

MCA102/50

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE DE OUARGLA

**faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur
département des sciences de l'ingénieur**



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT

Spécialité : Génie de procéder

Option : Génie chimique

Présenté par :

- HABIBI ABDEL GHANI

Thème

**CONTRIBUTION A LA MODELISATION NUMERIQUE DES
CINETIQUES DE SECHAGE DES BILLES D'ARGILE**

Soutenu le 20 octobre 2002, à l'université de Ouargla devant le jury :

M.KORICHI
L.SEGNI
S.DOUNITI
A.BOUBEKRI

Président
Examinateur
Examinateur
Encadreur

Année Universitaire 2001/2002



D E D I C A C E

Tous d'abord, je remercie le bon dieu de m'avoir insufflé courage
et persévérance afin que cette étude vous soit présentée
aujourd'hui.

Je dédie ce mémoire spécialement à l'être le plus chère au monde ;
Ma mère «symbole de la pitié et la patience »qui était la source de
mes inspirations et mes forces ;

Je le dédie aussi à mon très cher père, en reconnaissance de son
amour, sa générosité et sa tendresse.

A mes frères «mohamed, Fouzi » et sœurs chacun par son nom.

A mes amis intimes que j'aime et que je respecte.

Tous mes enseignants et camarades.

Habibi abdel ghani



R E M E R C I E M E N T

Je remercie Dieu, le tout puissant, qui m'a donné les forces, la patience durant toute ma formation.

J'exprime mes profonds remerciements à mon encadreur monsieur Boubekri Abdelghani pour l'aide précieuse, les conseils et les encouragements qu'il m'a sans cesse prodigués afin de mener à terme ce travail.

Je remercie vivement mon frère mohamed Pour son aide dans la finalisation de cette étude. J'exprime aussi mes sincères remerciements aux travailleurs de la bibliothèque de l'université de Ouargla, je ne saurai oublier le corps administratif, les enseignants de chimie industrielle, du département des sciences de l'ingénieur.

S O M M A I R E

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale.....	1

Chapitre I Etude Théorique des Cinétiques de Séchage

I.1	Introduction.....	5
I.2	Définition du séchage.....	5
I.3	Caractéristiques de l'air de séchage.....	6
I.3.1	Humidité absolue.....	6
I.3.2	Humidité relative.....	6
I.3.3	Point de rosée.....	6
I.3.4	Enthalpie spécifique de l'air humide.....	7
I.4	Description d'un solide humide.....	7
I.4.1	Le liquide d'hydratation.....	8
I.4.2	Liquide de constitution.....	8
I.5	Modes de séchage.....	8
I.5.1	Séchage naturel à l'air libre.....	8
I.5.2	Séchage artificiel par convection.....	9
I.5.3	Séchage artificiel par conduction.....	9
I.5.4	Séchage artificiel par rayonnement.....	9
I.6	Applications industrielles du séchage :.....	10
I.6.1	Industrie agro-alimentaire.....	10
I.6.2	Industrie papetière.....	10
I.6.3	Industrie du bois.....	10
I.7	Séchoirs industriels.....	11
I.7.1	Séchoir à tambour rotatif à convection.....	11
I.7.2	Séchoir à plateau.....	12
I.8	Obtention des cinétiques de séchage.....	13
I.9	Interprétation des cinétiques de séchage.....	15
I.10	Comportement physique de l'air et du produit au cours du séchage.....	16
I.10.1	Comportement de l'air au cours du séchage.....	16
I.10.2	Comportement du solide au cours de séchage.....	16
I.11	Utilités des cinétiques de séchage.....	18
I.12	Exemples de courbe de cinétique.....	19

Chapitre II Présentation du problème

II.1	Introduction.....	22
II.2	Banc d'essai et mode opératoire.....	22
II.2.1	Description du Banc d'essai.....	22
II.2.2	Description du produit à sécher.....	24
II.2.3	Mode opératoire.....	24
II.3	Présentation des courbes adoptées.....	25

Chapitre III

Recherche des modèles de régression

III.1	Introduction.....	30
III.2	Mesures de la qualité d'une approximation.....	30
III.3	Recherche des régressions des cinétiques de séchage.....	31
III.4	Résultats et discussions	36
III.4.1	Sommaire statistique et test de modélisation.....	39

Chapitre IV

Recherche d'un modèle standard

IV.1	Introduction.....	45
IV.2	Présentation du modèle de MUHLBAUER :.....	45
IV.3	Restrictions et modifications	46
IV.4	présentation des résultats.....	47

Conclusion et Recommandations.....	52
------------------------------------	----

Bibliographie

Annexes

LISTE DES FIGURES

Figures	Pages	
I.1	Représentation schématique d'un solide humide	07
I-2	Séchoir tambour à convection	11
I-3	Séchoir rotatif à plateaux	12
I-4	Courbe de séchage	13
I-5	Courbe de séchage	14
I-6	Courbe de séchage	14
I-7-a	Mécanismes impliqués en période de séchage à vitesse constante	17
I-7-b	Mécanismes impliqués en période de séchage à vitesse décroissante	17
I.8	Cinétique de billes d'argile	19
I.9	cinétique d'une brique d'argile	20
II.1	Banc d'essai pour cinétique de séchage	23
II.2	Cinétique de Séchage à $T = 51^{\circ}\text{C}$	25
II.3	Cinétique de Séchage à $T = 56^{\circ}\text{C}$	26
II.4	Cinétique de Séchage à $T = 28^{\circ}\text{C}$	26
III.1	Organigramme de calcul des erreurs d'approximation	34
III.2	Modèle Exponentiel comparé à l'expérience à $T = 51^{\circ}\text{C}$	36
III.3	Modèle Sigmoidal comparé à l'expérience (Boltzman) à $T = 51^{\circ}\text{C}$	36
III.4	Modèle polynomial comparé à l'expérience à $T = 51^{\circ}\text{C}$	36
III.5	Modèle Exponentiel comparé à l'expérience à $T = 56^{\circ}\text{C}$	37
III.6	Modèle Sigmoidal comparé à l'expérience (Boltzman) à $T = 56^{\circ}\text{C}$	37
III.7	Modèle polynomial comparé à l'expérience à $T = 56^{\circ}\text{C}$	37
III.8	Modèle Exponentiel comparé à l'expérience à $T = 28^{\circ}\text{C}$	38
III.9	Modèle Sigmoidal comparé à l'expérience (Boltzman) à $T = 28^{\circ}\text{C}$	38

III.10	Modèle polynomial comparé à l'expérience à $T= 28^{\circ}\text{C}$	38
III.11	Représentation d'erreurs modèle Exponentiel à $T= 51^{\circ}\text{C}$	40
III.12	Représentation d'erreurs modèle Sigmoïdal(Boltzman) à $T= 51^{\circ}\text{C}$	40
III.13	Représentation d'erreurs modèle polynomial à $T= 51^{\circ}\text{C}$	40
III.14	Représentation d'erreurs modèle Exponentiel à $T= 56^{\circ}\text{C}$	41
III.15	Représentation d'erreurs modèle Sigmoïdal(Boltzman) à $T= 56^{\circ}\text{C}$	41
III.16	Représentation d'erreurs modèle polynomial à $T= 56^{\circ}\text{C}$	41
III.17	Représentation d'erreurs modèle Exponentiel à $T= 28^{\circ}\text{C}$	42
III.18	Représentation d'erreurs modèle Sigmoïdal(Boltzman) à $T= 28^{\circ}\text{C}$	42
III.19	Représentation d'erreurs modèle polynomial à $T= 28^{\circ}\text{C}$	42
IV.1	Cinétique de séchage à $T =51^{\circ}\text{C}$	48
IV.2	Cinétique de séchage à $T =56^{\circ}\text{C}$	48
IV.3	Cinétique de séchage à $T =28^{\circ}\text{C}$	48
IV.4	Courbe d'erreur expérience- modèle standard à $T =51^{\circ}\text{C}$	50
IV.5	Courbe d'erreur expérience- modèle standard à $T =56^{\circ}\text{C}$	50
IV.6	Courbe d'erreur expérience- modèle standard à $T =28^{\circ}\text{C}$	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Pages
II.1	Données expérimentales des cinétiques de séchage	27
III.1	Résultats obtenus par les trois modèles de régression	33
III.2	Sommaire statistique et test de modélisation	39

INTRODUCTION GENERALE

La conception d'un séchoir approprié aux besoins d'une entreprise requiert une foule de données, dont la forme et la grosseur du produit, la distribution désirée des particules et l'estimation de la densité vrac (volume occupé par une certaine quantité de produit). Celles-ci serviront à déterminer les dimensions des convoyeurs de séchage. Il faut aussi connaître le contenu en eau initial du produit de même que le contenu final souhaité, la température maximale d'opération, etc....

Pour établir les conditions de fonctionnement du procédé, les ingénieurs se servent de chartes pour calculer, par exemple, l'influence de la température sur la cinétique de séchage. En représentant le procédé de séchage sur ces graphiques, ils peuvent estimer la grosseur du séchoir, les conditions de fonctionnement, l'humidité et la température de l'air et surtout le temps nécessaire pour obtenir le taux d'humidité désiré.

Les cinétiques de séchage étant d'origine purement expérimentale, leur disponibilité n'est pas toujours assurée. En outre, le besoin en temps et matériel fait que le moyen d'utilisation d'équation modèles devient très essentiel pour assurer que les données représentent le mieux possible les conditions qui seront utilisées en industrie.

L'objectif de notre travail est de faire le choix de modèles d'équations des cinétiques de séchage valables pour les produits solides granulaires, moyennant des données expérimentales existantes. Ce mémoire aborde l'étude proposée à travers quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux quelques rappels sur la théorie et la pratique du séchage par convection.

Dans le second chapitre, on a présenté le problème à étudier en décrivant le banc d'essai sur lequel sont obtenues les cinétiques exploitées ainsi que les données expérimentales de celles-ci.

Le troisième chapitre est consacré à la recherche de modèles de régression pour chacune des cinétiques de séchage relative à une température de l'air.

Le quatrième chapitre présente une tentative de standardisation sur la base de modifications apportées au modèle proposé par «MUHLBAUER» en 1976 pour le cas du maïs.

En fin une conclusion générale récapitule et commente les résultats globaux de ce travail.

Partie Théorique

Chapitre I : Etude théorique des cinétiques de séchage

Chapitre II : Présentation du problème

Chapitre I

Chapitre I

Etude théorique des cinétiques de séchage

Chapitre
1**Etude théorique des cinétiques de séchage****I.1 Introduction**

Au cours de la production de produits solides chimiques, pharmaceutiques, agro-alimentaire, bois...etc. il est souvent nécessaire d'éliminer un liquide imprégnant les corps en vue de :

- Faciliter leur conservation et leur manutention, une fois la production finie.
- Réduire les frais de transport et de stockage pour les produits très humides.
- Poursuivre les opérations de fabrication en cas de matière première.

Très souvent les corps traités ont déjà subi une séparation mécanique de la majeure partie du liquide (liquide d'égouttage), par exemple par filtration ou essorage. Néanmoins l'humidité restante peut être importante notamment lorsqu'il s'agit des produits de petite granulométrie. D'où la nécessité d'éliminer davantage l'humidité des corps en question par une opération thermique qui est le séchage. Le séchage fait intervenir de la chaleur qui permet le départ de l'humidité, il est donc une opération de transfert simultané de matière et de chaleur.[1]

I.2 Définition du séchage

Le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau qu'il contient (ou un autre solvant). On distingue le séchage par ébullition et par entraînement. On parle de séchage par ébullition quand le produit atteint la température d'ébullition de l'eau. Lors du séchage par convection le produit à sécher est mis en contact avec un courant d'air plus ou moins chaud. L'air chaud transmet une part de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface de solide vers l'agent séchant (l'air de séchage).

1.3 Caractéristiques de l'air de séchage

Pour connaître les divers états successivement pris par le gaz durant le séchage, il convient de définir avant toutes les différentes grandeurs qui caractérisent un gaz humide.[2]

1.3.1 Humidité absolue

On appelle humidité absolue ou teneur en eau, la masse d'humidité mélangée à 1 kilogramme de gaz sec.

Cette humidité que nous désignerons par X est parfois appelée rapport de mélange si donc m_v est la masse de vapeur associée à une masse m_g de gaz sec, on a :

$$X = \frac{m_v}{m_g} \quad 1.1$$

1.3.2 Humidité relative :

L'humidité relative, est le rapport de la pression partielle de la vapeur (P_v) dans le mélange, à sa pression de saturation (P_s) dans le même mélange, pris à la même température.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s} \quad 1.2$$

Pour des mélanges non saturés en humidité : $P_v < P_s$ et $\varphi < 1$

Pour des mélanges saturés en humidité : $P_v = P_s$ et $\varphi = 1$

1.3.3 Point de rosée

Si le mélange initial gaz - vapeur d'eau est refroidi sous une pression totale constante, la pression partielle en vapeur d'eau est constante mais la tension de vapeur diminue. Quand celle-ci devient égale à la pression partielle, les premières gouttes de liquide apparaissent, on a alors atteint une température nommée le **point de rosée**.

1.3.4 Enthalpie spécifique de l'air humide

L'enthalpie spécifique de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air. L'enthalpie notée H de 1 kg d'air sec associé à Y kg de vapeur d'eau à $T^\circ\text{C}$ est la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour l'amener de la température de référence 0°C à la température considéré $T^\circ\text{C}$. Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à 0°C .

L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

$$H = C_{p_a}T + Y(L_v + C_{p_v}T) \quad \text{I.3}$$

Avec :

C_{p_a} et C_{p_v} : Sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux

L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C .

On obtient donc $H = 1,01 \cdot T + Y \cdot (2494 + 1,92 \cdot T)$ avec H en $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$

1.4 Description d'un solide humide

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la Figure I.1

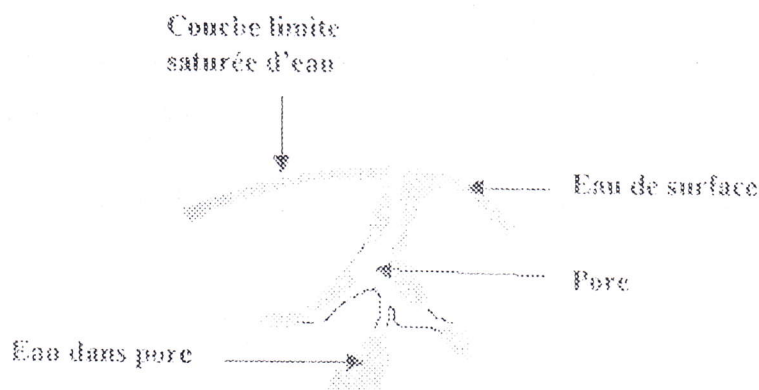


Figure I.1 :Représentation schématique d'un solide humide [10]

L'humidité d'un solide peut consister en un liquide d'hydratation ou en un liquide de constitution.

