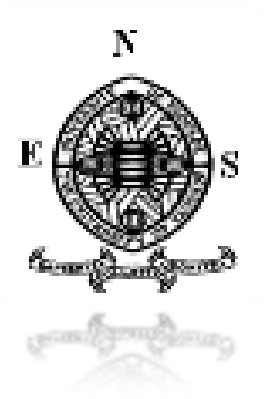


RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ 1

ÉCOLE NORMALE
SUPÉRIEURE

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE 1

HIGHER TEACHER'S TRAINING
COLLEGE

DEPARTMENT OF PHYSICS

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du :

**Diplôme de Professeurs de l'Enseignement
Secondaire 2^{ème} grade (DIPES 2)**

**MODÉLISATION DE TRANSFERT DE CHALEUR ET DE
MASSE DANS L'AIR DE SÉCHAGE DES GRANULÉS DE
LA POZZOLANE**

Présenté par :

TALLA NOUTACK Martin Stéphane, Master de physique

Matricule : 10W1337

Sous la direction de :

**Dr Louis MONKAM, Chef de Département de Génie Thermique
et Énergie à l'UIT de Douala**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2015/2016

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale

Chapitre I : ÉTAT DE L'ART ET INTÉRÊT DE L'ÉTUDE

I.1/ MATÉRIAUX POUZZOLANQUES ET LEUR UTILISATION.....	3
I.1.1/ Historique.....	3
I.1.2/ Matériaux à propriétés pouzzolanique.....	4
I.1.2.1/ Définitions.....	4
I.1.2.2/ Types de pouzzolane.....	4
I.1.3/ Activité pouzzolanique.....	7
I.1.4/ Caractéristiques techniques de la pouzzolane et son importance	7
I.1.4.1/ Teneur en eau.....	7
I.1.4.2/ Porosité.....	7
I.1.4.3/ Résistance à la chaleur.....	8
I.1.5/ Différentes utilisations de la pouzzolane.....	8
I.1.5.1/ Agriculture.....	8
I.1.5.2/ Applications routières.....	8
I.1.5.3/ Industrie et construction.....	8
I.2/ TERMINOLOGIE DU SÉCHAGE ET INTÉRÊT.....	8
I.2.1/ Définition du séchage.....	9
I.2.2/ Comment sécher ?.....	9
I.2.2.1/ Extraction mécanique.....	9
I.2.2.2/ Séchage thermique.....	9
I.2.3/ Couplage des transferts intervenant en séchage.....	10
I.2.4/ Différentes phases de séchage	
I.2.4.1/ Phase de séchage à vitesse constante.....	11
I.2.4.2/ Phase de séchage à vitesse décroissante.....	11
I.2.5/ Importance du séchage.....	11

Chapitre II : DESCRIPTION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME

II.1/ RAPPELS THÉORIQUES SUR LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR.....	12
II.1.1/ Transfert par conduction.....	12
II.1.2/ Transfert par rayonnement.....	12
II.1.3/ Transfert par convection.....	13
II.2/ COMPARAISON DES TYPES DE SÉCHOIR ET CRITÈRES DE CHOIX.....	13
II.2.1/ Séchoir rotatif.....	14
II.2.2/ Séchoir à lit fluidisé.....	15
II.2.3/ Séchoir à lit fixe mobile.....	16
II.2.4/ Séchoir tunnel.....	17
II.3/ FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME.....	17
II.3.1/ Modélisation physique du tunnel de séchage.....	18
II.3.2/ Modèle mathématique.....	18
II.4/ CHOIX DE LA MÉTHODE RÉOLUTION DES ÉQUATIONS.....	21
II.4.1/ Méthodes analytiques.....	21
II.4.2/ Méthodes numériques.....	22

Chapitre III : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DU PROBLÈME ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

III.1/ RAPPELS SUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES.....23

III.1.1/ Généralités.....23

III.1.2/ Les trois grandes familles de méthodes pour la discrétisation des EDP.....23

III.1.2.1/ Les différences finies.....23

III.1.2.2/ Les éléments finis.....24

III.1.2.3/ Les volumes finis.....24

III.2/ RÉOLUTION NUMÉRIQUE.....24

III.2.1/ Conditions initiales et aux limites.....24

III.2.2 / Méthode de résolution.....25

III.2.3/ Discrétisation des équation.....25

III.2.4/ Évaluation de certains paramètres.....25

III.3/ RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....29

III.3.1/ Analyse des résultats.....29

III.3.2/ Sensibilité aux paramètres externes.....30

III.3.2.1/ Effet de la vitesse de l'air séchant.....30

III.3.2.2/ Effet de l'humidité de l'air séchant.....30

Conclusion et perspectives.....31

Annexes.....32

Remerciements

Je tiens vivement à exprimer ma profonde gratitude à l'endroit des personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au bon déroulement du présent travail.

J'adresse premièrement au DIEU TOUT PUISSANT mes faibles mots de reconnaissance, lui qui m'a accordé la santé, l'intelligence et toute la force nécessaire à la réalisation du présent travail.

Mon travail a été effectué sous la haute supervision de l'ENS de Yaoundé et plus particulièrement le département de physique. Je ne saurais m'empêcher d'exprimer ma sincère reconnaissance à l'endroit de tous les responsables de l'ENS pour la formation et le suivi des élèves-professeur, en particulier le Pr Gabriel ANDIGA, Directeur de l'ENS, le Pr OWONO OWONO, directeur des études et le Pr BEGUIBE, chef de département de physique.

Je poursuis, en adressant particulièrement ma reconnaissance à l'endroit de mon encadreur de mémoire, le Dr Louis MONKAM pour ses précieux conseils, sa disponibilité et sa patience. Il a toujours été là pour répondre à mes questions, si nombreuses soient-elles, et m'a aidé à faire mes premiers pas en modélisation.

Je remercie tous les enseignants de l'ENS ainsi que tous mes enseignants de la faculté des sciences de l'université de Yaoundé pour la formation qu'ils m'ont donnée et plus particulièrement les enseignants du département de physique.

Je tiens vivement à exprimer ma profonde gratitude à ma princesse. Ton soutien, tes prières ont été incontournables pour mener à bien ce travail. Merci pour tout !!

Je suis reconnaissant envers tous mes promotionnaires de physique pour leur agréable compagnie, notamment. Je remercie particulièrement les délégués de la filière physique pour la communication des informations.

Je remercie quelques promotionnaires de l'UYI et plus particulièrement Cédric qui m'a fortement soutenu dans la partie pratique de ce travail ainsi que Fopossi. Votre soutien a été indispensable pour mener à bien ce travail. Je ne saurais oublier Landry qui m'a offert son soutien moral et m'a encouragé dans mes moments difficiles.

Césaire, Cyrille, Chercheur, Clément ainsi que tous les « puissants » merci infiniment pour tous les bons moments passés ensemble.

Un remerciement spécial à tous mes frères et sœurs en christ du FGP de Nkolmesseng qui m'ont soutenu moralement et n'ont cessé de penser à moi dans leur prière.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien et surtout pour leurs encouragements et leur persévérance dans la prière : Mr et Mme MOUTOMBI, LOVE, PRISCA, EMMANUEL, EUNICE, et le petit beau garçon Gédéon.

Je conclurai naturellement par ces personnes-là dont mes mots sont insuffisants pour leur exprimer ma profonde reconnaissance. Papa, Maman, un seul mot MERCI infiniment !!

PRINCIPAUX SYMBOLES ET NOTATIONS

Indices

a air asséchant
e eau
int initial
s produit
v vapeur
w air sec

Lettres latines

C_p chaleur spécifique à pression constante ($J/kg/C^\circ$)
 Δx pas d'espace dans la direction de l'écoulement
 h_{as} coefficient d'échange thermique par convection (W/m^2K)
 h_m coefficient d'échange massique par convection
 L_v chaleur latente massique de vaporisation (J/kg)
 L longueur du tunnel (m)
 t temps (s ou h)
 Nu nombre adimensionnel de Nusselt
 Pr nombre de Prandtl
 Re nombre de Reynolds
 X teneur e eau du produit
 x Coordonnée spatiale
 Y teneur en eau de l'air
 T température (K ou $^\circ C$)
 V vitesse de l'air de séchage (m/s)
 D_e coefficient de diffusion (m^2/s^{-1})

Lettres grecques

α : Coefficient d'échange thermique

ε : Porosité moyenne du produit

ρ : masse volumique (kg/m^3)

λ : conductivité thermique $(W/m/K)$

ξ : surface spécifique

Introduction générale

La principale préoccupation des bâtisseurs concerne la pérennité de leurs constructions. Ce principe est justifié par l'emploi de matériaux performant du point de vue résistance mécanique et durabilité. Par contre, les aspects confort thermique n'étaient traités qu'à posteriori. Cependant, ce concept séduit de moins en moins les bâtisseurs, car il devient coûteux. De ce fait, il est apparu depuis quelques années des unités d'initiative privée, faisant preuve de dynamisme et d'innovation par la mise sur le marché de produits diversifiés et nouveaux pour certains [1]. Ce changement de point de vue explique le développement récent de quelques matériaux allégés de construction tel que les bétons légers capables de jouer un rôle en tant qu'isolant, tout en conservant des niveaux de performance suffisant.

Les matériaux allégés, de masse volumique apparente inférieure à 1800Kg.m^{-3} , sont confectionnés souvent à partir de granulats légers. Outre la réduction de poids mort et l'économie sur les engins de manutention et du coffrage qu'elle engendre, leur légèreté leur confère un pouvoir d'isolation thermique meilleur que celui des matériaux traditionnels compte tenu du volume d'air qu'ils contiennent. Ils permettent donc de réaliser des économies d'énergies substantielles tout en assurant le confort thermique dans l'habitat qu'il s'agisse de se protéger de la chaleur ou du froid.

Un second élément expliquant l'intérêt pour les bétons allégés, est une certaine prise de conscience environnementale. Cette dernière s'exprime dans le contexte de l'utilisation de la pouzzolane sous forme de granulats légers ou remplacer une partie du ciment sous forme d'ajout cimentaire. Elle présente l'avantage d'utiliser une matière première qui donne la faculté au béton d'acquérir une résistance mécanique acceptable à long terme sur une éventuelle réactivité pouzzolanique que présenteraient ses granulats constitutifs, ainsi qu'un intérêt économique, puisque le coût de production est inférieur à celui du ciment. La pouzzolane à l'état brute contient beaucoup d'eau en raison de sa porosité et nécessite d'être séchée avant son utilisation. Le séchage est un processus complexe et fait l'objet de nombreuses études.

Le séchage intéresse plusieurs secteurs d'activités tels que les cimenteries, le secteur agricole, le secteur forestier etc. Ainsi, le séchage représente un processus indispensable pour le bon fonctionnement de ceux-ci (ces secteurs d'activité). Néanmoins, l'acquisition du séchoir solaire se traduit par une augmentation des coûts de production et une baisse de la marge de production ainsi qu'un temps de séchage très long. Pour palier à ces problèmes, les opérateurs sont à la recherche d'une solution technique intermédiaire qui permet une diminution de la durée de séchage [2], une augmentation de la production sans accroissement trop important des coûts de production. Cependant, il faut souligner que la difficulté fondamentale de la conception d'un équipement de séchage réside dans la connaissance des propriétés thermo physiques des produits à sécher.

Il sera donc d'un grand intérêt de maîtriser les paramètres nécessaires à la mise sur pied d'un séchoir présentant des conditions de séchages optimales.

Le présent travail a pour but de simuler les conditions opératoires d'un séchoir tunnel par un modèle élaboré à partir d'une analyse physique effectuée à deux échelles, l'échelle du grain et l'échelle du tunnel dans son ensemble. Le modèle permet, en tenant compte des contraintes propres au produit traité : les granulés de la pouzzolane, de déterminer, au sein du tunnel, les profils de température, d'humidité de l'air et de teneur en eau des grains, pour des conditions de fonctionnement données.

Le premier chapitre débute par des définitions générales de la pouzzolane comme matériau issu de projections volcaniques appelées, pouzzolanes naturelles, et les pouzzolanes artificielles produites par les centrales thermiques ou les hauts fourneaux pour la production de la fonte. Nous nous intéressons par la suite à la notion de séchage.

