée sur le potentiel vecteur peut être utilisée comme déjà esquissé par Singh et al. (1993a) et Singh et Thorpe (1993b).

En outre, ceux-ci ont été généralement restreints aux courants laminaires. Des systèmes de 2D ont été étudiés par Singh et al. (1994) et Singh et Thorpe (1995) et le système analogue à 3D a été étudié par Singh et al (1993).

Il y a encore un besoin d'emporter des théories et des études appliquées sur l'interaction des phénomènes qui se produisent dans l'espace de l'air au-dessus des grains dans les cavités non pleines.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire est destiné à mieux comprendre les processus des transferts couplés dans un stocke d'une matière vivante (produit agroalimentaire) avec une source de chaleur cas de fermentation.

Sur la base d'une lecture attentive des résultats discutés précédemment il serait convenable de signaler l'ensemble des constatations toutes abrégées ci-après :

- Pour mieux simuler l'alternance de la température jour/nuit il faudrait imposer une température périodiquement alternée sur les parois latérales.
- Dans le cas d'une longue durée de stockage et pour mieux simuler les variations des températures saisonnières ou celles dues au transport lointain, il faudrait envisager un gradient de température pariétal variable. (chaque trois mois par exemple).
- Dans le même but d'améliorer la précision et la compréhension des phénomènes, il serait intéressant d'essayer d'autres approches de modélisation numérique et d'en faire une base de comparaison pour conquérir à la précision et la réalité de l'information expérimentale.

Le sujet que nous avons traité nous a permis de connaître et de mettre en œuvre la méthode de différences finies ainsi que d'autres méthodes numériques (TDMA)

Lors de la simulation nous avons rencontré les difficultés suivantes :

- Le manque des documents concernant les modèles qui prennent en comptes le cas de la respiration et la transpiration des produits.
- Le manque des propriétés des produits (les propriétés thermiques des dattes) ce qui nous empêche d'exécuter le programme pour les dattes de Deglet noir.
- L'instabilité de la méthode pour le calcul de l'humidité des grains.

Malgré ces contraintes, nous avons pu obtenir des résultats, qui nous encouragent à continuer ce travail dans le futur, en asseyant de les améliorer, et de représenter d'autres caractéristiques. La validation a été réalisée en comparant nos résultats avec ceux du auteurs, comme on peut affirmer que notre étude représente une contribution à la mise en œuvre d'outils de simulation numérique en transferts couplés et marque le besoin à un large domaine d'investigation pour aboutir à des résultats économiquement explorables.

Pour les futurs travaux on propose la simulation à 3D, à des formes arbitraires (cas réelle) aussi d'entamer le cas turbulent.

# Nomenclature

## Nomenclature

$A_r$	facteur de forme	[H/L]
$B$	constante dans l'équation (3,83)	
$c$	chaleur spécifique	[J/kg.k]
$C$	concentration de pesticide	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_l$	chaleur spécifique de l'eau	[J/kg.k]
$c_a$	chaleur spécifique de l'air	[J/kg.k]
$C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}, \dots$	coefficient dans l'équation (3,49)	
$C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}, \dots$	coefficient dans l'équation (3,59)	
$D_{eff}$	diffusivité effective de la vapeur d'eau dans les grains	[m <sup>2</sup> /s]
$dm$	masse sèche perdue	
$f_1(y), f_2(y)$	fonctions spatiales de température T	
$g$	vecteur gravité	[m/s <sup>2</sup> ]
$g_y$	composante verticale du vecteur gravité	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	hauteur de la boîte	[m]
$h_t$	le pas d'intégration du temps	[s]
$h_v$	chaleur de vaporisation de l'eau libre	[J/kg]
$h_x$	distance inter nodale dans la direction de x	[m]
$h_y$	distance inter nodale dans la direction de y	[m]
$i, j$	la (i,j)ème nœud	
$k$	permiabilité des grains	[m <sup>2</sup> ]
$k_{eff}$	conductivité thermique effective des grains	[W/mk]
$k_r$	coefficient du taux de réaction	[W/mk]
$L$	largeur de la boîte	[m]
$M$	teneur en eau	[ % (b.h)]
$m, n$	nombre des noeuds dans les directions de x et y	
$MM$	humidité modifiée dans l'équation (3,73)	
$MT$	température modifiée dans l'équation (3,70)	
$P$	pression	[Pa]
$P_v$	pression de la vapeur d'eau	[Pa]
$P_s$	pression de saturation	[pa]
$q$	flux de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_0$	chaleur de respiration des grains	[J/kg]
$Q_r$	chaleur volumique de respiration	[W/m <sup>3</sup> ]
$r$	humidité relative	
$Ra^*$	nombre de Rayleigh dans l'équation (3,33)	
$S_i$	taux volumique de génération de masse	[kg/Sm <sup>3</sup> ]
$T$	température	[k]
$T_0$	température imposée aux parois	[k]
$t$	temps	[s]
$t_i, t_{mx}, t_{my}..$	coefficients dans l'équation (3,42)	