1.4.1 Le liquide d'hydratation

Le liquide d'hydratation est retenu :

- Soit sous forme d'un film adhérent à la surface externe du solide sous l'action des forces superficielles.
- Soit sous l'action des mêmes forces superficielles à l'intérieur des interstices ou des pores relativement larges du solide.
- Soit, d'une façon plus intime, sous l'action de forces capillaires, à l'intérieur des pores fins du solide. Le séchage a pour but d'éliminer plus ou moins complètement le liquide d'hydratation.[2]

1.4.2 Liquide de constitution

Le liquide de constitution (par exemple l'eau de cristallisation) participe à la structure moléculaire du solide. Son élimination, plus ou moins complète, constitue une déshydratation, et n'est pas recherchée lors de séchage. La déshydratation est accompagnée d'une modification de la structure moléculaire primitive du produit.[2]

1.5 Modes de séchage

On rencontre une grande diversité dans les modes de séchage :

1.5.1 Séchage naturel à l'air libre

Le séchage naturel est obtenu par exposition de la matière 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 principal inconvénient de cette technique est la faible capacité de saturation de l'air ambiant et surtout la faible différence de pression partielle de la vapeur d'eau entre celle de l'air et celle du produit. Par ailleurs certains produits ne sèchent correctement qu'au-delà d'un écart de pression minimal. S'il n'est pas atteint, il faudra attendre de meilleures conditions climatiques ou changer de technique.

1.5.2 Séchage artificiel par convection

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique: on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée en se transformant en un air humide refroidi .

1.5.3 Séchage artificiel par conduction

Dans ce mode de séchage la matière à sécher se trouve en contact avec une paroi solide, portée à une température élevée par circulation d'un fluide caloporteur (fumées, vapeur d'eau, eau chaud..). Sous l'action de la chaleur ainsi transmise par conduction, le liquide s'évapore ou se vaporise selon que la température est inférieure ou supérieure au point d'ébullition.

Les vapeurs formées sont soit aspirées (cas du séchage sous pression réduite qui abaisse la température d'ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est très faible par rapport à celui utilisé dans le cas d'un Chauffage par convection. La couche de solide en contact avec la paroi est d'abord séchée puis il y a ensuite une augmentation de l'épaisseur de la couche sèche en cours d'opération.[2]

1.5.4 Séchage artificiel par rayonnement

Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées

- soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes)
- Soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

En infrarouge le chauffage se manifeste sur des épaisseurs très faibles (500 μ m). Avec des micro-ondes on peut sécher à des épaisseurs plus importantes. Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau: l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires. Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau. Le séchage par micro-ondes est encore peu fréquent dans l'industrie chimique.

1.6 Applications industrielles du séchage :

Le champ d'application du séchage est particulièrement large, il intervient dans de nombreuses industries :

1.6.1 Industrie agro-alimentaire

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. On compte plus de 200 types de séchoirs industriels dans le secteur alimentaire. Parmi plusieurs exemples typiques où intervient le séchage on cite :

- Les pâtes alimentaires
- Le sucre cristallisé obtenu par évaporation
- Les légumes (pois,...) et fruits secs (raisins, abricots...)
- La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage (café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices...).
- Certains produits en poudre : cacao, lait,...

1.6.2 Industrie papetière

Le papier est obtenu par séchage de la pâte à papier sur des rouleaux rotatifs chauffés.

1.6.3 Industrie du bois

Le bois qui vient d'être abattu et scié contient un fort degré d'humidité qui interdit son utilisation immédiate dans les conditions correctes, sinon on s'expose à des changements de taille et de forme du bois.

D'autres applications du séchage peuvent être citées :

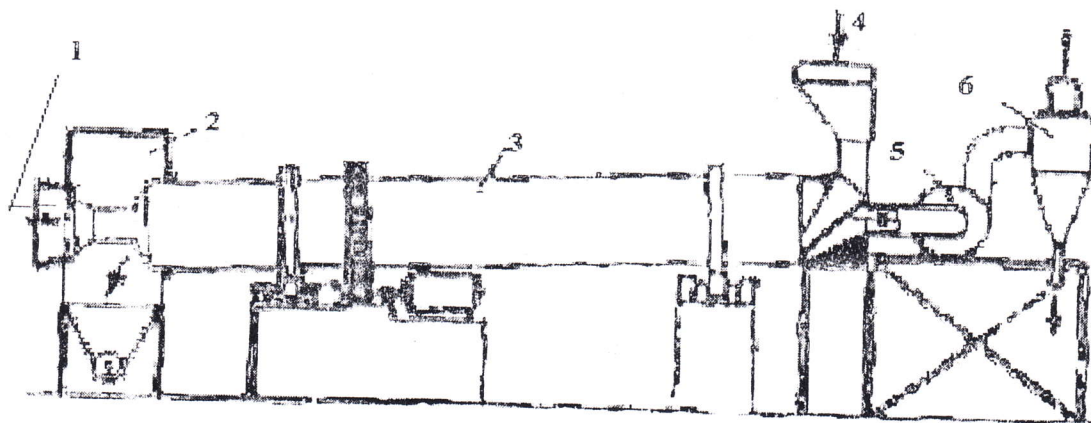
- Matériaux de construction : Briques, carrelages,...etc.
- L'industrie céramique : Assiettes, bols, plats... etc
- La biotechnologie et l'industrie pharmaceutique :
 - Levure en poudre
 - Antibiotiques
 - Séchage de principes actifs sous forme de poudre.

1.7 Séchoirs industriels

La grande variété des matières soumises au séchage dans l'industrie explique que l'on trouve un très grand nombre de modèles de séchoirs. La classification des appareils peut s'effectuer suivant le procédé (continu, discontinu), le mode de séchage (convection, conduction, rayonnement), ou le type de produits traités (solides en blocs, poudre, pâte). Si on adopte le classement selon le mode de séchage (par convection), On distingue pour les sécheurs ceux fonctionnant par léchage (courant de gaz parallèle à la matière) et ceux fonctionnant par traversée (courant de gaz perpendiculaire à la matière). Deux exemples importants de sécheurs peuvent être indiqués :

1.7.1 Séchoir tambour rotatif à convection

La partie essentielle du séchoir à tambour est un tube métallique cylindrique (tambour) dont le diamètre est compris entre 0,5 et 3m et la longueur entre 5 et 30m. Le tube est légèrement incliné sur l'horizontale vers la sortie et tourne lentement autour de son axe. Cela permet au produit à sécher de se déplacer à travers le tube. A l'intérieur du tambour sont disposées des chicanes de type divers (ailettes, cloisons, etc...) qui désertent la matière ce qui augmente et renouvelle la surface de contact avec le gaz. Cet appareil convient en particulier pour le séchage des solides en grain et le séchage de certaines suspensions. [1]



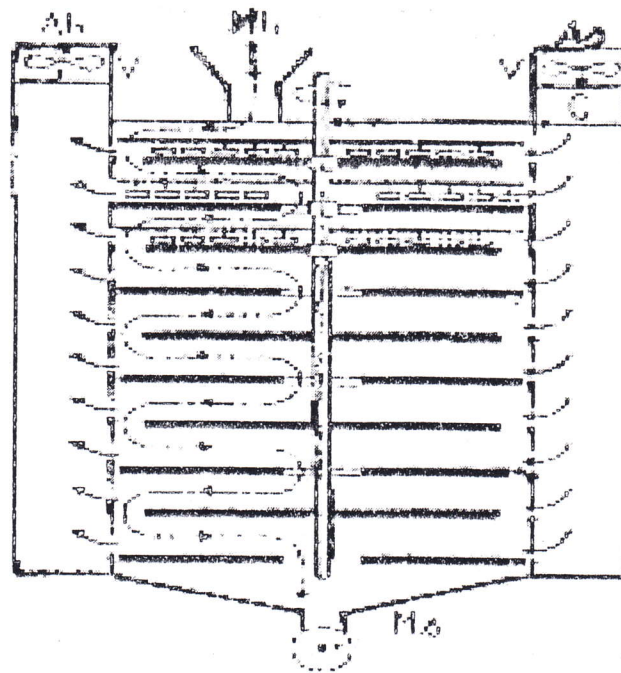
- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| 1 : Entrée de l'air humide | 4 : Entrée du produit humide |
| 2 : chambre de sortie du produit sec | 5 : ventilateur |
| 3 : tambour rotatif | 6 : Aérocyclone |

Figure I-2 : Séchoir tambour à convection [1]

I.7.2 Séchoir à plateau

Cet appareil comporte une série de plateaux annulaires horizontaux, et solidaires d'un arbre central. Les plateaux sont soumis à un mouvement lent de rotation, un système de bras fixes munis de pals d'orientation réglable dirige la matière, selon le plateau, alternativement dans une direction centrifuge vers une ouverture centrale du plateau.

La matière circule par gravité d'un étage à l'autre, durant son parcours elle est soumise à l'action d'un courant d'air chaud.[1]



Ab : air humide	Mh : matière humide
As : air sec	Ms : matière sèche
C : réchauffeur	V : ventilateurs

Figure I-3 : Séchoir rotatif à plateaux [1]

I.8 Obtention des cinétiques de séchage

La courbe de séchage d'un solide peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température, sont contrôlés et maintenus constants.

Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu. En portant les taux d'humidité du produit (X) (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps (t), on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la Figure I-4

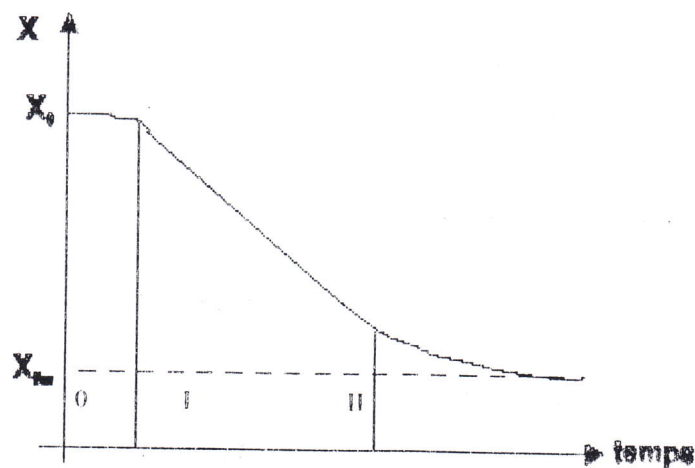


Figure I.4 : Courbe de séchage $X = f(t)$

On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation. En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $X = f(t)$, donc la vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en fonction du temps.

On peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure et donnée sur la figure I-5

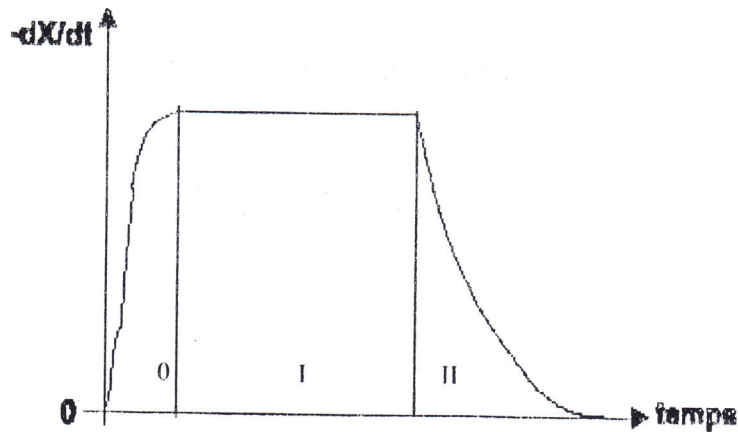
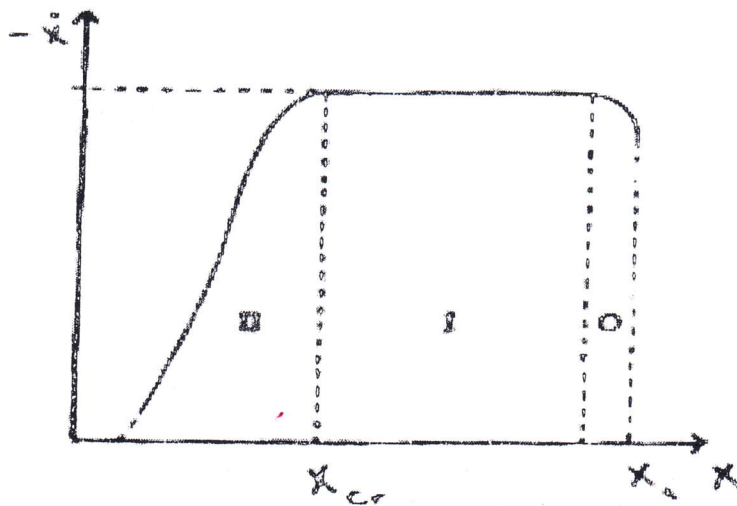


Figure I.5 : Courbe de séchage $\frac{-dX}{dt} = f(t)$

Krischer [7] a proposé un autre mode de représentation la vitesse de séchage $\left(\frac{-dX}{dt}\right)$ en fonction du taux d'humidité X ce qui conduit à la courbe représentée sur la figure I-6



X_{cr} : Teneur en eau critique X_i : Teneur en eau initial

Figure I.6 : Courbe de séchage $\frac{-dX}{dt} = f(X)$

Ces trois types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage.

I.9 Interprétation des cinétiques de séchage

Lorsqu'on examine les cinétiques de séchage des solides par convection, on constate que la courbe peut être divisée a priori en trois périodes :

- Période 0 (période de mise en température) :

le produit est plus froid que l'air de séchage et la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit est faible, l'air chaud entraîne une élévation de température du produit jusqu'à ce que le transfert de chaleur compense exactement le transfert de matière

- Période I (période de séchage à allure constante) :

Cette période correspond à l'évaporation du liquide superficiel. Le liquide remonte en surface sous l'action des forces d'aspiration des capillaires, et il se renouvelle à une vitesse suffisante pour former une pellicule continue et pour compenser l'évaporation.

Pendant toute cette période la tension de vapeur du liquide mouillant le solide reste égal à la tension de vapeur du liquide pur à la même température. La vitesse de séchage n'est, dans ce cas, que la vitesse d'évaporation du liquide dans les mêmes conditions opératoires. Cette période se poursuit tant que la migration de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit suffit à compenser l'évaporation de l'eau en surface.