Le second chapitre, consistera à caractériser le système de séchage et à établir les équations qui le régissent c'est-à-dire son architecture et son principe de fonctionnement ce qui va nous amener à l'identification des différents phénomènes thermiques et les équations mathématiques qui les modélisent.

Enfin, dans le troisième chapitre, sont exposés les résultats relatifs aux paramètres du séchoir dans son ensemble ainsi que ceux du grain obtenus à partir des simulations numériques basées sur les équations établies au chapitre 2.

Chapitre I : ÉTAT DE L'ART ET INTÉRÊT DE L'ÉTUDE

L'objectif de ce chapitre est de mettre sur pied des fondements qui nous aideront à comprendre les notions et les concepts qui seront utilisés tout au long de la présente étude, puis de montrer brièvement l'implication d'une telle étude dans quelques secteurs industriels. Nous décrirons à cet effet les matériaux pouzzolaniques et leur importance puis nous nous attarderons sur la notion de séchage.

I.1/ MATÉRIAUX POUZZOLANINIQUES ET LEUR UTILISATION

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages [3].

I.1.1/ Historique

Les Grecs et les romains avaient remarqué que les matériaux de dépôts volcaniques, lorsqu'ils sont moulus et mélangés avec de la chaux, donnent un mortier avec une bonne tenue à l'action de l'eau et une résistance mécanique très élevée. Les Grecs employaient le tuf volcanique de l'île de Santorin, par contre les romains se servaient d'un tuf volcanique rouge de la région de Naples. Les romains ont beaucoup plus préférés un type de roche qui se trouve aux environs de la ville de Pozzuoli, d'où le nom de pouzzolane sous lequel était alors connu tout matériau ayant des propriétés comparables. Aujourd'hui cette dénomination s'est étendue et s'applique à un grand nombre de matériaux d'origine diverses, selon la classification donnée par l'organigramme de la **figure I.1** [4]. La poudre de tuile ou de brique mélangé avec de la chaux en présence d'eau produit le même effet, les poudres de la terre cuite fabriquées spécialement pour cet usage, sont appelées aujourd'hui pouzzolanes artificielles.

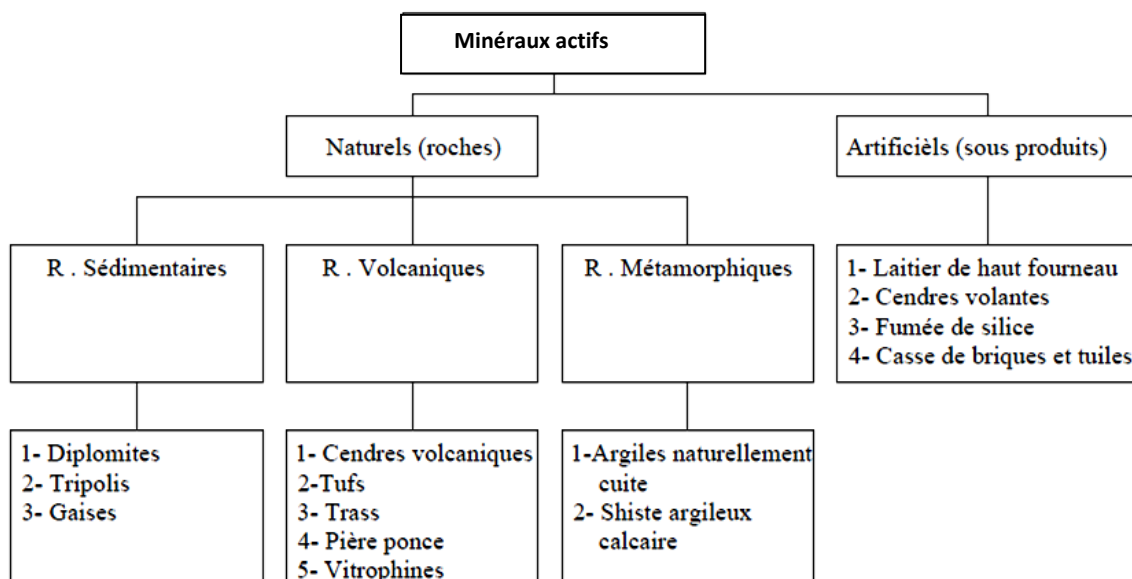


Figure I.1 : Origine des matériaux pouzzolaniques

I.1.2/ Matériaux à propriétés pouzzolanique

I.1.2.1/ Définitions

Par pouzzolane naturelle on désigne au sens strict les pyroclastites, qui sont des projections des éruptions volcaniques [5]. Les pouzzolanes sont composées essentiellement de la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3). La partie restante contient de l'oxyde de fer et d'autres oxydes ainsi qu'un pourcentage de chaux (CaO). Elles sont généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise. Les pouzzolanes les plus acides, contenant de la silice et peu de chaux (CaO) sont en général les plus vitreuses. La différence SiO_2 - CaO doit être supérieure à 34% pour que la teneur en verre soit appréciable [4].

C. Vernet [6], définit les pouzzolanes comme des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, mais qui en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes. Selon la norme ASTM sur les ciments (désignation C 340-58 T), la définition est pratiquement similaire : La pouzzolane se définit comme étant un matériau siliceux ou silico-alumineux, qui ne possède pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre très fine et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes.

Les deux dernières définitions attirent l'attention sur le fait que la pouzzolane est définie en fonction de son emploi comme matériau liant et non sur la nature du matériau lui-même. Puisque, les phénomènes responsables du durcissement du mélange pouzzolane + chaux du point de vue chimiques et physiques ne sont pas considérés.

I.1.2.2/ Types de pouzzolanes

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les artificiels.

a) **Pouzzolanes naturelles**

➤ **Tufs volcaniques compacts**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hygrothermiques se traduit par la formation des minéraux zéolithiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.

➤ **Verre volcanique**

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par

l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

b) Produits pyroclastiques

La roche pyroclastique est une désignation purement génétique, son origine est volcanique et elle est sédimentaire de par son mode de dépôt. Le terme pyroclaste, et employé pour définir de manière générale tout matériau fragmenté produit par les éruptions d'un volcan.

Selon l'état sous lequel la lave est émise, les produits pyroclastiques peuvent se subdiviser en plusieurs catégories :

Les cendres (ash), qui ont moins de 2 mm de diamètre, matériau résultant de la pulvérisation de roches préexistantes ou de l'éjection de magma finement fragmenté ou pulvérisé

Le lapilli, est un gravier dont la dimension maximale est comprise entre (2-64 mm), en général, il arrive à la surface déjà consolidé (consolidation des laves de la cheminée d'éjection), et il est le résultat de la fragmentation des vieilles roches.

Pierre ponce, Elle se forme généralement à partir des fragments de magmas solidifiés qui ont emprisonnés une très grande quantité de bulles, et se caractérise par une forme alvéole. Elle est très poreuse d'où sa faible densité.



Figure I.2 : *Pierre ponce ; cliché Michelle Barbier, Préparation à l'Agrégation SVT, ENS Lyon.*

Les bombes ou blocs (plus de 64 mm de dimension). Elles ont des formes particulières selon leur projection, leur atterrissage et leur mode de refroidissement. On peut trouver des bombes en chou-fleur, en fuseau, en bouse de vache ou en boule (en basalte). Et des bombes en croûte de pain (en trachyte). Pour former ce type de bombe volcanique, le magma doit être peu visqueux et donc dans la plupart des cas basaltique.



Figure I.3 : a) *Bombe volcanique en fuseau.* b) *Bombe en croûte de pain*

Les scories, sont des morceaux de lave déchiquetées, sombres, et bulleux. Elles peuvent avoir une taille variant de 1 à 10 cm de diamètre. La différence entre la pierre ponce se situe dans les formes et la structure vésiculaire rempli de bulles gaz. Elles sont aussi plus denses.



Figure I.4 : *Puy de Dôme, France - 11 octobre 1999 - Hélène Janin*

c) **Pouzzolanes artificielles**

➤ **Cendres volantes**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90% [5].

➤ **Laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment. Les analyses minéralogiques de LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100 % [5].

➤ **Argiles calcinées**

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elles sont moulues à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice [3]

I.1.3/ Activité pouzzolanique

L'activité pouzzolanique c'est l'aptitude pour un matériau pouzzolanique à fixer l'hydroxyde de calcium et durcir sous l'eau à des températures ordinaire et en un temps raisonnable. Cette propriété se constate à des degrés variables pour des matériaux riches en silice libre, qu'ils soient d'origine naturelles (gaize, diatomites, cendres volcaniques...) ou artificielles (Cendres volantes, fumée de silice, argile calcinée...). L'activité pouzzolanique se caractérise par deux aspects distincts :

La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer.

La rapidité de fixation de l'hydroxyde de calcium par la pouzzolane [8, 9].

Les différents matériaux pouzzolanique décrits ci-dessus possèdent tous la propriété, selon la définition, de réagir avec l'hydroxyde de calcium, en présence d'humidité, pour former des composés possédant des propriétés liantes. L'influence de la silice et de l'alumine ne peut pas être négligée, la silice participe dans le mélange par la fixation de la chaux et l'alumine augmente la résistance mécanique du matériau à court terme.

I.1.4/ Caractéristiques techniques de la pouzzolane et son importance

I.1.4.1/ Teneur en eau

Par rapport aux autres roches naturelles, la teneur en eau de la pouzzolane est élevée et peut varier entre 8 à 13 % suivant l'état hygrométrique ambiant.

I.1.4.2/ Porosité

La porosité de la pouzzolane peut varier de 30 à 60 % en volume suivant les granulométries. Contrairement aux agrégats lourds, ce sont les gros éléments qui possèdent le coefficient de porosité le plus important. La pouzzolane a également une faible densité du fait de la proportion du vide. Les essais d'absorption d'eau en 24 h montrent que la texture cellulaire et la porosité de la pouzzolane lui confèrent une grande capacité d'absorption qui peut varier de 20 à 30 % en poids du granulats sec.

I.1.4.3/ Résistance à la chaleur

La température de fusion de la pouzzolane est de 1140°C mais sa mauvaise conductibilité est telle qu'un élément de 0.150 m d'épaisseur exposé sur une face 8 heures à cette chaleur présente sur la face opposée une température d'environ 100°C seulement. La face exposée se vitrifie.

I.1.5/ Différentes utilisations de la pouzzolane

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants :

I.1.5.1/ Agriculture

La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols. Elle est riche en silice, en alcalino-terreux, offre pour certaines cultures l'avantage d'un milieu bien aéré, ainsi qu'un meilleur enracinement, un meilleur arrachage, la facilité de reprise des plantes, la réduction du risque de carences et de maladies.

L'herbe pousse mal sur la pouzzolane, son caractère minéral met les toiles plastiques à l'abri des rayons ultraviolets pour la culture horticole en serre.

I.1.5.2/ Applications routières

Elle sert pour le sablage des routes verglacées. Utilisée comme couches de base pour itinéraires routiers hors-gel (la porosité globale de la pouzzolane empêche la formation de lentilles de glaces et évite donc la mise en place de barrières de dégel) [5]. Dans les travaux publics, elle est utilisée comme matériaux de remblais légers, pour la réalisation de terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnée.

I.1.5.3/ Industrie et construction

La pouzzolane est utilisée dans la fabrication de ciment, de béton léger et les parpaings comme constituant secondaire (la structure alvéolaire de la pouzzolane confère une faible densité au béton pour une qualité mécanique donnée), les boisseaux de cheminées, les filtres divers et fosses septiques, sert aussi, comme éléments de décoration (actuellement les exploitants mettent l'accent sur cet aspect en mettant en avant la touche de couleur qu'apporte la pouzzolane). En construction, la pouzzolane présente les avantages suivants : la qualité drainante, la légèreté, l'isolation thermique et phonique, la facilité de mise en place, la résistance au gel et au dégel : durabilité. En sous couche, la pouzzolane permet de poser le dallage, de faire du pavage, de poser tout type de canalisations (PVC, béton, fonte).

Dans de nombreuses utilisations de la pouzzolane, l'état durci est généralement sollicité. Par conséquent, il faut procéder au séchage.

