

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكة
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
du Diplôme de

Doctorat en Sciences en : Génie Mécanique

Intitulé

Etude du séchage convectif par l'énergie solaire
des produits rouges

Présentée par :

BENLAHMIDI Said

Soutenue publiquement le : **29/05/2013**

Devant le jury composé de :

MOUMMI Abdelhafid	Professeur	Président	Université de BISKRA
MOUMMI Noureddine	Professeur	Rapporteur	Université de BISKRA
BENMOUSSA Hocine	Professeur	Examineur	Université de BATNA
BRIMA Abdelhafid	Maitre de conférences	Examineur	Université de BISKRA
MAZOUZ Hamoudi	Professeur	Examineur	Université de BATNA
BRIOUA Mourad	Professeur	Examineur	Université de BATNA

Remerciement

Je remercie avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'ont permis d'accomplir ce petit et modeste travail.

Je tiens en premier à exprimer ma profonde gratitude et sincère reconnaissance envers Pr MOUMMI Noureddine pour son soutien et sa disponibilité, dont il a fait preuve par sa personne et ses moyens, dans la bonne humeur.

Aux membres du jury :

Monsieur Moumami Abdelhafid Professeur au département de Génie Mécanique, Université de BISKRA, Président du jury.

Monsieur Benmoussa Hocine, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de BATNA, Examineur.

Monsieur Brima Abdelhafid, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université de BISKRA, Examineur.

Monsieur Mazouz Hamoudi, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de BATNA, Examineur.

Monsieur Brioua Mourad, Professeur au département de Génie Mécanique, Université de BATNA, Examineur.

Qui ont pris sur leur temps et aménager leur volonté pour examiner et porter une analyse critique sur mon travail.

L'équipe pédagogique du département de Génie Mécanique, sans oublier l'équipe du séchage du CETIM Boumerdes.

A mes collègues de travail et en particulier Dr Aouici Hamdi, Dr Rebiai Cherif et Dr Ziani Ridha pour leurs encouragements.

Hommage à ma mère et une cordiale reconnaissance envers mon épouse et mon fils.

Benlahmidi S.

RESUME

Les produits rouges font partie du secteur des matériaux de construction, la production algérienne concerne essentiellement la fabrication de briques à 98% et en beaucoup plus faible quantité, les tuiles et produits divers. Cette production passe par l'étape du séchage qui nécessite une consommation d'énergie. C'est dans ce cadre que notre travail consiste à évaluer les performances des insolateurs plans pour une éventuelle utilisation pour le séchage des ces produits.

L'implantation de tel système solaire pour satisfaire ce besoin bien déterminé ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement solaire local disponible réellement. La modélisation des paramètres intrinsèques et extrinsèques qui gouvernent le fonctionnement des insolateurs (température et rayonnement) constitue une étape incontournable. Des essais sur le séchage ont donné des résultats acceptables, la dernière partie du travail est réservée à l'étude statistique pour déterminer le rôle de la température et du temps sur l'humidité, la variation de la masse et la variation de la masse volumique.

Mots clés : Energie solaire, produits rouges, séchage, insolateurs plans

ABSTRACT

Red products are part of the construction materials sector, Algeria produced essentially for the manufacture of bricks and 98% much lower amount, tiles and other products. This production through the drying step which requires energy. It is in this context that our work is to evaluate the performance of flat collectors for a possible use for the drying of these products. The implementation of such a solar system to satisfy that need definite must be done after the estimated productivity of the system as a function of local solar resource available really. Modeling of intrinsic and extrinsic parameters that govern the operation of collectors (temperature and radiation) is an essential step. Tests on drying gave acceptable results, the last part of the work is reserved for the study to determine the role statistical temperature and time on the humidity, the change of the mass and the variation in density.

Keywords: solar energy, drying, red products, plat collector

ملخص

الجزء الكبير من مواد البناء عبارة عن منتجات حمراء مثل الأجر الأحمر و القرميد، إنتاج الجزائر من هذه المواد يتكون اقلية (98%) من صناعة الأجر الأحمر و بكمية قليلة جدا من البلاط ومنتجات أخرى مثل الخزف. يمر هذا المنتج بمرحلة التجفيف التي تتطلب استهلاك الطاقة. في هذا السياق يدخل عملنا الذي يهدف إلى تقييم أداء اللاقطات المستوية في هذه المرحلة. تطبيق مثل هذا النظام الشمسي و لتلبية هذا الإحتياج يجب المرور بتقييم إنتاجية النظام بدلالة الموقع الشمسي المحلي (درجة الحرارة والإشعاع)، هذا التقييم عبارة عن خطوة ضرورية. الإختبارات على التجفيف أعطت نتائج مقبول.

الجزء الأخير من العمل مخصص لدراسة إحصائية و ذلك لإظهار دور درجة الحرارة والزمن على الرطوبة وتغير الكتلة و الكتلة الحجمية.

الكلمات الدالة: الطاقة الشمسية - التجفيف - الطين - المنتجات الحمراء-

LISTES DES FIGURES

N° figure	Désignation	Chap.	N° page
Figure I-1	<i>Courbe de séchage</i>	I	4
Figure I-2	<i>Vitesse de séchage $-dM/dt=f(t)$</i>	I	5
Figure I-3	<i>Vitesse de séchage $-dM/dt=f(M)$</i>	I	5
Figure I-4	<i>Représentation de la teneur en eau calculée et expérimentale</i>	I	9
Figure I-5	<i>Evolution du coefficient de diffusion avec la teneur en eau</i>	I	9
Figure I-6	<i>Allure générale des isothermes de sorption</i>	I	12
Figure I-7	<i>Forme générale des isothermes</i>	I	12
Figure I-8	<i>Evolution de la masse volumique du gâteau du Kaolin en fonction de la teneur en eau</i>	I	14
Figure I-9	<i>Isothermes de désorption (modèle de G.A.B.) de la bentonite et du Kaolin</i>	I	16
Figure I-10	<i>Isothermes de désorption (modele de Henderson) de la bentonite et du Kaolin</i>	I	16
Figure I-11	<i>Enthalpies de désorption des trois argiles</i>	I	17
Figure I-12	<i>Courbe des isostères dans un diagramme ($1/T$ et $-\ln a_w$)</i>	I	18
Figure I-13	<i>Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles</i>	I	19
Figure II-1	<i>Schéma d'un insolateur plan à air (coupe transversale d'un capteur)</i>	II	24
Figure II-2	<i>Représentation schématique des divers transferts dans l'insolateur</i>	II	27
Figure II-3	<i>Tranche fictive de longueur dx</i>	II	37
Figure II-4	<i>Définition d'éléments de volume et de surface</i>	II	37
Figure II-5	<i>Organigramme simplifié de calcul des performances de l'insolateur</i>	II	44
Figure II-6	<i>Interface graphique des calculs</i>	II	49
Figure II-7	<i>Evolution du rayonnement, température ambiante et température du fluide à la sortie de l'insolateur à Biskra (16 /03/2009)</i>	II	50
Figure II-8	<i>Evolution du rayonnement, température ambiante et température du fluide à la sortie de l'insolateur à Biskra (06 /04/2009)</i>	II	51
Figure III-1	<i>Etuve</i>	III	55
Figure III-2	<i>Granulomètre</i>	III	55
Figure III-3	<i>balance SARTORIUS</i>	III	55
Figure III-4	<i>Mélangeur</i>	III	56
Figure III- 5	<i>Façonneuse des tessons</i>	III	57
Figure III-6	<i>Séchage des échantillons</i>	III	57
Figure III- 7	<i>Pycnomètre</i>	III	59

Figure III-8	<i>Les échantillons avant et après séchage</i>	III	60
Figure III-9	<i>Les échantillons après cuisson</i>	III	60
Figure III-10	<i>Principe du séchoir à chambres</i>	III	62
Figure III-11	<i>Séchoir à chambres ventilées</i>	III	63
Figure III-12	<i>Séchoir à chambres avec brasseurs rotatifs</i>	III	63
Figure III-13	<i>Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut</i>	III	67
Figure III-14	<i>Définition de l'espace expérimental</i>	III	67
Figure III-15	<i>Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental</i>	III	68
Figure III-16	<i>Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur</i>	III	68
Figure III-17	<i>Définition de la surface de réponse</i>	III	69
Figure IV-1	<i>Evolution du rayonnement solaire à Boumerdes (16/12/2011)</i>	IV	72
Figure IV-2	<i>Evolution du rayonnement solaire à Boumerdes (16/04/2012)</i>	IV	72
Figure IV-3	<i>Evolution du rayonnement solaire à Bousmail (21/03/2012)</i>	IV	73
Figure IV-4	<i>Evolution du rayonnement solaire à Bousmail (21/10/2012)</i>	IV	73
Figure IV-5	<i>Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Boumerdes (16/12/2011)</i>	IV	74
Figure IV-6	<i>Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Boumerdes (16/04/2012)</i>	IV	75
Figure IV-7	<i>Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Bousmail (21/03/2012)</i>	IV	75
Figure IV-8	<i>Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Bousmail (21/10/2012)</i>	IV	76
Figure IV-9	<i>Courbe de Bigot pour l'échantillon 1</i>	IV	77
Figure IV-10	<i>Courbe de Bigot pour l'échantillon 2</i>	IV	77
Figure IV-11	<i>Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 1)</i>	IV	78
Figure IV-12	<i>Variation de la température et du retrait sur sec en fonction du temps (Echantillon 1)</i>	IV	79
Figure IV-13	<i>Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 2)</i>	IV	79
Figure IV-14	<i>Variation de la température et du retrait sur sec en fonction du temps (Echantillon 2)</i>	IV	80

Figure IV-15	<i>Evolution de la masse volumique de l'échantillon 1 en fonction de la teneur en eau</i>	IV	81
Figure IV-16	<i>Evolution de la masse volumique de l'échantillon 2 en fonction de la teneur en eau</i>	IV	81
Figure IV-15	<i>Graphe de PARETO des effets des paramètres sur HR</i>	IV	85
Figure IV-16	<i>Evolution de l'humidité résiduelle en fonction de T et t</i>	IV	86
Figure IV-17	<i>Graphe de contour de l'humidité résiduelle en fonction de T et t</i>	IV	86
Figure IV-18	<i>Graphe des effets principaux de t et T sur HR</i>	IV	87
Figure IV-19	<i>Graphe de PARETO des effets des paramètres sur le retrait (Ret.)</i>	IV	88
Figure IV-20	<i>Evolution du retrait en fonction de T et t</i>	IV	89
Figure IV-21	<i>Graphe de contour du retrait en fonction de T et t</i>	IV	89
Figure IV-22	<i>Graphe des effets principaux de t et T sur Ret</i>	IV	90
Figure IV-23	<i>Graphe de PARETO des effets des paramètres sur la variation de la masse volumique</i>	IV	91
Figure IV-24	<i>Evolution de la variation de la masse volumique en fonction de T et t</i>	IV	92
Figure IV-25	<i>Graphe de contour de la variation de la masse volumique en fonction de T et t</i>	IV	92
Figure IV-26	<i>Graphe de contour de la variation de la masse volumique en fonction de T et t</i>	IV	93
Figure IV-27	<i>Courbes des valeurs expérimentales et estimées des paramètres de sortie</i>	IV	93

LISTE DES TABLEAUX

N° du tableau	Désignation	Chap.	N° de la page
Tableau I-1	Composition chimique de l'argile pour produits rouges	I	2
Tableau I-2	<i>Paramètres de coefficient de diffusion</i>	I	9
Tableau I-3	<i>Equations des modèles appropriés aux courbes de désorption expérimentales</i>	I	13
Tableau I-4	<i>Estimation des paramètres de l'équation du modèle de G.A.B pour la bentonite et le Kaolin</i>	I	15
Tableau II-1	<i>Le coefficient d'absorption et l'émissivité en fonction du revêtement</i>	II	24
Tableau II-2	<i>L'isolation</i>	II	25
Tableau II-3	<i>Coefficient d'échange dû au vent et les pertes qui en résultent</i>	II	28
Tableau III-1	<i>Résultats de l'analyse chimique</i>	III	54
Tableau III-2	<i>Caractérisation et observation des éprouvettes</i>	III	57
Tableau III-3	<i>Le débit d'air en fonction des températures</i>	III	64
Tableau III-4	<i>Conditions de séchage pour un plan 3²</i>	III	69
Tableau IV-1	<i>Résultats du retrait, l'humidité résiduelle et variation de la masse volumique en fonction des différentes combinaisons de la température et du temps</i>	IV	84
Tableau IV-2	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour HR</i>	IV	85
Tableau IV-3	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour le retrait (Ret.)</i>	IV	87
Tableau IV-4	<i>Analyse de la variance (ANOVA) pour la variation de la masse volumique</i>	IV	90

NOMENCLATURE

A : Surface de captation de l'insolateur plan à air	[m ²]
a : Angle azimutal du soleil	
h : Angle zénithal (ou hauteur) du soleil	
C _p : Capacité calorifique massique du fluide à pression constante	[J/kg.k]
D _H : Rayonnement diffus horaire	[w/m ² .heure]
D _J : Rayonnement diffus journalier	[w/m ² .jour]
\overline{D}_H : Moyenne mensuelle D _H	[w/m ² .heure]
\overline{D}_J : Moyenne mensuelle D _J	[w/m ² .jour]
d : Rayonnement diffus sur un plan horizontal	[w/m ²]
d _β : Rayonnement diffus sur un plan incliné	[w/m ²]
D _H : Diamètre hydraulique	[m]
e : Epaisseur de la veine d'air mobile	[m]
F' : Coefficient d'efficacité local de l'absorbeur	
F _R : Coefficient global de transfert air-absorbeur	
g : Rayonnement global sur un plan horizontal	[w/m ²]
g _β : Rayonnement global sur un plan incliné	[w/m ²]
G _H : Rayonnement global horaire	[w/m ² .heure]
G _J : Rayonnement global journalier	[w/m ² .jour]
\overline{G}_H : Moyenne mensuelle de G _H	[w/m ² .heure]
\overline{G}_J : Moyenne mensuelle de G _J	[w/m ² .jour]
G _c : Débit massique d'air par unité de surface de captation	[kg/h.m ²]
h _{rv-c} : Coefficient de transfert radiatif entre la vitre du capteur et la voûte céleste	[W/m ² .K]
h _{rp-pl} : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque	[W/m ² .K]
h _{rp-v} : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre	[W/m ² .K]
h _{c-v} : Coefficient de transfert convectif dû au vent	[W/m ² .K]
h _{c-nat} : Coefficient de perte par conduction-convection naturelle entre absorbeur et vitre	[W/m ² .K]
h _{cp-f} : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur	[W/m ² .K]
h _{cpl-f} : Coefficient de transfert convectif entre la plaque isolante et fluide caloporteur	[W/m ² .K]
h _{rv-s} : Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et le sol	[W/m ² .K]
h _{rp-pl} : Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et la plaque métallique placée sur l'isolant	[W/m ² .K]
h _{ris-s} : Coefficient de transfert radiatif entre l'isolant et le sol (à l'arrière du capteur)	[W/m ² .K]
J : Numéro du jour de l'année	
I : Constante solaire	[w/m ²]
I ₀ : Rayonnement reçu par une surface horizontale hors atmosphère	[J/m ² .jour]
\overline{I}_0 : Moyenne mensuelle de I ₀	[J/m ² .jour]
K _T : Indice de clarté	
l : Largeur du capteur plan à air	[m]
L : Longueur du capteur plan à air	[m]
M : Humidité absolue du produit à l'instant t	[kg eau/kg MS]

•	
m : Débit massique	[kg/s]
N : Nombre de vitrage	
P_u : Puissance utile récupérée par l'insolateur	[w]
Q_u : Quantité de chaleur utile récupérée par l'insolateur	[w/m ²]
Q_p : Quantité de chaleur perdue par l'insolateur	[w/m ²]
Q_{pav} : Quantité de chaleur perdue à l'avant de l'insolateur	[w/m ²]
Q_{par} : Quantité de chaleur perdue à l'arrière de l'insolateur	[w/m ²]
R : Facteur de conversion du rayonnement horaire	
s : Rayonnement direct sur un plan horizontal	[w/m ²]
s_β : Rayonnement direct sur un plan incliné	[w/m ²]
t_{ls} : Temps local du lever du soleil	[s] ou [heure]
t_{cs} : Temps local du coucher du soleil	[s] ou [heure]
t_{sv} : Temps solaire vrai	[s] ou [heure]
T : Facteur de trouble de Lunke	
T_a : Température ambiante	[°C] ou [K]
T_e : Température d'entrée de l'air dans le capteur	[°C] ou [K]
T_{is} : Température de la plaque arrière isolante	[°C] ou [K]
T_{max} : Température maximale au cours de la journée	[°C]
T_{min} : Température minimale au cours de la journée	[°C]
T_{pt} : Température de la plaque métallique placée sur l'isolation	[K]
T_c : Température équivalente de la voûte céleste	[°C] ou [K]
T_{fe} : Température sèche de l'air à l'entrée du capteur	[°C] ou [K]
T_f : Température moyenne de l'air dans la veine d'air mobile du capteur	[°C] ou [K]
T_{fs} : Température sèche de l'air asséchant à la sortie du capteur	[°C] ou [K]
T_p : Température moyenne de l'absorbeur	[°C] ou [K]
T_s : Température du sol	[°C] ou [K]
T_v : Température de la vitre	[°C] ou [K]
U_L : Coefficient global de perte thermique entre l'absorbeur et l'air ambiant	[W/m ² .K]
U_{ar} : Coefficient des pertes arrière	[W/m ² .K]
U_{av} : Coefficient des pertes avant	[W/m ² .K]
V_f : vitesse de l'air dans la veine d'air mobile du capteur plan	[m/s]
V_v : Vitesse du vent	[m/s]
z : Altitude	[km]

Nombres adimensionnels

G_z : Nombre de Graetz
Nu : Nombre de Nusselt
Pr : Nombre de Prandtl
R_a : Nombre de Rayleigh
R_e : Nombre de Reynolds
S_c : Nombre de Schmidt
S_h : Nombre de Sherwood

Lettres grecques

α : Coefficient d'absorptivité

α_p : coefficient d'absorptivité de l'absorbeur (= 0,95)

α_v : coefficient d'absorptivité de la vitre (= 0,06)

β : Angle d'inclinaison du capteur

ε : Émissivité

ε_{is} : Emissivité de la plaque arrière isolante du capteur.