- Période II (Période de ralentissement progressif de la vitesse de séchage) :

Lorsque l'humidité superficielle du solide n'est pas renouvelée à une allure suffisante pour maintenir en surface une pellicule continue du liquide, la vitesse cesse d'être constante. A cet instant, appelé point critique qui marque la fin de la période de séchage à vitesse constante, correspond une certaine valeur X_{cr} de l'humidité (humidité critique). Peu après le point critique, l'influence de la diffusion du liquide à travers les pores et les interstices du solide commence à se manifester et la vitesse de séchage n'est plus constante. Cette vitesse décroît d'abord linéairement avec l'humidité, car pendant un certain temps, la surface d'évaporation est encore partiellement recouverte

de liquide. Puis la diffusion du liquide devenant le phénomène prépondérant, la vitesse de séchage diminue, plus ou moins rapidement selon le solide. A la fin de cette période, le produit est en équilibre avec l'air.

Souvent cette dernière phase est décomposée en deux sous-phases distinctes suivant le caractère hygroscopique ou non hygroscopique du solide.

1.10 Comportement physique de l'air et du produit au cours du séchage

1.10.1 Comportement de l'air au cours du séchage

Le séchage artificiel des produits est obtenu par convection forcée d'air au travers d'une couche de produit. Le passage de l'air dans le matériau est rendu possible par le fait que le matériau en masse constitue un produit non compact, présentant un coefficient de porosité E .

Le phénomène de séchage peut être interprété comme le résultat de transferts simultanés de chaleur et de matière :

- l'énergie thermique nécessaire à l'évaporation de l'eau est rapportée par l'air (transfert de chaleur du fluide vers le produit à sécher)
- l'eau évaporée du produit est ensuite absorbée et évacuée par cet air (transfert de masse du produit vers le fluide de séchage) [8]

1.10.2 Comportement du solide au cours du séchage

Sous l'action d'un courant d'air chaud, le produit humide cède son eau à l'air puisqu'il règne une pression partielle de vapeur d'eau plus faible dans l'air, qu'à la surface de produit. Les différents mécanismes qui gouvernent la migration de l'humidité à l'intérieur des produits peuvent être groupés sous le terme général de transfert de masse par convection et diffusion.

Les différentes phases de mouvement de l'humidité sont illustrées dans la figure 1.7.a

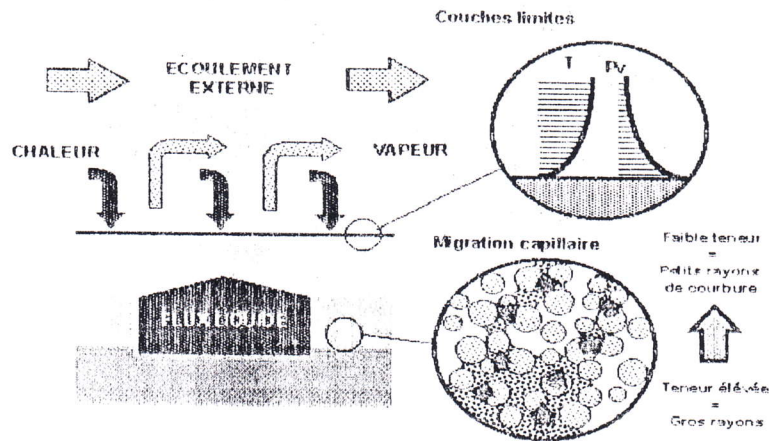


Figure 1-7-a : Mécanismes impliqués en période de séchage à vitesse constante [11]

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.

Deux 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 aucun changement de phase n'a lieu au sein du produit, le milieu est isotherme tant que dure cette phase.

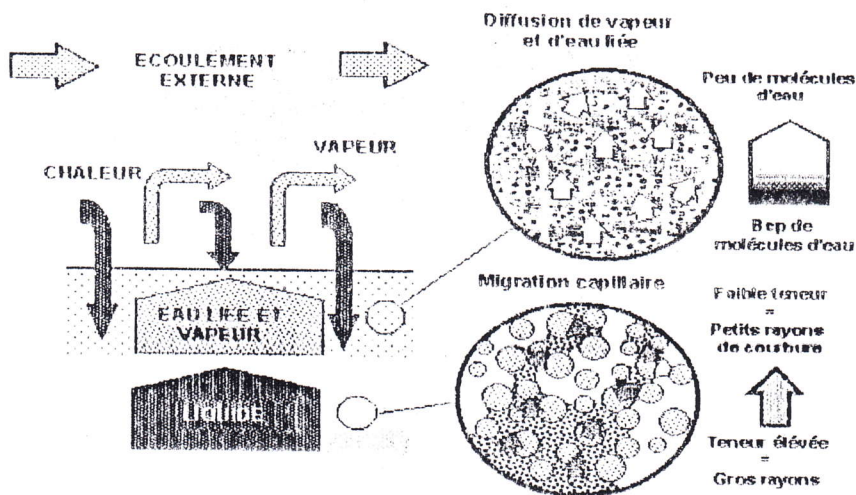


Figure 1-7-b : Mécanismes impliqués en période de séchage à vitesse décroissante [11]

Lorsque la surface du produit atteint le domaine hygroscopique, la pression de vapeur devient inférieure à la pression de vapeur saturante. En conséquence, 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 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.

Deux zones se distinguent alors dans le milieu poreux : une zone interne dans laquelle la migration liquide, la plus efficace, est le mécanisme dominant et une zone périphérique, plus sèche, dans laquelle seule la diffusion de vapeur et/ou d'eau liée n'est possible. Durant cette période, un flux thermique doit exister dans le milieu de façon à chauffer le milieu et à apporter l'énergie à l'endroit où le liquide est évaporé.

Bien entendu, la région de migration liquide s'amenuise et finit par disparaître. Le séchage est terminé quand la température atteint la température sèche de l'écoulement et que la teneur en eau est partout égale à la teneur en eau d'équilibre du produit.

I.11 Utilités des cinétiques de séchage

Les courbes cinétiques de séchage peuvent être utilisées à plusieurs fins dont on cite principalement :

- Fonctionnement d'une installation de séchage (paramètre de séchage pour chaque produit).
- Dimensionnement d'un séchoir.
- Simulation numérique des processus de séchage.

1.12 Exemples de courbe de cinétique [8]

- La figure(1.8) représente deux cinétiques correspondantes chacune à une valeur différente de la température de l'air de séchage($T_a=56^\circ\text{C}$ et $T_b=28^\circ\text{C}$), les autres paramètres caractéristiques de l'air étant maintenus constant($V=0,7\text{m/s}$, $HR=54\%$).

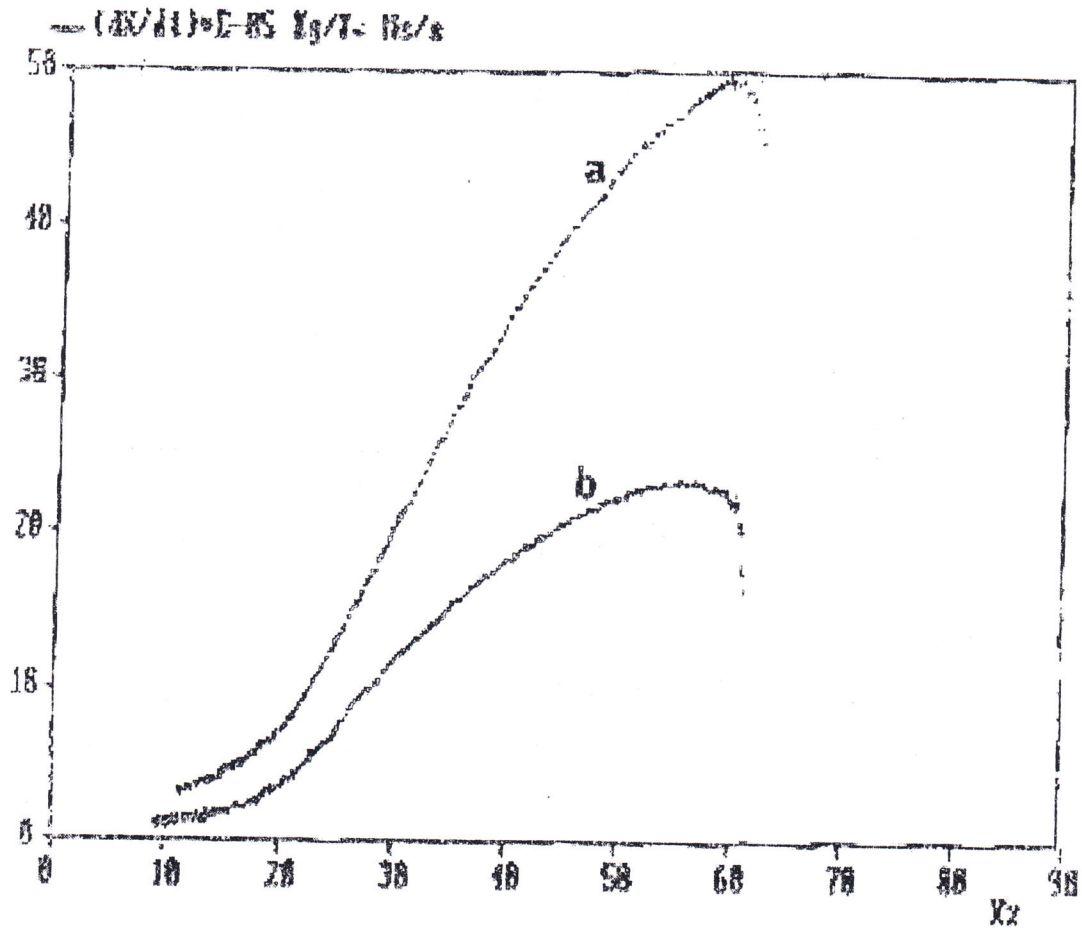


Figure 1.8 : Cinétiques de billes d'argile

- La figure (1.9) représente la cinétique d'une brique d'argile obtenue avec les caractéristiques de l'air séchant ($T_a=51^\circ\text{C}$, $V=0,7\text{m/s}$, $\text{HR}=54\%$)

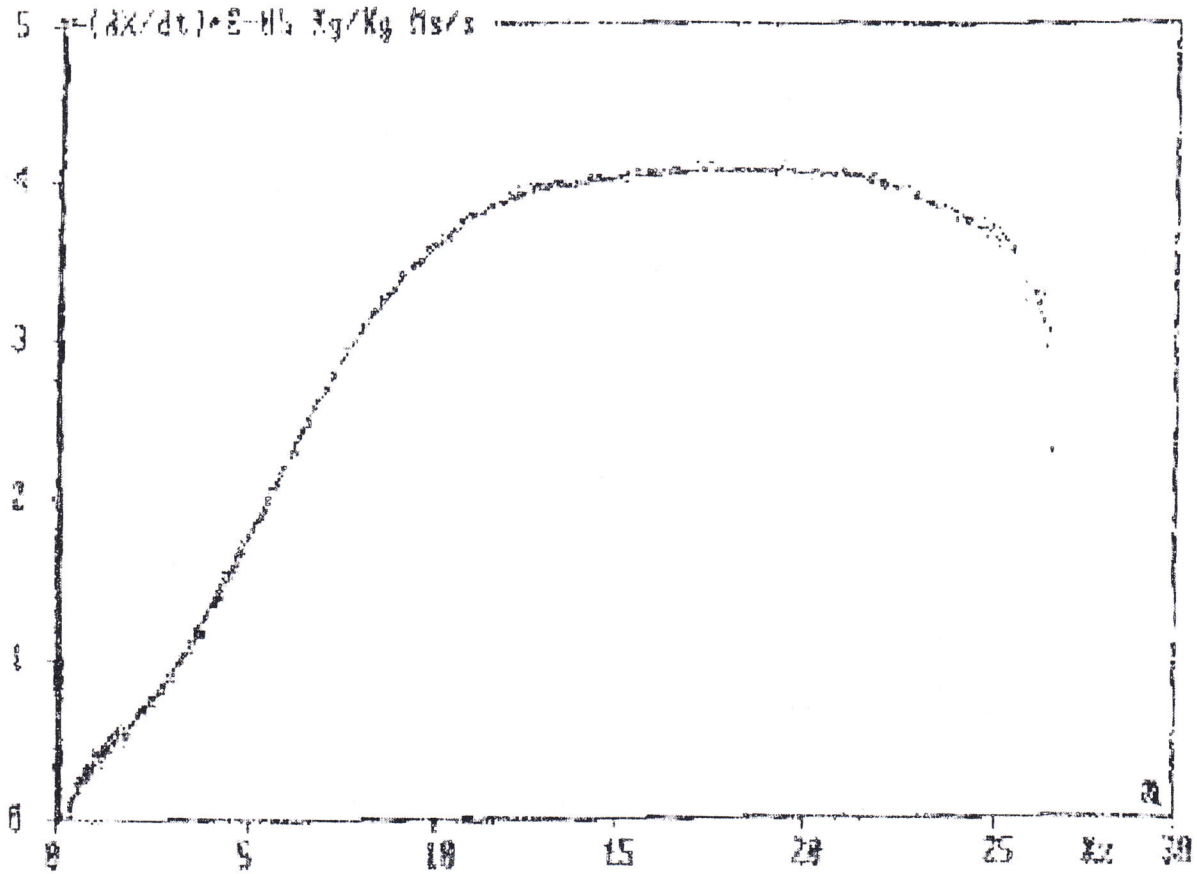


Figure 1.9 : cinétique d'une brique d'argile

Chapitre III

Chapitre II

Présentation du problème

**Chapitre
2****Présentation du problème****II.1 Introduction**

Dans les applications diverses où intervient la technique de séchage, il se trouve indispensable de disposer des cinétiques de séchage. La connaissance des cinétiques est alors nécessaire soit pour concevoir une nouvelle installation de séchage ou pour déterminer les conditions optimales d'une installation existante. Vu que les moyens d'expérience ne sont pas toujours disponibles ou nécessitent des coûts élevés, le recours au moyen de la modélisation présente une importance majeure.