I.2/ TERMINOLOGIE DU SÉCHAGE ET INTÉRÊT

On comprend par séchage, l'action par laquelle on élimine l'humidité absorbée dans les pores et les capillaires des substances poreuses, dont le plus grand nombre fait partie de la classe des colloïdes. Un empirisme total a dominé, pendant longtemps, les applications du

séchage, par l'emploi exclusif, dans les grands processus industriels, des sources d'énergie naturelle : le soleil et le vent. Ce n'est que dans les dernières décennies, qu'on a réussi à concrétiser les principes scientifiques qui sont à la base du phénomène complexe du séchage. L'application de ces principes dans la pratique présente encore aujourd'hui des difficultés qui sont dues à l'enchaînement d'effets secondaires, se produisant dans des espaces de dimensions inférieures au micron, en quantité difficilement saisissables [10]. Tous les transferts de masse et de chaleur qui conditionnent le séchage se produisent par la surface limite qui sépare l'eau adsorbée de sa vapeur, ou, plutôt, par une couche limite d'épaisseur moléculaire se trouvant à la surface des matériaux humides. L'agent thermique, porteur de la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau, l'air, contient lui-même une humidité initiale. Les gaz de combustions constituent aussi un agent thermique, dont les propriétés sont peu différentes de celles de l'air, aux températures respectives de travail.

I.2.1/ Définition du séchage

Comme d'autres techniques (filtration, centrifugation, pressage, évaporation, lyophilisation) la finalité du séchage est la séparation partielle entre un liquide (généralement de l'eau) et une matière solide. Selon que l'air utilisé pour sécher le produit est de l'air ambiant extérieur ou de l'air mis artificiellement en mouvement, réchauffé ou non, on est amené à distinguer deux modes de séchage :

- Le séchage naturel qui est obtenu par exposition du produit humide au soleil, ou par séjour dans une ambiance atmosphérique relativement sèche, permettant au produit de céder à l'air une partie de l'eau en excès qu'il contient.
- Le séchage artificiel qui est obtenu en soumettant le produit humide, dans un séchoir, à l'action d'un courant d'air généralement chaud, obtenu grâce à une source d'énergie calorifique (combustible ou électricité). Il faut savoir que le séchage artificiel est un procédé coûteux en énergie. Il s'agit plus précisément du séchage calorifique et mécanique (chauffage et mise en mouvement de l'air).

I.2.2/ Comment sécher ?

Le séchage étant une opération qui consiste à enlever toute ou partie d'eau contenue dans un produit, il existe par conséquent deux grandes voies pour atteindre cet objectif.

I.2.2.1/ Extraction mécanique

L'eau sort du produit sous forme liquide (le rendement énergétique est excellent). La gravité peut suffire pour extraire une partie d'eau (linge qui s'égoutte). Une action plus musclée est souvent nécessaire : augmentation des forces volumiques (essorage) ou déformation du produit par compression. Dans le cas de la pouzzolane, la voie mécanique n'est presque plus utilisée car elle nécessite un coût énergétique important.

I.2.2.2/ Séchage thermique

Pour ce type de séchage, il faut apporter l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau et évacuer la vapeur d'eau qui en résulte. Plusieurs solutions physiques sont envisageables : L'apport énergétique peut être de type conductif, convectif ou radiatif (les trois modes fondamentaux de transmission de la chaleur). L'évacuation de l'humidité se fait, en général

sous forme de vapeur d'eau. Le phénomène sera dit « phénomène par entraînement » s'il a lieu par diffusion moléculaire dans la couche limite ou par vaporisation si la pression partielle de vapeur est supérieure à la pression atmosphérique.

Les procédés de séchage utilisés font appel pratiquement à toutes les combinaisons possibles de ces modes de transfert :

Le séchage convectif à basse température est le procédé industriel le plus répandu pour les granulés de la pouzzolane. Un courant d'air à la surface du volume de contrôle joue à la fois le rôle de vecteur d'énergie et de vecteur d'humidité.

I.2.3/ Couplage des transferts intervenant en séchage

Pendant le séchage, des phénomènes de transferts de chaleur et de masse interviennent dans le produit ainsi qu'à sa surface (couche limite). Dans la couche limite les transferts sont régis par des lois physiques bien connues (Transfert de quantité de mouvement : Newton, transfert de chaleur : Fourier et transfert de masse : Fick). Un milieu poreux est constitué de plusieurs phases (solide, liquide, gazeuse et éventuellement, eau liée). Pour chacune de ces phases, les lois précédentes s'appliquent. Cependant, la morphologie d'un milieu poreux est d'une complexité telle que la résolution à l'échelle des pores est impossible. Pour être utilisable, la formulation doit faire intervenir des grandeurs macroscopiques, qui s'appliquent sur un milieu continu « fictif ». Finalement, chaque flux est exprimé par le produit d'un coefficient (caractéristique du milieu poreux) par le gradient d'une force motrice (variation spatiale du potentiel qui génère le flux). En écrivant la conservation de différentes grandeurs (liquide, vapeur d'eau, air, enthalpie) nous obtenons le jeu d'équations qui gouverne les transferts de chaleur et de masse dans un milieu poreux.

I.2.4/ Différentes phases de séchage

I.2.4.1/ Phase de séchage à vitesse constante

Pendant cette période, de l'eau libre est présente à la surface du produit. En conséquence, la pression de vapeur à la surface du produit est égale à la pression de vapeur saturante et n'est donc fonction que de la température. Des flux croisés de masse et de chaleur existent dans la couche limite. Le flux de chaleur est intégralement utilisé pour transformer le liquide en vapeur. Pendant cette période, le taux de séchage est constant, il ne dépend que des conditions externes (température et humidité de l'air, vitesse et caractéristiques de l'écoulement).

La température de surface est égale à la température humide de l'air. Puisque qu'aucun changement de phase n'a lieu au sein du produit. Le milieu est isotherme tant que dure cette phase. La surface d'échange est alimentée en eau par l'action des forces capillaires. En fait, dans un milieu poreux partiellement saturé, le liquide et le gaz coexistent, d'où la présence d'interfaces liquide gaz. En raison de la tension superficielle de l'interface, la pression du fluide mouillant (ici, l'eau) est plus faible que celle du fluide non mouillant (l'air). La pression capillaire n'est autre que cette différence de pression. Bien entendu la courbure de la surface dépend de la taille de pores : elle augmente lorsque le teneur en eau diminue. C'est la raison pour laquelle le flux du liquide est dirigé des zones humides vers les zones sèches. Ce phénomène de migration capillaire est le principal mode de migration du liquide pour des conditions de séchage modérées. La première phase de séchage dure tant que la surface du produit est alimentée en eau libre. Ceci dépend fortement des conditions de séchage externes

(température et humidité de l'air, vitesse et caractéristiques de l'écoulement), des conditions initiales (température et humidité du produit) et des propriétés et de la géométrie du produit à sécher.

I.2.4.2/ Phase de séchage à vitesse décroissante

Lorsque la surface du produit atteint le domaine hygroscopique, la pression de vapeur devient inférieure à la pression de vapeur saturante. Par conséquent, le flux de vapeur externe est réduit et la quantité de chaleur fournie au produit est temporairement supérieure aux besoins nécessaires au changement de phase. L'énergie en excès chauffe le solide ; d'abord en surface, puis grâce à la conduction thermique, au cœur du produit. Un équilibre dynamique, plus subtil, s'établit en transfert de chaleur et transfert de masse. La pression de vapeur en surface dépend à la fois de la température et de la teneur en eau en surface. Ainsi, la température de surface augmente au fur et à mesure que la teneur en eau en surface diminue, de façon à satisfaire le bilan d'enthalpie. Cette évolution explique pourquoi la vitesse de séchage décroît durant cette période.

I.2.5/ Importance du séchage

Les pouzzolanes à l'état durci améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables :

- L'accroissement de la résistance finale ;
- Une légère diminution du retrait et du fluage, une réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité ;
- une amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques, la protection des armatures contre la corrosion ;
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques ;
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces exposées du béton ;
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

Dans les cimenteries le séchage est également utilisé pour faciliter le broyage.

Chapitre II : DESCRIPTION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME

Afin de pouvoir prédire le comportement d'un lit de granulés le long d'un séchoir en continu, il est primordial de faire recours à un modèle pour pouvoir simuler le séchage de particules isolées et d'estimer les flux locaux à la surface de celles-ci. Le modèle en question doit être capable de prédire l'évolution de la teneur en eau et de la température d'une particule en conditions climatiques variables, sur une large plage de conditions climatiques. Ceci implique que le modèle soit capable de prédire les transferts couplés masse/chaleur dans la particule et intègre l'effet de la pression de gaz sur les transferts internes dans le cas du séchage à haute température.

II.1/ RAPPELS THÉORIQUES SUR LA TRANSMISSION DE LA CHALEUR

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Comme les écarts de températures existent dans tout l'univers, les phénomènes d'écoulement de chaleur sont aussi universels que ceux associés aux attractions de gravitation. Cependant, contrairement à la pesanteur, l'écoulement de chaleur est régi non seulement par une relation unique, mais plutôt par une combinaison de différentes lois physiques indépendantes. La littérature traitant du transfert de chaleur reconnaît généralement trois modes de transmission de chaleur : *Conduction*, *Rayonnement* et *Convection*. Chacun de ces modes de transmission de la chaleur sera décrit et étudié séparément. Cependant, dans plusieurs cas se présentant dans la nature, l'attention sera portée sur le fait que non seulement un seul, mais plusieurs mécanismes sont mis simultanément en jeu. Il est particulièrement important, dans les études industrielles, d'être informé du concours des différents modes de transmission de la chaleur car, en pratique, lorsqu'un des mécanismes domine quantitativement, des solutions approchées utilisables sont obtenues en négligeant tous les mécanismes sauf le plus important [11].

II.1.1/ Transfert par conduction

La conduction est un phénomène au moyen duquel la chaleur s'écoule à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) d'une région à haute température vers une région à basse température, ou entre différents milieux mis en contact. Au cours de l'écoulement de chaleur par conduction, l'énergie se propage par contact direct des molécules sans un déplacement appréciable des molécules.

La conduction est le seul mécanisme au moyen duquel la chaleur peut s'écouler dans les corps solides. La conduction est importante également dans les fluides, mais dans ce cas elle est accompagnée d'une transmission par convection et dans certains cas par rayonnement.

La relation fondamentale de la transmission de chaleur par conduction a été proposée par le savant Français Fourier en 1822. Elle établit que le flux de chaleur transmis dans le matériau par conduction est égal au produit des trois quantités suivantes :

q_k : La conductivité thermique du matériau

A : L'aire de la section à travers laquelle s'écoule la chaleur par conduction (cette section étant mesurée perpendiculairement à la direction du flux thermique).

dT/dx : Le gradient de température dans la section.

$$q_k = -k \times A \times \frac{dT}{dx} \quad (II.1)$$

Pour un système constitué d'un cylindre creux, le flux de chaleur radial transmis par conduction est nécessairement radial. A partir de l'équation (II.1), on a donc :

$$q_k = -k \times A \times \frac{dT}{dr} \quad (II.2)$$

Où dT/dr est le gradient de température dans la direction radiale.

Pour le cylindre creux l'aire est une fonction du rayon et est donnée par : $A = 2\pi r l$

Où r est le rayon et l la longueur du cylindre. Le flux de chaleur par conduction peut donc s'exprimer sous la forme après une séparation des variables et une intégration de l'équation (II.2) entre T_0 et T_i pour T et r_0 et r_i pour r .

$$q_k = \frac{T_i - T_0}{\frac{\ln(r_i/r_0)}{2\pi k l}} \quad (II.3)$$

L'équation (II.3) représente l'expression flux de chaleur à travers un cylindre creux (Un tuyau par exemple). L'analyse de cette équation montre que le flux de chaleur radial est proportionnel à la longueur du cylindre l , à la conductivité thermique k , à la différence entre les températures des surfaces intérieure et extérieure $T_i - T_0$ et, inversement proportionnel au logarithme du rapport des rayons extérieur et intérieur r_i/r_0 .

II.1.2/ Transfert par rayonnement

Le rayonnement est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un corps à température élevée vers un autre à température basse, lorsque ces corps sont séparés dans l'espace ou même lorsqu'un vide existe entre eux. Le terme rayonnement est généralement appliqué à toutes sortes de phénomènes d'ondes électromagnétiques, mais dans la transmission de chaleur les seuls phénomènes qui ont de l'intérêt sont ceux qui résultent d'une différence de température et qui peuvent transporter de l'énergie à travers un milieu transparent ou à travers l'espace. L'énergie transmise de cette manière est appelée : *chaleur rayonnée*.