ε_{p-pl} : Emissivité de l'absorbeur coté plaque métallique.

ε_{pl} : Emissivité de la plaque métallique coté absorbeur

ε_{pl} : Emissivité de la plaque (= 0,25)

ε_{p-pl} : Emissivité de l'absorbeur vers la plaque (= 0,25)

ε_{p-vat} : Emissivité de l'absorbeur coté vitre (= 0,95)

ε_v : Emissivité du vitrage (=0,9)

ε_{p-v} : Emissivité de la surface mate de l'absorbeur vers la vitre

Φ_g : flux global reçu par le capteur plan à air [w/m²]

λ : La conductivité thermique du fluide considéré [w/m.k]

ν : Viscosité dynamique du fluide [kg/m.s]

ν : Viscosité cinématique [kg/m.s]

ρ : Masse volumique du fluide en [kg/m³]

η_0 : Rendement optique

η : Rendement thermique du capteur plan à air

σ : Constante de Stephan Boltzmann (= 5,67.10⁻⁸)

τ_v : Coefficient de transmittivité du vitrage (= 0,84)

δ : La latitude (angle de déclinaison du soleil)

ω : Angle horaire du soleil [rd/s] ou [d°/heure]

ϕ : Angle de la latitude du site

ω_s : Angle horaire du lever ou du coucher du soleil [rd/s] ou [d°/heure]

ρ : Albédo du sol

INTRODUCTION GENERALE

Le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une consommation en énergie, le grand public et les gouvernements ont pris conscience des problèmes liés à ça dans la vie quotidienne, d'où la nécessité à diversifier les sources et les formes de acquisition.

La production et la consommation énergétique passe par un ensemble d'appareils qui sont conçus selon le type et la forme d'énergie envisagée. Ainsi l'énergie se trouve impliqué dans un système qui prédit la forme de sa production et la destination de son utilisation.

La présente étude est, pour sa part, consacrée au séchage des produits rouges par air chaud, première opération de transformation profonde de l'argile avant sa cuisson, le chauffage étant assuré par un capteur solaire plan à air.

Il convient en effet de savoir que l'Algérie appartient aux régions situées dans la ceinture solaire Afrique du nord, sud ouest des états unis d'Amérique, Australie, ces régions disposent des gisements solaires les plus élevés au monde. Pour l'Algérie, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 h (hauts plateaux et Sahara).L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [68-69]. Tout le problème est de tirer profit de cette énergie solaire directe au lieu de la laisser se dissiper. C'est le rôle du capteur solaire, simple dans son principe, mais élaboré dans sa technique, dont on peut améliorer son rendement par l'adjonction d'ailettes dans la veine d'air mobile.

La chaîne énergétique comportera donc deux étapes, la première concernant l'insolateur plan qui sert à convertir l'énergie solaire rayonnante incidente en énergie thermique, cette énergie étant véhiculée par un fluide caloporteur (air), la seconde concernant l'armoire de séchage où nous disposons le produit à sécher étalé sur des claies.

Notre travail se compose de quatre chapitres ; le premier est une étude bibliographique sur les recherches effectuées dans le domaine du séchage, en particulier le séchage solaire et séchage des argiles. Nous y donnons quelques généralités sur le séchage, mettant en évidence les différentes phases qui se succèdent au cours de la déshydratation des produits poreux.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude théorique détaillée des échanges (radiatifs, conductifs et convectifs) au niveau de tous les composants de l'insolateur plan. En partant des données météorologiques et des caractéristiques thermophysiques et dynamiques de l'air, grâce à une interface graphique de calcul et simulation que nous avons développé, nous pouvons déterminer les performances thermiques du capteur ainsi que les caractéristiques de sortie de l'air de cet insolateur plan.

Ce même chapitre comporte quelques résultats expérimentaux et simulés à l'aide de cette interface de calcul, pour la ville de Biskra (Latitude=34°48', Longitude= 5°44' et Altitude=81m) du rayonnement solaire, de la température ambiante et la température de sortie de l'insolateur en fonction du temps solaire vrai.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de travail.

Le dernier chapitre comporte deux parties, la première c'est pour la présentation des principaux résultats obtenus du rayonnement, température ambiante et température de sortie de l'insolateur en fonction du temps solaire vrai, ainsi que des résultats sur le séchage de l'argile , la deuxième partie est consacré à une étude statistique qui repose sur l'analyse ANOVA ainsi que la régression multiple afin de modéliser les phénomènes étudiés ainsi qu'une optimisation des paramètres. Les plans d'expérience utilisés sont le plan d'expérience 3^2 avec un nombre de 9 essais. Ainsi les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ont été calculées à l'aide du logiciel Design-Expert 8.

En dernier lieu, nous avons élaboré une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques et des annexes.

SOMMAIRE

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. INTRODUCTION.....	1
I.2. LE SECHAGE.....	4
I.2.1. Phase initiale	6
I.2.2. Phase à vitesse de séchage constante	6
I.2.3. Phase à vitesse de séchage décroissante.....	7
I.3. Isothermes de sorption	10
I.3.1. Modèles de sorption	11
I.3.2. Formes et modèles des isothermes	11
I.4. MASSE VOLUMIQUE ET RETRAIT	13
I.4.1. Mécanisme de retrait	13
I.4.2. Résultats obtenus sur le Kaolin et la Bentonite	14
I.5. ACTIVITE DE L'EAU	15
I.5.1. Travaux de recherche	15
I.5.2. Chaleur nette de désorption	17
I.6. COURBE DE BIGOT	18
I.6.1. Eau colloïdale et eau d'interposition	19
I.6.2. Pente de la zone linéaire de l'eau colloïdale.....	20
I.7. SECHOIRS SOLAIRES	21
I.8. CONCLUSION.....	21

CHAPITRE II MODELISATION D'UN INSOLATEUR PLAN A AIR

II.1. INTRODUCTION	23
II.2. LES COMPOSANTS D'UN CAPTEUR PLAN A AIR.....	23
II.2.1. Couverture transparente	24
II.2.2. Paroi absorbante (absorbeur).....	24
II.2.3. Isolation arrière	25
II.2.4. Le coffret	25
II.3. MODELISATION DES PARAMETRES D'UN INSOLATEUR A AIR PLAN	25
II.3.1. Etablissement d'un modèle de température ambiante	25
II.3.2. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques	26
II.3.2.1. Transferts convectifs	27
II.3.2.2. Transferts radiants	30

II.4. BILAN THERMIQUE ET CALCUL DU RENDEMENT	
DU CAPTEUR SOLAIRE	32
II.4.1. Modélisation des échanges thermiques.....	33
II.5.PERFORMANCES DU CAPTEUR SOLAIRE	37
II.6. ALGORITHME DE CALCUL	42
II.6.1.Caractéristiques et données communes aux calculs.....	42
II.6.2.Schéma	44
II.6.4.Introduction des données	45
II.6.5.Initialisation des températures moyennes	45
II.6.6. Calcul des coefficients.....	45
II.7. DEMONSTRATION DE L'INTERFACE DU PROGRAMME	48
II.8. CONCLUSION	52

CHAPITRE III PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1. INTRODUCTION	53
III.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	53
III.2.1. Analyse Chimique du modèle d'argile étudié	53
III.2.2. Préparation de la pâte d'argile	54
III.2.2. Elaboration et séchage des éprouvettes	56
III.3. APPAREILLAGE DE MESURE UTILISE	58
III.4. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE.....	60
III.5. LES SECHOIRS INDUSTRIELS A CHAMBRES EXISTANTS.....	61
III.6.VALEURS DES PRINCIPAUX PARAMETRES RELEVES	
LORS DES VISITES DES BRIQUETERIES	63
III.6.1. La température	63
III.6.2. Le débit d'air	63
III.6.3. La vitesse de l'air séchant	64
III.6.4. Circulation de l'air séchant	65
III.7. PROCEDURE EXPERIMENTALE	65
III.7.1. Essais par plans d'expériences	65
III.7.2. Plans d'expériences	66
III.8. CONDITIONS EXPERIMENTALES	69

III.9. CONCLUSION	69
CHAPITRE IV RESULTATS EXPERIMENTAUX	
IV.1. INTRODUCTION	71
IV.2. REPRESENTATION GRAPHIQUES DES MODELES THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX	71
IV.2.1. Rayonnement solaire	71
IV.2.2. Température ambiante et température à la sortie de l'insolateur	74
IV.2.4. Variation de l'humidité en fonction du retrait (courbe de BIGOT)	76
IV.2.5. résultats du séchage (appelé séchage rapide)	78
IV.2.6. Variation de la masse volumique	81
IV.3. ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS	82
IV.3.1. Introduction	82
IV.3.2. Modélisation de l'humidité résiduelle, retrait linéaire et variation de la masse volumique en fonction des paramètres temps et température	83
IV.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	93
CONCLUSION GENERALE	94
Annexe 1.....	96
Annexe 2	98

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre relate les fondements scientifiques liés à l'énergie solaire et fait référence aux différents résultats issus de la littérature. La majorité des études présentées concernent principalement le séchage. Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse des travaux relatifs à l'utilisation de l'énergie solaire au séchage des produits.

I.1. INTRODUCTION

Dans les procédés de traitement des solides, l'opération de séchage est d'une grande importance, par rapport à toutes les autres opérations mises en jeux. Bien que soit généralement la dernière étape du processus industriel, il est souvent appliqué à un grand nombre de matériaux solides : minerais, produits pharmaceutiques, boues résiduelles, argile, etc. il est couramment reconnu que dans un procédé industriel, l'étape de séchage est la plus consommatrice d'énergie.

Sur le plan scientifique, le séchage est une opération caractérisée par des transferts couplés de chaleur, de masse et de quantité de mouvement.

Pendant la phase de séchage, l'évacuation de l'eau de façonnage introduit inévitablement une variation des dimensions des pièces céramiques (retrait). Si ce retrait n'est pas homogène dans toute la masse de la pièce, il s'ensuit des déformations et même des fissurations qui, si elles dépassent un certain seuil, rendent les produits impropres à la distribution [33]. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place une modélisation prédictive de ce comportement. Les problèmes de déformation survenant lors d'un transfert de chaleur et de matière ont été abordés dans la littérature et font appel à des domaines scientifiques différents.

Ce procédé possède un large domaine d'applications, selon qu'il s'agit de l'argile ou autre. On peut citer des études sur le séchage de la Bentonite et le Kaolin [51], le séchage de l'argile [14], la laine [29], d'autres sécheurs pour le papier [65]. La recherche axée sur l'étude des séchoirs à bois ainsi que le séchage du bois lui-même [46], a permis, [72] l'introduction du concept d'unités de transfert thermique et massique (outils rapides de simulation de séchoirs) et aussi les réseaux de modules d'unités de transferts (séchoir multi-tapis) [73].

Les produits agricoles et autres ont été séchés par le soleil et le vent à l'air libre depuis des milliers d'années. Le but est soit de les conserver pour une utilisation ultérieure, comme c'est le cas avec les denrées alimentaires, soit cela fait partie intégrante du processus de production, comme avec le bois, le tabac, la poterie et autres. Dans les régions industrialisées, les secteurs de séchage, en plein air ont été en grande partie remplacés par des séchoirs mécaniques, avec des chaudières pour chauffer l'air entrant, et des ventilateurs pour augmenter le rythme. Les séchoirs mécaniques sont plus rapides que le séchage en plein air, ils utilisent beaucoup moins de terrains et donnent généralement un produit de meilleure qualité. Mais l'équipement est coûteux et nécessite d'importantes quantités de carburant ou d'électricité pour fonctionner.

Les séchoirs solaires peuvent être plus efficaces que le séchage au soleil (exposition aux poussières, aux insectes etc.), mais ont des coûts d'exploitation plus bas que les séchoirs mécaniques.

On distingue deux grandes catégories de séchoirs solaires : les armoires de séchage vitrées (séchage direct) et les armoires de séchage non vitrées et reliées à un insolateur plan (séchage indirect). Des chercheurs [84] ont développé des équations empiriques de cinétique de séchage de riz disposé en couche mince, en convection naturelle. Ils ont fait une comparaison entre les deux procédés de séchage cités auparavant et ils ont conclu que le mode de séchage à armoire (non vitrée) reliée à un capteur solaire à air (séchage indirect), présente les meilleures performances et réduit les risques d'endommager les produits sensibles pendant les fortes intensités du soleil dans les pays tropicaux. D'autres travaux [76 et 77], ont permis de déterminer des facteurs de gain de séchage affectés aux produits utilisés, en passant du séchage traditionnel à l'utilisation des séchoirs indirects à convection naturelle.

Le séchage des produits a fait l'objet de plusieurs recherches, notamment : le maïs [56], la tomate [31], les carottes [75], l'oignon [71], les noix [44], la pomme [85], le riz [22], la pomme de terre douce [23], la pomme de terre [15 et 67], et beaucoup d'autres produits [14, 51 et 4].

Notre projet global concerne le séchage des produits rouges qui présente un grand intérêt pour l'industrie notamment pour la fabrication des tuiles, briques, céramiques, etc... la composition chimique de l'argile préparé pour l'industrie est résumée dans le tableau I.1 et dépend entre autre et surtout du site de prélèvement.

Nature des éléments	Formulation	Tolérances (%)
Silice	SiO ₂	35 à 85
Alumine	Al ₂ O ₃	9 à 25
Chaux	CaO	0 à 25
Magnésie	MgO	0 à 5
Oxydes alcalins	Na ₂ O+ K ₂ O	1 à 5
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3 à 9
Oxyde de titane	TiO ₂	0.3 à 2
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 à 3
Gaz carbonique	CO ₂	0 à 13
Eau de combinaison	H ₂ O	5 à 11

Tableau I-1 Composition chimique de l'argile pour produits rouges

Ces produits présentent un grand intérêt dans la construction d'aujourd'hui, elle est même devenue une industrie moderne permettant de réaliser toutes les parties de la construction :

- murs en fondation en briques pleines ;
- murs en élévation en briques creuses ;
- hourdis pour planchers ;
- bardeaux (planche mince en forme de tuile)- sous toiture ;
- tuiles pour couverture ;
- carreaux pour les revêtements de sols ;
- faïence pour les revêtements de murs ;
- boisseaux pour les cheminées (conduites de fumée).

C'est pour toutes ces raisons que nous nous sommes intéressés au séchage de ce type de produit qui présente par ailleurs, lorsqu'on le soumet à ce traitement, des caractéristiques adaptables à la cuisson.

I.2. LE SECHAGE

Le séchage est l'opération qui a pour but l'évacuation d'un solvant contenu dans un produit. Le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie est le séchage par entraînement : la température reste inférieure à celle d'ébullition de l'eau et le gaz d'entraînement est généralement de l'air. C'est l'air qui cède sa chaleur au produit et reçoit l'humidité extraite de celui-ci. Le séchage est alors défini comme étant un double transfert de chaleur et de masse. L'opération de séchage s'applique aux produits qui ont une structure permettant la fixation de l'eau. Ces produits sont souvent de nature capillaro-poreuse. Cette opération est soumise à des consignes très strictes quels que soient les produits à sécher. Pour les matériaux de construction (bois, brique, tuile, béton, céramiques sanitaires,...), le séchage doit conserver la forme et l'état de surface, éviter les déformations et les fentes. Les propriétés mécaniques ne doivent pas être altérées. Les transferts de chaleur et de masse, lors du séchage convectif, ont fait l'objet de nombreux travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux. La modélisation de ces transferts devient de plus en plus précise. L'intérêt porté à la modélisation des déformations provoquées par cette opération est récent. Les problèmes de déformations et fissurations se posent de manière plus aigüe pour le séchage des bois [62 et 79], de produits de terre cuite [33 et 34], des gels [57 et 64].

Selon leur prééminence, on peut distinguer plusieurs phases dans le phénomène de séchage. La figure I-1 présente l'évolution typique, en fonction du temps t , de la teneur en humidité absolue M (rapport de la masse d'eau contenue dans le produit et de la masse du produit sec) d'un produit à travers lequel circule un courant d'air chaud dont l'humidité et la température sont contrôlées tout au long du processus de séchage.