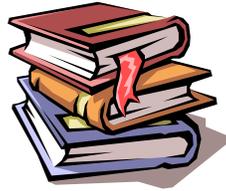
$t_p$	temps physiologique	[s]
$t^*$	temps référentiel	[s]
$t^*_{1/2}$	constante spécifique de pesticide	[s]
$u$	la composante horizontale de la vitesse	[m/s]
$u^*$	vitesse horizontale référentielle	[m/s]
$v_a$	vecteur de vitesse	[m/s]
$v$	la composante verticale de la vitesse	[m/s]
$v^*$	vitesse verticale référentielle	[m/s]
$w$	humidité absolue de l'air	[kg d'eau/kg air]
$W$	teneur en eau des grains	[kg d'eau/kg MS]
$x,y$	coordonnées de l'espace	[m]

### **Symboles grec**

$\beta$	coefficient d'expansion volumétrique de l'air	[1/k]
$\beta_i$	coefficient dans l'algorithme de Thomas	
$\gamma$	réfère à l'air intergranulaire	
$\delta_i$	côté droit de la ième équation dans l'algorithme de Thomas	
$\varepsilon$	fraction de volume	
$\mu$	viscosité dynamique de l'air	[JKPa]
$\sigma$	réfère aux grains	
$\psi$	fonction de courant	[m <sup>2</sup> /s]
$\psi_{err}$	l'erreur adimensionnelle admissible	
$\psi^*$	fonction de courant référentielle	
$\rho$	la densité	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	la densité de l'air	[kg/m <sup>3</sup> ]
$(\rho c p)_a$	chaleur spécifique du produit	[J/k.m <sup>3</sup> ]
$\Delta T$	la différence de température	[k]

### **super scriptes**

*	réfère aux valeurs du 1 <sup>er</sup> mi pas du temps
**	réfère aux valeurs du 2 <sup>eme</sup> mi pas du temps
$p$	réfère au p <sup>ième</sup> pas du temps
'	valeur adimensionnelle



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] FREDERC.T, Étude expérimentale et numérique du séchage de particules en vapeur d'eau surchauffée, thèse de docteur de l'université de Provence, Marseille, 1995.
- [02] THIBAUD, Contribution a l'étude de la convection naturelle à l'intérieure d'un Cylindre vertical poreux soumis à une densité de flux thermique pariétal constant. Application aux silos à grains, thèse de docteur de l'université de Poitiers ,1988.
- [04] MULTON.J.L , Conservation et stockage des grains et des graines et produits dérivés, T1, Tec&Doc, Lavoisier, Paris, 1982.
- [05] LEN Caddick Csiro, regular checks reduce moisture risk in stored grain, Farming ahead, grain quality, Corpping, N°131,November 2002.
- [06] BENMOUSSA .H , Poly copies du cours Tec 329.
- [07] BOUBEKRI .A, Simulation numérique des transferts de chaleur et de masse dans un stock de datte en cavité confiné, Mémoire de magistère , Batna ,1996.
- [08] BENMOUSSA.H,Étude des transferts de chaleur et de masses dans un silo à Grains soumis à un flux de chaleur pariétal instationnaire , thèse de docteur de l'université de Poitiers, 1984.
- [09] THORP .G.R, Modeling moisture migration of stored grains, Australian center of international Agricultural research, Canberra, 1996.
- [10] COSTA.V.A.F, FIGUEIRIDO.A.R.A, Numerical technique for solving partial Differential equations system for the simulation of a fixed bed dryer, International communication of heat and mass transfer, 1129-1140, April, 1993.
- [11] ISTADI. I, SITOMPUL.J.P, A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain draying, department of chemical Engineering, Diponegoro University, Semarang,50239, Indonésie, 2002.
- [12] W.H. Barreveld, Descripteurs du Palmier dattier IPGRI/GEF/UNDP/INRA 2004 L'Institut international des ressources phylogénétiques (IPGRI), Date Palm Products.
- [13] ESTANOVE.P, Note technique : Valorisation de la datte, Institut de Recherches sur les Fruits et Agrumes, IRFA - CIRAD , France.2004
- [14] Ben Cheikh. K, Choukri Bouziani. R, Étude expérimentale et numérique des effets