La chaleur rayonnée est émise par un corps sous forme de paquets finis ou quanta d'énergie. Le mouvement dans l'espace de la chaleur rayonnée est identique à la propagation de la lumière et peut être décrit par la théorie des ondes. Lorsque les ondes de rayonnement frappent un corps, leur énergie est absorbée près de la surface. La chaleur transmise par rayonnement devient de plus en plus importante avec l'accroissement de la température du corps. Dans les problèmes techniques où interviennent des températures voisines de celles de l'atmosphère, la chaleur rayonnée peut être souvent négligée.

Dans notre étude, étant donné que le séchoir opère dans un vaste local, on néglige les transferts par rayonnement d'où la non nécessité d'énoncer les lois mathématiques qui régissent ce mode de transmission de chaleur [11].

II.1.3/ Transfert par convection

La convection est un mode de transfert d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du

fluide, par *convection libre* et *convection forcée*. Lorsqu'il (mode d'écoulement) se produit au sein du fluide en raison des courants dus simplement aux différences de densités résultant des gradients de température, on dit que la convection est *naturelle* ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle qu'une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé *convection forcée*.

L'efficacité de la transmission de chaleur par convection dépend largement du mouvement du fluide. C'est pourquoi l'étude du transfert de chaleur par convection est fondée sur la connaissance des caractéristiques de l'écoulement du fluide.

Le flux de chaleur transmis par convection entre une surface et un fluide peut être évalué par la relation suivante :

$$q_c = h_v \times A \times \Delta T \tag{II.4}$$

Où :

q_c : flux de chaleur par convection

A : aire de la surface de transmission de la chaleur

ΔT : différence entre la température T_s de la surface et celle du fluide T_∞ loin de la surface

h_v : coefficient superficiel de transmission de chaleur ou coefficient d'échange de chaleur par convection.

Sous cette forme l'équation de la convection semble être tout à fait simple, en réalité ce n'est pas le cas. Il faut savoir que le coefficient d'échange de chaleur par convection est en effet, une fonction complexe de l'écoulement du fluide, des propriétés thermiques du milieu fluide et de la géométrie du système. Pour sa détermination numérique nous allons seulement nous baser sur les corrélations (qui dépendent de la géométrie du système et des conditions du fluide) faites par certains auteurs.

II.2/ COMPARAISON DES TYPES DE SÉCHOIR ET CRITÈRES DE CHOIX

II.2.1/ Séchoir rotatif

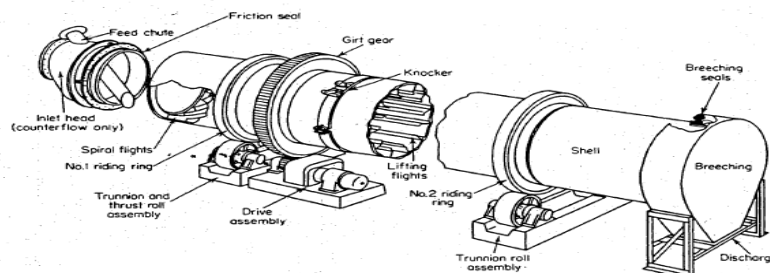


Figure II.1 : Séchoir rotatif direct [10]

Ce type de séchoir consiste en un cylindre en rotation autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontal. Les granulés de pouzzolane entrent par l'extrémité surélevée du cylindre et, grâce aux effets couplés de la rotation et de la gravité, se déplacent jusqu'à l'évacuation localisée au niveau de la partie basse du cylindre. Ainsi, les paramètres intrinsèques du produit (taille de particule, sphéricité, densité, etc.) influencent significativement sa vitesse de traversée et donc son temps de séjour. Ce temps de séjour peut être réglé en ajustant l'inclinaison du cylindre et sa vitesse de rotation. Ce mode de déplacement impose que la biomasse soit bien calibrée pour éviter que certaines particules ne traversent le séchoir plus vite que d'autres. Dans le cas contraire, une teneur en eau homogène à la sortie du séchoir ne peut être garantie. Le cylindre rotatif mélange les particules en continu. Ainsi, toutes les particules sont soumises au même profil de conditions climatiques le long du séchoir. Ce mélange peut être amélioré par la disposition d'aubes périphériques fixées sur la face intérieure du cylindre : les particules sont soulevées puis déversées. Il s'agit d'un moyen efficace d'atteindre l'homogénéité de teneur en eau désirée. Cependant, il est important de noter que ce type d'appareil n'est pas adapté au séchage des particules de grande taille telle que les granulés de la pouzzolane. En effet, leur chute dans le cylindre endommagerait rapidement la paroi et les aubes. L'apport de chaleur peut s'effectuer selon divers modes. Nous pouvons ainsi différencier les séchoirs rotatifs directs et indirects. Dans le premier cas, de l'air chaud est injecté dans le cylindre : le produit à sécher et le gaz vecteur de chaleur sont en contact l'un avec l'autre. Dans le second cas, soit la paroi du séchoir est chauffée (au moyen d'une flamme ou de résistances électriques), soit de la vapeur circule dans des tubes placés à l'intérieur du séchoir. Les séchoirs rotatifs indirects sont utiles si la pouzzolane est finement broyée. En effet, un écoulement d'air dans le cylindre balayerait la biomasse. Cependant, le transfert de chaleur par convection est plus efficace que celui par conduction, c'est pourquoi les séchoirs rotatifs directs présentent un meilleur rendement. La présence d'aubes périphériques permet d'améliorer cette performance : quand elles tombent, les particules traversent le courant d'air, ce qui favorise les échanges de chaleur et de masse. Par conséquent, si le calibre des particules est adéquat, un séchoir rotatif direct doit être privilégié. De plus, leur conception et leur fabrication étant plus aisées, le coût d'investissement est plus faible.

II.2.2/ Séchoir à lit fluidisé

Dans un séchoir à lit fluidisé, le produit granulaire est mis en suspension par un gaz vecteur de chaleur. Habituellement, le gaz vecteur est un puissant courant d'air ascendant qui traverse le lit de particules de pouzzolane : le lit a un comportement similaire à un fluide visqueux. La condition est que la vitesse d'air soit plus élevée (de deux à quatre fois) que la vitesse minimum de fluidisation. Celle-ci dépend de la viscosité de l'air et principalement des caractéristiques des particules : la fluidisation est d'autant plus aisée que les particules sont petites, sphériques et d'une faible densité. Ainsi, la taille maximale des particules est limitée par le flux d'air chaud disponible : couramment, cette taille s'étend de 50 à 2000 μm . Les séchoirs à lit fluidisés conventionnels sont constitués d'une tour de séchage verticale. Les particules humides pénètrent par le haut de la tour et le produit sec est évacué en bas : il s'agit d'une configuration *contre-courant*. Pour que la vitesse d'air soit uniforme dans le séchoir, la base de la tour doit être équipée d'un distributeur. Ainsi, pour un type de particule donné, où qu'elle soit injectée dans la section de la tour, son temps de séjour sera identique. Il est donc important que la variabilité des géométries de particules soit réduite pour que cette durée reste la même d'une particule à l'autre. En effet, des différences de temps de séjour seraient une source d'hétérogénéité de la teneur en eau des particules à la sortie du séchoir. Grâce à ce

mélange intense de la biomasse granulaire, les coefficients de transferts externes atteignent des valeurs élevées. En termes d'échange de chaleur et de masse, le séchage en lit fluidisé est l'un des séchages convectifs les plus efficaces. En outre, le temps de séjour est faible compte tenu de la taille réduite des particules et de l'intensité de la convection. Ceci facilite le contrôle du procédé par ajustement du débit et de la température d'air puisque l'inertie du système est relativement faible. Néanmoins, l'injection de cet important débit d'air s'accompagne d'une quantité significative d'énergie électrique.

Les séchoirs à lit fluidisé sont adaptés au séchage de particules de faibles dimensions. Ils sont par exemple utilisés pour le séchage des sciures et des copeaux dans les unités de pelletisation.

II.2.3/ Séchoir à lit fixe mobile

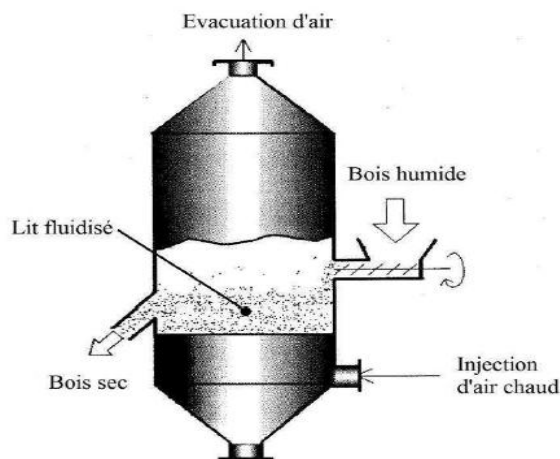


Figure II.2 : Séchoir lit fluidisé

Un lit de particules non agité est traversé par un flux modéré d'air chaud : les particules granulées ne sont pas en suspension (figure II.2). La configuration d'un séchoir à lit fixe mobile est similaire à celle d'un séchoir à lit fluidisé excepté que la vitesse d'air est plus faible que la vitesse minimale de fluidisation.

Les particules amassées dans la tour se déplacent par gravité : elles sont introduites en haut de la tour et sont déchargées à la base de celle-ci. Le temps de séjour est directement corrélé au débit de particule sèche évacuée. Les caractéristiques de l'écoulement d'air, quant à elles, ne régulent pas ce temps de séjour. Ainsi, même si c'est habituellement le cas, le flux d'air n'est pas nécessairement ascendant. Les particules sont immobiles les unes par rapport aux autres. Il est donc primordial que le flux d'air soit identique sur toute la section de la tour. L'efficacité du distributeur d'air placé à la base du séchoir conditionne l'homogénéité de la teneur en eau finale. Le taux de remplissage de la tour étant élevé, le temps de séjour des particules peut y être important : de quelques heures à plusieurs jours. Le principal avantage des séchoirs à lit fixe mobile est leur capacité à utiliser de l'air à basse température (40 à 200 °C). L'énergie peut par exemple provenir d'installations solaires ou d'un système de récupération de chaleur fatale issue d'une unité industrielle annexe (tour de carbonisation, etc.). Ceci réduit le coût du séchage puisqu'une source de chaleur dédiée n'est pas nécessaire. Cependant, la durée importante du temps de séjour induit des coûts d'immobilisation de la biomasse. Mais, d'un point de vue économique, ceci est compensé par un faible coût d'investissement et par l'optimisation du volume du séchoir. Néanmoins, si le lit est très épais,

les pertes de charges de l'air le long du séchoir sont importantes. La puissance électrique du ventilateur n'est donc pas négligeable.

Les séchoirs à lit fixe mobile sont adaptés pour les particules de dimensions moyennes.