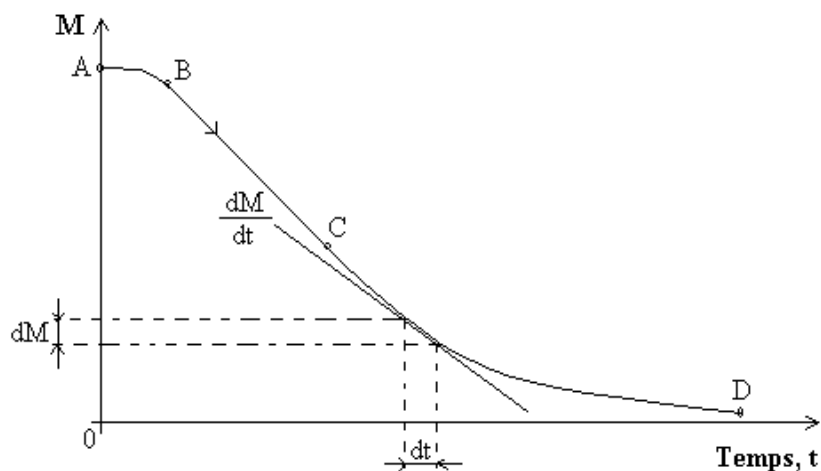
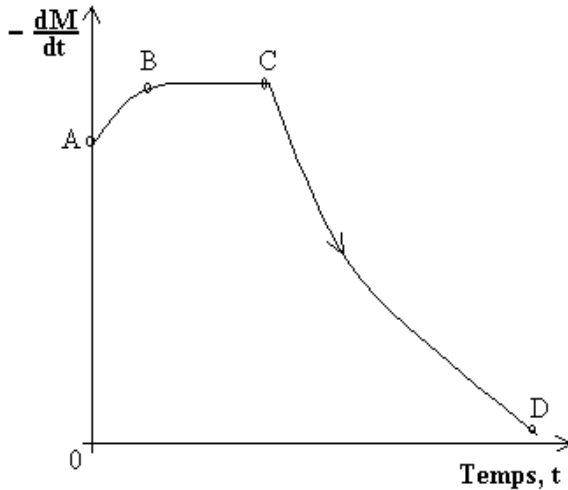
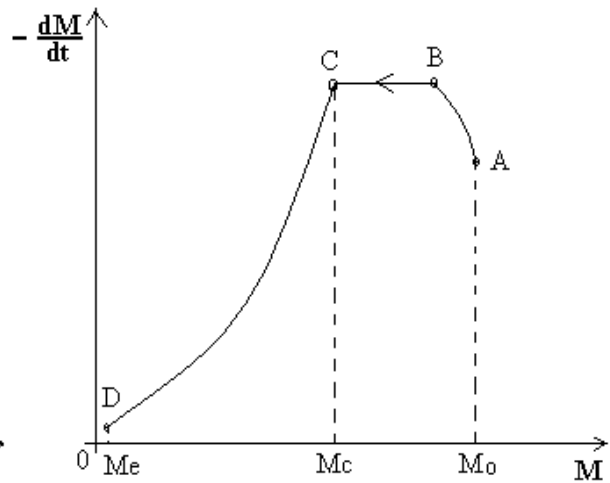


Figure I-1 Courbe de séchage

On y distingue trois phases, plus visibles sur les courbes des figures (I-2 et I-3) donnant la vitesse de séchage $-dM / dt$ en fonction du temps ou de M [13].

Figure I-2 Vitesse de séchage $-dM/dt=f(t)$ Figure I-3 Vitesse de séchage $-dM/dt=f(M)$

1.2.1. Phase initiale (A-B) : Cette phase est définie comme étant une phase de mise en régime des transferts de chaleur et de matière à la surface saturée du produit. La quantité de chaleur apportée durant cette période contribue à élever la température du produit tout en vaporisant une certaine quantité du soluté. Cette phase est généralement courte par rapport au temps global du séchage ; ce qui explique vraisemblablement le peu d'intérêt manifesté par les chercheurs dans l'étude de cette phase.

1.2.2. Phase à vitesse de séchage constante (B-C) : Pendant cette phase l'humidité est acheminée en flux continu vers la surface du produit causée par la pression capillaire ; de cette manière, durant toute la durée de cette phase jusqu'au point critique C, la surface du produit est saturée en eau. Ceci rend donc le processus de séchage assimilable à l'évaporation d'un liquide dont la vitesse de séchage dépend uniquement des conditions externes telles que l'humidité de l'air, sa température sèche et sa vitesse de circulation. Cette phase s'achève lorsque le matériau atteint une humidité moyenne appelée humidité critique. Par contre la nature du solide n'intervient pas, alors que sa forme peut influencer sur le débit d'eau évaporée \dot{m}_e , défini par [13] :

$$\dot{m}_e = -m_{prs} \frac{dM}{dt} = K_m S_{fpr} (P_{sat}(T_{pr}) - P_v(T_{fs})) \quad (I.1)$$

Où :

- $P_{sat}(T_{pr})$ est la pression de vapeur d'eau saturante à la température T_{pr} à la surface du produit pendant la phase à vitesse constante ou pression saturante à la température humide de l'air en Pascal ;

- $P_v(T_{fs})$ est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air de température locale T_{fs} en Pascal ;
- $K_m = h_{me} / (R_v (T_{fs} + 273))$, est le coefficient global externe de transfert de matière exprimé en s/m, où h_{me} est le coefficient d'échange de matière par diffusion à travers la couche limite, il peut être déterminé expérimentalement et est exprimé en m/s. R_v est la constante caractéristique de l'eau exprimée en J/kgK.

En considérant que le transfert de matière représenté par l'évaporation de l'eau s'accompagne d'un transfert thermique dirigé en sens inverse, la vitesse d'évaporation peut également s'exprimer sous une autre forme :

$$\dot{m}_e = h_{vfpr} S_{fpr} (T_{fs} - T_{pr}) / L_v \quad (I.2)$$

Où h_{vfpr} et S_{fpr} sont respectivement le coefficient d'échange par convection entre l'air et le produit (en W/m²K) et la surface d'échange entre l'air et le produit (en m²).

C'est une phase qui n'est pas toujours identifiable, même pour les produits végétaux qui ont une humidité absolue initiale importante. Ceci s'explique par le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface extérieure.

Cette phase d'évaporation est observable tant que la vitesse de transport de l'eau liquide dans les pores du matériau vers sa surface est un phénomène rapide devant la vitesse globale d'évaporation ; les principaux facteurs diminuant sa durée sont :

- la diminution de la pression de vapeur d'eau dans l'air ou bien la diminution du taux d'humidité de l'air de séchage ;
- l'augmentation des coefficients de transfert de matière et de chaleur par une augmentation de la vitesse de l'air de séchage ;
- l'accroissement de la surface d'échange air-produit, qui peut s'obtenir en divisant le plus possible le produit à traiter ;
- l'élévation de la température de séchage.

I.2.3. Phase à vitesse de séchage décroissante (C-D) : Au deçà de l'humidité critique les forces capillaires ne sont plus suffisantes pour acheminer l'eau vers la surface du produit .C'est le début de la première phase de ralentissement. La vitesse de séchage ne peut plus maintenue constante et elle commence à décroître. Les propriétés physiques du corps à sécher influent de plus en plus sur le déroulement du séchage. La pression de vapeur d'eau sur cette surface diminue donc, ce

qui diminue le potentiel d'échange, défini par la différence entre cette pression et la pression de vapeur d'eau dans le milieu ambiant ; par conséquent, la vitesse de séchage diminue.

Cette phase dépend, en premier lieu des propriétés de diffusion de l'eau dans le produit, l'influence des conditions d'écoulement de l'air asséchant est secondaire.

La théorie la plus appropriée dans cette phase est celle de la diffusion qui suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la seconde loi de Fick qui établit une relation linéaire entre le flux de matière $\vec{\Phi}_m$ (kg/m²s) et le gradient de concentration volumique de l'eau C (kg eau/m³), au sein d'un volume de produit :

$$\vec{\Phi}_m = -D_e \vec{grad}.C \quad (1.3)$$

D_e est la diffusivité de l'eau dans le produit à sécher : m²/s

La loi de conservation de la matière donne :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div} \vec{\Phi}_m = 0 \quad (\text{En l'absence de sources volumiques})$$

Qui peut s'écrire, lorsque la diffusivité est constante (matériau homogène isotrope) et indépendante de C :

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_e \Delta C = 0$$

Lorsque l'on suppose que la masse volumique du produit est constante, cette équation devient :

$$\frac{\partial M}{\partial t} - D_e \Delta M = 0 \quad (I.4)$$

Dans de nombreux travaux [16], et dans le souci d'obtenir une solution analytique, la diffusivité de l'eau a souvent été supposée constante et le produit traité considéré comme indéformable. Ainsi en partant d'une humidité uniforme égale à M_0 et en supposant que la surface du produit reste à tout instant à son humidité d'équilibre M_e , l'équation (I.4) admet pour solution, dans le cas d'une géométrie plane, la série suivante [21] :

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1) \pi^2 D_e t}{4 l_p^2}\right) \quad (I.5)$$

Avec l_p la dimension caractéristique du produit (épaisseur pour une plaque séchée par sa face supérieure).

Cependant la relation (I.5) n'est applicable que pour une épaisseur l_p constante tout au long du processus de séchage. De plus cette relation obtenue dans le cas d'un séchage isotherme. Vu la décroissance rapide de la série (I.5), la somme des termes d'ordre supérieur à 1 est négligeable devant le premier terme, alors pour un temps de séchage suffisamment long, lorsque le temps t est supérieur au temps critique à partir duquel débute la phase à vitesse de séchage décroissante, on peut écrire :

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_e t}{4 l_p^2}\right) \quad (I.6)$$

Une autre proposition a été faite par [80], pour déterminer D_e . Son approche suppose que pendant un séchage court, l'humidité et l'épaisseur de l'échantillon varient peu, donc supposées constantes, d'où D_e est alors déterminé à partir de la vitesse de séchage :

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{2}{l_p} \left(\frac{D_e}{\pi}\right)^{1/2} \quad (I.7)$$

Grace aux développements des outils informatiques et en particulier les algorithmes d'optimisation, il est devenu possible de déterminer la diffusivité en fonction de la température et l'humidité absolue. D'autres [5] ont déterminé la diffusivité de l'eau dans les pâtes alimentaires. Ils ont ensuite proposé cette équation où D_e a une évolution quadratique avec l'humidité et exponentielle avec la température.

$$D_e = (aM^2 + bM + c) \exp\left(-\frac{d}{T}\right)$$

Pour le cas de l'argile, une loi exponentielle mise en œuvre par de nombreux auteurs [38], de diffusion liant la diffusivité à la température et à l'humidité et qui a été retenue par [51] (figures I-4 et I-5).

$$D_e = D_0 \left(a + \exp\left(\frac{bM}{c+M}\right) \exp\left(-\frac{d}{T}\right) \right) \quad (I.8)$$

Avec :

$D_0 \times 10^{-10} (m^2 s^{-1})$	a	b	c	d
5,61	7,5	44	1,6	510

Tableau I-2 Paramètres de coefficient de diffusion

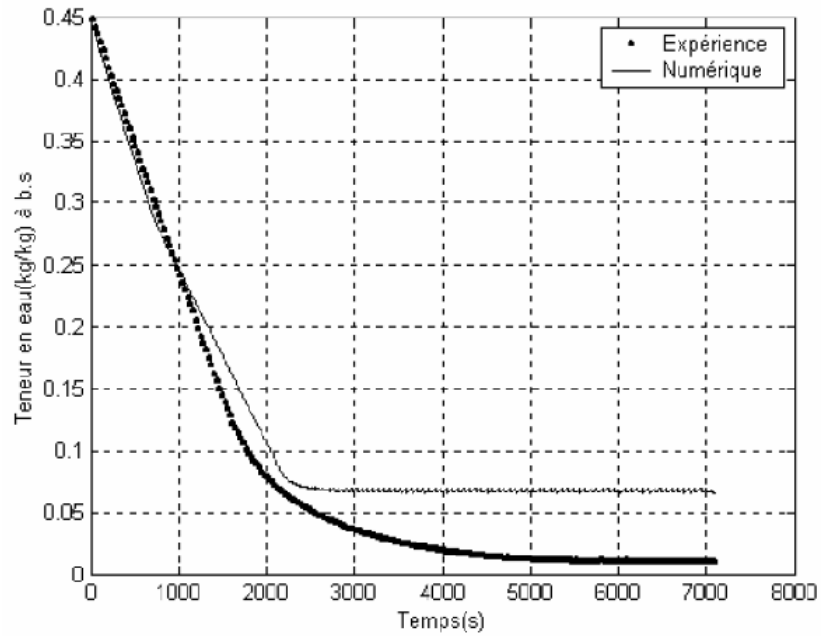


Figure I-4 Représentation de la teneur en eau calculée et expérimentale [51]

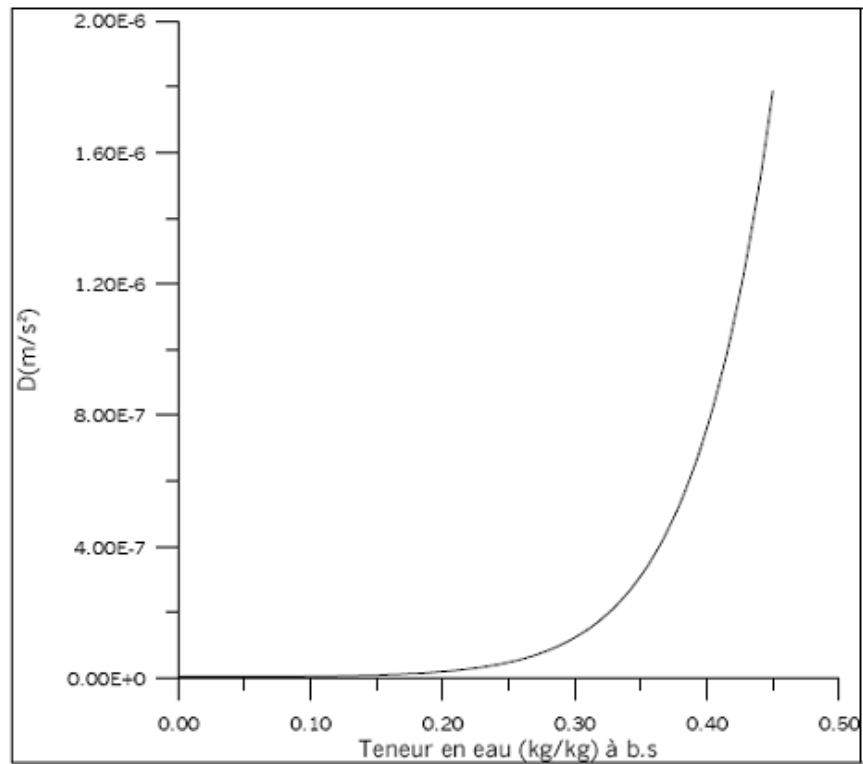


Figure I-5 Evolution du coefficient de diffusion avec la teneur en eau [51]

Le coefficient de diffusion de l'eau dans certains produits a été l'objet de plusieurs travaux, Citons : Gekas et Lamberg [26], Mulet [58]. Alors que Afzal et Abe [1] proposent une expression de ce coefficient, dont les valeurs sont comprises entre $5,93 \times 10^{-11}$ et $1,73 \times 10^{-9}$ m²/s, en fonction de la température interne du produit T_{pr} , de l'épaisseur e_p en mm, ainsi que de l'humidité absolue M de la pomme de terre :

$$D_e = 2,57 \times 10^{-11} (T_{pr} + 273) + 7,96 \times 10^{-11} e_p - 2,11 \times 10^{-10} M - 7,015 \times 10^{-11} \quad (\text{I.9})$$

La théorie capillaire, elle, s'applique à des produits poreux et granulaires dont la teneur en humidité absolue à base sèche est généralement déterminée empiriquement. Si la teneur en eau est uniforme ou représente une valeur moyenne dans le produit, on écrit que :

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = b(M_e - \bar{M}) \quad (\text{I.10})$$

La solution générale de cette équation s'écrit donc :

$$\bar{M} = (M_0 - M_e)e^{-bt} + M_e \quad (\text{I.11})$$

où M_e teneur à l'équilibre, est fixée ;
 M_0 étant la teneur initiale moyenne ;
 b est un coefficient qui dépend de la vitesse de séchage pendant la phase à vitesse constante, sa détermination est empirique.

I.3. ISOTHERMES DE SORPTION

Dans tout procédé de séchage, une étape importante consiste à évaluer son caractère hygroscopique. Le transport de la vapeur est un phénomène qui se produit lors de cette étape. Le mouvement de la vapeur se fait soit par diffusion au sein du matériau même soit par échange au niveau de la surface entre le matériau et son environnement. Si un produit peu humide de nature hygroscopique se trouve en contact avec de la vapeur d'eau, il fixe celle-ci jusqu'à atteindre un état d'équilibre ; ce phénomène est connu sous le nom d'*adsorption*. Par contre lorsque le même produit est placé dans une atmosphère plus sèche, l'état d'équilibre s'établit par transfert d'humidité du produit vers l'extérieur ; ce phénomène est couramment appelé *désorption*. Les isothermes de sorption représentent la relation entre la teneur en liquide du produit et celle de la vapeur à la pression d'équilibre pour des températures données.

1.3.1. Modèles de sorption

L'utilité des isothermes est double : D'une part, elles permettent de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage, appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation, particulièrement lorsque les matériaux sont fortement hygroscopiques Coumans [20].

Pour rappel, un matériau est qualifié d'hygroscopique lorsqu'il absorbe et retient facilement l'humidité de l'air et de non hygroscopique lorsqu'il ne fixe pas naturellement les molécules d'eau présentes sous forme de vapeur dans l'air.

1.3.2. Formes et modèles des isothermes

L'activité a_w de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. La courbe représentant pour une température T donnée la teneur en eau d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec ;
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

Les deux courbes sont en général différentes figure I-6 car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

Trois zones apparaissent en général sur les isothermes d'adsorption/, chacune correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit (figure I-7) :

- *Zone 1* : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et des pores du produit. L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- *Zone 2* : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale. L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.
- *Zone 3* : L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes. Certaines se basent sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique, un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Le tableau I-3 présente les modèles les plus utilisés.