- thermiques d'une source de chaleur interne dans une enceinte de stockage de grains, mémoire d'ingénieur en mécanique énergétique, université de Ourgla.2003.
- [15] Centre algérien du contrôle de la qualité et de l'emballage, Contribution à l'étude de la qualité (physico-chimique, Biochimique et microbiologique) des quatre variété des dattes.
- [16] KECHAOU. NABIL, chapitre 03, présentation des produits utilisés (deglelet Nour), thèse de doctorat, Algérie
- [17] BELARBI.A, Étude de quelques caractères physiques et biochimiques de la datte, thèse de doctorat, ENSIA.
- [19] KECHAOU.N, MAALEJ.N, A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves, *Drying technology*, 8(4&5), 1109-1125, 2000.
- [20] HANNACHI.S, KHITRI.D, BENKHALIFA.A, Brac de la perrière. R. A, Inventaire Variétal de la palmeraie algérienne, C.D.A.R.S ET U.R.Z.A, Algérie, Mars 1998.
- [21] BAKHTI.F. Z. simulation numérique directe de la convection naturelle dans une conduite verticale. Mémoire de magister en énergétique, institut de génie mécanique, université de M'sila, Algérie, 2004.
- [22] A.K.Singh,G.R.Thorpe ;A grid generation technique for numerical modelling heat and moisture movement in peaked bulks of grain; *journal of food process Engineering* 16, (1993),127-145.
- [23] Graham Thorpe, Recirculation- a new low energy method of preserving cereal grains, Institute of Sustainability and Innovation, School of Architectural, Civil and Mechanical Engineering, Victoria University, Melbourne, Australia 2006.
- [26] A.K. Datta and J. Zhang, Porous Media Approach to Heat and Mass Transfer in Solid Foods, Department of Agric. and Biol. Engineering, Cornell University, August 7, 2001
- [27] Awad M. Hussein, Development /Improvement of Date Palm Post harvest Handling Alexandria Post harvest Centre (APHC) Scientific Team, Fac. of Agric., Univ. Alex.Egypt
- [28] BOUDEBOUS S. Étude numérique de la convection naturelle laminaire et turbulente dans un conduite hyperbolique, thèse docteur, institut de génie mécanique, université de Constantine, Algérie, 2006.
- [29] CAN-CHUN JIA, DA-WEN SUN, CHONG-WEN CAO, Mathematical simulation of temperature fields in a stored grains bin due to international heat generation, *International communication of journal of food engineering* 43 :227-233, 2000.
- [30] Chuen-Yen-Chow, An introduction to computational fluid Mechanics, Seminole publishing company, Boulder, Clorado, 1983.
- [31] G.D.Smith, Numerical solution of partial differential equations, senior lecture in