II.2.4/ Séchoir tunnel

Les granulés de pouzzolane traversent un tunnel de séchage (au moyen d'un tapis roulant ou de wagonnets de forme cylindrique) dans lequel circule de l'air chaud (Figure II.3). Compte tenu du mode de transport des granulés, le temps de séjour ne dépend pas de la géométrie et de la taille des particules. Ceci est un avantage lorsqu'il existe une dispersion importante de ces paramètres dans le lit de particules

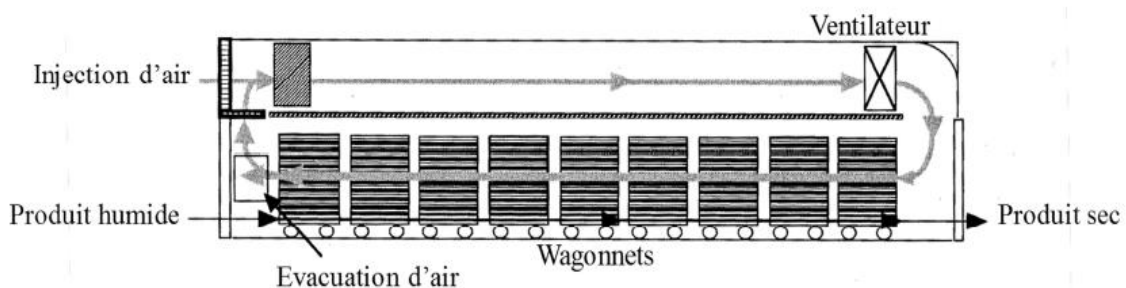


Figure II.3 : Séchoir tunnel type en configuration contre-courant

En outre, ce type de séchoir peut facilement être configuré pour une large gamme de granulométries moyennes du lit : en tenant compte du temps caractéristique moyen de séchage des particules, la vitesse du système de convoyage peut être ajustée pour obtenir la teneur en eau désirée en sortie du tunnel. Néanmoins, la vitesse d'air définit la taille minimale de particule : celles-ci ne doivent pas être soufflées. De ce fait, il est très difficile d'y sécher des particules de très petites tailles. Enfin, ces séchoirs peuvent supporter des particules de grandes tailles en raison de leur robustesse mécanique. En effet, les particules sont immobiles au sein du lit et ne risquent donc pas d'endommager des éléments de l'installation. La flexibilité est donc l'avantage principal des tunnels de séchage. L'efficacité de ce type de séchage est principalement déterminée par la configuration aéraulique. L'air chaud peut être injectée autour ou à travers le lit. Dans le premier cas, les transferts de chaleur et de masse entre les granulés et l'air ne sont pas optimaux : il existe une grande disparité des conditions climatiques à travers le lit provoquant une hétérogénéité de teneur en eau entre son centre et sa périphérie en sortie du séchoir. Pour éviter ce constat, le lit doit être fin. Avec la seconde configuration (l'air injectée à travers le lit), l'hétérogénéité de teneur en eau constatée est plus faible car le flux d'air est forcé à travers le lit. Pour réduire davantage cette hétérogénéité, le tunnel peut être compartimenté, ce qui permet de faire circuler l'air à travers le lit du haut vers le bas dans une partie du séchoir et inversement dans une autre. Ainsi, le lit peut être plus épais, ce qui se traduit, pour un flux de biomasse donné, par moindre un encombrement au sol de l'installation.

Suivant le sens de circulation de l'air par rapport à celui des granulés, deux configurations aérauliques peuvent être définies : co-courant et contre-courant. Le long du séchoir, l'air échange de la chaleur et de l'eau à la surface des particules et de l'enveloppe du séchoir. La

configuration aéraulique, par l'intermédiaire de l'évolution spatiale des conditions climatiques le long du tunnel, détermine la cinétique de séchage des granulés de pouzzolane fragmenté. Les séchoirs tunnel sont adaptés pour les particules à granulométrie moyenne donc adaptée pour les granulés de la pouzzolane.

Dans le cadre de ce travail, nous nous limiterons au séchoir tunnel en configuration contre-courant.

II.3/ FORMULATION MATHÉMATIQUE DU PROBLÈME

II.3.1/ Modélisation physique du tunnel de séchage

Les séchoirs convectifs et particulièrement les séchoirs tunnels sont très répandus dans les différents secteurs industriels [13, 14,15]. Il s'agit de séchoirs opérant dans le mode de la convection forcée. Ils utilisent un circulateur pour assurer l'écoulement d'air chaud et ils permettent de modifier les conditions opératoires pour assurer un bon rendement. Tenir compte uniquement du soleil rend le système dépendant du climat, ce qui nécessite l'utilisation d'une source d'appoint comme le gaz naturel.

Le développement d'un modèle mathématique de séchage d'une couche de produits granulaires tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'échange thermique convectif entre les deux phases est exprimé à l'aide d'un coefficient volumique de transfert de chaleur qui dépend de la vitesse de déplacement du fluide et de la texture du milieu poreux.
- Le tassement du produit au cours du séchage est négligé.
- La masse volumique de l'air est constante
- La conduction thermique dans l'air et entre les grains est exprimée à l'aide de coefficients de conductivités thermiques équivalentes du solide et du fluide supposés isotropes.

II.3.2/ Modèle mathématique

Une couche mince est définie comme une épaisseur de particules (ou de grains), de telle façon que nous puissions supposer que les caractéristiques de l'air (température, humidité et vitesse) en tout point de la couche sont identiques. Cela implique l'absence de gradient inter particules. Ainsi, l'étude du séchage en couche mince peut être considérée comme l'étude du séchage d'un grain moyen (Fig. II.4).

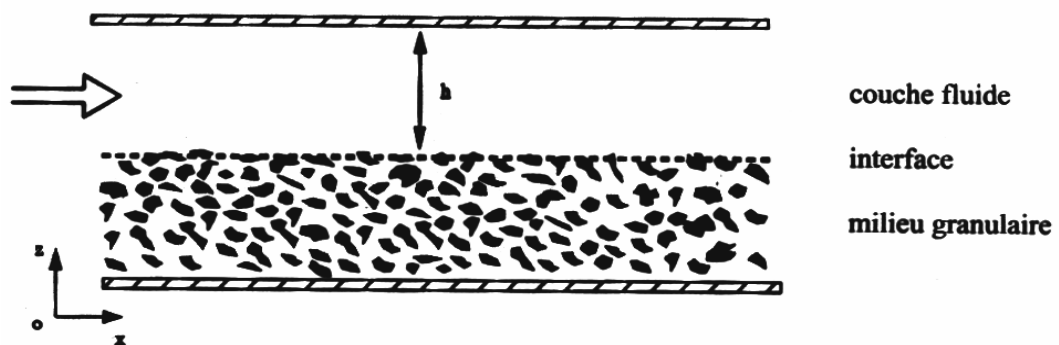


Figure II.4 : Schéma d'un séchoir tunnel statique. L'interface fluide-milieu granulaire est poreuse.

Le milieu poreux granulaire est décrit par deux fonctions macroscopiques (T_s, X) pour la phase solide et (T_a, Y) pour la phase fluide [16,17].

Avec :

X : Teneur en eau du produit (granulés)

Y : Humidité absolue de l'air ou potentiel de séchage

T_s, T_a : Température respective du produit, de l'air de séchage

Les équations suivantes découlent des bilans thermiques et massiques établis à l'intérieur du tunnel de séchage entre la couche de produit et l'air de séchage. Ces équations sont écrites en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses :

Les différents échanges de chaleur considérés se font :

Par convection : entre l'air asséchant et le produit

Par conduction : dans les parois du séchoir

Par rayonnement : entre le produit et le tunnel

Tous les échanges par rayonnement sont négligés.

En plus des échanges de chaleur par conduction et par convection, nous prendrons en compte les échanges de masse du fait qu'une certaine quantité d'eau s'évapore à la surface du volume de contrôle du produit considéré. Un volume de produit donné à la même température et possède la même teneur en eau. La vitesse de l'air de séchage est constante le long du séchoir.

➤ Au niveau de l'air de séchage

• **Bilan thermique (conservation de l'énergie)**

Dans cette étude, le phénomène de dispersion est traité comme étant un terme diffusif s'ajoutant à un terme stagnant. Ainsi, la variation de la puissance thermique de l'air pendant la traversée de la couche de granulés est égale à la somme des puissances échangées par convection par l'air lors du balayage du produit (granulés), par conduction à travers la couche du produit, d'une puissance liée à l'évaporation de l'eau et au phénomène de diffusion.

$$\rho_a (C_{pa} + Y C_{pv}) \left[\varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + \vec{V}_a \cdot \vec{\nabla} T_a \right] = m C_{pv} (T_s - T_a) + \xi h_{as} (T_s - T_a) + \vec{\nabla} (\varepsilon \lambda_{ae} \vec{\nabla} T_a) + m L_v \quad (\text{II.5})$$

ρ_a : masse volumique de l'air

C_{pa} : chaleur spécifique à pression constante de l'air

C_{pv} : chaleur spécifique à coefficients constants de la vapeur d'eau

ξ : surface spécifique

V_a : vitesse de l'air de séchage

T_a : température de l'air de séchage

T_s : température du produit

h_{as} : coefficient de transfert thermique entre l'air et le produit

ε : porosité du produit

λ_{ae} : conductivité thermique entre l'eau et l'air de séchage
 L_v : chaleur latente de vaporisation de la vapeur d'eau

Afin de modéliser les conductivités thermiques effectives, nous avons choisi la corrélation empirique développée par Wakao et Kaguei sous la forme suivante [17,18] :

$$\varepsilon\lambda_{ae} = \varepsilon\lambda_a + 0.1Pr \left[\frac{\rho_a V_a d_p}{\mu_a} \right] \lambda_a = \varepsilon\lambda_a + (0.1 Pr Re)\lambda_a \quad (\text{II.6})$$

Pr : nombre de Prandtl

μ_a : Viscosité dynamique de l'air de séchage

d_p : diamètre du produit

Re : nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho_a V_a d_p}{\mu_a}$

- **Bilan massique (conservation de la masse d'eau à la sortie)**

L'accroissement de l'humidité absolue Y dans l'air provient de la perte en eau ΔX du produit.

$$\rho_a \left[\varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + \vec{V}_a \cdot \vec{\nabla} Y \right] = -m + \vec{\nabla} (\rho_a D_e \vec{\nabla} Y) \quad (\text{II.7})$$

➤ Au niveau du produit (couche de granulés)

- **Bilan thermique (conservation de l'énergie)**

En négligeant les termes de dissipation visqueuse, la variation de l'enthalpie du produit est égale à la somme des puissances échangées par convection avec l'air et de l'énergie utilisée pour vaporiser l'eau du produit :

$$(1 - \varepsilon)\rho_s (C_{ps} + XC_{pw}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \xi h_{as} (T_s - T_a) - m\Delta H_{vap} + \vec{\nabla} (\varepsilon\lambda_{ae} \vec{\nabla} T_a) \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta H_{vap} = \Delta H_{vap}^0 + (C_{pv} - C_{pe})T_s \quad (\text{II.9})$$

ξ : Surface spécifique

h_{as} : coefficient de transfert entre la surface du produit et l'air

- **Bilan massique**

Cette équation représente la conservation de masse du produit. C'est l'équation de la cinétique du séchage.

$$-m = (1 - \varepsilon)\rho_s \frac{\partial X}{\partial t} = (1 - \varepsilon)\rho_s \dot{X} = \xi h_m (X - Y) \quad (\text{II.10})$$

ρ_s : masse volumique du grain ou produit à sécher
 h_m : coefficient de transfert massique

En tenant compte des équations (II.3) et (II.6), on obtient :

$$\rho_a \left[\varepsilon \frac{\partial Y}{\partial t} + V_a \nabla_x Y \right] = \xi h_m (X - Y) + \rho_a D_e \Delta_x Y \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Où } \Delta_x = \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \Delta_x^2$$

De même en tenant compte des équations (II.6) et (II.1), on a :

$$\begin{aligned} \rho_a (C_{pa} + Y C_{pv}) \left[\varepsilon \frac{\partial T_a}{\partial t} + V_a \nabla_x T_a \right] &= \xi h_m (X - Y) L_v + \varepsilon \lambda_{ae} \nabla_x T_a \\ &+ \xi h_m (X - Y) C_{pv} (T_s - T_a) \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

II.4/ CHOIX DE LA MÉTHODE DE RÉOLUTION DES ÉQUATIONS

Les équations établies ci-dessus et plus particulièrement les équations (II.7) et (II.8) révèlent bien le couplage entre les paramètres (X, T_a) du produit et les paramètres (Y, T_s) de l'air de séchage. On remarque également que le profil de conditions climatiques dépend des transferts de chaleur et de masse au niveau des surfaces d'échange (les granulés et la paroi du séchoir) et réciproquement : l'humidité relative et la température de l'air influencent la vitesse de séchage de chaque particule et vice-versa. Par conséquent, le modèle utilisé pour simuler le séchage en continu d'un lit de particules de pouzzolane doit prendre en compte le couplage bidirectionnel entre les deux échelles spatiales (produit ↔ séchoir). Le modèle adéquat est donc celui qui soit capable de prédire les paramètres des granulés de la pouzzolane et de l'air pendant leur séjour dans l'enceinte.