Les modèles d'isothermes peuvent être théoriques (Langmuir 1918 ; Brunauer et al. 1938, 1940; Bradeley 1936 ; Kühn 1964 ; Zsigmondy 1911), semi théoriques (Henderson 1952 ; Iglesias et Chirife 1976) ou empiriques (Lykov 1955 ; Iglesias et Chirife 1978).

De nombreux modèles ont été développés montrant la relation entre l'humidité d'équilibre M_e , l'activité de l'eau a_w et la température T_{fs} (Bizot 1983 ; Andrieu et al. 1985 ; Chen et Morey, 1989). Le choix du modèle convenable dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la zone à étudié (Roques, 1988) car pour décrire la zone 1 il est mieux décrit par l'équation de Langmuir, la zone 2 et mieux décrit par l'équation de B.E.T., ainsi que le type de matériau à étudiée et la nature du solvant.

D'après la littérature Maroulis et al. [45] ; Tsami et Marinos-Kouris [78] ; Mok et Hettiarrachy [52]; Mihoubi et al. [49] les modèles de GAB, Henderson, Chung, et Pfost et Halsey semblent les mieux adaptés à l'argile.

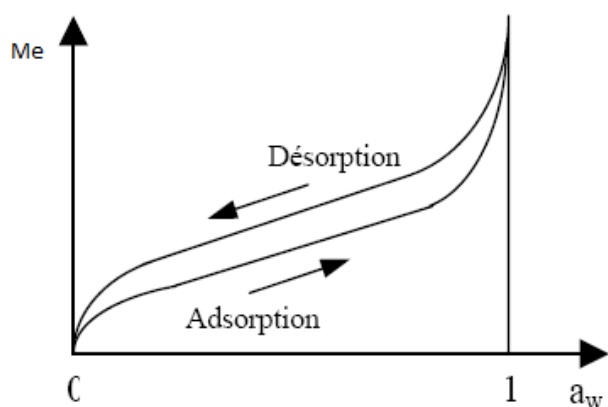


Figure I-6 Allure générale des isothermes de sorption

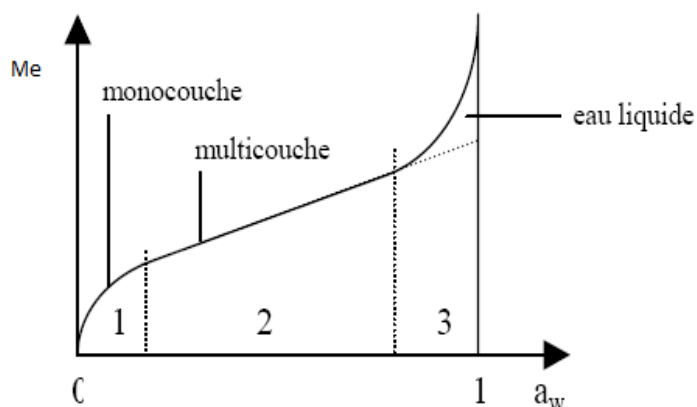


Figure I-7 Forme générale des isothermes

Auteurs	Modèle	Paramètres	Domaine
Langmuir (1918)	$M_e = M_{mc} \cdot \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w}$	C M_{mc}	Zone 1
Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T, 1938)	$M_e = M_{mc} \cdot \frac{c \cdot a_w}{1 - a_w} \cdot \frac{1 - (n + 1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1}}{1 + (C - 1)a_w - C \cdot a_w^{n+1}}$	C M_{mc} n: nombre de couches	Zone 2
	$M_e = M_{mc} \cdot \frac{c \cdot a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]}$	C M_{mc} n=1, a_w^2 négligé	Zone 1
Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B) (1946)	$M_e = \frac{C \cdot K \cdot M_{mc} \cdot a_w}{[(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)]}$ C = C ₀ exp[ΔH _C / (R (T _{fs} + 273))] K = K ₀ exp[ΔH _K / (R (T _{fs} + 273))]	C K	Courbe complete
Oswin (1946)	$M_e = A \cdot \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$	A B	Courbe complete
Halsey (1948)	$a_w = \exp\left(\frac{-A}{M_e^B}\right)$	A B	Courbe complete
Henderson (1952)	$1 - a_w = \exp[-A \cdot (T_{fs} + 273) \cdot M_e^B]$	A B	Courbe complete
Chung-Pfost (1967)	$a_w = \exp\left[\frac{-A}{R \cdot (T_{fs} + 273)} \cdot \exp(-B \cdot M_e)\right]$	A B	Courbe complete

Tableau I-3 Equations des modèles appropriés aux courbes de désorption expérimentales

(A, B, C, K, Z₁ et Z₂ : sont des constantes qui dépendent généralement de la température de l'air, M_{mc} : humidité absolue d'une monocouche en kg eau/kg MS).

I.4. MASSE VOLUMIQUE ET RETRAIT

Pour caractériser le comportement d'un produit étudié lors du séchage, la connaissance de l'évolution de sa masse volumique en fonction de la teneur en eau est essentielle.

I.4.1. Mécanisme de retrait

Certains matériaux subissent un retrait non négligeable lors du séchage. Les constituants du produit se resserrent les uns contre les autres sous l'effet de forces internes. Ce phénomène peut avoir une grande influence sur les propriétés du matériau séché. Krause [43] évoque les fissurations dans les céramiques dues à un séchage agressif produisant un retrait maximal en

surface alors que le cœur du produit, encore humide, garde ses dimensions. Kneule [40] fut le premier à tenter la caractérisation de ce phénomène. Il distingue le retrait libre, durant lequel le matériau peut se contracter librement, du retrait contrarié durant lequel cette contraction est entravée par des forces extérieures. Il fait également mention de l'anisotropie du retrait propre aux matériaux à fibres ou à directions privilégiées. Il qualifie enfin le retrait d'idéal lorsque la diminution du volume subie par le produit humide correspond exactement au volume de liquide extrait.

1.4.2. Résultats obtenus sur le Kaolin et la Bentonite

Plusieurs travaux ont montré que la masse volumique ne dépendait pas des conditions de séchage, son évolution étant seulement liée à la quantité d'eau dans le produit [37 et 83]. La courbe (figure I-8) en trait continu représente une corrélation permettant de relier la masse volumique à la teneur en eau. Cette corrélation a pour expression mathématique :

$$\rho = 1345,217 \exp\left(-\frac{(M_e - 0,262387)^2}{2(0,3735)^2}\right) \quad (\text{I.12})$$

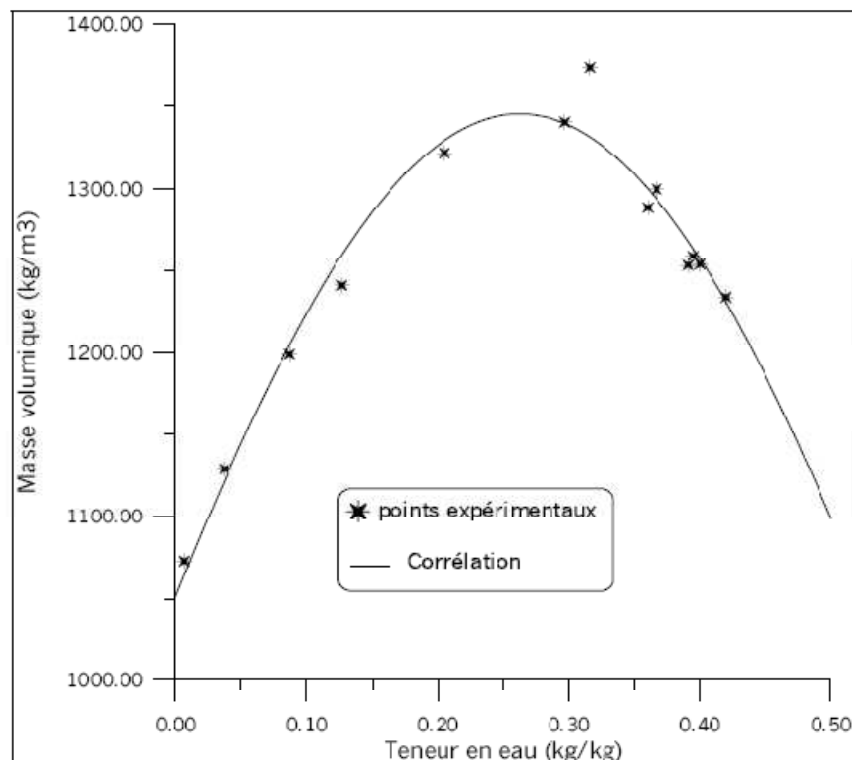


Figure I-8 Evolution de la masse volumique du gâteau de Kaolin en fonction de la teneur en eau [51]

I.5. ACTIVITE DE L'EAU

On définit l'activité de l'eau dans le corps humide « a_w », par le rapport de la pression P_{vp} (de la vapeur à la surface du produit) et de la pression P_{sat} (de la vapeur saturante à la température de surface du produit).

Si le corps est en équilibre hygroscopique avec l'air qui l'entoure (lorsqu'il n'y a plus d'échange d'eau entre eux), il en résulte que la pression P_{vp} s'égalise avec la pression partielle de vapeur P_v dans l'air et que l'activité de l'eau du produit et l'humidité relative de l'air deviennent identiques ($a_w = \varphi$).

Pour qu'il y ait séchage, il faut que l'humidité relative de l'air soit inférieure à l'activité de l'eau du produit ($\varphi < a_w$) de façon à ce que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression partielle de vapeur dans l'air ($P_{vp} > P_v$).

I.5.1. Travaux de recherche

Mihoubi [51] et autres ont étudié le comportement des courbes de sorption-désorption déterminées expérimentalement pour des échantillons de la bentonite et du Kaolin, Ils montrent que les modèles de G.A.B. et Henderson sont bien adaptés à ce type de produit. Selon G.A.B. (tableau I-3), les constantes C et K sont données en fonction de la température de l'air par :

$$C = C_0 \exp\left[\frac{\Delta H_C}{R(T_{fs} + 273)}\right]$$

$$K = K_0 \exp\left[\frac{\Delta H_K}{R(T_{fs} + 273)}\right]$$

Les valeurs des paramètres C_0 , K_0 , ΔH_C et ΔH_K étant regroupées dans le tableau

$T^\circ C$	Désorption Kaolin			Désorption bentonite		
	K	C	M_{mc}	C	K	M_{mc}
30				0,98	45,981	0,070
50	0,94	86,307	0,00449	0,93	42,628	0,062
70	0,95	87,985	0,00356	0,92	30,695	0,054

Tableau I-4 Estimation des paramètres de l'équation du modèle de G.A.B pour la bentonite et le Kaolin

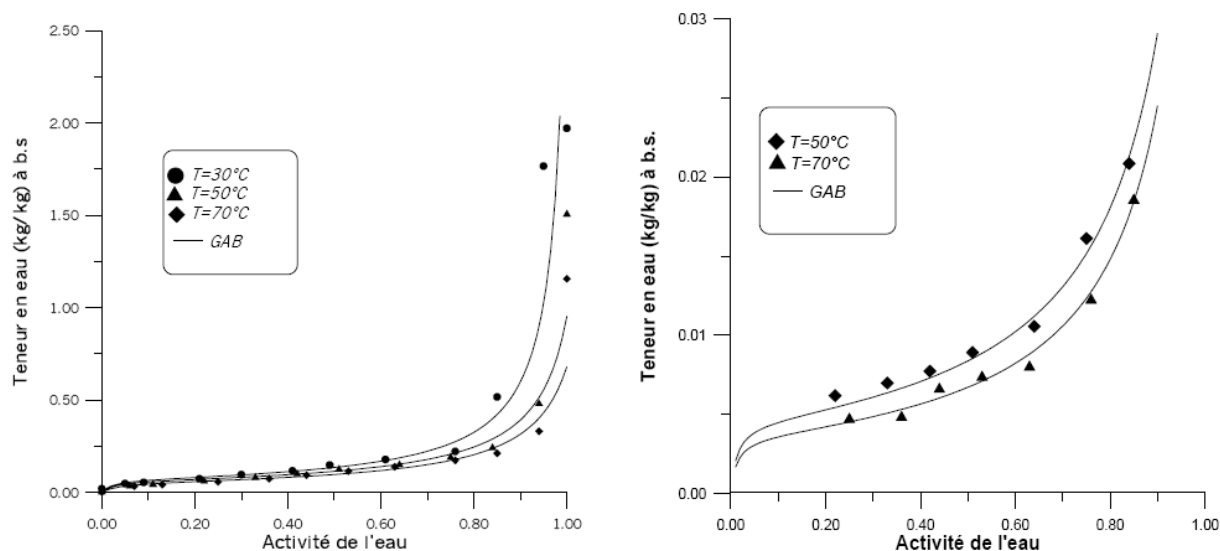


Figure I-9 Isothermes de désorption (modèle de G.A.B.) de la bentonite et du Kaolin

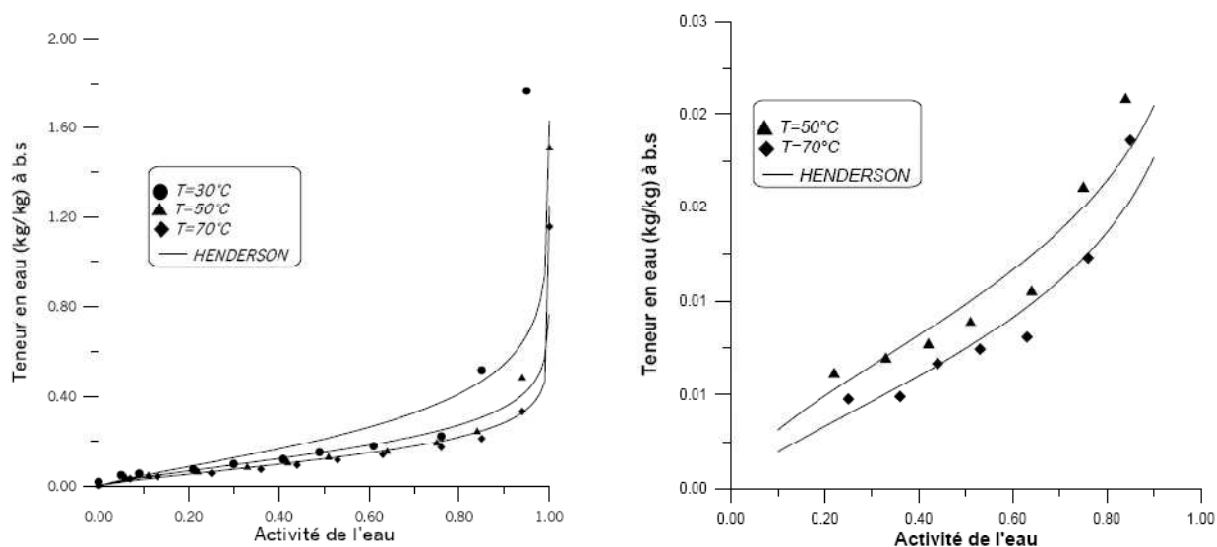


Figure I-10 Isothermes de désorption (modèle de Henderson) de la bentonite et du Kaolin

Un travail de recherche sur trois argiles élaboré par [14], a présenté les résultats du calcul (figure I.12) obtenus ne sont pas suffisamment précis à cause de la petite variation de la teneur en eau avec la température. L'enthalpie de sorption décroît quand la teneur en eau augmente et tend vers une valeur fixe. Pour des teneurs en eau faibles, l'enthalpie de sorption est élevée ; ceci est dû à l'énergie d'interaction eau-sorbant s'ajoutant à l'enthalpie de condensation.