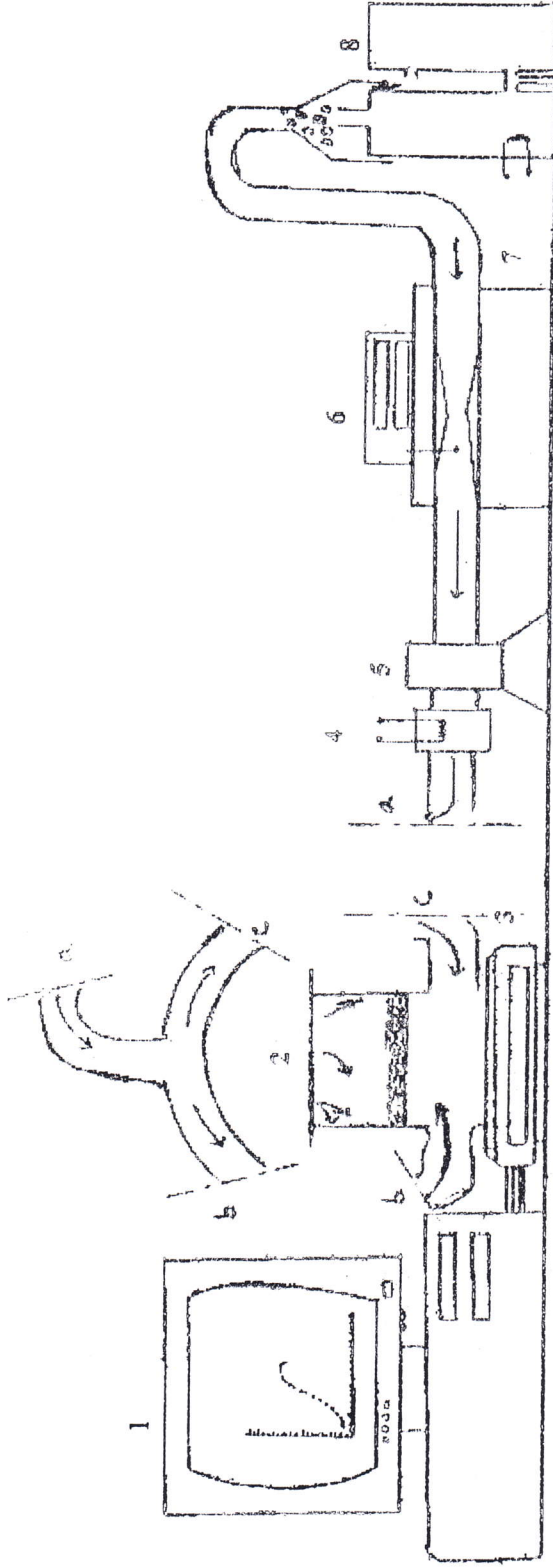
Dans la suite de notre travail on se propose d'exploiter trois courbes cinétiques de séchage de billes d'argile expansée, obtenues sur un banc d'essai au laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques de l'université de Poitiers par (H. Ben Moussa) et (J-P. FOIR), en vue de rechercher des modèles de régressions pour chacune des courbes et d'essayer de proposer un modèle standard valable à plusieurs températures de l'air de séchage.

II.2 Banc d'essai et mode opératoire [8]**II.2.1 Description du banc d'essai**

Dans ce paragraphe il convient de décrire brièvement le banc d'essai expérimental sur lequel sont obtenues les cinétiques de séchage à exploiter.

La composition du dispositif expérimental est la suivante :

- Micro-ordinateur
- Module de séchage
- Balance électronique
- Batterie de chauffage
- Ventilateur centrifuge
- Micro-manomètre
- Tube de venturi
- Un humidificateur



- 1 : Micro-ordinator
- 2 : Panier
- 3 : Balance électronique
- 4 : Batterie de chauffage

- 5 : Ventilateur centrifuge
- 6 : Micro-manomètre
- 7 : Tube
- 8 : Un humidificateur

Figure II.1: Banc d'essai pour cinétique de séchage [8]

II.2.2 Description du produit à sécher

II- Benmoussa a effectué de nombreuses expériences de séchage sur des billes d'argiles. son choix est porté sur ce matériau car ne se dégrade pas au cours du temps et permet des essais répétitifs.

Avant chaque manipulation, un échantillon de billes d'argile est humidifié, en les laissant tremper plusieurs jours dans l'eau (environ un mois) à fin que les petits pores se remplissent, cette technique donne une teneur en eau entre (34% - 45%). L'immersion des billes d'argiles dans l'eau est insuffisante, car l'eau emprisonne, dans les pores de l'air qui s'oppose à la saturation. Donc la saturation ne peut être obtenue qu'au moyen de techniques spéciales telles que : la saturation par le vide qui peut provoquer une teneur en eau de 82%. Cette remarque est importante du fait que les courbes de séchage dépendent de l'humidité initiale de l'échantillon.

Les conditions d'expériences pour obtenir les lois de séchage du produit en couche mince doivent prévoir que l'échantillon du produit ne doit pas être disposé en couche monoparticulaire car la vitesse à travers les particules ne sera pas uniforme et que la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air doivent être bien contrôlées. Avant chaque manipulation, un échantillon de bille sèches (environ 400g) est mis dans le panier. lorsque la température de l'ensemble du système est stable, les billes séchées sont enlevées et remplacées par le même poids de billes humides et ceci pour que l'opération soit faite avec la même vitesse d'air. La teneur en eau initiale et finale du produit est déterminée par une simple pesé avant et après l'opération de séchage.

II.2.3 Mode opératoire

Un humidificateur composé de deux cuves parallélépipédiques contenant des résistances électriques réglables, permet la production de vapeur. Celle-ci est évacuée dans un tube de venturi au-dessus duquel est branché un micromanomètre. le venturi permet la mesure de la vitesse de l'air qui parvient de l'humidificateur, ensuite l'air est propulsé par un ventilateur, équipé par une cartouche chauffante avec un système de

régulation de température. L'air passe alors dans une résistance de chauffage avant d'être évacué dans un module de séchage, composé de deux parties cylindriques :

- Une partie supérieure où le matériau à sécher est stocké.
- Une autre partie inférieure où l'air de séchage arrive d'une façon axisymétrique.

Le passage de l'air au niveau du module de séchage provoque le séchage des billes d'argiles qui se manifeste par une perte de masse, contrôlable à l'aide d'une balance électronique de précision de 0.01g. Le dispositif est contrôlé par un micro-ordinateur qui permet la mesure des : masse, température, humidité, simultanément. Une visualisation sur écran permet de suivre l'évolution de la masse et la température de produit au cours de temps. Les résultats acquis sont stockés et représentés sous formes de courbes cinétiques du type : $\dot{X} = F(X)$ avec : $X = \frac{m_h - m_s}{m_s}$

m_h et m_s : Expriment les masses initiales et celle à l'instant (t) de l'échantillon à sécher.

II.3 Présentation des courbes adoptées

On va représenter dans ce titre les cinétiques de séchage des billes d'argiles expansées, adoptées pour l'exploitation dans les chapitres suivants.

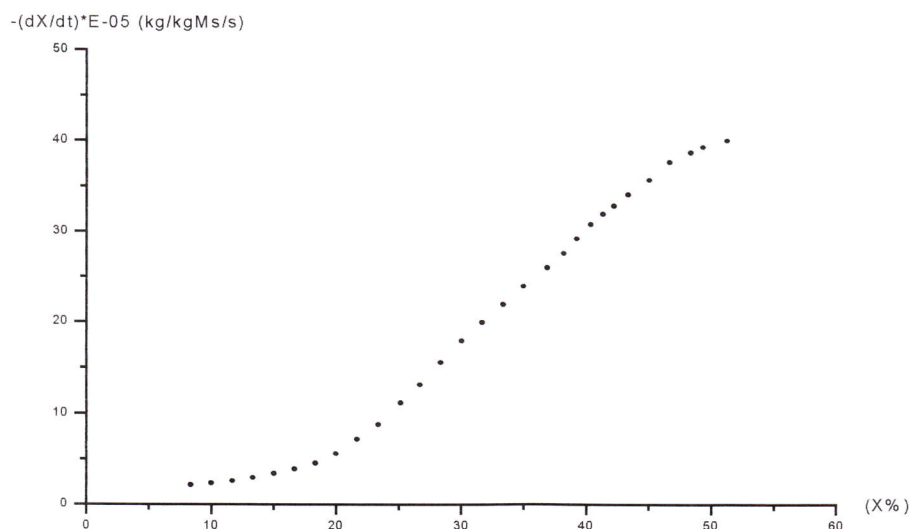


Figure II.2 : Cinétique de Séchage à T = 51°C

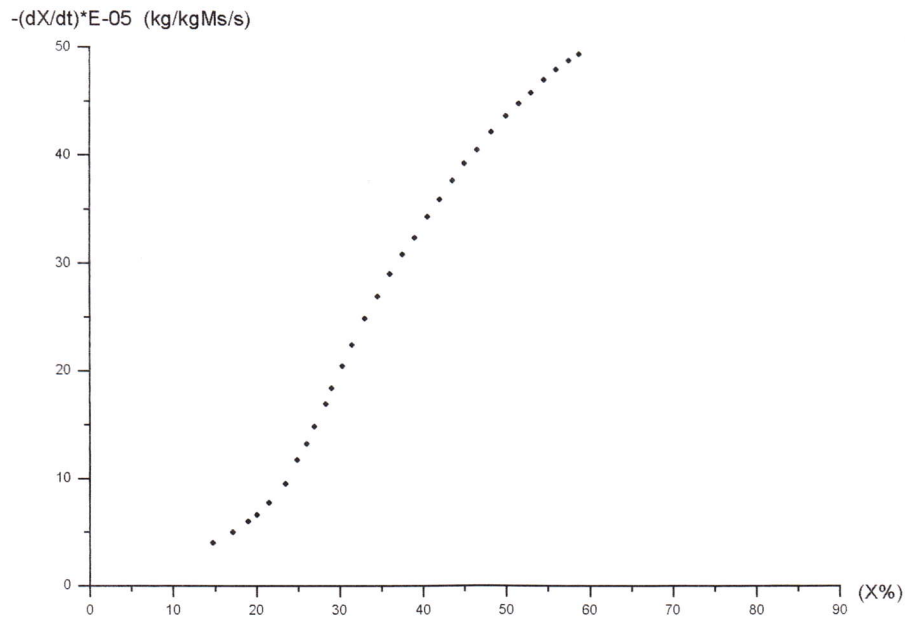


Figure II.3 : Cinétique de Séchage à T = 56°C

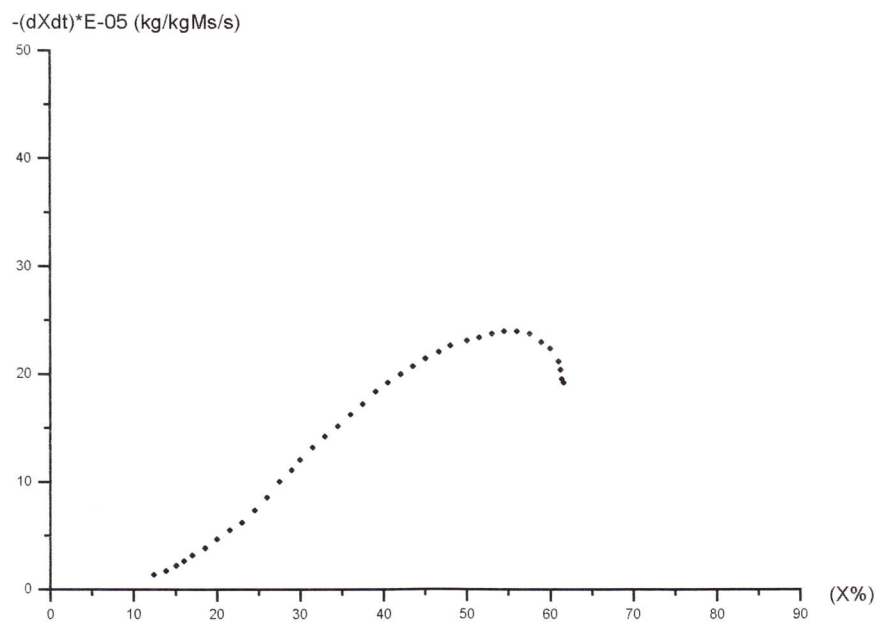


Figure II.4 : Cinétique de Séchage à T = 28°C

Pour mieux exploiter ces courbes expérimentales, on a procédé à un relevé graphique des points $\left(X, \frac{-dX}{dt}\right)$, sous forme convenable à la manipulation par les logiciels de graphisme (EXCEL, ORIGIN).

Avec : X : Humidité relative

$\frac{dX}{dt}$: Vitesse de séchage

T = 51°C		T = 56°C		T = 28°C	
X(%)	-(dx/dt)*E+05	X(%)	-(dx/dt)*E+05	X(%)	-(dx/dt)*E-05
08,33333	02,20000	14,73000	04,00000	12,42000	01,41000
10,00000	02,40000	17,10000	05,00000	13,84000	01,78000
11,66667	02,65000	18,94000	06,00000	15,07000	02,23000
13,33333	03,00000	20,00000	06,60000	16,00000	02,65000
15,00000	03,45000	21,50000	07,72000	17,00000	03,20000
16,66667	03,92000	23,45000	09,52000	18,50000	03,85000
18,33333	04,58000	24,83000	11,70000	20,00000	04,72000
20,00000	05,60000	26,00000	13,20000	21,50000	05,50000
21,66667	07,20000	26,96000	14,80000	23,00000	06,25000
23,33333	08,80000	28,33000	16,90000	24,50000	07,39000
25,15000	11,20000	29,00000	18,40000	26,00000	08,57000
26,66667	13,21000	30,28000	20,40000	27,50000	10,06000
28,33333	15,60000	31,50000	22,40000	29,00000	11,13000
30,00000	18,00000	33,00000	24,84000	30,00000	12,06000
31,66667	20,00000	34,50000	26,90000	31,50000	13,20000
33,33333	22,00000	36,00000	29,00000	33,00000	14,23000
35,00000	24,00000	37,50000	30,76000	34,50000	15,20000
36,87000	26,00000	39,00000	32,30000	36,00000	16,27000
38,18000	27,60000	40,50000	34,32000	37,50000	17,20000
39,22000	29,20000	42,00000	35,92000	39,00000	18,40000
40,36000	30,80000	43,50000	37,60000	40,50000	19,20000
41,33333	31,92000	45,00000	39,16000	42,00000	20,00000
42,22000	32,85000	46,50000	40,40000	43,50000	20,72000
43,33333	34,12000	48,19000	42,08000	45,00000	21,40000
45,00000	35,71000	50,00000	43,56000	46,64000	22,00000
46,66667	37,63000	51,50000	44,80000	48,00000	22,64000
48,33333	38,69000	53,00000	45,80000	50,00000	23,07000
49,33333	39,29000	54,50000	46,95000	51,50000	23,40000
51,27000	40,00000	56,00000	47,93000	53,00000	23,72000
		57,50000	48,76000	54,50000	24,00000
		58,75000	49,38000	56,00000	24,00000

Tableau II.1 : Données expérimentales des cinétiques de séchage

Partie Pratique

Chapitre III : Recherche des modèles de régression

Chapitre IV : Recherche d'un modèle standard

Chapitre III

Chapitre III

Recherche des modèles de régression

III.1 Introduction

Les ingénieurs ont souvent à prendre des décisions au sujet des phénomènes dont ils ne connaissent le comportement qu'à partir de données expérimentales.