II.4.1/ Modèles analytiques

Les modèles analytiques, utilisant le concept de courbe caractéristique de séchage, permettent de prédire l'évolution temporelle des paramètres moyens du grain [20]. L'approche globale du séchage à l'échelle de la particule permet de limiter le nombre d'équations différentielles décrivant le système. Ainsi, la résolution de ces équations de conservation sur la durée du séchage nécessite un temps de calcul très réduit. L'emploi de ce type de modèle est donc adapté à l'étude du séchage simultanée de plusieurs milliers de particules, tel que c'est le cas pour les granulés de la pouzzolane. Cependant, dans la formulation de ces modèles analytiques, il est souvent supposé que l'intégralité de l'énergie échangée entre l'air et les granulés est utilisée pour évaporer l'eau. Cette lacune laisse voir que ces modèles ne tiennent pas compte de tous les aspects du problème posé dans cette étude, par conséquent ne permettent pas de simuler fidèlement l'évolution de la teneur en eau des granulés si la température d'air varie, tel que l'on peut le constater le long des séchoirs en continu.

II.4.2/ Modèles numériques

À l'échelle des granulés de la pouzzolane, les modèles à éléments ou volumes finis sont utiles pour prédire l'évolution du champ de teneur en eau et de contraintes thermiques au sein de la particule et de l'air de séchage. Ils permettent ainsi une meilleure compréhension des mécanismes du séchage [21,22]. Cependant, l'inconvénient majeur des modèles à éléments ou volumes finis réside dans leur temps de calcul important.

Nous utiliserons donc les méthodes numériques pour simuler les paramètres de l'air et d'un grain moyen.

Chapitre III : RÉOLUTION NUMÉRIQUE DU PROBLÈME ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

III.1/ RAPPELS SUR LES MÉTHODES NUMÉRIQUES

III.1.1/ Généralités

Pour analyser les paramètres et grandeurs du système, l'une des solutions est parfois de recourir à une série d'expériences. Mais les essais peuvent s'avérer très coûteux (essais en vol, essais avec matériaux rares, instrumentations très chères...) et ils peuvent être très dangereux (essais nucléaires, environnement spatial...). Enfin il peut être difficile de mesurer tous les paramètres : échelles du problème trop petites (chimie du vivant, couche limite en fluide...) ou trop grandes (astrophysique, météorologie, géophysique...).

On peut aussi construire un modèle mathématique permettant la représentation du phénomène physique. Ces modèles utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) dont on ne connaît pas de solutions analytiques en général. Il faut alors résoudre le problème numériquement en transformant les équations continues de la physique en un problème discret sur un certain domaine de calcul (le maillage).

L'analyse numérique traite de nombreux problèmes de sciences physiques, biologiques, technologiques ou des problèmes issus de modèles économiques et sociaux. Elle intervient dans le développement de codes de calcul (météorologie, physique des particules...), mais aussi dans les problèmes de simulations (aéronautique, industrie nucléaire...) ou d'expérimentations mathématiques. Elle entretient des liens étroits avec l'informatique. Si sa partie théorique relève plus des mathématiques, sa mise en pratique aboutit généralement à l'implémentation d'algorithmes sur ordinateur. Ces méthodes se fondent à la fois sur la recherche de solutions exactes comme dans le cas de l'analyse matricielle ou du calcul symbolique, sur des solutions approchées qui résultent le plus souvent de processus de discrétisation comme dans le traitement des équations différentielles. Récemment, l'analyse numérique s'est enrichie des techniques probabilistes comme les méthodes de Monte-Carlo. Bien qu'il existe sur le marché des logiciels conçus pour traiter la quasi-totalité de des problèmes sus-mentionnés, il se trouve que la plupart des problèmes de recherche sont complexes et exigent du chercheur ou de l'ingénieur qu'il écrive lui-même son programme en tenant compte de tous les critères et conditions particuliers. De plus, faire fonctionner ces logiciels demande au chercheur ou à l'ingénieur de comprendre correctement les différentes étapes à suivre afin d'introduire les données dans le logiciel et recueillir les résultats dudit calcul.

III.1.2/ Les trois grandes familles de méthodes pour la discrétisation des EDP

Pour passer d'un problème exact continu régi par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles de méthodes :

III.1.2.1/ Les différences finies

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

Cette méthode présente comme avantages une grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul et comme inconvénients la limitation à des géométries simples, les difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann.

III.1.2.2/ Les éléments finis

La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou nœuds du maillage. Avantages : traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence. Inconvénient : complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire.

III.1.2.3/ Les volumes finis

La méthode intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec des volumes élémentaires rectangles.

Cette méthode présente des avantages : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann, mais également un inconvénient : peu de résultats théoriques de convergence.

III.2/ RÉOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS

Nous avons développé un modèle basé sur une description physique très complète des transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement pour simuler le séchage d'un milieu poreux [23]. Cette description prend en compte d'une part les transferts de chaleur entre les phases fluide et solide et d'autre part les différents phénomènes qui interviennent au sein du produit [25]. La simulation complète d'un problème de séchage comporte des périodes pour lesquelles le couplage des équations est très fort et oblige à adopter un pas de temps très petit. On a pu vérifier que le conditionnement du système linéaire associé à la discrétisation du problème se détériore lorsque le couplage entre les équations est fort. On met ainsi au point une méthode de résolution itérative qui permet de prendre à chaque instant un pas de temps optimal.

III.2.1/ Conditions initiales

Initialement, le milieu poreux est supposé isotherme et en équilibre hydrostatique. L'état du système est alors décrit par :

$$\begin{cases} X(x, 0) = X_{int} \\ Y(x, 0) = Y_{int} = Y_0 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} T_s(x, 0) = T_{s0} \\ T_a(x, 0) = T_{a0} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

III.2.2/ Conditions initiales

La configuration de la section d'entrée du tunnel nous amène à poser les conditions aux limites suivantes :

➤ À l'entrée du tunnel $x=0$

$$\begin{cases} X(0, t) = X_0 \\ Y(0, t) = Y_0 \end{cases} \quad \frac{\partial X}{\partial x}(0, t) = h_m(X_0 - Y_0) \quad \text{et} \quad \begin{cases} T_a(0, t) = T_{a0} \\ T_s(0, t) = T_{a0} \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

➤ À la sortie du tunnel $x=L$

$$\begin{cases} X(L, t) = X_{int} \\ \frac{\partial Y}{\partial x}(L, t) = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} T_s(L, t) = T_{so} \\ -\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial x}(L, t) = h_c(T_a - T_s) \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

A la surface du produit, l'évaporation s'effectue en échange d'une chaleur latente de vaporisation et d'un flux de chaleur moyen global. Le flux correspondant à l'évaporation et à l'évacuation de la vapeur d'eau diffusée dans la couche limite est fonction de la différence de la masse de vapeur à travers la couche limite et du coefficient de transfert massique.

La face inférieure du tunnel est supposée adiabatique et imperméable ; les flux de chaleur et de masse sont alors nuls. Enfin, nous supposons que la pression intrinsèque de l'air sur la surface d'échange est égale à la pression atmosphérique.

III.2.3/ Méthode de résolution

Au plan numérique nous utilisons les méthodes de différences finies. Dans ces méthodes, chaque dérivée est approchée par une expression discrétisée. L'équation différentielle est ainsi remplacée par une expression discrète appelée schéma numérique. L'étude porte alors sur les conditions de convergence de ces schémas vers la solution exacte et de leur stabilité. Les erreurs accumulées au fil du calcul pouvant conduire à une solution numérique qui s'éloigne progressivement de la solution exacte. Les schémas explicites ne sont pas toujours stables et imposent donc une condition de stabilité. Par contre, les schémas implicites sont inconditionnellement stables.

Le temps caractéristique d'établissement de la température T_a et de l'humidité absolue de l'air Y est beaucoup plus petit que celui relatif au séchage. Les termes transitoires relatifs à l'air peuvent ainsi être négligés lors de la résolution numérique. Le système d'équations (II.5, II.7, II.8, II.10) régissant les transferts et présentés ci-dessus est résolu par une méthode implicite de différences finies utilisant une approche du type volume de contrôle [25]. Pour résoudre une équation différentielle du système, on construit un maillage constitué d'un réseau de points.

III.2.4/ Discrétisation des équations

La discrétisation des équations est faite en admettant les conditions suivantes :

- ✓ Les dérivées premières en espace pour une grandeur physique ϕ sont approximées comme suit :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi_{i-1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta x} \quad \text{(III.4)}$$

- ✓ Les dérivées secondes en espace pour une grandeur physique ϕ donnée sont approximées comme suit :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (\text{III.5})$$

Où Δx est le pas d'espace

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_{i,j-1} - \phi_{i,j}}{\Delta t} \quad (\text{III.6})$$

Où Δt est le pas d'espace

- ✓ Nous considérons que la variation de la température en un point donné due aux échanges avec les différents milieux présents est négligeable devant la variation de température due au déplacement de l'air [25]. Par conséquent, le terme

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_{i,j-1} - \phi_{i,j}}{\Delta t} \text{ est négligé devant le terme } \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi_{i-1,j} - \phi_{i,j}}{\Delta x}$$

En tenant compte donc des conditions ci-dessus, les équations (III.2), (II.7), (II.6) se discrétisent respectivement comme suit :

$$X_{1,j} = -h_m \Delta x (X_{0,j} - Y_{0,j}) + X_{0,j} \quad (\text{III.7})$$

$$Y_{i+1,j} = [2 - a + b]Y_{i,j} + [a - 1]Y_{i-1,j} - bX_{i,j} \quad i = 1 \dots n - 1 \quad (\text{III.8})$$

$$X_{i+1,j} = \frac{A}{B+A} X_{i+1,j-1} + \frac{B}{B+A} Y_{i+1,j} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Avec : } a = \frac{V_a \Delta x}{D_e}; \quad b = \xi \frac{h_m (\Delta x)^2}{\rho_a D_e}; \quad c = \frac{(1-\varepsilon)\rho_a}{\Delta t}; \quad d = \xi h_m$$

De même, la discrétisation des équations (II.5) et (II.8) traduisant la conservation de l'énergie conduit aux équations suivantes :

$$T_a^{i+1,j} = [a_1(C_a + C_v Y_{i,j}) + b_1 C_v m_{i,j} + c_1 + 2]T_a^{i,j} - [a_1(C_a + C_v Y_{i,j}) + 1]T_a^{i-1,j} + [b_1(K_2 - C_v)m_{i,j} - c_1]T_s^{i,j} + m_{i,j}K_1 b_1 \quad (\text{III.10})$$

$$T_s^{i+1,j} = [d_1(C_s - X_{i,j}C_w) - c_1 + K_2 b_1 m_{i,j} + 2]T_s^{i,j} - d_1(C_s + X_{i,j}C_w)T_s^{i,j-1} - T_s^{i-1,j} + c_1 T_a^{i,j} + k_1 b_1 m_{i,j} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Où } m_{i,j} = \xi h_m (X_{i,j} - Y_{i,j})$$

$$T_a^{n,j} = \frac{-E}{1-E} T_a^{n-1,j} + \frac{1}{1-E} T_s^{n,j} \quad (\text{III.12})$$

$$a_1 = \frac{\rho_a V_a \Delta x}{\varepsilon \lambda_{ae}} ; b_1 = \frac{(\Delta x)^2}{\varepsilon \lambda_{ae}} ; c_1 = \frac{\xi h_{as} (\Delta x)^2}{\varepsilon \lambda_{ae}} ; d_1 = \frac{(1-\varepsilon) \rho_s (\Delta x)^2}{\Delta t \varepsilon \lambda_{ae}} ; E = \frac{\lambda_a}{\Delta x h_m}$$

III.2.5/ Évaluation de certains paramètres.

a) Surface spécifique

La pouzzolane étant assimilée à un corps poreux, en toute légitimité on peut calculer sa surface d'échange avec l'air de séchage en utilisant la porosité. [25]

Il faut savoir que la porosité ε est, par définition, le rapport du volume des pores (occupé par le gaz) au volume total (gaz et solide). C'est donc la fraction de volume total occupée par le gaz tandis que (J-E) est celle occupée par le solide. Notons que l'empilement le plus compact qui soit possible de réaliser avec des sphères de même diamètre correspond à une porosité de 0,26 ; le plus lâche correspond à la valeur 0,476 ; dans le cas d'un empilement distribué de manière quelconque, la valeur de la porosité oscille autour de 0,4.