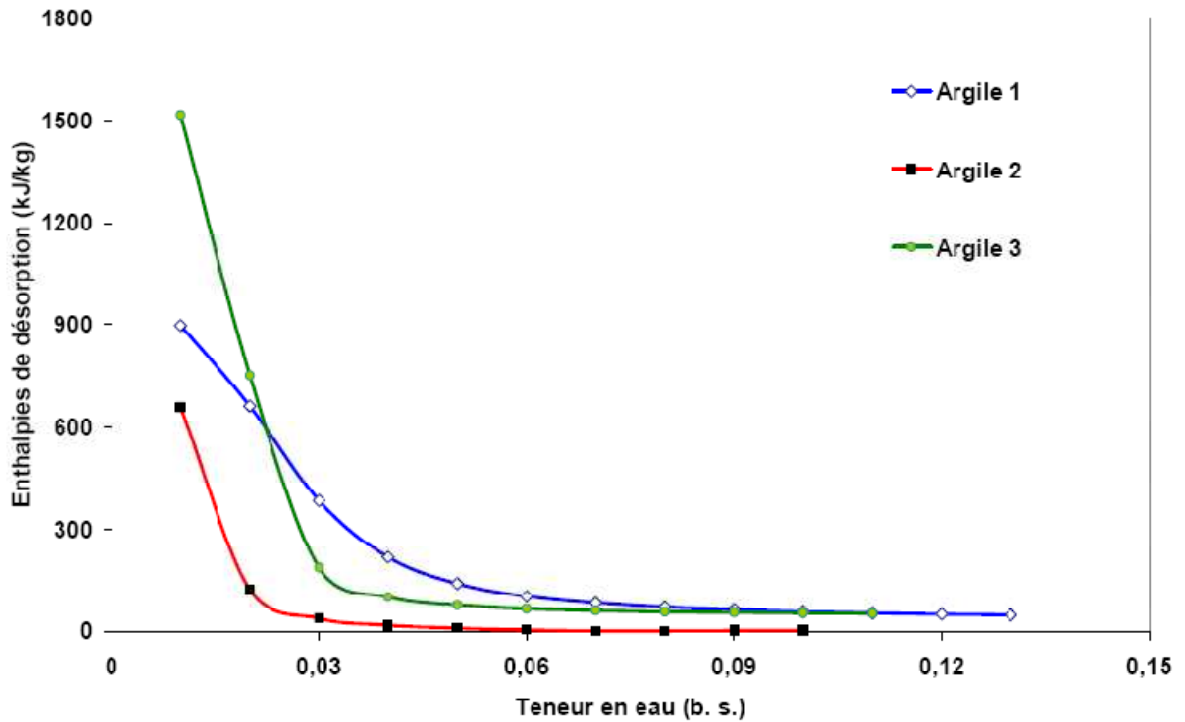


Figure I-11 Enthalpies de désorption des trois argiles

1.5.2. Chaleur nette de désorption

En toute conception et optimisation des séchoirs, le calcul de la chaleur de désorption de l'eau dans les produits est utile et améliore le calcul de l'énergie consommée durant le séchage. Cette chaleur de désorption peut être obtenue à partir des courbes des isothermes de désorption en utilisant l'équation de Clausius-Clapeyron qui met en relation la pression de vapeur et la température dans une phase de transition entre un liquide absorbé et la phase vapeur. La chaleur totale qu'il faut fournir pour évaporer l'eau liée ΔH_t est la somme de la chaleur latente de changement de phase ΔH_v et de la chaleur nette de désorption ΔH_n . Pour un corps pur, la relation de Clausius-Clapeyron donne la chaleur latente d'évaporation :

$$\Delta H_v = - \frac{R}{M_e} \frac{d(\ln P_{sat})}{d(1/T)} \quad (I-13)$$

Pour l'eau adsorbée, l'expression est analogue mais la pression de saturation du corps pur est remplacée par la pression de vapeur à l'équilibre :

$$\Delta H_t = - \frac{R}{M_e} \frac{d(\ln a_w P_{sat})}{d(1/T)} \quad (I-14)$$

Et on obtient la chaleur nette de désorption :

$$\Delta H_n = \Delta H_t - \Delta H_v = -\frac{R}{M_e} \frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} \quad (\text{I-15})$$

Une représentation graphique de cette équation est donnée par la figure I-13. La pente de chaque isostère (une isostère correspond à l'ensemble des points ayant la même teneur en eau) est, à une constante près, la chaleur nette de désorption. Cette méthode de calcul est actuellement la plus utilisée. Le principe de calcul des enthalpies de désorption se fait à l'aide des courbes des isothermes de désorption et pour chaque valeur de teneur en eau, on détermine les trois valeurs de l'activité de l'eau correspondant respectivement aux trois températures (40, 50 et 60°C). On trace alors la courbe $(-\ln a_w)$ en fonction de $(1/T)$ appelée isostère figure I-13 et on calcule la pente de la droite. La valeur trouvée correspond à la chaleur nette de désorption à une teneur en eau bien déterminée.

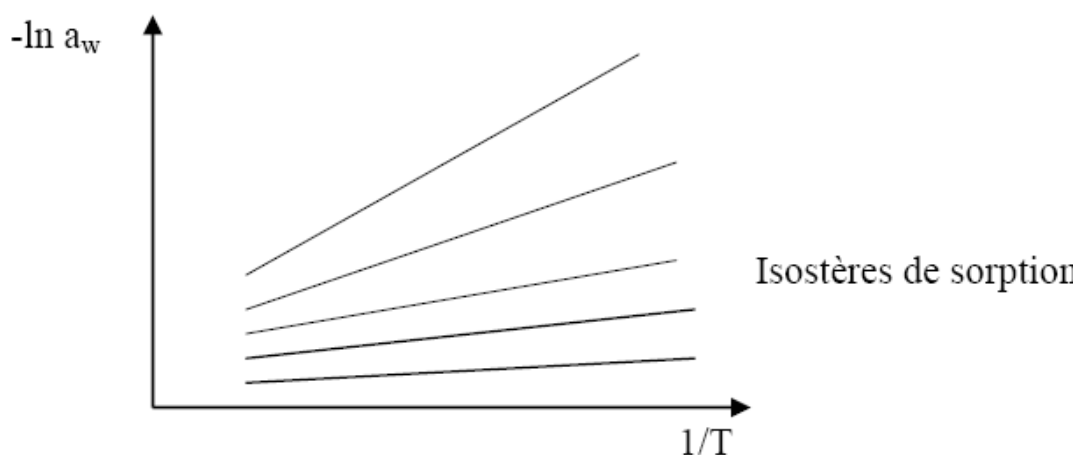


Figure I-12 Courbe des isostères dans un diagramme $(1/T$ et $-\ln a_w)$

I.6. COURBE DE BIGOT

Pour le céramiste qui travaille les matières argileuses et la terre cuite, la courbe de retrait Bigot est une des données importantes utilisées pour prévoir la facilité de séchage d'un mélange argileux. L'obtention de la courbe de Bigot est décrite dans les textes de la céramique ou de la terre cuite [42]. Son interprétation détaillée est parue partiellement dans des articles anciens oubliés depuis longtemps, et n'a pas été reprise dans les livres modernes. On a noté récemment une tendance à mal interpréter les résultats ou au contraire à leur faire dire plus qu'ils ne le peuvent. Aussi, cela vaut la peine de préciser ce qu'on peut tirer exactement de cette mesure déjà ancienne [10] et comment l'interpréter au mieux. Sur la figure I-14, on voit la courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles avec les différentes humidités remarquables:

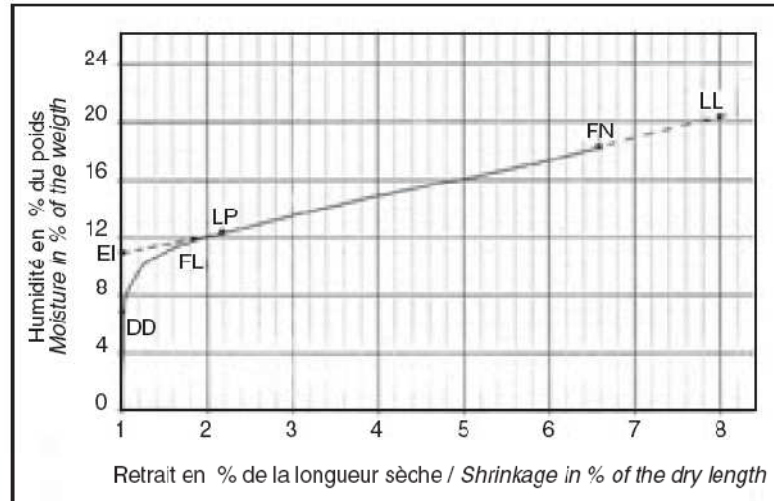


Figure I-13 Courbe de Bigot typique d'une argile à tuiles [41]

- LL et LP : limites de liquidité et de plasticité selon Atterberg ;
- FN : "façonnage normal" EI : point critique ou concentration critique ou eau d'interposition ;
- FL : fin de linéarité DD : début de déformation.

1.6.1. Eau colloïdale et eau d'interposition

En partant de la pâte de façonnage normale, avec l'humidité FN, on détermine:

- Eau colloïdale 7,2 % ;
- Eau d'interposition 10,9 %
- Eau totale 18,1 %.

Les interprétations qu'on donne de cette courbe montrent certaines variations.

- plus la courbe est longue, plus le retrait sera important, ce qui est le cas des argiles fines et plastiques. Elles sont difficiles à sécher ;
- plus la courbe est haute, plus l'argile nécessite de l'eau de façonnage et plus l'opération de séchage est longue et coûteuse ;
- plus la teneur en eau d'interposition est élevée, plus l'argile est facile à sécher puisque la phase correspondante au départ d'eau sans variation dimensionnelle est importante".

Roget [66] compare la courbe de Bigot avec l'isotherme d'adsorption de l'argile. Puis il indique que la seule partie qu'il interprète est la longueur et la pente de la partie droite : plus la pente est petite, plus les risques de rupture due à une inégalité dans le séchage sont petits. Dans les études géotechniques ou agricoles des sols argileux, on réalise aussi des tests de dessiccation où on mesure le retrait [17]. Ces essais sont souvent moins précis et ne se réfèrent pas au nom de Bigot.

Cependant des travaux récents permettent de mieux comprendre [11 et 25] et même modéliser [82] la courbe de retrait de sol. Il est intéressant d'utiliser ces résultats pour mieux expliquer les courbes de Bigot.

La courbe de Bigot classique peut être tracée à partir des essais avec les commentaires suivants :

- le test de Bigot permet de tracer la courbe simplement en continu avec un seul échantillon ;
- les variations de volume sont données maintenant sous forme de variation d'une longueur ;
- le point de référence est l'état sec, de façon à comparer plus facilement les courbes entre elles.

1.6.2. Pente de la zone linéaire de l'eau colloïdale

Dans le test précédent de séchage, on avait l'égalité des variations de poids et de volume, ce qui s'exprime par :

$$\Delta P = \Delta V \cdot \rho_{eau} \quad (I.16)$$

Avec	ΔP	variation du poids (kg) ;
	ΔV	variation de volume (m ³) ;
	ρ_{eau}	masse volumique de l'eau (kg/m ³) ;
	V_0	volume volumique de l'échantillon sec poreux ;
	ρ_{sec}	masse de l'échantillon sec poreux.

Après division des deux termes de l'équation (I.16) par le poids de l'échantillon sec P_0 ($P_0 = V_0 \times \rho_{sec}$)

L'équation devient alors :
$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \frac{\rho_{eau}}{\rho_{sec}}$$

Si le matériau est isotrope, le retrait volumique $\Delta V/V_0$ est égal à trois fois le retrait linéaire $\frac{\Delta l}{l}$.

L'équation (I.16) devient alors :
$$\frac{\Delta P}{P_0} = 3 \frac{\Delta l}{l_0} \frac{\rho_{eau}}{\rho_{sec}} \quad (I.17)$$

Cette équation correspond aux échelles employées sur la courbe de Bigot et indique que, dans la zone linéaire de séchage, la courbe de Bigot est une droite avec une pente aux environs de 4 :

En conséquence:

- si la courbe enregistrée n'est pas une droite, il y a sans doute un problème expérimental (par exemple bulle d'air résiduelle dans le mélange initial, liée aussi à une concentration élevée de sable) ;
- contrairement à ce que dit Bigot, la pente de la courbe ne donnerait aucune indication sur la facilité ou non de séchage du mélange. Cette pente tient à la nature des choses, principalement à la densité du mélange sec.

I-7 SECHOIRS SOLAIRES

Les produits peuvent être séchés en les disposants en lit de particules sur des claies perforées fixées ou placées sur des chariots qui se déplacent. Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection naturelle. Evidemment la quantité de soleil et d'humidité affectera les performances du séchoir. Les séchoirs solaires se divisent en deux modèles, de type directs et indirects.

On peut citer l'utilisation des toitures solaires [30] et le couplage capteur-armoire de séchage. Dans ce deuxième procédé, l'air peut être aspiré par un ventilateur (convection forcée) ou se déplacer par gravitation (convection naturelle).

Pendant les périodes non ensoleillées, pour maintenir le processus de séchage à une température de l'air asséchant assez élevée, certains utilisent un chauffage d'appoint qui prévoit de chauffer l'air par des résistances électriques.

Dans notre travail, nous procéderons au séchage solaire indirect de l'argile, par circulation de l'air forcée. Ce procédé est plus adapté à l'industrie [71] lorsqu'on le compare au système de séchage direct à convection naturelle (domestique) qui est approprié au séchage de petites quantités de produits.

I-8 CONCLUSION

A l'issue de cette recherche, une étude approfondie sur les performances des séchoirs solaires indirects s'avère très utile pour des applications au séchage des produits à base d'argile, en particulier dans les pays du tiers monde. La maîtrise de la technologie des séchoirs solaires indirects nécessite deux volets d'étude ; l'étude énergétique des insolateurs plans à air qui jouent le rôle de batterie de chauffage et l'étude de l'unité de séchage où l'on dispose le produit à sécher, ainsi que le couplage entre ces deux éléments constituant cette chaîne énergétique.

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées dans le passé concernant l'amélioration des performances des capteurs solaires plans à air. Les rendements obtenus pour

différentes configurations ouvrent un grand éventail d'applications à basse et à moyenne température, tel que le séchage des produits agro-alimentaires. Pour développer une étude de cette chaîne énergétique que constitue le couplage capteur-séchoir, nous serons amenés à faire une étude numérique détaillée, en premier lieu de l'insolateur plan à air et en second lieu, du séchoir.

CHAPITRE II

MODELISATION D'UN INSOLATEUR PLAN A AIR

Ce chapitre est consacré à la modélisation des différents paramètres intrinsèques et extrinsèques des insolateurs plans à air et la proposition d'une interface graphique pour le calcul et la simulation, ainsi que quelques résultats obtenus à l'aide de cette dernière.

II.1. INTRODUCTION

Les capteurs plans à air ou à eau sont des éléments chargés de transformer le rayonnement solaire qu'ils reçoivent en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire du fluide caloporteur (eau, air,...). Ils jouent aussi le rôle d'échangeur en cédant cette énergie captée au fluide caloporteur qui les traverse. Les usages sont multiples à savoir ; le chauffage des locaux, le séchage, etc.

Leur conception est orientée selon l'efficacité recherchée, leurs destinations et les coûts engendrés par l'installation. Plusieurs modèles ont été construits et étudiés afin de cerner les différents paramètres qui les caractérisent en vue de dégager une normalisation qui peut être standardisée par la suite.

Un meilleur rendement du capteur s'effectue par diminution des pertes avant, arrière, aussi par un choix judicieux des matériaux entrant dans sa fabrication (couverture transparente, absorbeur et de l'isolation) ainsi que sa disposition (inclinaison et orientation)

Les pertes avant sont dues à la couverture transparente qui échange :

- Par convection avec l'ambiance ;
- Par radiation avec le ciel ;
- Réflexion d'une partie des rayons solaires lors de leur réception ;
- Echange radiatif avec le sol.

La convection est inévitable, mettre le capteur à l'abri du vent ; la réflexion et l'irradiation vers le ciel ont fait l'objet de plusieurs études portant sur la composition chimique de la vitre et le traitement de sa surface.

Les pertes arrière et latérales sont causées par la conduction à travers les couches isolantes. En général une bonne isolation peut les maintenir à une valeur très faible.

II.2. LES COMPOSANTS D'UN CAPTEUR PLAN A AIR

Un capteur plan simple est essentiellement constitué par une tôle bien isolée à l'arrière et sur les côtés. A cette tôle pour un capteur à eau, sont accolés des tubes parcourus par un fluide auquel l'énergie emmagasinée par la tôle est transmise. Pratiquement les températures sont de quelques centaines de K. Par conséquent, le rayonnement de la tôle vers le ciel est essentiellement infrarouge (IR). Par suite, l'idéal serait de constituer le capteur par un matériau ayant un grand coefficient d'absorption α dans le visible et une faible émissivité ε dans l'IR, déjà une simple tôle galvanisée remplit partiellement ces conditions :

$$\varepsilon = 0,25 \text{ à } 0,30 ; \alpha = 0,90$$

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une surface noire est moins bonne qu'une surface sélective, car la surface noire absorbe bien le visible mais émet beaucoup en IR.

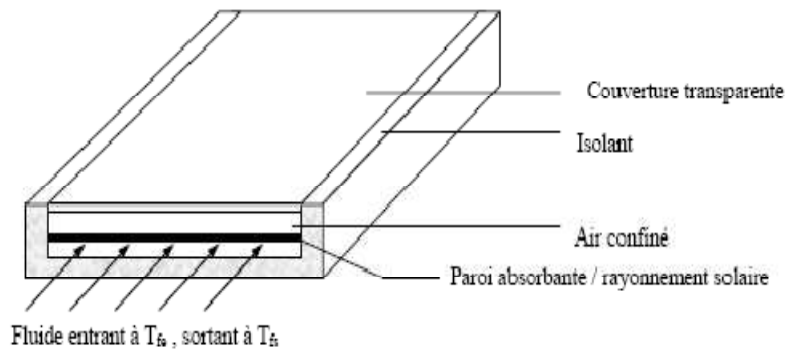


Figure II-1 Schéma d'un insolateur plan à air (coupe transversale d'un capteur)

II.2.1. Couverture transparente

C'est cette partie du capteur qui est exposée au rayonnement solaire, elle est faite en verre ou plexiglas dans la plupart des capteurs et assure l'effet de serre.

Le verre est le plus souvent utilisé à cause de sa bonne transmission dans le domaine des ondes électromagnétiques de très hautes fréquences (U.V), et surtout à cause de sa très mauvaise transmission des grandes longueurs d'ondes (IR) qu'émet l'absorbeur.

Quelque soit l'angle d'incidence sur le vitrage, sa transmission à l'absorbeur du rayonnement diffus est constante.

II.2.2. Paroi absorbante (absorbeur)

Chargée d'absorber l'énergie rayonnante et de la restituer au fluide caloporteur ; en tôle de métal (Aluminium, Acier et Cuivre) de faible épaisseur (< 4 mm) avec un revêtement du côté rayonnement et parfois munie d'ailettes de l'autre côté pour augmenter le transfert avec le fluide caloporteur.