- mathematics, Brunel university, OXFORD university press, Ely house, London, W.I.1975.
- [32] G.XANTHOPOULOS, J.L.WOODS, a two dimensional model of grain storage with dynamic visualization: prediction for temperature, moisture content, germination and respiration- a case study for rapeseed, heat and mass transfer laboratory, International communication of Agro Thesis ,vol.1.no.1:19-27, 2003.
- [33] H.WLLFRIED, SCHNITZIER, Post harvest Handling and Monitoring of Quality for Vegetables Produced in Greenhouses in Hot, Arid Climates, institute for vegetable Science, Technische University, München, Freising, Germany.
- [34] K. M. Ismail, S. A. Alyahya, A Quick method for measuring date moisture content
- [35] [Léonide Saad](#), Le SF<sub>6</sub>: Mesure de la pression, tracé de la carte des isothermes, étude du point critique et applications -poly technique, la France, 1997.
- [36] M.E.Cascada, J.H.Young, Heat and moisture transfer during transportation of shelled peanuts, Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome 1993.
- [37] Michael Talbot, Phil Koehler, Pest Management Strategies for Storing Grains in Florida
- [38] M.N.Zidoune, Extrait du cours de production de chaleur et de froid, Institut de nutrition alimentaire et technologie Agro-alimentaire (INATAA), université Mentouri, Constantine 2000-2001.
- [39] M.N.Zidoune, Extrait du cours de génie industriel alimentaire, Institut de nutrition alimentaire et technologie Agro-alimentaire (INATAA), université Mentouri, Constantine 2000-2001.
- [40] NORME CEE-ONU DF-08, Concernant la commercialisation et le contrôle de la qualité commerciale des DATTES ENTIERES livrés au trafic international entre les pays membres de la CEE-ONU et à destination de ces pays
- [41] Robert.M, Marck Taylor, Al.Bulushi.I, The moisture sorption isotherms of omani dates, drying proceedings of the 10th international drying symposium (IDS'9) Krakow, Poland, 30 July-2 August 1996, volB, pp: 989,996.
- [42] Stefanie J.W.H.Oude Elferink, Frank Driehuis, Jan C. Gottschal, and Sierk F. Spoelstra, Silage fermentation processes and their manipulation. Schnitzler, Institute for Vegetable Science, Technische University München, Freising, Germany.

**ملخص:** في نهاية هذا العمل استطعنا تحليل ظواهر التحول الحراري و المادي و التيار الجاري في حاوية لوسط نفوذ (منتوج زراعي ) بوجود مصدر للحرارة (حالة التخمر). نموذج دائم ،ثنائي البعد قدم دراسة تقريبية اختبرت حسب مستويين ،طولي وشاقولي. معادلات الانحفاظ المستعملة هي معادلة الحركة و معادلة الطاقة. هذه المعادلات حلت رقميا باستعمال طريقة الفروق المنتهية وباستعمال برنامج بلغة الفورتران طور محليا. المعادلات الرئيسية في شكلها الابعدي نوقشت بالتفصيل.الهدف من هذا العمل هو الحصول على منحنيات و حقول سرعة الهواء و ايضا منحني و حقول درجة الحرارة.

*الكلمات المفتاحية: التحول الحراري و المادي ، تخمر ، تغزير*

**Résumé :** À l'issue de cette étude, des phénomènes ayant lieu dans une cavité contenant un produit agroalimentaire en présence d'une source de chaleur (cas d'une fermentation) ont pu être analysés. Un modèle, bidimensionnel transitoire de l'écoulement de l'air et de transfert de chaleur et de masse est présenté. Une approche bidimensionnelle a été choisie selon deux plans, longitudinal et vertical. Les équations de conservation utilisées sont l'équation de mouvement, et l'équation d'énergie. Ces équations ont été résolues numériquement en utilisant la méthode des différences finies, sous un programme informatique (fortran) développé localement. Les équations sous forme adimensionnelle ont été résolues et discutées en détail. L'objectif de ce travail est l'obtention des profils et champs de vitesse de l'air dans la cavité, ainsi que le profil et le champ de la température.

*Mots clés: transfert couplé, agroalimentaire, fermentation, stockage des grains.*

**Abstract:** in this work, phenomena taking place in a cavity containing an agro-alimentary product in presence of a source of heat (case of fermentation) was be analyzed. A transient two-dimensional model of heat and mass transfer, and air driven flows is presented. A two-dimensional approach has been chosen according to two plans, longitudinal and vertical. Equations of conservation used are the equation of movement, and the equation of energy. These equations have been solved numerically while using the method of finite differences, with a computer program (Fortran) developed locally. The governing equations in dimensionless form are discussed in details. The objective of this work is the obtaining of profiles and fields of air speed in the cavity, as well as the profile and field of temperature.

*Key words: coupled transfer, fermentation, storage of grains.*