Considérons que le volume de contrôle de granulés est constitué d'un ensemble de particules sphériques de diamètre quasiment identique de 4mm.

Les tronçons cylindriques de granulés de pouzzolane ont une longueur de 0,475m et un diamètre de 0,5m correspondant au diamètre du cylindre grillagé.

Donc le volume total d'un tronçon est :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \cdot l = \frac{3.14 \times (0.5)^2}{4} \times 0.475 = 0,093m^3 \quad (\text{III.13})$$

Fixons une porosité égale à 0,45, alors le volume du solide (produit) est de :

$$V_s = (1 - \varepsilon)V = 0,049m^3 \quad (\text{III.14})$$

Le volume d'un granulat de pouzzolane est donné par :

$$V_g = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (0,002^3) = 3,4 \times 10^{-8}m^3 \quad (\text{III.15})$$

La surface d'un granulat est :

$$S_g = 4\pi r^2 = 4 \times 3.14 \times (0,002)^2 = 0,00005m^2 \quad (\text{III.16})$$

L'aire totale d'échange est donnée par :

$$A = \frac{V_s}{V_g} \times S_g = 73,586m^2 \quad (\text{III.17})$$

Du fait que le produit se trouve entassé dans le tunnel, nous allons introduire un coefficient qui tient compte du niveau d'entassement du produit. Il faut savoir que ce facteur est d'autant plus faible que le tunnel est rempli ou le diamètre des granulats est petit [14].

Pour une première approche on prend $K = 1,33 \times 10^{-2}$. De ce fait, la surface spécifique ou utile d'échange entre le volume de produit considéré et l'air asséchant est :

$$\xi = K \times A = 0.976m^2 \tag{III.18}$$

b) Humidité de l'air à l'entrée du tunnel Y_0

Y_0 est donné par la relation :

$$Y_0 = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \tag{III.19}$$

Avec $P_v = h_r P_{vs}$ et $P_{vs} = 10^{(2,7877 + 9.756\theta / (272,7 + \theta))}$

Où P_v est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air

P_{vs} est la pression de vapeur saturante à la température du produit ou à la température humide.

h_r humidité relative de l'air humide à l'entrée du tunnel (0,83)

θ est la température en degré Celsius

En choisissant θ autour de la température ambiante ($\theta = 30^\circ\text{C}$), on a :

$$P_{vs} = 10^{(2,7877 + 9.756 \times 30 / (272,7 + 30))} = 5683,2652\text{Pa.}$$

$$Y_0 = 0,622 \cdot \frac{5683,2652 \times 0,83}{1,015 \times 10^5 - 0,83 \times 5683,2652} = 0,03 \tag{III.20}$$

c) Coefficient de transfert convectif de masse h_m

En se basant sur l'équation sur les équations citées dans la littérature [26], on peut calculer le coefficient de transfert convectif de masse par la relation suivante :

$$h_m = (2D_e / 0.004) [(1 - 3.94813 \ln J_1) / 5,13257 \ln J_1] \tag{III.21}$$

J_1 : est un facteur log (adimensionnel) = 1,0941

$$h_m = 0,0194\text{m/s}$$

Remarque : l'unité de h_m est donnée par l'analyse dimensionnelle.

D_e : coefficient de diffusion

d) Principales données nécessaires à la simulation

$$\begin{aligned}
 X_{int} &= X_{i0} = X_{nj} = 14\% \\
 X_0 &= X_{0j} = 2\% \\
 T_{a0} &= T_{a0j} = T_{ai0} = T_{s0j} = 75^\circ\text{C} \\
 T_{s0} &= T_{snj} = T_{si0} = 30\% \\
 h_{as} &= 28,1 \text{ W/m}^2\text{K} \\
 C_e &= C_w = 4180 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} \\
 C_a &= 1006 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} \\
 C_v &= 1840 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} \\
 L_v &= \Delta H_{vap} = (2503 - 2.46T) \text{ J/kg} \\
 \rho_a &= 1,0285 \text{ kg/m}^3 \\
 h_m &= (2D_e/0.005)[1 - 3.94813\ln J_1/5,13257\ln J_1] \\
 V_a &= 3 \text{ m/s} \\
 L_v &= 1006 \text{ J/kg/}^\circ\text{C} \\
 D_e &= 2,3 \cdot 10^{-5} \times (T/273)^{1,81} \\
 \lambda_a &= 0.0277 \text{ W/m.}^\circ\text{C} \\
 \varepsilon &= 45\%
 \end{aligned}$$

III.3/ RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

III.3.1/ Analyse des résultats

Le modèle numérique décrit ci-dessus est appliqué au séchage convectif d'une couche de granulés. Les températures de l'air de séchage sont comprises entre 30 °C et 75 °C pour une vitesse de 3 m/s et une humidité absolue de l'ordre de 3 %. L'enceinte du séchage, de forme parallélépipédique, a une longueur variable (Figure II.4).

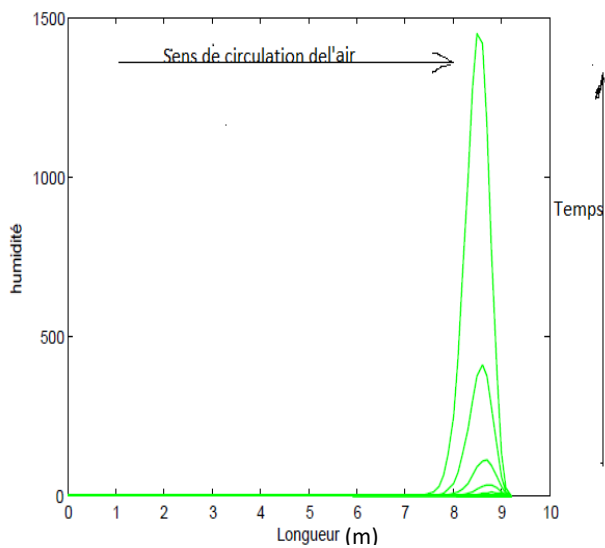


Figure III.1 : Évolution de l'humidité relative de l'air en fonction du temps et de la longueur du tunnel.

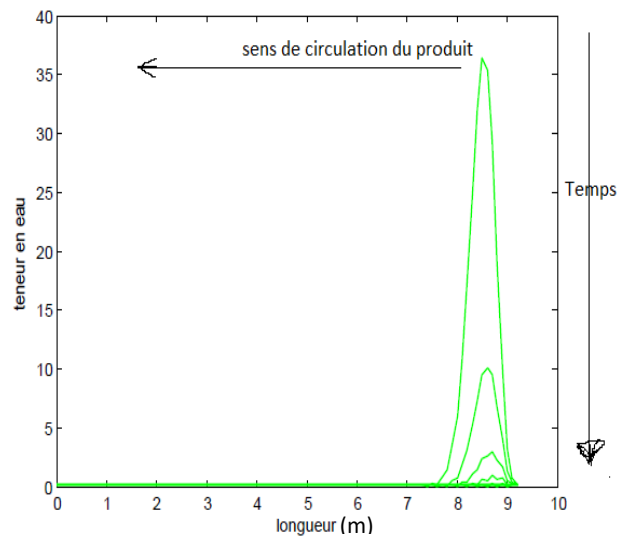


Figure III.2 : Évolution de la teneur en eau du produit en fonction du temps et de la longueur du tunnel.

Rappelons que le tunnel de séchage utilisé ici est dans la configuration contre-air. C'est-à-dire que l'air de séchage entre en $x=0$ tandis que le produit entre en $x=L$ (longueur du tunnel).

Nous avons pour quatre instants donnés, représenté les courbes traduisant les variations des paramètres de l'air et du produit en fonction de la longueur du tunnel.

On observe que, dès l'entrée du produit (figure III.2) dans le tunnel, sa teneur en eau augmente considérablement pendant les premiers instants du séchage avant de rechuter après une avancée de 0,5mètre dans le tunnel, puis se stabilise.

Cette augmentation au début du séchage serait probablement due à l'absence de l'air de séchage à la position où se trouve le produit car l'air de séchage entre en sens inverse et a pour rôle d'entraîner l'humidité du produit vers l'extérieur du tunnel. Une observation similaire a été faite dans la littérature [12] lorsque le courant d'air est soufflé avec une vitesse faible.

On observe parallèlement, sur la figure III.1 que, l'humidité de l'air commence à varier après une avancée de 8mètres environ dans le tunnel. Pour $x = 8m$, l'humidité de l'air croît pendant que la teneur en eau du grain décroît. Vers sortie du tunnel, l'humidité de l'air de séchage chute avant de se stabiliser à une valeur finale. Ces observations seraient probablement dûes au fait que les échanges thermique et massique entre l'air de séchage et le produit ont lieu après une avancée de l'air de 8mètres. Dans cette configuration du tunnel, le produit sèche dès son entrée dans le tunnel, c'est-à-dire après une avancée de 0,5mètre dans le tunnel car la vitesse de circulation de l'air de séchage est beaucoup plus importante que la vitesse de déplacement du front de séchage.

On remarque également la diminution de la teneur en eau du produit et l'augmentation de l'humidité de l'air de séchage au cours du temps, ce qui est bien en conformité avec le processus de séchage.

III.3.2/ Sensibilité aux paramètres externes

III.3.2.1/ Effet de la vitesse de l'air séchant

La vitesse de l'air joue un rôle important dans le déroulement du séchage [1]. Plus le débit de l'air est élevé, plus vite le front de séchage se forme et se déplace. L'humidité relative de l'air diminue et les grains se chargent encore d'eau si la vitesse de l'air séchant n'est pas assez importante [7].

III.3.2.2/ Effet de l'humidité de l'air séchant

Notons l'existence pour des humidités assez élevées d'une période de séchage à température constante. En un point donné du milieu, lorsque l'humidité relative du fluide séchant augmente, la température croît au début, puis décroît. Quant à l'évolution de la teneur en eau du milieu au cours du temps, le séchage est bien évidemment plus rapide et plus efficace pour une humidité relative d'entrée plus faible.

Conclusion et perspectives

Afin d'appréhender l'influence de la variation des caractéristiques de l'air (température, humidité, vitesse) sur les cinétiques globales de séchage, nous avons simulé, dans cette étude, les échanges de chaleur et d'humidité au sein d'une couche de produits granulaires constituant un milieu poreux. Pour obtenir des résultats qualitatifs, nous avons utilisé un modèle global qui tient compte des différents phénomènes intervenants au sein du produit. Ce modèle numérique étant résolu dans le plan (x, t) .

Les résultats de la simulation ont permis de mettre en évidence les différentes phases de séchage et d'avoir une conception plus claire du processus de séchage. Nous avons étudié l'évolution de l'humidité relative de l'air de séchage ainsi que celle de la teneur en eau des granulés de la pouzzolane dans le temps et le long du séchoir. Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que pour de faibles vitesses de l'air de séchage, le séchage se fait en deux étapes : une inversion du processus de séchage dès les premiers instants de séchage, puis un rétablissement du processus de séchage quelques minutes après. De plus, l'évolution de la cinétique globale, lorsque les conditions initiales et aux limites sont variables dans le temps et dans l'espace, montre l'importance des phénomènes mis en évidence et les multiples possibilités de cette simulation.

Les résultats issus des simulations numériques ne nous ont pas permis de conclure quant à l'évolution des températures du produit et celle de l'air dans le temps et le long du séchoir. Par conséquent, nous n'avons pas pu apprécier l'évolution de la température au cours du séchage. Les difficultés rencontrées à ce niveau pourraient être dues au fait que nous avons considéré la masse volumique du produit, ainsi que celle de l'air comme constantes et avons utilisé les données de la littérature.

La présente étude a été faite en utilisant l'hypothèse simplificatrice selon laquelle l'air circule dans une seule direction d'espace et sa vitesse est constante le long du séchoir. Il serait intéressant dans la suite d'effectuer des simulations avec une vitesse d'air variable dans le temps et dans les trois directions de l'espace. Notons aussi que l'évolution de certains paramètres dans le temps et dans l'espace comme la masse volumique, ainsi que des conditions initiales peut également nous offrir plus de possibilité de simulations afin d'avoir une description plus précise des échanges de masses et de chaleur dans un séchoir tunnel.