Le revêtement est souvent composé d'une couche très absorbante pour le rayonnement visible suivie d'un support à faible émissivité IR, citons quelques exemples :

Le revêtement	α	ε
Noir de Ni sur Ni poli	0,91 à 0,94	0,11
Noir de Ni sur dépôt électrolytique de Ni sur acier doux	0,94	0,07
CuO sur Al anodisé	0,85	0,11

Tableau II-1 Le coefficient d'absorption et l'émissivité en fonction du revêtement

II.2.3. Isolation arrière

Empêche les déperditions ; elle se compose d'une couche de polystyrène (de 20 à 80 mm d'épaisseur) ou de la laine de verre ou le liège et d'une plaque en bois externe (de 5 à 20 mm d'épaisseur). Le vide étant l'isolant idéal.

Isolation arrière	Coef. de transmissivité w/m°C
La laine de verre	0,057
Le liège	0,42
Le polystyrène expansé	0,31
Le polyrétane	0,026

Tableau II-2 L'isolation

II.2.4. Le coffret

C'est une structure sous forme de cadre qui consolide le tout et qui porte des ouvertures pour le passage du fluide caloporteur, on utilise généralement la fibre de verre, la tôle ordinaire, le bois, la mousse de polyméthane. Le matériau doit résister aux chocs, à la corrosion et surtout aux variations de températures.

Le type de capteur est caractérisé par le nombre de vitrage utilisé, le type d'absorbeur et le mode de l'écoulement du fluide caloporteur autour de l'absorbeur.

II.3. MODELISATION DES PARAMETRES D'UN INSOLATEUR A AIR PLAN

Partie A : Modélisation des paramètres extrinsèques

II.3.1. La température à l'entrée de l'isolateur (Température ambiante)

a) *Modèle théorique :*

L'évolution théorique de la température ambiante, qui est la température d'entrée de l'air dans le capteur, peut être modélisée par l'équation :

$$T_e(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta t} \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec T_{\max} températures ambiantes maximale au cours de la journée ;
 T_{\min} températures ambiantes minimale au cours de la journée ;
 t temps solaire vrai.

Dans ce modèle la température maximale est atteinte au midi solaire vrai où le flux est maximal. Ce modèle ne correspond pas à la réalité car on considère que la température maximale n'est atteinte qu'au midi thermique qui correspond en temps solaire vrai, midi

solaire vrai plus 1/8 de la durée du jour solaire (Δt), cela est du à l'inertie thermique du sol, l'équilibre thermique entre le milieu ambiant et le sol.

b) Modèle proposé

Le modèle proposé précédemment a été remplacé par un modèle qui introduit "midi thermique", où la température ambiante atteint sa valeur maximale de la journée. Vu les échanges radiatifs nocturnes, la température ambiante atteint sa valeur minimale au lever du soleil et enfin au coucher du soleil.

Ainsi la température ambiante peut être modélisée par :

$$T_e(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) \cos\left(\frac{2\pi(t - 12 - \Delta t/8)}{\Delta t} \right) \quad (\text{II.2})$$

Selon Idlimam [71] qui tient compte du décalage de la température maximale :

$$T_e(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) \cos\left(\frac{(14 - t)\pi}{12} \right) \quad (\text{II.3})$$

Partie B : Modélisation des paramètres intrinsèques

II.3.2. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques

Les échanges s'effectuent selon trois modes connus : convectifs, radiatifs et par conduction. Pour le calcul des transferts qui s'y manifestent, il faut considérer les principaux composants du capteur et le mode d'écoulement du fluide.

- La convection : entre le capteur et le milieu ambiant qui l'entoure c'est les pertes avant et arrière dues au vent, ainsi qu'à l'intérieur du capteur entre le fluide caloporteur et l'absorbeur, entre le fluide et la plaque isolante, la lame d'air immobile et le vitrage.
- L'échange radiatif : entre la vitre et la voûte céleste, la vitre et l'absorbeur, entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium et enfin entre le capteur et le sol.

La conduction est dominante au niveau des pertes arrière à travers l'isolation.

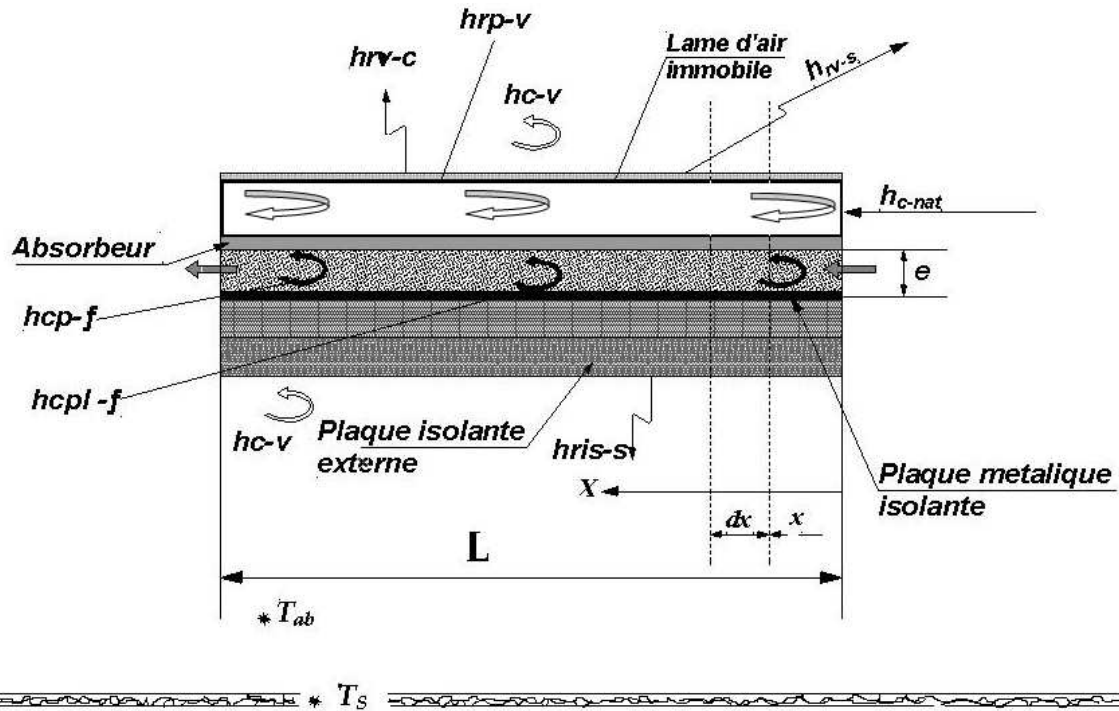


Figure II-2 Représentation schématique des divers transferts dans l'insolateur

II.3.2.1. Transferts convectifs

a) Transfert dû au vent

Le coefficient est défini comme étant fonction linéaire de la vitesse du vent:

$$h_{c_v} = a_0 + a_1 V_v \tag{II.4}$$

Avec a_0 et a_1 Coefficients [$J/m^3 K$] ;
 V_v Vitesse du vent [m/s] ;
 h_{c_v} Coefficient de transfert dû au vent [$J/m^3 K$] ;

Cette forme d'expression indique que même avec un vent de vitesse nulle l'échange subsiste. Plusieurs études utilisent la relation de Hottel et Woertz [48] :

$$h_{c_v} = 5,67 + 3,86V_v \text{ En } [w/(m^2K)] \tag{II.5}$$

Selon cette expression, les résultats suivants, indiquent que les pertes peuvent être importantes (pour une différence de température entre la vitre et l'ambiance de $\Delta T= 20K$). Ce qui suggère qu'il faut protéger les capteurs du vent, dans la mesure du possible.

Vv (m/s)	h_{c_v} (w/m ² K)	$h_{c_v} \Delta T$ (w/m ²)
0	5,67	113,4
2	13,39	267,8
4	21,11	422,2
6	28,83	576,6
8	36,55	731
10	44,27	885,4

Tableau II-3 Coefficient d'échange dû au vent et les pertes qui en résultent

b) Transfert convectif à l'intérieur du capteur

1) Entre la vitre et l'absorbeur

L'échange entre la vitre et l'absorbeur, à travers la lame d'air immobile si elle existe, et une convection naturelle, il est donné par l'expression suivante [54] :

$$h_{c_nat} = 1,42 \left[\frac{(T_p - T_a) \sin \beta}{L} \right]^{1/4} \quad (\text{II.6})$$

Avec h_{c_nat} [w/m²K] ;
 T_p température de l'absorbeur en [K] ;
 T_a température ambiante en [K] ;
 β inclinaison du capteur par rapport au sol ;
 L longueur du capteur selon laquelle s'effectue l'écoulement du fluide caloporteur en [m].

2) Dans la veine d'air mobile

Ils peuvent se produire soit par convection naturelle (quand il n'y a pas de circulation d'air), soit par convection forcée. Dans les deux cas, diverses corrélations ont été développées.

En ce qui concerne la convection forcée, et dans le cas des conduits rectangulaires on peut utiliser l'expression empirique suivante [8]:

$$Nu = 0,0196 R_e^{0,8} \times P_r^{1/3} \quad (\text{II.7})$$

$$h_c = \frac{Nu \times \lambda}{D_H}$$

$$R_e = \frac{V \times D_H}{\nu}$$

$$\nu = \nu / \rho$$

Avec	h_c	[w/m ² K] ;
	R_e	le nombre de Reynolds
	Nu	le nombre de Nusselt moyen ;
	λ	la conductivité thermique du fluide considéré [w/m.K] ;
	D_H	diamètre hydraulique (dimension caractéristique), (voir annexe) ;
	P_r	le nombre de Prandtl (égal à 0,73 pour l'air) ;
	ν	viscosité cinématique [kg/m.s] ;
	ν	viscosité dynamique du fluide en [kg/m.s] ;
	ρ	masse volumique du fluide en [kg/m ³].

D'autres relations reliant Nu à P_r et R_e ont été proposées par Manglik et Buelow (1995), Kays ainsi que Tan et Charters.

Les corrélations de Sieder-Tate et Hausen, souvent adoptées; elles dépendent du régime d'écoulement caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds, introduisent le nombre adimensionnel de Graetz, défini par :

$$Gz = R_e \times P_r \frac{D_H}{L}$$

Où : L est la dimension caractéristique de l'écoulement (Longueur du capteur).

Tels que :

- Régime laminaire : $R_e < 2100$

$$Nu = 3,66 + 0,085Gz / (1 + 0,047Gz^{2/3}) \quad \text{pour } Gz < 100$$

$$Nu = 1,86Gz^{1/3} + 0,87 (1 + 0,015Gz^{1/3}) \quad \text{pour } Gz > 100$$

- Régime transitoire : $2100 < R_e < 10000$

$$Nu = 0,116 (R_e^{2/3} - 125) Pr^{1/3} [1 + (D_H / L)^{2/3}]$$

- Régime turbulent : $R_e > 10000$

$$Nu = 0,027R_e^{0,8} Pr^{0,33}$$

Toutes ces corrélations font intervenir par l'intermédiaire de nombres adimensionnels (Nu , R_e , P_r et Gz), les propriétés physiques de l'air, qui doivent être calculées en tenant compte de l'hygrométrie et de la température de l'air d'entrée.

Les conduits considérés par les relations sont à section rectangulaire mais les relations prenant en compte le diamètre hydraulique sont applicables, en principe, à des conduits de géométrie différente à condition de modifier la valeur de D_H .

Il est recommandé, par Manglik et Buelow (1995) et rapporté par [68], pour la corrélation expérimentale, dans le cas des insolateurs à ailettes de passer par le facteur de Colburn (J) qui prend en considération le régime d'écoulement, à travers le Reynolds et la géométrie de l'ailette.

3) Echange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur

Pour augmenter la valeur du coefficient d'échange entre le fluide et l'absorbeur, il faut favoriser l'échange, et par suite l'énergie transférée. Cela est réalisable de plusieurs façons :

- Utilisations des chicanes qui canalisent le fluide caloporteur et augmente le temps de son passage dans le capteur en allongeant son parcours.
- Accroissement de la surface d'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur par l'installation d'ailettes.

$$h_{cp-f} = \frac{Nu \times \lambda}{D_H} \quad (\text{II.8})$$

Avec : Nu est déterminé selon ce qui a précédé [$\text{w/m}^2\text{K}$].

4) Echange convectif entre le fluide caloporteur et la plaque isolante

C'est le même type de corrélation que celui entre le fluide et l'absorbeur, dans certaines hypothèses de calcul, on peut les confondre ! Mais en réalité il est plus faible.

$$h_{cpl-f} = h_{cp-f} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2.2. Transferts radiants

Les éléments composant les capteurs plans à air (vitrage, absorbeur et isolation) ont une forme géométrique commune simple (rectangulaire). Toutes les surfaces des composants sont parallèles à des distances relativement faibles ce qui nous permet de simplifier les facteurs de formes et prendre les températures moyennes des composants afin d'exprimer les coefficients radiatifs. Pour cela, on utilise la formule exprimant le transfert radiatif entre deux plaques parallèles de températures T_1 et T_2 [K] [60] :

$$h_r = \frac{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \frac{S_1}{S_2}}$$

Avec σ constante de Stephan Boltzmann = $5,67 \times 10^{-6}$ [$\text{w/m}^2\text{K}^4$] ;
 ϵ_1 et ϵ_2 émissivité des surfaces d'échange ;
 $F_{1,2}$ facteur de forme géométrique relatif aux surfaces dans leur position l'une par rapport à l'autre (pour un capteur plan à air sa valeur est 1) ;
 S_1 et S_2 Surfaces d'échanges [m^2].

a) Echange radiatif entre la vitre et la voûte céleste

Le coefficient d'échange rapporté par [9] est donné par :

$$h_{rv-c} = \sigma \cdot \varepsilon_v \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) (T_v + T_c)(T_v^2 + T_c^2) \quad (\text{II.10})$$

Avec β inclinaison du capteur en degré ;
 ε_v émissivité du vitrage ;
 T_v température de la vitre [K] ;
 T_p température de l'absorbeur [K] ;
 T_c température équivalente du ciel formulée par la relation de Swinbank (1963) [K].

$$T_c = 0,0552 T_a^{3/2} \quad (\text{II.11})$$

b) Echange radiatif entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{rp-v} = \frac{\sigma(T_v + T_p)(T_v^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{p-v}} - 1} \quad (\text{II.12})$$

ε_{p-v} : émissivité de la surface mate de l'absorbeur vers la vitre

c) Echange radiatif entre la vitre et le sol

$$h_{rv-s} = \sigma \varepsilon_v \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (T_v + T_s)(T_v^2 + T_s^2) \quad (\text{II.13})$$

T_s : température du sol en [K].

d) Echange radiatif entre l'isolant et la plaque métallique placée sur l'isolant

$$h_{rp-pl} = \frac{\sigma(T_{pl} + T_p)(T_{pl}^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p-pl}} + \frac{1}{\varepsilon_{pl}} - 1} \quad (\text{II.14})$$

Avec T_p température de la plaque métallique placée sur l'isolation [K] ;
 ε_{p-pl} émissivité de l'absorbeur coté plaque métallique ;
 ε_{pl} émissivité de la plaque métallique coté absorbeur ;

e) Echange radiatif entre l'isolant et le sol (à l'arrière du capteur)

$$h_{ris-s} = \sigma \varepsilon_{is} \left[\frac{1 + \cos(\pi - \beta)}{2} \right] (T_{is} + T_s)(T_{is}^2 + T_s^2) \quad (\text{II.15})$$

Avec T_{is} température de la plaque arrière isolante [K] ;
 ε_{p-pl} émissivité de la plaque arrière isolante du capteur ;

II.4. BILAN THERMIQUE ET CALCUL DU RENDEMENT DU CAPTEUR SOLAIRE

La modélisation d'un capteur plan prend obligatoirement en considération le mode de circulation du fluide vis-à-vis de l'absorbeur, le nombre de vitrage, la présence ou l'absence de la plaque métallique adjointe à l'isolation, les matériaux utilisés pour l'isolation arrière et latérale.

Cette modélisation doit aboutir à la détermination des coefficients caractérisant le capteur étudié, les différentes équations permettant d'évaluer l'énergie extraite, les températures des éléments et du fluide à l'entrée et à la sortie, ainsi que les rendements du capteur.

Avant d'aborder les calculs il est nécessaire de considérer certaines hypothèses :

- Les propriétés physiques et thermiques du fluide caloporteur (air) sont données en fonction de sa température moyenne.
- L'absorbeur étant en métal (acier, cuivre ou aluminium) de faible épaisseur avec une conductivité très élevée.
- Les deux faces de la vitre sont à la même température.
- La température ambiante est la même autour du capteur.
- La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension longitudinale (sens de l'écoulement).

Prenons le capteur à air (Figure II.2); l'air circule entre la face interne de l'absorbeur et la face supérieure de la plaque dont l'autre face est en contact avec l'isolant thermique.

Le bilan thermique d'un insolateur rapporté à l'unité de surface est :

$$\phi_g = Qu + Qp + Qs$$

Le flux ϕ_g reçu par l'insolateur se répartit en flux utile transmis au fluide Qu , flux perdu lors des différents modes de transfert vers le milieu ambiant et le flux stocké dans le capteur.

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité du flux stocké dans les différentes parties de l'insolateur est négligeable, ce qui conduit à :

$$\phi_g = Qu + Qp$$

II.4.1. Modélisation des échanges thermiques

Il existe deux méthodes de modélisation de l'insolateur plan à air :

- Méthode par tranche.
- Méthode globale.

a) Méthode par tranche

On l'appelle aussi la méthode de modélisation " pas à pas " qui tient compte de l'évolution des températures de tous les éléments de l'insolateur en tranches fictives de longueur (dx) dans le sens de l'écoulement du fluide et dresser le bilan des échanges thermiques.