Dans certains cas, en physique par exemple, la connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle mathématique précis, déterministe que l'on nomme modèle de connaissance. Mais souvent, on ignore les mécanismes précis du phénomène ou encore les mesures effectuées sur le phénomène peuvent être influencées par les variations aléatoires de variables incontrôlables. On peut alors proposer un modèle dont on approche un ensemble de données expérimentales $\{Y_{exp}(X_i)/i=1,n\}$ par une fonction analytique Y_{est} ou $Y_{est}(X_i)$.

III.2 Mesures de la qualité d'une approximation

Quand on approche un ensemble de données numériques $\{Y_{exp}(X_i)/i=1,n\}$ par une Fonction analytique (Y_{est}), on veut faire une bonne approximation. Par bonne approximation, nous entendons que $(Y_{exp}-Y_{est})$ doit être petite dans un certain sens. La distance entre la fonction réelle (Y_{exp}) et son modèle (Y_{est}) peut être mesuré par plusieurs normes. Les normes les plus courantes pour l'approximation d'un ensemble des données numériques sont :

La norme de laplace :

$$\|Y_{exp}-Y_{est}\|_1 = \sum_{i=1}^n |Y_i exp - Y_i est| \quad \text{III.1}$$

La norme euclidienne :

$$\|Y_{exp}-Y_{est}\|_2 = \sum_{i=1}^n (Y_i exp - Y_i est)^2 \quad \text{III.2}$$

La norme de MINMAX de laplace-Tchebychev :

$$\|Y_{exp}-Y_{est}\|_\infty = \text{MAX} |Y_i exp - Y_i est| \quad \text{III.3}$$

Par définition la meilleure approximation au sens de la méthode des moindres carrés sera celle qui minimisera la norme euclidienne (III.2).[3]

Donc la fonction objective demandée pour la minimisation d'erreur est la fonction

$$Z = \sum_{i=1}^n (Y_i \text{ exp} - Y_{i, \text{est}})^2 \quad \text{III.4}$$

Pratiquement on procédera comme suit :

Soit un ensemble de n valeurs X_i d'une grandeur X auxquelles correspond un ensemble de valeurs Y_i d'une grandeur Y .

On veut représenter la liaison entre X et Y par une fonction analytique Y_{est} . Par le moyen des logiciels (ORIGIN 5, EXCEL) et manipulant les données expérimentales des trois cinétiques de séchage des billes d'argile, nous dégagerons en premier lieu un nombre de choix de modèles de régression en se basant sur l'indication d'erreur donnée par chaque logiciel. Dans cette première étape on retiendra trois différents modèles d'équations parmi les quels sera fait un choix sur la base de calcul de minimisation d'erreurs (méthode des moindres carrés). D'autre part concernant les courbes expérimentales certaines adaptations sont nécessaires, par exemple l'élimination de la phase de mise à température.

III.3 Recherche des régressions des cinétiques de séchage

Dans ce travail nous nous sommes basé sur trois modèles de régression qui ont présenté le minimum d'erreur indiqué par le logiciel (ORIGIN):

Les modèles de régression retenus sont les suivants :

▪ Modèle Exponentiel :

$$Y_{\text{est}} = Y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-(X - X_0)}{t} \right)} \quad \text{III.5}$$

avec :

Y_{est} : vitesse de séchage

X : teneur en eau (kg eau / kg matière sèche)

- Modèle Sigmoidal de Boltzman :

$$Y_{est} = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\left(\frac{(X - X_0)}{dX}\right)}} + A_2 \quad \text{III.6}$$

- Modèle Polynomial

$$Y_{est} = A + B_1X + B_2X^2 + B_3X^3 \quad \text{III.7}$$

Les paramètres de régression obtenus à partir de la manipulation des données expérimentales des trois cinétiques, utilisant la fonctionnalité «analyse» offerte par le logiciel (ORIGIN), sont données dans le tableau ci-après :

Cinétique de séchage	Modèle de régression	Paramètre de régression										
		Y0	X0	A1	A2	dx	A	B1	B2	B3	t1	
T=51°C	Exponentiel	39,1675	8,3333	-36,9939	---	---	---	---	---	---	---	27,1627
	Sigmoidal (Boltzman)	---	33,68	-0,29385	44,5	7,9493	---	---	---	---	---	---
	Polynomial	---	---	---	---	---	11,3495	-1,72918	0,09144	-9,21E-04	---	---
T=56°C	Exponentiel	112,167	14,73	-112,525	---	---	---	---	---	---	---	72,6308
	Sigmoidal (Boltzman)	---	32,956	-4,8891	53,55	32,956	---	---	---	---	---	---
	Polynomial	---	---	---	---	---	3,78309	-0,97041	0,07107	-7,09E-04	---	---
T=28°C	Exponentiel	53,9919	12,42	-54,2629	---	---	---	---	---	---	---	67,2627
	Sigmoidal (Boltzman)	---	30,037	-1,7214	25,85	8,5197	---	---	---	---	---	---
	Polynomial	---	---	---	---	---	1,80591	-0,48097	30,037	8,5197	---	---

Tableau III.1: Résultats obtenus par les trois modèles de régression

Organigramme de calcul d'erreurs :

Pour calculer l'erreur d'approximation de chaque modèle de régression nous avons conçu un programme en Fortran 90 version (4.0) dont la structure est montrée sur l'organigramme suivant :

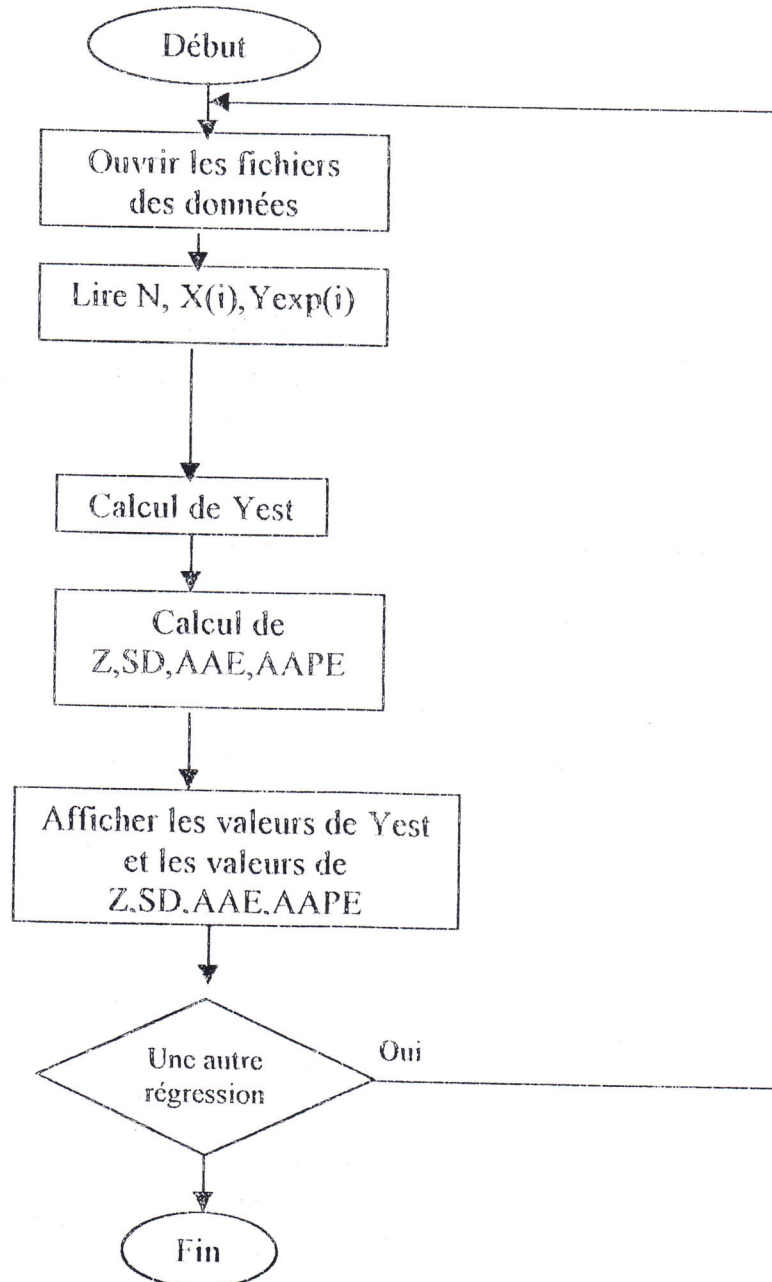


Figure III.1: Organigramme de calcul des erreurs d'approximation

Les formules d'erreurs utilisées sont celles généralement utilisées par différents auteurs et sont données par les relations suivantes :

Déviatoin standard (SD) :

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (X_{est} - X_{exp})^2}{N}} \quad \text{III.8}$$

Erreur approximative absolue (AAE) :

$$AAE = \frac{1}{N} \sum |X_{est} - X_{exp}| \quad \text{III.9}$$

Le pourcentage d'erreur approximative absolue AAPE(%) :

$$AAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|X_{est} - X_{exp}|}{X_{exp}} * 100 \quad \text{III.10}$$

La norme euclidienne (Z) est donnée par la formule (III.4)

III.4 Résultats et discussions

Cinétique de séchage à T=51°C

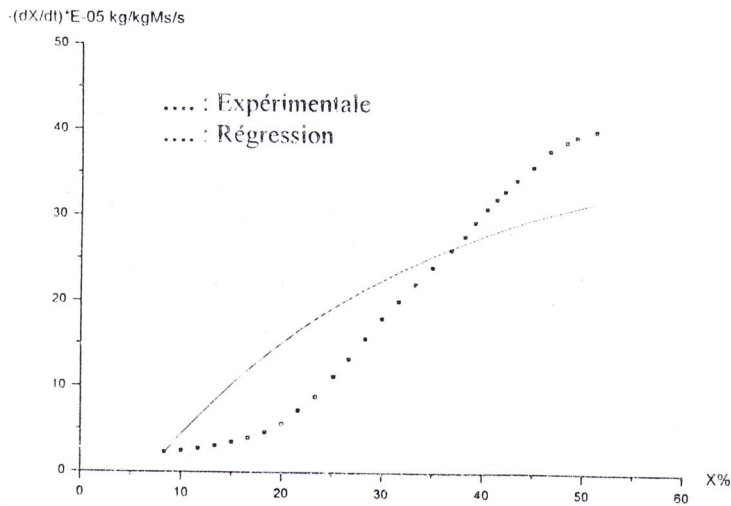


Figure III.2 : Modèle Exponentiel comparé à l'expérience

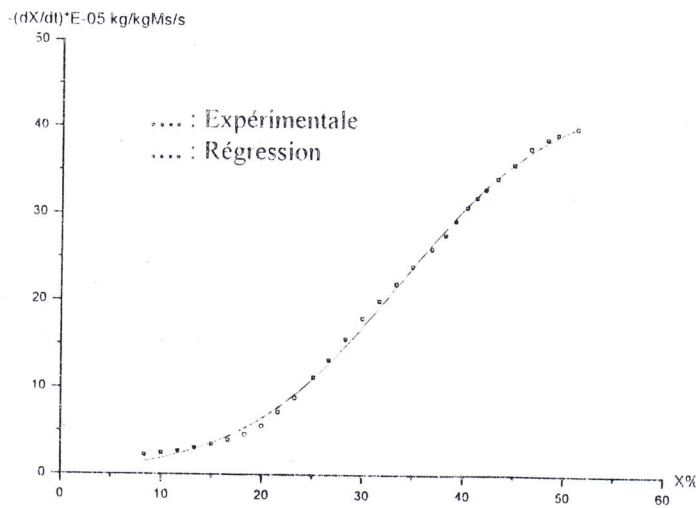


Figure III.3 :Modèle Sigmoidal (Boltzman) comparé à l'expérience

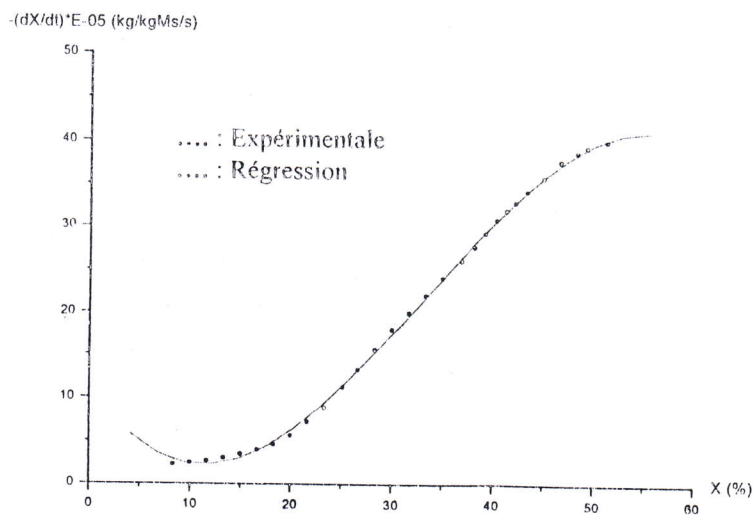


Figure III.4 :Modèle Polynomial comparé à l'expérience

Cinétique de séchage à T=56°C :