Références Bibliographiques

- [1] M. Maalej et A. Belghith, *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 4, pp. 279-285, 1977.
- [2] R. Bertin, F. Pierronne et M. Combarous, *Industries Alimentaires et Agricoles*, 93, pp. 1431-1436, Déc. 1976.
- [3] V. Furian et Y.Houst, laboratoire des matériaux pierreux de l'EPF, Lausanne, chronique du LMP 1980.
- [4] MEATF, *ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire de France, les pouzzolanes et les basalts*, bull n°92 Nov-Déc 1977 p 91-112, bull n°93 Fev 1978 pp 61-69
- [5] Meukam P. « *Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments* », Thèse de doctorat, Université de Gergy-Pontoise, 2004.
- [6] Vernet, C. et Cadoret, G., *Compte- rendus du Colloque «Voies Nouvelles du Béton»* Cachan, France, pp. 17, 1991.
- [7] Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo, *utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton : guide des règles de l'art, laboratoire de la technologie des matériaux, Canada*, 2005.
- [8] F. Massaza , *chimie des additions pouzzolaniques et ciments mélangés*, II cemento,73, vol 1, pp 3-38, 1976.
- [9] P. Barret ,D. Menetrier, B. Cottin, *study of silicate lime solution reaction*. Cement and concrete research, n° 07, pp 61-67
- [10] A. Dascalescu *Le séchage et ses applications industrielles* DUNOD Paris - i 969
- [11] F. Kreith *Transmission de la chaleur et Thermodynamique* MASSON ET C ÉDITEURS
- [13] S. Ben Mabrouk, '*Etude des Transferts Simultanés de Chaleur et de Masse dans les Milieux Poreux* : Thèse de Doctorat Es-Sciences, Faculté des Sciences, Tunis II, 1999.
- [14] F. Pierronne et M. Combarous, *Industries Alimentaires et Agricoles*, 93, pp 1431-1436, Déc. 1976.
- [15] R. Piacentini et M. Combarous, *Revue Internationale d'Hélio technique*, 2, pp 44-49, 1985.
- [16] G. Arnaud et J.P. Foh, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31 (12), pp 2517-2526, 1988.
- [17] S. Ben Mabrouk, G. Arnaud, J.P. Fohr and A. Belghit, *Actes des Journées Int. Thermique JITH'89*, 1 (2), pp 471-480, Edition CNRS, Paris, 1999.
- [18] A. Mobarki, '*Etude des Transferts de Chaleur et de Masse au Cours du Séchage d'un Milieu Poreux*', *Rapport de DEA, ENIM*, 1998.
- [19] L. Zili, '*Etude des Transferts de Chaleur et de Masse dans un Cylindre Rempli de Grains Humides et Traversés par un Ecoulement d'Air*', *Rapport de DEA, ENIM*, 1997
- [20] A. Sander, *Chemical Engineering and Processing*, Volume 46, pp 1324-1331, 2007.
- [21] S.V. Patankar, *Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science*, Taylor & Francis, pp 214 , 1980.
- [22] M. Prat, *Drying Technology*, Volume 9 (5), pp 1181-1208, 1991.
- [23] S. Whitaker *Advances in Heat Transfer*, 13, pp 119-203, Acad. Press, 1977.
- [24] B. Khiari, '*Etude des Transferts de Chaleur et de Masse dans un Séchoir Solaire Tunnel*', *Rapport de DEA, ENIM – INRST*, 2001.
- [25] S.V. Patankar, *Hemisphere Pub. Corp.*, 1981.


```

53         L1(0,j)=0.0
54         L1(n,j)=0.0
55         L2(0,j)=0.0
56         L2(n,j)=0.0
57         L3(0,j)=0.0
58         L3(n,j)=0.0
59         L4(0,j)=0.0
60         L4(n,j)=0.0
61
62
63     end do
64
65 do j=0,m-1
66
67 do i=1,n-1
68 L1(i,1)=dt*f1(x(i,j),y(i,j),y(i+1,j),y(i-1,j))
69 L2(i,1)=dt*f2(x(i,j),y(i,j),y(i+1,j),y(i-1,j))
70 L3(i,1)=dt*f3(x(i,j),y(i,j),Ts(i,j),Ta(i,j),Ta(i+1,j),Ta(i-1,j))
71 L4(i,1)=dt*f4(x(i,j),y(i,j),Ta(i,j),Ts(i,j),Ts(i+1,j),Ts(i-1,j))
72 end do
73
74     do i=1,n-1
75 L1(i,2)=dt*f1(x(i,j)+L1(i,1)/2.0,y(i,j)+L2(i,1)/2.0,y(i+1,j)+L2(i+1,1)/2.0,&
76             &y(i-1,j)+L2(i-1,1)/2.0)
77 L2(i,2)=dt*f2(x(i,j)+L1(i,1)/2.0,y(i,j)+L2(i,1)/2.0,y(i+1,j)+L2(i+1,1)/2.0,&
78             &y(i-1,j)+L2(i-1,1)/2.0)
79 L3(i,2)=dt*f3(x(i,j)+L1(i,1)/2.0,y(i,j)+L2(i,1)/2.0,Ts(i,j)+L4(i,1)/2.0,&
80             &Ta(i,j)+L3(i,1)/2.0,Ta(i+1,j)+L3(i+1,1)/2.0,Ta(i-1,j)+L3(i-1,1)/2.0)
81 L4(i,2)=dt*f4(x(i,j)+L1(i,1)/2.0,y(i,j)+L2(i,1)/2.0,Ta(i,j)+L3(i,1)/2.0,&
82             &Ts(i,j)+L4(i,1)/2.0,Ts(i+1,j)+L4(i+1,1)/2.0,Ts(i-1,j)+L4(i-1,1)/2.0)
83 end do
84
85     do i=1,n-1
86
87 L1(i,3)=dt*f1(x(i,j)+L1(i,2)/2.0,y(i,j)+L2(i,2)/2.0,y(i+1,j)+L2(i+1,2)/2.0,&
88             &y(i-1,j)+L2(i-1,2)/2.0)
89 L2(i,3)=dt*f2(x(i,j)+L1(i,2)/2.0,y(i,j)+L2(i,2)/2.0,y(i+1,j)+L2(i+1,2)/2.0,&
90             &y(i-1,j)+L2(i-1,2)/2.0)
91 L3(i,3)=dt*f3(x(i,j)+L1(i,2)/2.0,y(i,j)+L2(i,2)/2.0,Ts(i,j)+L4(i,2)/2.0,&
92             &Ta(i,j)+L3(i,2)/2.0,Ta(i+1,j)+L3(i+1,2)/2.0,Ta(i-1,j)+L3(i-1,2)/2.0)
93 L4(i,3)=dt*f4(x(i,j)+L1(i,2)/2.0,y(i,j)+L2(i,2)/2.0,Ta(i,j)+L3(i,2)/2.0,&
94             &Ts(i,j)+L4(i,2)/2.0,Ts(i+1,j)+L4(i+1,2)/2.0,Ts(i-1,j)+L4(i-1,2)/2.0)
95 end do
96
97     do i=1,n-1
98 L1(i,4)=dt*f1(x(i,j)+L1(i,3),y(i,j)+L2(i,3),y(i+1,j)+L2(i+1,3),y(i-1,j)+L2(i-1,3))
99 L2(i,4)=dt*f2(x(i,j)+L1(i,3),y(i,j)+L2(i,3),y(i+1,j)+L2(i+1,3),y(i-1,j)+L2(i-1,3))
100 L3(i,4)=dt*f3(x(i,j)+L1(i,3),y(i,j)+L2(i,3),Ts(i,j)+L4(i,3),&
101             &Ta(i,j)+L3(i,3),Ta(i+1,j)+L3(i+1,3),Ta(i-1,j)+L3(i-1,3))
102 L4(i,4)=dt*f4(x(i,j)+L1(i,3),y(i,j)+L2(i,3),Ta(i,j)+L3(i,3),&
103             &Ts(i,j)+L4(i,3),Ts(i+1,j)+L4(i+1,3),Ts(i-1,j)+L4(i-1,3))
104 end do
105
106 do i=1,n-1
107 x(i,j+1)=x(i,j)+(L1(i,1)+2.0*L1(i,2)+2.0*L1(i,3)+L1(i,4))/6.0
108 y(i,j+1)=y(i,j)+(L2(i,1)+2.0*L2(i,2)+2.0*L2(i,3)+L2(i,4))/6.0
109 Ta(i,j+1)=Ta(i,j)+(L3(i,1)+2.0*L3(i,2)+2.0*L3(i,3)+L3(i,4))/6.0
110 Ts(i,j+1)=Ts(i,j)+(L4(i,1)+2.0*L4(i,2)+2.0*L4(i,3)+L4(i,4))/6.0
111
112     end do
113     end do
114 do j=0,m
115 do i=8,n
116     if(mod(j,10)==0) then
117         !if(x(i,j).lt.y(i,j))then
118 print*,L(i),x(i,j),y(i,j),Ta(i,j),Ts(i,j),t(j)
119 write(03,*)L(i),'',x(i,j),'',y(i,j),'',Ta(i,j),'',Ts(i,j),'',t(j)

```



```

120 !$$$$$ write(4,*)x(i),' ',t(j),' ',u(i,m)
121 !endif
122 end if
123 end do
124 end do
125 !end program
126 contains
127 function f1(a,b,c,d)
128 implicit none
129 double precision::a,b,c,d,f1,ki,hm,epsilon,rhos,rhoa,Va,De,dx
130 dx=0.1
131 epsilon=0.45;hm=0.019739;ki=0.967;
132 rhos=1.35; rhoa=1.0285;epsilon=0.45;De=5.31884E-10;Va=3.0;
133
134 f1=ki*hm/(ki*hm+(1-epsilon)*rhos)*(ki*hm/(rhoa*epsilon)*(a-b)+De/(epsilon*dx**2)*(c-2*b+d)-Va/(epsilon*dx)*(c-b))
135 end function f1
136
137 function f2(a,b,c,d)
138 implicit none
139 double precision::a,b,c,d,f2,ki,hm,rhoa,epsilon,De,dx,Va
140
141 rhoa=1.0;epsilon=0.45;hm=0.019739;ki=0.967;De=5.31884E-10;Va=3.0;
142 dx=0.1;
143 f2=ki*hm/(rhoa*epsilon)*(a-b)+De/(epsilon*dx**2)*(c-2*b+d)-Va/(epsilon*dx)*(c-b)
144
145 end function f2
146
147 function f3(a,b,c,d,d1,f)
148 implicit none
149 double precision::a,b,c,d,d1,f,f3,ki,hm,cpv,has,rhoa,epsilon,lambda_ae,dx,Va,lambda_a,cpa,Pr,Re
150 dx=0.1;
151 Pr=0.33;Re=0.8;rhoa=1.0285;epsilon=0.45;hm=0.019739;ki=0.967;lambda_a=0.0277;
152 lambda_ae=(epsilon+0.1*Pr*Re)*lambda_a;
153 Va=3.0;cpv=1840;has=28.1;cpa=1006;
154
155 f3=-ki*(hm*(a-b)*cpv-has)/(rhoa*epsilon*(cpa+b*cpv))*(c-d)+lambda_ae/(rhoa*(cpa+b*cpv)*dx**2)*&
156 &(d1-2*d+f)-ki*hm*(a-b)*(2503-2.46*c)/(rhoa*epsilon*(cpa+b*cpv))-Va/(epsilon*dx)*(d1-d)
157
158 end function f3
159
160
161 function f4(a,b,c,d,d1,f)
162 implicit none
163 double precision::a,b,c,d,d1,f,f4,ki,hm,cps,cpw,has,rhos,epsilon,lambda_ae,dx,lambda_a,Pr,Re
164 dx=0.1;
165 Pr=0.33;Re=0.8;rhos=1.35;epsilon=0.45;hm=0.019739;ki=0.967;lambda_a=0.0277;
166 lambda_ae=(epsilon+0.1*Pr*Re)*lambda_a;
167 cpw=4180;cps=4180;has=28.1;
168
169 f4=ki*has/((1-epsilon)*rhos*(cps+a*cpw))*(c-d)+ki*hm*(a-b)*(2503-2.46*c)&
170 &/((1-epsilon)*rhos*(cps+a*cpw))+epsilon*lambda_ae/((1-epsilon)*&
171 &rhos*(cps+a*cpw)*dx**2)*(d1-2*c+f)
172
173 end function f4
174 end program

```