* Pour la Vitre (indice v) :

$$\alpha_v \phi_g + h_{rp-v} (T_p - T_v) + \frac{h_{c-nat}}{2} (T_p - T_v) = U_{av} (T_v - T_a) \quad (II.16)$$

* Pour l'absorbeur (indice p) :

$$\alpha_p \tau_v \phi_g = h_{cp-f} (T_p - T_f) + \frac{h_{c-nat}}{2} (T_p - T_v) + h_{rp-pl} (T_p - T_{pl}) + h_{rp-v} (T_p - T_v) \quad (II.17)$$

* Pour le fluide caloporteur (indice f) :

$$h_{cp-f} (T_p - T_f) = h_{cpl-f} (T_f - T_{pl}) + Qu \quad (II.18)$$

* Pour le plan d'écoulement inférieur (coté plaque) (indice pl) :

$$h_{cpl-f} (T_f - T_{pl}) + h_{rp-pl} (T_p - T_{pl}) = U_{ar} (T_{pl} - T_a) \quad (II.19)$$

Avec U_{av} Coefficient des pertes avant (nous le verrons par la suite) ;
 α_v Coefficient d'absorptivité de la vitre ;
 τ_v Coefficient de transmittivité du vitrage.

Considérons une tranche d'écoulement de longueur dx .

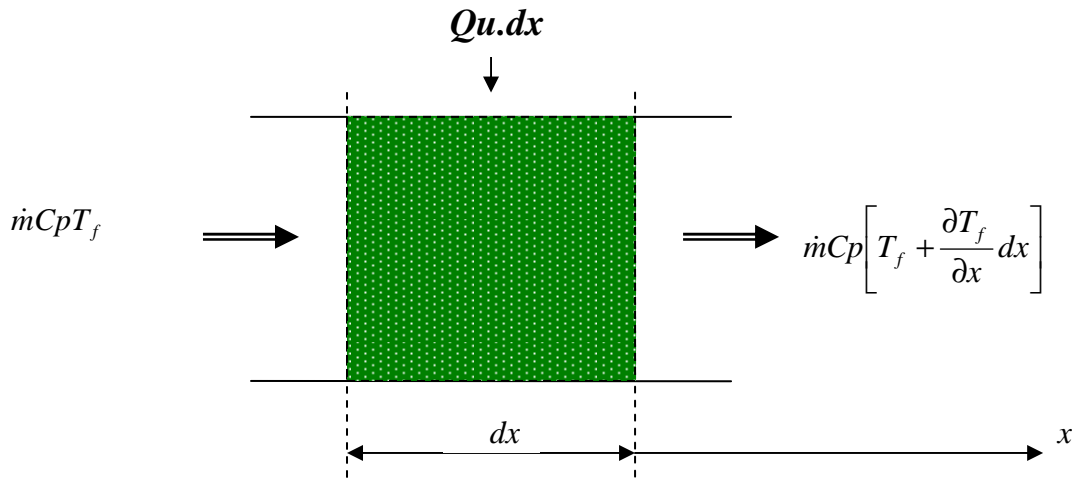


Figure II-3 Tranche fictive de longueur dx

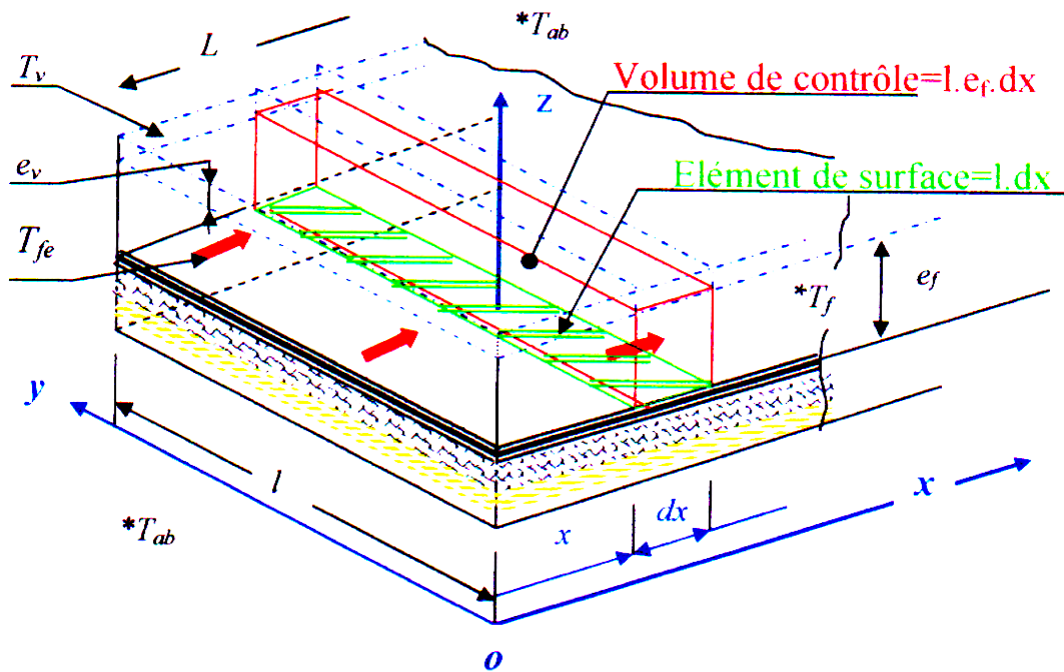


Figure II-4 Définition d'élément de volume et de surface

La conservation de l'énergie dans cette tranche nous donne :

$$\dot{m}C_p T_f + Q_u \cdot l \cdot dx = \dot{m}C_p \left[T_f + \frac{dT_f}{dx} dx \right] \Rightarrow \frac{dT_f}{dx} = \frac{Q_u \cdot l}{\dot{m}C_p} \quad (\text{II.20})$$

Avec	\dot{m}	Débit massique [kg/s] ;
	C_p	Capacité calorifique massique du fluide à pression constante [J/kgK] ;
	l	Largeur du capteur.

On suppose que la température et le transfert de chaleur avec le fluide caloporteur de température T_f est uniforme le long du capteur de longueur L d'où :

$$\int_{x=0}^{x=L} \frac{dT_f}{dx} . dx = \int_{x=0}^{x=L} \frac{Qu.l}{\dot{m}C_p} dx$$

Nous aurons :

$$T_f(x) = \left[\frac{Qu.l}{\dot{m}C_p} \right] x + T_{fe} \quad \text{D'où : } T_{fs} = \left[\frac{Qu.l}{\dot{m}C_p} \right] L + T_{fe}$$

On définit la température moyenne par : $T_{fm} = \frac{T_{fs} + T_{fe}}{2}$

T_{fe} et T_{fs} sont respectivement les températures du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur.

On déduit :

$$Qu = \frac{2\dot{m}C_p(T_{fm} - T_{fe})}{A} \quad (\text{II.21})$$

Où : $A = L \times l$

En remplaçant la valeur du flux transmis au fluide Qu dans le système d'équation du bilan on aura :

$$\alpha_v \phi g + h_{rp-v}(T_p - T_v) + \frac{h_{c-nat}}{2}(T_p - T_v) = U_{av}(T_v - T_a)$$

$$\alpha_p \tau_v \phi g = h_{cp-f}(T_p - T_f) + \frac{h_{c-nat}}{2}(T_p - T_v) + h_{rp-pl}(T_p - T_{pl}) + h_{rp-v}(T_p - T_v)$$

$$h_{cp-f}(T_p - T_f) = h_{cpl-f}(T_f - T_{pl}) + \frac{2\dot{m}C_p(T_{fm} - T_{fe})}{A}$$

$$h_{cpl-f}(T_f - T_{pl}) + h_{rp-pl}(T_p - T_{pl}) = U_{ar}(T_{pl} - T_a)$$

Ce système d'équation peut être mis sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} T_v \cdot a_{11} + T_p \cdot a_{12} + T_f \cdot a_{13} + T_{pl} \cdot a_{14} = b_1 \\ T_v \cdot a_{21} + T_p \cdot a_{22} + T_f \cdot a_{23} + T_{pl} \cdot a_{24} = b_2 \\ T_v \cdot a_{31} + T_p \cdot a_{32} + T_f \cdot a_{33} + T_{pl} \cdot a_{34} = b_3 \\ T_v \cdot a_{41} + T_p \cdot a_{42} + T_f \cdot a_{43} + T_{pl} \cdot a_{44} = b_4 \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_f \\ T_{pl} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

$$[A] \times \{T\} = \{B\}$$

$$T_v \left(h_{rp-v} + \frac{h_{c-nat}}{2} + U_{av} \right) - T_p \left(h_{rp-v} + \frac{h_{c-nat}}{2} \right) = \alpha_v \phi g + T_a U_{av}$$

$$-T_v \left(h_{rp-v} + \frac{h_{c-nat}}{2} \right) + T_p \left(h_{cp-f} + \frac{h_{c-nat}}{2} + h_{rp-pl} + h_{rp-v} \right) - T_f (h_{cp-f}) - T_{pl} (h_{rp-pl}) = \alpha_p \tau_v \phi g$$

$$T_p (h_{cp-f}) - T_f \left(h_{cp-f} + h_{cpl-f} + \frac{2\dot{m}Cp}{A} \right) + T_{pl} (h_{cpl-f}) = -\frac{2\dot{m}Cp(T_{fe})}{A}$$

$$T_p (h_{rp-pl}) + T_f (h_{cpl-f}) - T_{pl} (h_{cpl-f} + h_{rp-pl} + U_{ar}) = -U_{ar} T_a$$

Les températures peuvent être déterminées par : $\{T\} = [A]^{-1} \times \{B\}$ après connaissance des valeurs des coefficients d'échange thermiques ainsi que les pertes à l'avant et à l'arrière.

b) Méthode globale :

L'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur s'écrit :

$$\rho Cp \left[\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{V}_f \cdot \text{grad} T_f \right] = \text{div } \vec{q} + \sigma_T \quad (\text{II.22})$$

Où q est le flux par conduction dans le fluide, σ_T l'amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire par unité de volume du fluide caloporteur de masse volumique ρ .

Cette méthode a été appliquée par Hottel, Whillier et Bliss ; elle suppose que le régime est permanent et que les éléments de l'insolateur se trouvent chacun à une température

moyenne constante ; elle néglige les effets de l'inertie thermique et la conduction dans le fluide.

Notre choix s'est porté sur cette méthode pour la modélisation et l'étude des performances de l'insolateur, car les performances que nous déterminons sont instantanées.

En considérant les hypothèses suivantes :

- le régime permanent : $\frac{\partial T_f}{\partial t} = 0$

- l'écoulement unidimensionnel : $\vec{\text{grad}} T_f = \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{dT}{dx}$

- la conduction dans le fluide négligée : $\text{div } \vec{q} = 0$

(q est le flux de conduction dans le fluide).

Alors l'équation de la chaleur devient : $\rho C_p V_f \frac{dT_f}{dx} = \sigma_T$ (II.23)

Avec : $Qu = \tau_v \alpha_p \phi g - U_L (T_p - T_a)$ et $\sigma_T = \frac{dQu}{e.l.dx}$

Où U_L est le coefficient global des pertes thermiques entre l'absorbeur et l'air ambiant.

II.5.PERFORMANCES DU CAPTEUR SOLAIRE

a) Coefficient d'efficacité de l'absorbeur F'

C'est un rapport de la puissance utile à la puissance récupérée par l'insolateur lorsque la température de l'absorbeur est précisément celle du fluide ($T_f = T_p$).

$$F' = \frac{P_u}{P_u'} \quad \text{Où : } P_u = A \cdot Qu \quad \text{et} \quad P_u' = A \cdot Qu'$$

$$F' = \frac{\tau_v \alpha_p \cdot \phi g - U_L (T_p - T_a)}{\tau_v \alpha_p \cdot \phi g - U_L (T_f - T_a)} \quad (II.24)$$

b) La température de sortie du fluide caloporteur :

En introduisant le débit massique \dot{m} et le coefficient d'efficacité de l'absorbeur F' dans l'équation (II.23) on aura :

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dx} = l.F'.U_L \left[\tau_v \alpha_p \phi g \frac{1}{U_L} - (T_f - T_a) \right]$$

Faisons le changement de variable :

$$\theta = \tau_v \alpha_p \phi g \frac{1}{U_L} - (T_f - T_a)$$

Ce qui donne :

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{dT}{dx} \Rightarrow \frac{d\theta}{dx} = -\frac{l}{\dot{m}C_p} F'.U_L \theta \Rightarrow \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{l}{\dot{m}C_p} F'.U_L dx$$

En supposant que F' et U_L ne dépendent pas de la longueur de l'insolateur.

Intégrons entre l'entrée $x=0$ et la sortie $x=L$

$$\int_{\theta_e}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\theta} = \int_{x=0}^{x=L} -\frac{l}{\dot{m}C_p} F'.U_L dx$$

$$\text{Soit : } \theta^s = \theta^e \exp \left[-\frac{l.L}{\dot{m}C_p} U_L F' \right]$$

Ou bien :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L}} = \exp \left[-\frac{l.L}{\dot{m}C_p} U_L F' \right]$$

c) La puissance récupérée par le fluide :

La puissance récupérée par l'insolateur lorsque ($T_f = T_p$) :

$$P_u' = f(F') = f(T_p, T_f) \quad \text{où } T_p \text{ est une inconnue}$$

Il est pratique d'exprimer la puissance utile en fonction des conditions d'entrée en définissant un autre coefficient global de transfert air-absorbeur par :

$$F_R = \frac{\tau_v \alpha_p \phi g - U_L (T_p - T_a)}{\tau_v \alpha_p \phi g - U_L (T_{fe} - T_a)} \quad (\text{II.25})$$

$$Qu = F_R (\tau_v \alpha_p \phi g - U_L (T_f - T_a)) \quad (\text{II.26})$$

Soit Gc le débit massique par m^2 : $Gc = \frac{\dot{m}}{l.L}$

De l'équation (II.21) on aura :

$$Qu = Gc.Cp(T_{fs} - T_{fe}) = Gc.Cp \left[\left(T_{fs} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L} \right) - \left(T_{fe} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L} \right) \right]$$

$$Qu = Gc.Cp \left[\left(T_{fe} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L} \right) \exp\left(-\frac{F'U_L}{GcCp}\right) - \left(T_{fe} - T_a - \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L} \right) \right]$$

$$Qu = \frac{Gc.Cp}{U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{F'U_L}{Gc.Cp}\right) \right] \left[\frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{U_L} - U_L (T_{fe} - T_a) \right] \quad (\text{II.27})$$

Des équations (II.26) et (II.27) et en introduisant la surface de l'insolateur le coefficient F_R s'écrit :

$$F_R = \frac{\dot{m}Cp}{A.U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{F'U_L A}{\dot{m}Cp}\right) \right] \quad (\text{II.28})$$

d) Rendements :

Dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire, on définit :

- Le rendement optique.
- Le rendement instantané (ou thermique).

* Rendement optique :

Le rendement optique quantifie les capacités du vitre-absorbeur à capter l'énergie vis à vis de l'énergie incidente ; il est défini par :

$$\eta_0 = \text{Flux absorbé par la surface du capteur} / \text{Flux incident sur le capteur}$$

Soit :

$$\eta_0 = \frac{\tau_v \alpha_p \phi g}{\phi g} = \tau_v \alpha_p \quad (\text{II.29})$$

Avec :

τ_v : Le facteur de transmission de la couverture transparente (vitre).

α_p : Le facteur d'absorption du capteur.

ϕg : Flux incident solaire ; reçu par le capteur [W/m²]

On sait que ces deux facteurs ainsi que la réflexion, pour un matériau donné, sont fonction de l'angle d'incidence i du rayonnement et de sa longueur d'onde; donc ce rendement est variable en fonction de la position du soleil dans le ciel, or cette position est fonction du temps.

Les valeurs adoptées dans notre étude sont pour $i = 60^\circ$ ce qui a été vérifié par l'expérimentation [70]

* Rendement thermique (instantané) :

Le rendement instantané mesure le rapport de la puissance utile extraite par m² à la puissance totale incidente sur le capteur à chaque instant; soit :

$$\eta = \frac{Qu}{\phi g} = \frac{Pu}{A_c \phi g} \quad \text{Avec } A_c : \text{Surface du capteur, exposée au rayonnement [m}^2\text{]}$$

$$\eta = F_R \tau_v \alpha_p - F_R U_L \frac{T_{fe} - T_a}{\phi g} \quad (\text{II.30})$$

e) Evaluation des pertes thermiques :

Les hypothèses faites sont :

- Le régime de fonctionnement du capteur est stationnaire.
- L'énergie absorbée par la vitre est négligeable.
- Les pertes latérales sont faibles devant les pertes avant et arrière.
- Le potentiel de température considéré pour l'évaluation de ces pertes est $T_p - T_a$.

Le capteur perd de l'énergie à l'avant, par la vitre, et à l'arrière à travers l'isolation ; d'où l'idée de diviser les pertes Qp en perte avant Q_{pav} et perte arrière Q_{par} :

$$Qp = U_L \cdot (T_p - T_a) = U_{av} \cdot (T_p - T_a) + U_{ar} \cdot (T_p - T_a)$$

$$= Q_{pav} + Q_{par}$$

Soit :

$$Q_{pav} = U_{av} \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{II.31})$$

$$Q_{par} = U_{ar} \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{II.32})$$

Avec :

U_L : Coefficient des échanges globaux.