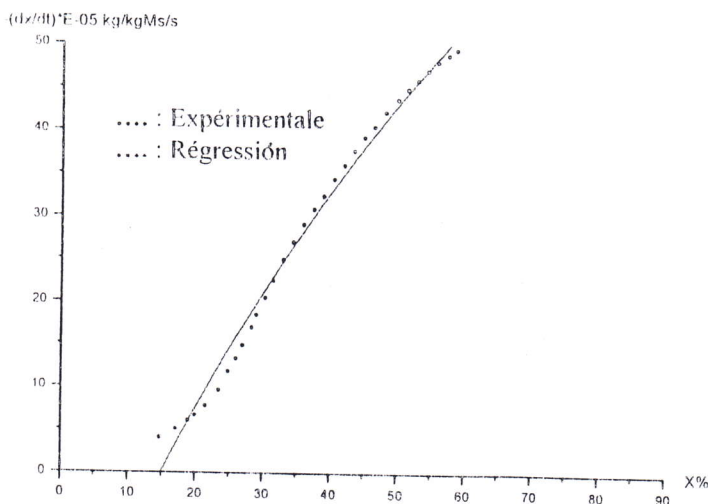


Figure III.5 : Modèle Exponentiel comparé à l'expérience

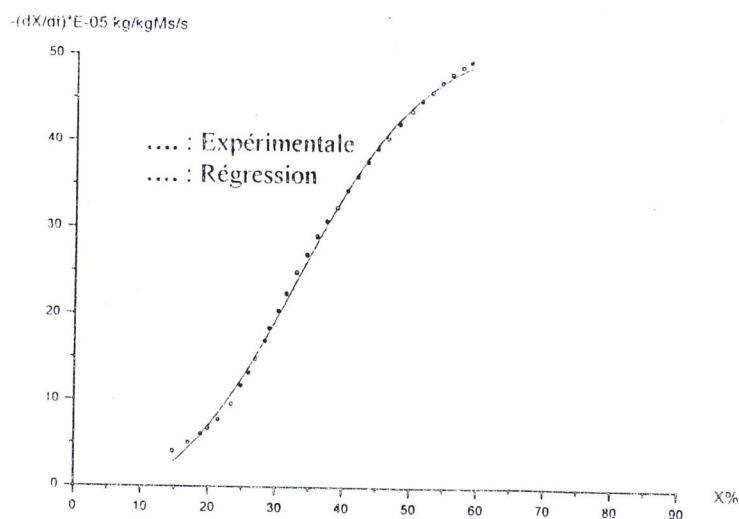


Figure III.6 :Modèle Sigmoidal (Boltzman) comparé à l'expérience

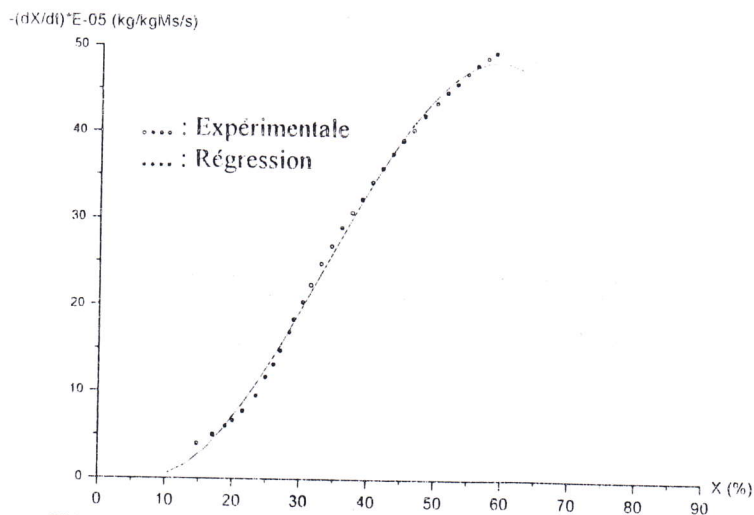


Figure III.7 :Modèle Polynomial comparé à l'expérience

Cinétique de séchage à T=28°C :

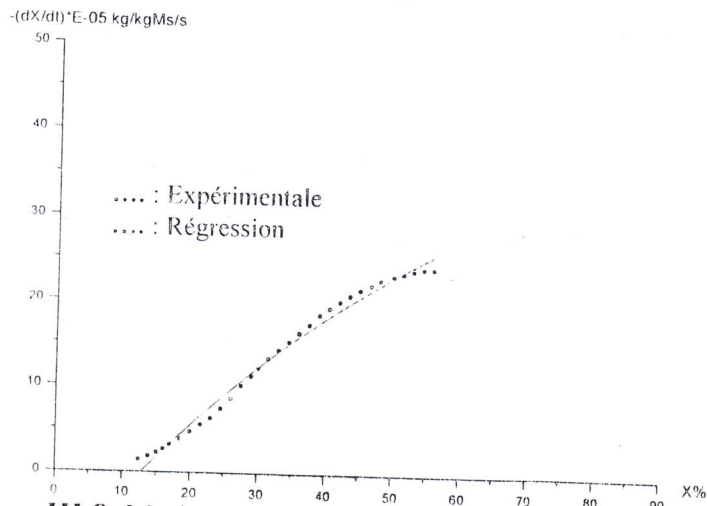


Figure III.8 :Modèle Exponentiel comparé à l'expérience

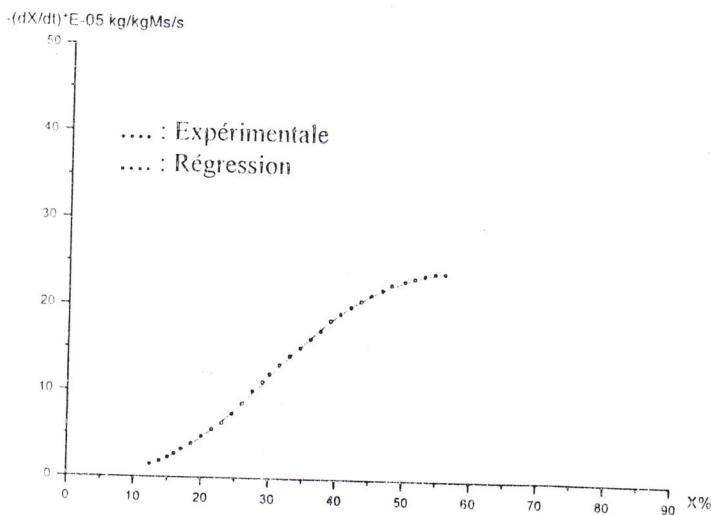


Figure III.9 :Modèle Sigmoidal (Boltzman) comparé à l'expérience

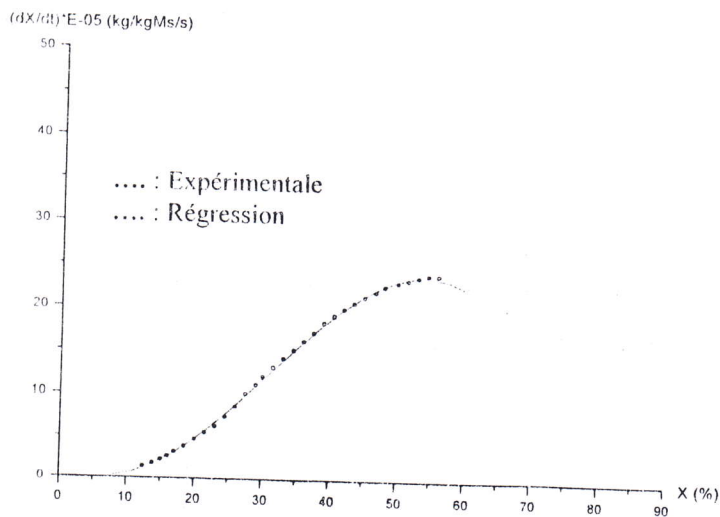


Figure III.10 :Modèle Polynomial comparé à l'expérience

Les courbes expérimentales et analytiques représentées superposées pour chacun des tests et chacun des modèles indiquent une bonne coïncidence entre les points expérimentaux et ceux obtenus par le modèle polynomial en premier lieu, le modèle de régression sigmoïdal de Boltzman en second ordre se trouve aussi acceptable par référence aux même graphes.

III.4.1 Sommaire statistique et test de modélisation

Dans ce titre nous voulons représenter un sommaire statistique global des résultats de régression pour les trois cinétiques de séchage. Le tableau suivant résume ces résultats

Cinétique de séchage à	Modèle de régression	Déviatoin standard (SD)	Erreur approximative absolu (AAE)	Le pourcentage d'erreur approximative absolu AAPE(%)	La norme euclidienne(Z)
T=51°C	Exponentiel	6,039936	5,278859	61,66	1057,944
	Sigmoïdal (Boltzman)	0,493604	0,415487	5,67	7,065707
	Polynomial	0,349718	0,281809	4,41	3,546778
T=56°C	Exponentiel	1,526940	1,201301	10,66	72,277890
	Sigmoïdal (Boltzman)	0,916240	0,793368	4,78	26,024340
	Polynomial	0,750559	0,649093	4,59	17,463510
T=28°C	Exponentiel	0,820661	0,695705	11,74	20,878010
	Sigmoïdal (Boltzman)	0,314477	0,263599	2,26	3,065762
	Polynomial	0,200870	0,166987	2,07	1,250807

Tableau III.2: Sommaire statistique et test de modélisation

Une autre forme d'interprétation des résultats est la représentation graphique des erreurs. L'illustration de cette analyse des résultats est donnée par les figures III.11 jusqu'à III.19 où une bonne approximation est aussi remarquée sur les modèles polynomiaux et Sigmoïdal(Boltzman).

Cinétique de séchage à T=51°C :

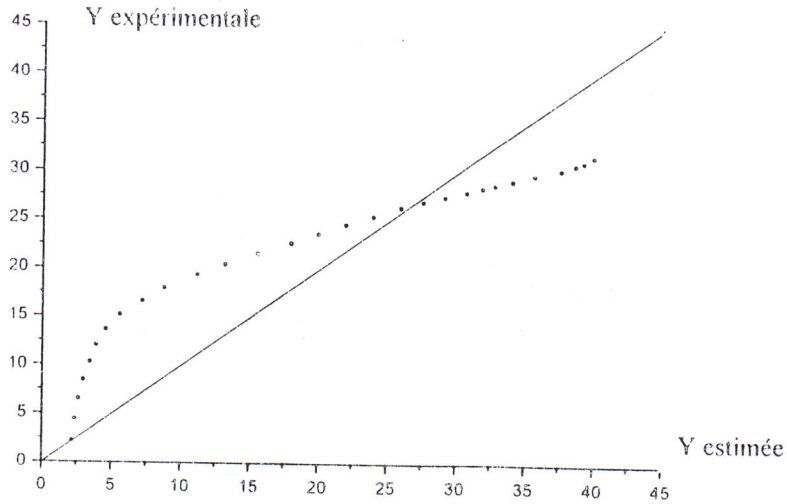


Figure III.11 : Représentation d'erreurs (modèle Exponentiel)

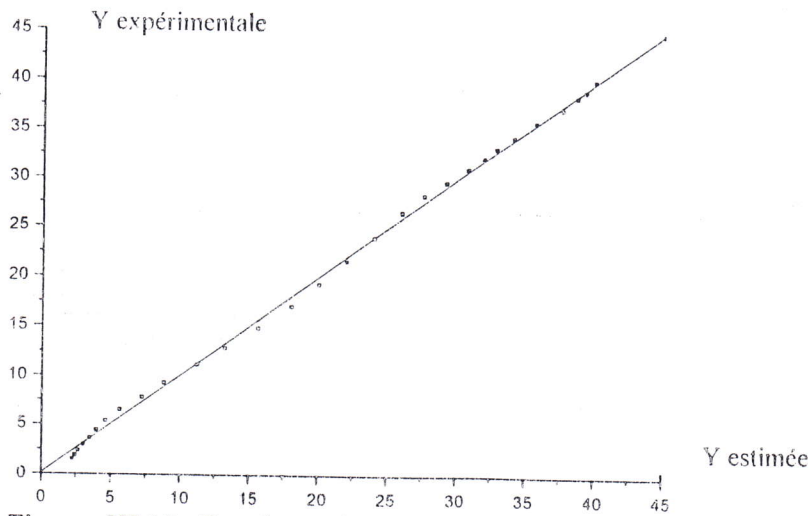


Figure III.12 : Représentation d'erreurs modèle Sigmoidal (Boltzman)

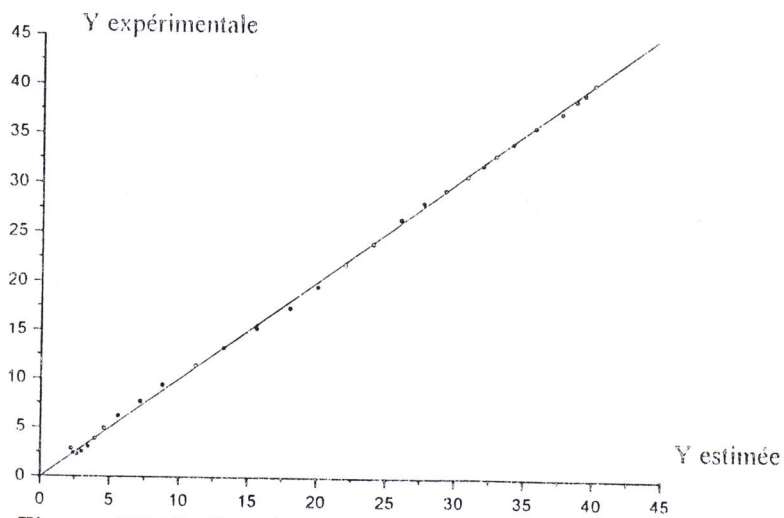


Figure III.13 : Représentation d'erreurs (modèle Polynomial)

Cinétique de séchage à $T=56^{\circ}\text{C}$:

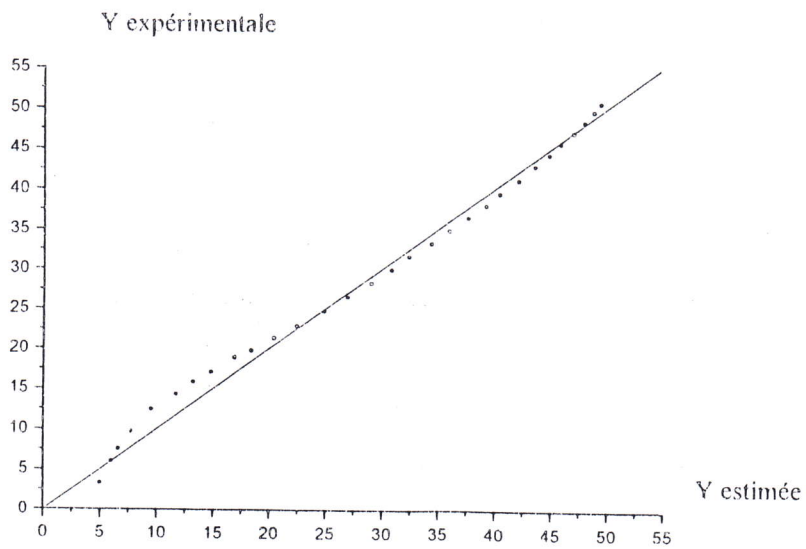


Figure III.14 : Représentation d'erreurs (modèle Exponentiel)

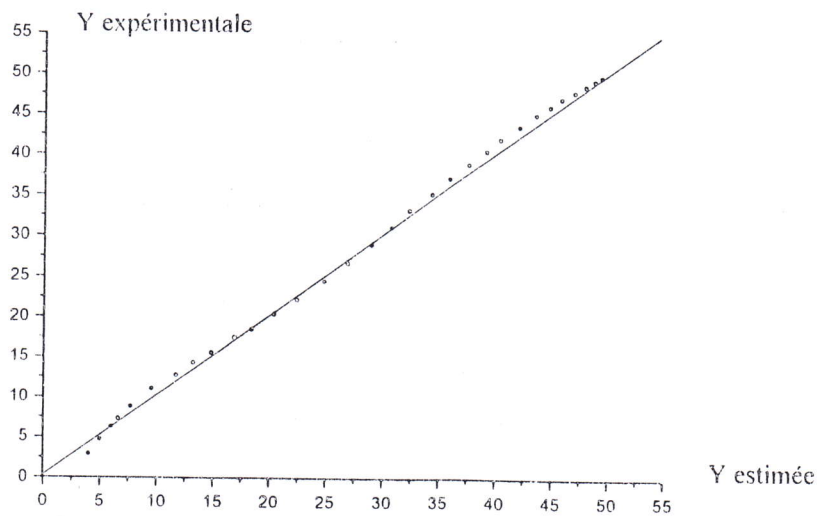


Figure III.15 : Représentation d'erreurs modèle Sigmoidal (Boltzman)

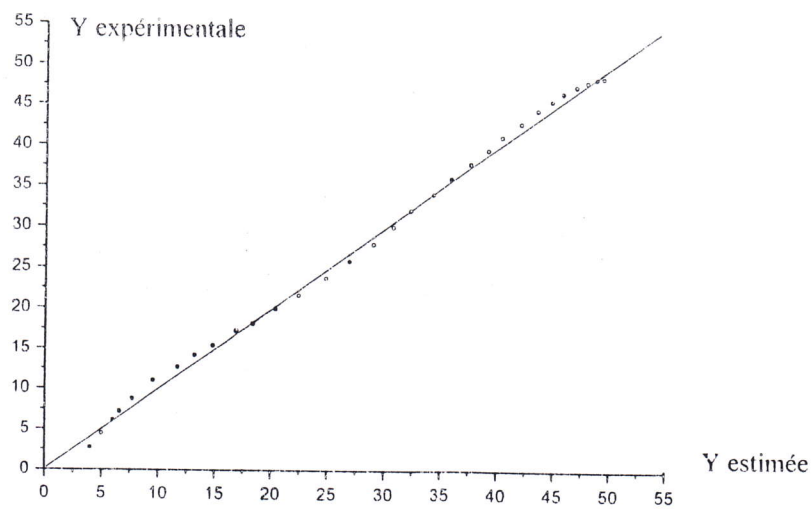


Figure III.16 : Représentation d'erreurs (modèle Polynomial)

Cinétique de séchage à $T=28^{\circ}\text{C}$:

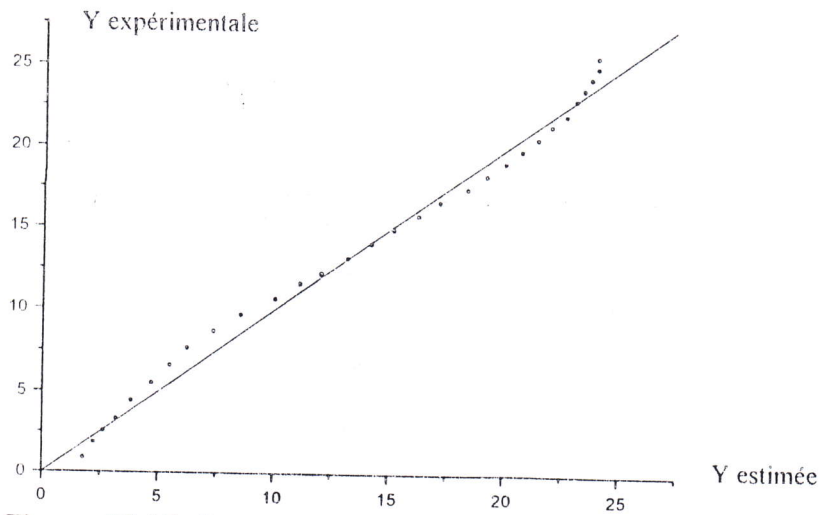


Figure III.17 : Représentation d'erreurs (modèle Exponentiel)

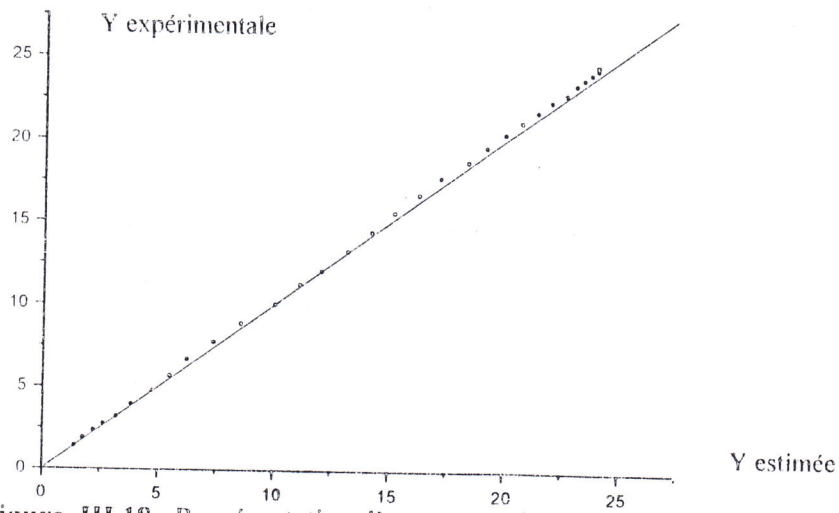


Figure III.18 : Représentation d'erreurs modèle Sigmoidal (Boltzman)

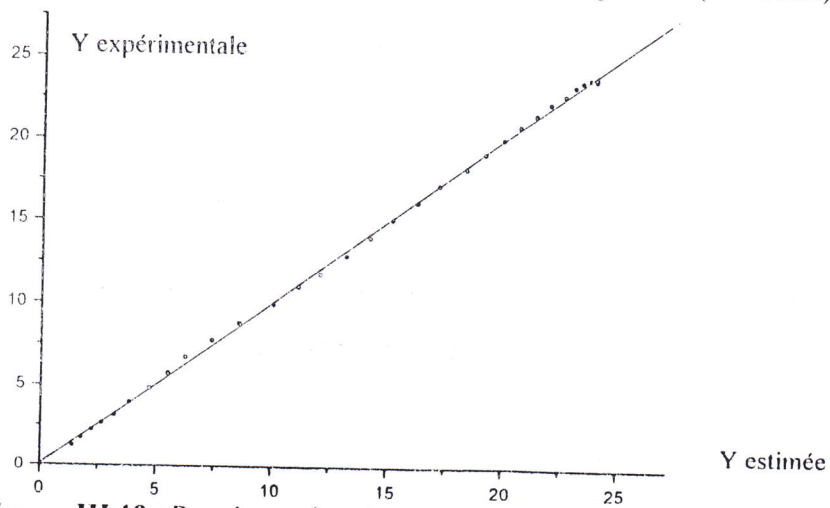


Figure III.19 : Représentation d'erreurs (modèle Polynomial)

Commentaires :

L'examen des représentations graphiques des erreurs (de III.11 jusqu'à III.19) justifie clairement que les modèles polynomial et Sigmoidal(Boltzman) indiquent une bonne coïncidence entre les points expérimentaux et ceux obtenus par les modèles de régression.

Le sommaire statistique des erreurs d'approximation présenté par le tableau III-2 conduit aux mêmes déductions d'autant plus le pourcentage d'erreur (AAPE) montre un minimum d'erreur pour le cas polynomial dans la marge de 2,07% à 4,6%. Cette observation nous représente un appui suffisant pour le choix du modèle polynomial troisième degré comme étant le meilleur parmi les trois modèles étudiés.

En leur généralité, les résultats obtenus montrent aussi une bonne approximation avec le modèle Sigmoidal($2,26\% \leq AAPE \leq 5,67\%$). Il reste à noter que le modèle exponentiel essayé a donné moins de précision particulièrement en cas de la cinétique à 51°C.

Il est à remarquer que le modèle choisi dans ce chapitre est valable pour une température de séchage, dans le chapitre suivant, on va essayer de lever cette limitation par la recherche de modèle standard pouvant couvrir une grande marge des températures de l'air de séchage.

Chapitre IV

Chapitre IV

Recherche d'un modèle standard

IV.1 Introduction

Les modèles proposés dans le chapitre précédent sont limités par une seule valeur de température de l'air de séchage. Dans l'utilisation courante, on s'intéresse aux cinétiques de séchage d'un produit à différentes températures de l'air séchant, d'où la nécessité de retrouver un modèle standard pouvant fournir l'information nécessaire sur la cinétique de séchage à différentes températures.

On a choisit, en cette raison, de se baser sur un modèle existant proposé par « MUHLBAUER » en 1976 pour le cas de séchage du maïs, auquel on a apporté des modifications en relation avec les considérations propres à notre cas d'étude.

IV.2 Présentation du modèle de MUHLBAUER :

MUHLBAUER a effectué de nombreuses expériences de séchage sur le maïs, l'idée de base introduite, était de développer un modèle mathématique global pour décrire le séchage du maïs. En utilisant plusieurs formulations mathématiques, il a proposé un modèle polynomial de troisième degré qui nous fournis une bonne représentation du processus de séchage de maïs. La formulation de ce modèle pour la phase décroissante est telle que :

$$f(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 \quad \text{IV.1}^{(*)}$$

avec :

$$a_0 = (-121 - 0,81T_g)10^{-4} \quad a_1 = (0,97 - 0,0018T_g)$$

$$a_2 = (-3,73 + 0,0022T_g) \quad a_3 = (3,76 + 0,002T_g)$$

Où T_g : représente la température de l'air de séchage.

(*) A. MHIMID & S. BEN NASRALLAH, [4].

IV.3 Restrictions et modifications

Notre choix est porté sur le modèle de MUIHLBAUER, par ce que ce dernier présente une certaine correspondance mathématique et physique avec notre modèle, suivant les résultats obtenus et cités dans le chapitre III.

La correspondance entre notre modèle et celui de MUIHLBAUER est ajustée par l'introduction de certains paramètres de rectification.

Cette rectification est faite sur les termes comportant la température, par ce que celle-ci est la seule variable dans les trois cinétiques utilisées précédemment. Par le moyen de la fonctionnalité (Solveur) du logiciel EXCEL, et partant de la formulation de MUIHLBAUER, on a effectué plusieurs calculs d'approximation variant les coefficients des termes comportant la température en vue d'approcher les données expérimentales déjà utilisées précédemment. La méthodologie suivie pour cette approximation est la suivante :

- Calcul les coefficients de correction pour chaque valeur des données expérimentales des cinétiques de séchage.
- Calcul de la moyenne des coefficients pour chaque cinétique de séchage
- Calcul de la moyenne générale des coefficients de correction pour les trois cinétiques de séchage

présentation du modèle modifié retenu :

$$f(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 \quad \text{IV.2}$$

avec :

$$a_0 = (-121 - 0,81\alpha T_g) 10^{-4} \quad \alpha = -1,75342E - 10$$

$$a_1 = (0,97 - 0,0018\beta T_g) \quad \beta = 1,15735E - 07$$

$$a_2 = (-3,73 + 0,0022\gamma T_g) \quad \gamma = -4,68734E - 06$$

$$a_3 = (3,76 + 0,002\delta T_g) \quad \delta = 0,000129722$$

IV.4 présentation des résultats

Dans ce paragraphe on va représenter les résultats obtenus à partir des données expérimentales des trois cinétiques de séchage utilisant le nouveau modèle adopté, «modèle de MUHLBAUER modifié», sur les figures IV-1, IV-2 et IV-3 on a représenté les courbes de cinétique estimées par le modèle adopté comparées aux courbes expérimentales.

Sur les figures IV-4, IV-5 et IV-6 on a représenté graphiquement les erreurs d'approximation en comparant les valeurs (Y_{est}) aux valeurs (Y_{exp}), pour les valeurs de $T_g = 51^\circ\text{C}$, 56°C et 28°C .

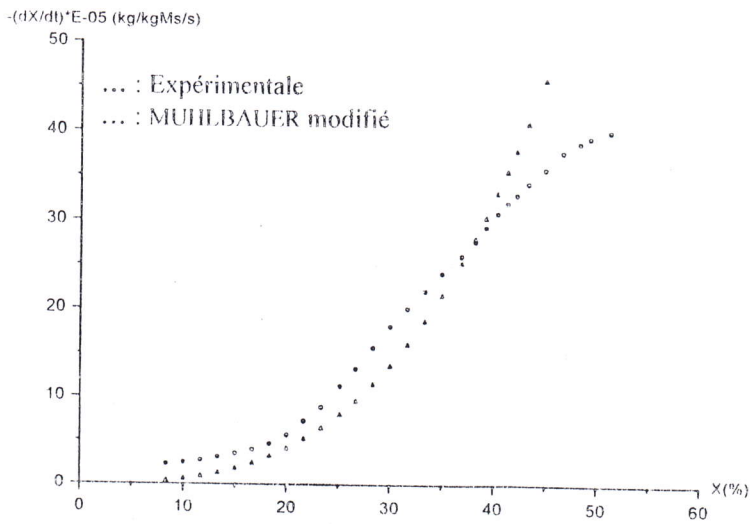


Figure IV.1 : Cinétique de séchage à T = 51°C

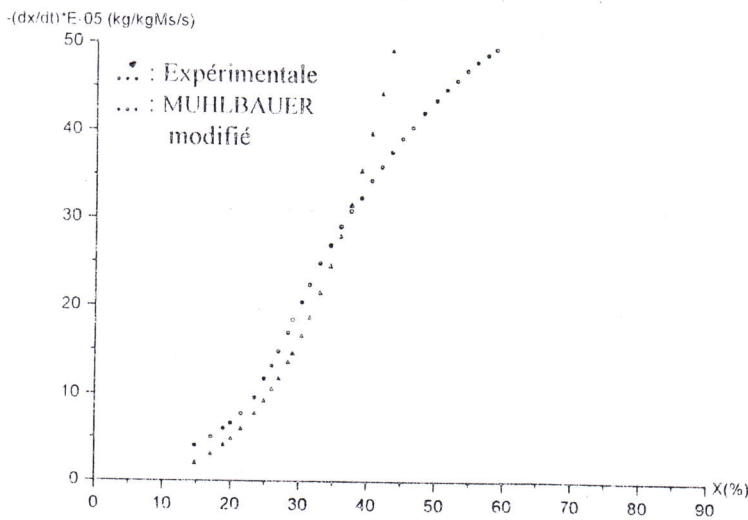


Figure IV.2 : Cinétique de séchage à T = 56°C

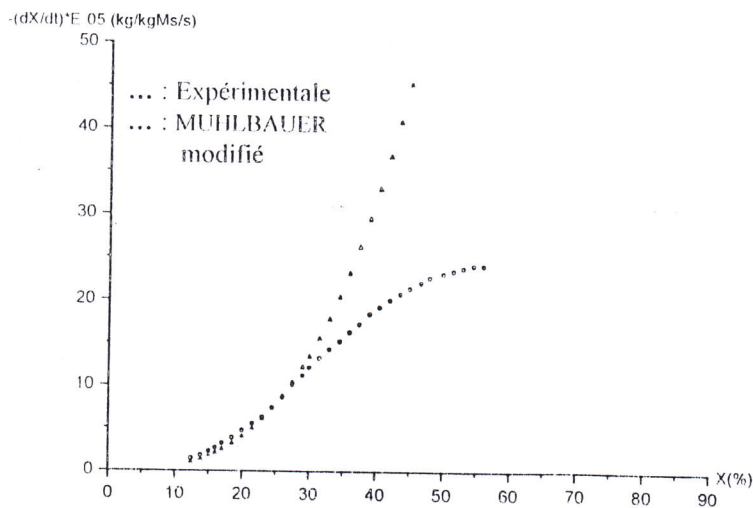


Figure IV.3 : Cinétique de séchage à T = 28°C

Commentaires :

D'après les résultats représentés sur les trois graphes (IV.1 à IV.3), on peut dire que le modèle de MUHLBAUER modifié donne des valeurs acceptables pour les cinétiques à $T = 51^{\circ}\text{C}$ et $T = 56^{\circ}\text{C}$. Pour $T = 28^{\circ}\text{C}$ on observe moins de concordance entre l'expérience et le tracé relatif au modèle retenu.

Les modifications apportées au modèle de MUHLBAUER sont bien confirmées dans la phase décroissante, mais il existe une petite divergence au début des courbes qui est assimilée à une phase de séchage constante très réduite.

Les remarques citées ci-dessus avec l'observation des représentations graphiques d'erreur de comparaison entre le modèle standard et l'expérience (IV.4 à IV.6) nous conduisent à imposer une limitation de validité du modèle proposé, à une plage des températures entre 40°C et 60°C , pour le séchage des produits solides granulaires où les cinétiques sont marquées par l'absence de la phase de séchage constante.

Courbe d'erreurs

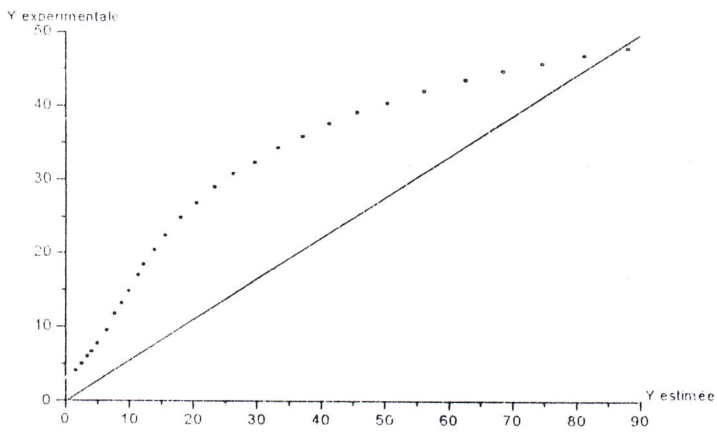


Figure IV.4 : Courbe d'erreur expérience-modèle standard à $T = 51^{\circ}\text{C}$

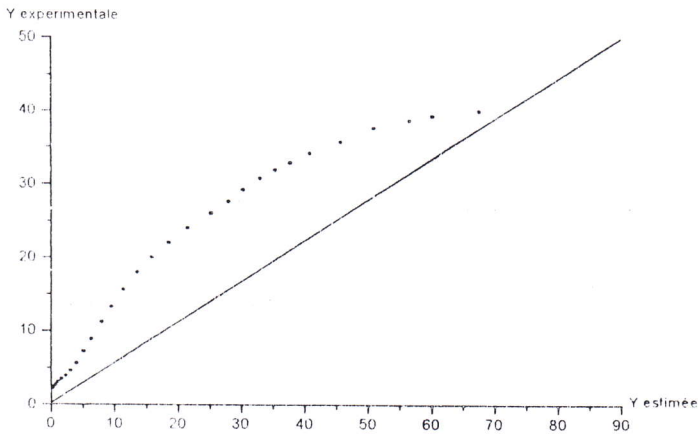


Figure IV.5 : Courbe d'erreur de la cinétique - modèle standard à $T = 56^{\circ}\text{C}$

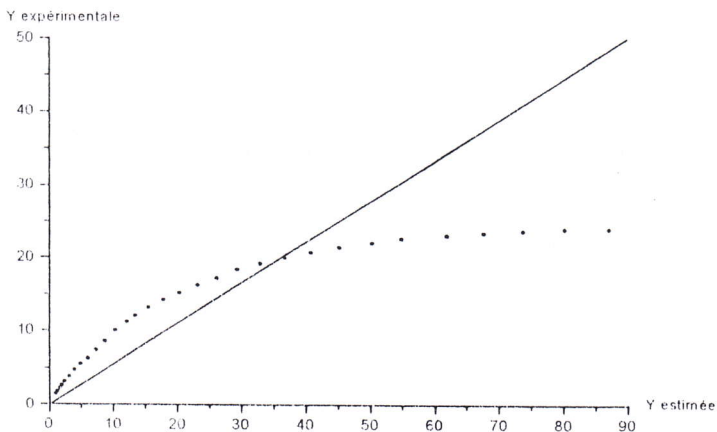


Figure IV.6 : Courbe d'erreur de la cinétique - modèle standard à $T = 28^{\circ}\text{C}$



Conclusion et recommandations

CONCLUSION

Dans cette étude de modélisations des cinétiques de séchage des billes d'argile on est arrivé, sur la base des résultats obtenus, à confirmer avec bonne approximation le modèle polynomial de troisième degré parmi les trois modèles étudiés. Cette confirmation reste vraie pour toutes les expériences exploitées, relative chacune à une température de l'air de séchage.

D'autre part les résultats obtenus avec le modèle standard proposé se trouvent acceptables mais dans une plage de température de l'air assez limitée. On peut enfin considérer les résultats ainsi obtenus comme antécédent utile à d'autres études qui doivent principalement aborder le problème des différentes limitations rencontrées, à savoir les limitations de validité de température de l'air et aussi les autres limitations sur la vitesse et l'humidité relative de l'air qui nous sont été imposées par les conditions de l'expérience.

On recommande à cet effet d'essayer d'autres formes d'équations de cinétique, comme exemple $\frac{dX}{dt} = f(t)$ en adoptant des modèles dont la formulation introduit les variables T_g, V_g et HR . Dans l'immédiat, on peut qualifier les modèles retenus dans les chapitres III et IV d'être utiles tenant compte des restrictions imposées.

B I B L I O G R A P H I E



- [1] D.SCHNEL, Technique du séchage, (1983).
- [2] GEORGES ARDITTI, Technologie chimique industrielle, TOME 3.
- [3] A.GOURDIN et M. BOUMAH RAT, Méthodes numériques appliquées, O.P.U, seconde édition,(1988).
- [4] A.MHIMID & S.BEN NASRALLAH, Heat and mass transfer during druing of granular products-Simulation with convective and conductive boundary conditions, IDS 96.
- [5] A.RUI ALMEID A. FIGUEIREDO, Etude Des possibilités régionales de séchage en grange à partir de collecteurs solaires agricoles. Thèse de doctorat de l'université de Poitiers,(1984).
- [6] M.A.Basunia,T.Abe, Moisture adsorption isotherms of rice Journal of rough food engineering 42(1999) 235-242.
- [7] ANDRE CHARREAU et ROLAND CAVAILLE, Technique de l'ingénieur. J 2480, 3-1991.
- [8] H. BENMOUSSA, Etude des transferts de chaleur et de masse dans un silo à grain soumis à un flux de chaleur pariétal instationnaire, Thèse de doctorat de l'université de Poitiers (1989).
- [9] M.SAIDAT et L.SEKHAR, Standardisation d'un modèle de calcule des propriétés physiques et thermodynamiques basées sur la méthode des contributions des groupes, mémoire de fin d'étude, option génie chimique, département chimie industrielle, promotion 2001, université de Ouargla.
- [10] web site <http://www.ulg.ac.be/sciences>
- [11] Perré P. and Turner I. W. Aiche Journal, 43(10), pp. 2579-2595 (1997).

Annexes

ANNEXES

A1- Subroutines de calcul d'erreurs d'approximation

**A2- Fichiers résultats obtenus par l'approximation par le
modèle polynomial**

ANNEXE 1

Subroutines de calcul d'erreurs d'approximation

1- Model Sigmoidal (Boltzman)

```
Subroutine Boltz(a1,a2,dx,X0,Length,X,Yest)
  Real a1,a2,X0,dx
  Real X(31),Yest(31)
  Integer i,Length

  Do i=1,Length
    Yest(i)=((a1-a2)/(1+Exp((X(i)-X0)/dx)))+ a2
  end do
end
```

2- Model Exponentiel

```
Subroutine Exponentiel(X0,Y0,a1,t1,Length,X,Yest)
  Real X0,Y0,a1,t1
  Real X(31),Yest(31)
  Integer i,Length

  Do i=1,Length
    Yest(i) = Y0 + a1*Exp(-(X(i)-X0)/t1)
  enddo
end
```

3- Model Polynomial

```
Subroutine Polynomial(a,b1,b2,b3,Length,X,Yest)
  Real a,b1,b2,b3
  Real X(31),Yest(31)
  Integer i,Length

  Do i=1,Length
    Yest(i) = a + b1*X(i) + B2*(X(i)**2) + B3*(X(i)**3)
  enddo
end
```

ANNEXE 2

Fichiers résultats obtenus par l'approximation par le modèle polynomial

1- Cas de T = 51°C

X(%)	Y _{exp} *E-5	Y _{est} *E-5
08,33333	02,20	02,79137
10,00000	02,40	02,33065
11,66667	02,65	02,22721
13,33333	03,00	02,45546
15,00000	03,45	02,98982
16,66667	03,92	03,80470
18,33333	04,58	04,87452
20,00000	05,60	06,17369
21,66667	07,20	07,67664
23,33333	08,80	09,35776
25,15000	11,20	11,36314
26,66667	13,21	13,15224
28,33333	15,60	15,21442
30,00000	18,00	17,35245
31,66667	20,00	19,54076
33,33333	22,00	21,75373
35,00000	24,00	23,96581
36,87000	26,00	26,41500
38,18000	27,60	28,09150
39,22000	29,20	29,38995
40,36000	30,80	30,77219
41,33333	31,92	31,91239
42,22000	32,85	32,91449
43,33333	34,12	34,11724
45,00000	35,71	35,78665
46,66667	37,63	37,27607
48,33333	38,69	38,55991
49,33333	39,29	39,22090
51,27000	40,00	40,24375

3- Cas de T = 28°C

X(%)	Y _{exp} *E-5	Y _{est} *E-5
12,42	01,41	01,21231
13,84	01,78	01,70937
15,07	02,23	02,21186
16,00	02,65	02,63293
17,00	03,20	03,12253
18,50	03,85	03,92279
20,00	04,72	04,79411
21,50	05,50	05,72751
23,00	06,25	06,71403
24,50	07,39	07,74469
26,00	08,57	08,81052
27,50	10,06	09,90255
29,00	11,13	11,01181
30,00	12,06	11,75646
31,50	13,20	12,87449
33,00	14,23	13,98583
34,50	15,20	15,08150
36,00	16,27	16,15252
37,50	17,20	17,18994
39,00	18,40	18,18477
40,50	19,20	19,12805
42,00	20,00	20,01080
43,50	20,72	20,82405
45,00	21,40	21,55882
46,64	22,00	22,26180
48,00	22,64	22,75708
50,00	23,07	23,32616
51,50	23,40	23,61722
53,00	23,72	23,78196
54,50	24,00	23,81141
56,00	24,00	23,69660

2- Cas de T = 56°C

X(%)	$Y_{exp} * E-5$	$Y_{est} * E-5$
14,73	04,00	02,64422
17,10	05,00	04,42703
18,94	06,00	06,08298
20,00	06,60	07,13333
21,50	07,72	08,72811
23,45	09,52	10,96978
24,83	11,70	12,65553
26,00	13,20	14,13974
26,96	14,8	15,39014
28,33	16,90	17,21754
29,00	18,40	18,12673
30,28	20,40	19,88609
31,50	22,40	21,58353
33,00	24,84	23,68645
34,50	26,90	25,79346
36,00	29,00	27,89022
37,50	30,76	29,96236
39,00	32,30	31,99555
40,50	34,32	33,97542
42,00	35,92	35,88762
43,50	37,60	37,71782
45,00	39,16	39,45164
46,50	40,40	41,07476
48,19	42,08	42,75290
50,00	43,56	44,35084
51,50	44,80	45,50124
53,00	45,80	46,47875
54,50	46,95	47,26900
56,00	47,93	47,85764
57,50	48,76	48,23032
58,75	49,38	48,36557

Résumé :

La connaissance des cinétiques de séchage, obtenues expérimentalement, est une donnée indispensable pour la conception des installations de séchage ou pour déterminer les conditions optimales de fonctionnement d'une installation existante. A cet effet, on a fait le choix de trois courbes de séchage de billes d'argile expansée, obtenu au laboratoire d'étude des systèmes thermique et énergétique de Poitiers,

Notre travail, a pour but de faire le choix d'un modèle d'équations de cinétiques moyennant des données expérimentales existantes, Utilisons les logiciels (ORIGIN5, EXCEL), manipulant les données expérimentales des cinétiques de séchage des billes d'argile, pour dégager en premier lieu un nombre de choix de modèles de régression en se basant sur l'indication d'erreur (méthode des moindres carrée).

S u m m a r y :

The knowledge of the kinetic of drying can be found experimentally, which is an indispensable data (parameter) for the drying installation conception or for finding the optimal conditions for working an existing installation. To this effect, we have made choice for the three curves of kinetic drying, gotten on the laboratory of the thermal and energizing systems of Poitiers.

The main goal of our work is to make choice from model of equation that can present an existing applied data. To match best result, we have used special software (ORIGIN5, EXCEL), and manipulating the applied data of the kinetic of drying. We have choose number of regression models in the first step while basing on the indication of errors (least square method), in the second step we choose only one model of regression, this choice is based on the error (by taking the smallest one)