U_{av} : Coefficient des pertes à l'avant ; qui peut être évalué par l'expression de Klein.

U_{ar} : Coefficient des pertes à l'arrière.

* Coefficient des pertes à l'avant :

Pour les capteurs dont le fluide caloporteur ne fait qu'une passe (ne circule pas en circuit fermé dans le capteur) le coefficient des pertes à l'avant peut être modélisé selon deux expressions qui dépendent de la méthode de résolution et la précision choisie. Si on ne tient compte uniquement de l'effet du vent et de la radiation de la vitre avec la voûte céleste le coefficient d'échange des pertes avant de la vitre s'écrit.

$$U_{av} = h_{rv-c} + h_{c-v}$$

Klein propose de calculer le coefficient de pertes avant de l'absorbeur par l'expression suivante ; qui tient compte des températures de l'absorbeur et de l'ambiance, du nombre de vitre [77], de l'effet du vent, des émissivités et de l'inclinaison du capteur [39]

$$U_{av} = \left[\frac{1}{N \left(\frac{C}{T_p} \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^e \right) + \frac{1}{h_{c-v}}} \right] + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p\beta} + 0.05 \cdot N \cdot (1 - \varepsilon_{p\beta})} + \frac{2 \cdot N + f - 1}{\varepsilon_{p\beta}} - N} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

T_p : Température de l'absorbeur [Kelvin].

T_a : Température ambiante [Kelvin].

$\varepsilon_{p\beta}$: Emissivité de l'absorbeur coté vitre évalué à l'angle β .

$\varepsilon_{v\beta}$: Emissivité de la surface externe de la vitre évaluée à l'angle β .

N : Nombre de vitres

$$e = 0,43. (1-100/T_p) ; \text{ en général } e \approx 0.33$$

$$C = 365,9. (1-0,00883. \beta + 0,00012. \beta^2) ; \text{ Où } \beta \text{ est en degré.}$$

f : Facteur correctif tenant compte de l'effet du vent

$$f = (1 - 0,04.h_{c-v} + 0,0005.h_{c-v}^2).(1 + 0,091.N)$$

L'équation (II.33) est valable pour :

$$47^\circ\text{C} < T_p < 147^\circ\text{C} \quad ; \quad -13^\circ\text{C} < T_a < 37^\circ\text{C} \quad ; \quad 0,1 < \varepsilon_{v\beta} < 0,95$$

$$0 < \beta < 90^\circ\text{C} \quad ; \quad V_v < 10 \text{ m/s} \quad ; \quad 1 < N < 3$$

* Coefficient des pertes à l'arrière :

L'expression du Coefficient des pertes à l'arrière est :

$$U_{ar} = \frac{1}{\sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{c-v}}}$$

Avec : e_{is} : Epaisseur des plaques isolantes [m]

λ_{is} : Conductivité des plaques isolantes [w/(m.k)]

II.6. ALGORITHME DE CALCUL DES PERFORMANCES DE L'INSOLATEUR PLAN A AIR

Dans cette section nous donnerons une structure générale, des enchaînements des étapes des calculs, qui peuvent servir de base au développement du programme pour le capteur dont on souhaite l'étude.

Les résultats obtenus peuvent être visualisés sous forme de courbes dans le but de profiter des avantages qu'elles nous offrent.

II.6.1. Caractéristiques et données communes aux calculs des performances des capteurs

$L=2m$: Longueur du capteur

$l=1m$: Largeur du capteur

$e=0.025m$: Epaisseur du passage du fluide caloporteur

$\varepsilon_v=0.93$: Emissivité de la vitre

$\varepsilon_{p-nat}=0.95$: Emissivité de l'absorbeur coté vitre

$\tau_v=0.84$: Transmittivité de la vitre

$\alpha_p=0.95$: Absorptivité de l'absorbeur

$\alpha_v = 0.06$: Absorptivité de la vitre

Les différentes étapes de l'algorithme de calcul des performances thermiques de l'insolateur ; en utilisant la méthode globale sont :

II.6.2.Schéma :

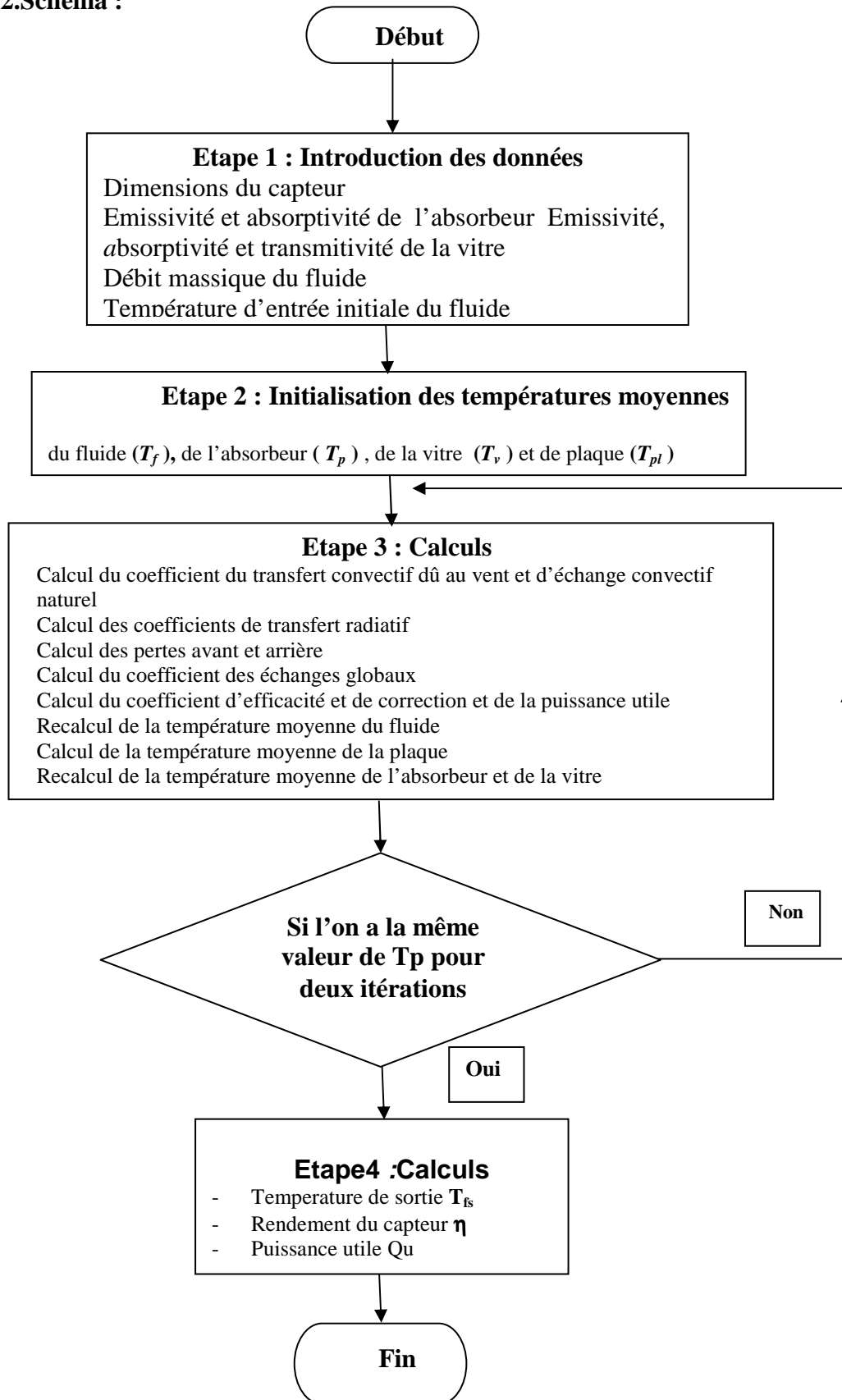


Figure II-5 Organigramme simplifié de calcul des performances de l'insolateur

II.6.3. Introduction des données :

- Dimensions de l'insolateur (longueur, largeur, inclinaison,....)
- Données météorologiques (ϕ, g, T_a, V_v).
- Débit massique du fluide (\dot{m}).
- Température d'entrée du fluide (T_{fe}).

II.6.4. Initialisation des températures moyennes :

- Température du fluide dans l'insolateur (T_f)
- Température de l'absorbeur (T_p).
- Température de la plaque (T_{pl}).
- Température de la vitre (T_v).

II.6.5. Calcul des coefficients :**1. Calcul du coefficient (h_{c-v}) :**

$$h_{c-v} = 5.67 + 3.86.V_v ; \text{ En } [w/(m^2.k)]$$

2. Calcul du coefficient d'échange convectif naturel (h_{c-nat}) :

$$h_{c-nat} = 1.42 \cdot \left[\frac{(T_p - T_{ab}) \cdot \sin(\beta)}{L} \right]^{1/4} ; \text{ En } [w/(m^2.k)]$$

3. Calcul des coefficients de transfert radiatif ($h_{rv-c}, h_{rp-v}, h_{rp-pl}$) :

$$h_{rv-c} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot (T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2)$$

$$h_{rp-v} = \frac{\sigma \cdot (T_v + T_p) \cdot (T_v^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_{p-v}} - 1}$$

$$h_{rp-pl} = \frac{\sigma \cdot (T_{pl} + T_p) \cdot (T_{pl}^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\epsilon_{p-pl}} + \frac{1}{\epsilon_{pl}} - 1}$$

4. Calcul des pertes avants (U_{av}, Q_{pav}, U_{ar}) :

$$U_{av} = \left[\frac{1}{N \left(\frac{C}{T_p} \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^e \right) + \frac{1}{h_{c-v}}} \right] + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\epsilon_{p\beta} + 0.05 \cdot N \cdot (1 - \epsilon_{p\beta})} + \frac{2 \cdot N + f - 1}{\epsilon_{p\beta}} - N}$$

$$Q_{pav} = U_{av} \cdot (T_p - T_a) \quad U_{ar} = \frac{1}{\sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{e-v}}}$$

5. Calcul du coefficient des échanges globaux (U_L) :

En tenant compte des échanges radiatifs, le coefficient des échanges globaux U_L peut être écrit sous la forme [39]:

$$U_L = \frac{(U_{av} + U_{ar}) \cdot (h_{cp-f} \cdot h_{cpl-f} + h_{cp-f} \cdot h_{rp-pl} + h_{cpl-f} \cdot h_{rp-pl}) + U_{av} \cdot U_{ar} \cdot (h_{cp-f} + h_{cpl-f})}{h_{cp-f} \cdot h_{rp-pl} + h_{cpl-f} \cdot U_{av} + h_{cpl-f} \cdot h_{rp-pl} + h_{cp-f} \cdot h_{cpl-f}}$$

Sachant que :

$$h_{cpl-f} = h_{cp-f} \quad ; \text{ on aura :}$$

$$U_L = \frac{(U_{av} + U_{ar}) \cdot (h_{cp-f} + 2 \cdot h_{rp-pl}) + 2 \cdot U_{av} \cdot U_{ar}}{U_{av} + 2 \cdot h_{rp-pl} + h_{cp-f}}$$

Pour un capteur sans chicanes, sans plaque placée sur l'isolant et sans tenir compte des échanges radiatifs on peut écrire :

$$U_L = U_{av} + U_{ar}$$

6. Calcul du coefficient d'efficacité (F') :

En tenant compte des échanges radiatifs [28] nous aurons :

$$F' = \frac{\tau_v \cdot \alpha_p \cdot \phi_g - U_L \cdot (T_p - T_a)}{\tau_v \cdot \alpha_p \cdot \phi_g - U_L \cdot (T_f - T_a)}$$

7. Calcul du coefficient de correction (F_R) :

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot Cp}{A \cdot U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F' \cdot U_L \cdot A}{\dot{m} \cdot Cp} \right) \right]$$

8. Calcul de la puissance utile (Qu) :

$$Qu = F_R \cdot [\tau_v \cdot \alpha_p \cdot \phi_g - U_L \cdot (T_{fe} - T_a)]$$

9. Recalcul de la température moyenne du fluide (T_f) :

On peut faire ce calcul avec la relation proposée par Klein :

$$T_f = T_{fe} + \frac{Qu}{U_L \cdot F_R} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right)$$

10. Calcul de la température moyenne de la plaque (T_{pl}) :

On peut déduire cette température à partir des équations du bilan thermique (insolateur sans chicanes) :

$$T_{pl} = T_f + \frac{h_{rp-pl} \cdot \tau_v \cdot \alpha_p \cdot \phi g - (T_f - T_a) \cdot (U_{av} \cdot U_{ar} + U_{ar} \cdot h_{cpl-f} + h_{rp-pl} \cdot (U_{ar} + U_{av}))}{(U_{av} + h_{rp-pl} + h_{cpl-f}) \cdot (U_{ar} + h_{cpl-f} + h_{rp-pl}) - h_{rp-pl}^2}$$

11. Recalcul de la température moyenne de l'absorbeur (T_p) :

Toujours d'après le bilan thermique équation (II.18); on aura :

$$T_p = 2.T_f + \frac{Qu}{h_{cp-f}} - T_{pl}$$

12. Calcul de la température moyenne de la vitre (T_v) :

D'après les équations du bilan thermique équation (II.16) ; on aura :

$$T_v = \frac{\alpha_v \cdot \phi g + T_p + \left(h_{rp-v} + \frac{h_{c-nat}}{2} \right) \cdot h_{c-v} \cdot T_p + h_{rv-c} \cdot T_c}{h_{rp-v} + \frac{h_{c-nat}}{2} + h_{c-v} + h_{rv-c}}$$

13. Comparer : on compare la valeur initiale de T_p et celle calculée.

Si l'écart est trop important, on réitère à partir de l'étape 3, sinon continuer.

14. Calcul de :

- La température du fluide à la sortie du capteur :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{A \cdot Qu}{m \cdot Cp} \quad (II-34)$$

- Le rendement thermique de l'insolateur :

$$\eta = \frac{Qu}{\phi g} \quad \text{Où} \quad \eta = F_R \cdot (\alpha_p \cdot \tau_v) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{T_{fe} - T_a}{\phi g}$$

II.7. DEMONSTRATION DE L'INTERFACE DU PROGRAMME

L'énergie ou la puissance reçue au sol est fortement influencée par les paramètres géographiques, astronomiques et météorologiques. Ces derniers ont un caractère aléatoire ce qui a conféré des dispersions multiples aux résultats obtenus par les différents modèles d'investigations.

L'évaluation précise du rayonnement reçu en un site donné exige des moyens humains et du matériel de mesure performant (capteurs de rayonnement, relevés automatisés par ordinateur, dépouillement des mesures par logiciel,...). Les stations météorologiques sont les plus appropriées à cet effet.

La plupart des stations météorologiques, (en Algérie) depuis plusieurs années, effectuent la mesure de l'insolation, et par conséquent il devient la seule grandeur disponible pour quantifier le rayonnement solaire, exception faite des rares stations qui font des mesures du rayonnement plus précis (elles sont au nombre de quatre en Algérie).

Toutes ces considérations nous ont amenées à réaliser une interface graphique, simple et conviviale, elle est basée sur :

* Un programme a été élaboré pour permettre de calculer :

- Le lever et le coucher du soleil en temps solaire vrai, la durée du jour.
- Le rayonnement global sur un plan horizontal pour diverses situations climatiques et selon deux modèles (Perrin de Brichambaut et Liu et Jordan), ainsi que la température ambiante à n'importe quel instant de la journée.

Ce même programme permettra de simuler les résultats suivants :

- Le rayonnement global selon les deux modèles cités précédemment.
- La température ambiante du jour considéré.
- La température du fluide à la sortie de l'insolateur.

Pour cela il faut introduire les données suivantes :

- Les coordonnées du site : latitude, longitude et altitude.
- L'état du ciel : ciel très pur (CTP), ciel moyen (CM), ciel pollué (CP)
- La date

- La température minimale et maximale enregistrée le jour considéré
- Les caractéristiques géométriques de l'insolateur
- La vitesse du vent ainsi que le débit

UNIVERSITE Med Khider Biskra SimuSol

CIEL: CTP CM CP

LATITUDE: 36.71 LONGITUDE: 3.25 ALTITUDE: 0.025 JOUR: 15 MOIS: 01 ANNEE: 2006 EXIT

H. LEVER: 7,12 H. COUCHER: 16,87 JOUR: 15 TSV (H): 14,06 Temps Universel: 14

Tache: Calcul Courbe

T min: 10 T max: 18

rayonnement global (PERRIN) (W/m²): 338,35 Graphe Température

Température ambiante (°C): 17,41

rayonnement global (JORDAN) (W/m²): 342,28

Température de sortie (°C): 29,8832

Caractéristiques géométriques de l'insolateur

Longueur (m): 2 Largeur (m): 1 Hauteur du canal (m): 0,025 Inclinaison (°): 35

Caractéristiques de l'insolateur

La Vitesse du Vent (m/s): 1 Le Débit du Fluide (kg/s): 0,008 Température Absorbeur (°C): 80

Figure II-6 Interface graphique des calculs

Quelques résultats numériques obtenus, qui donnent l'évolution du rayonnement solaire global sur un plan horizontal pour les modèles de Perrin de B. et de Jordan, ainsi que la température d'entrée et de sortie de l'insolateur théoriques et expérimentales pour la ville de Biskra sont ci-dessous Figure II-7 et II-8 et d'autres résultats concernant les villes de Boumerdes et Bousmail sont présentés dans le chapitre IV.

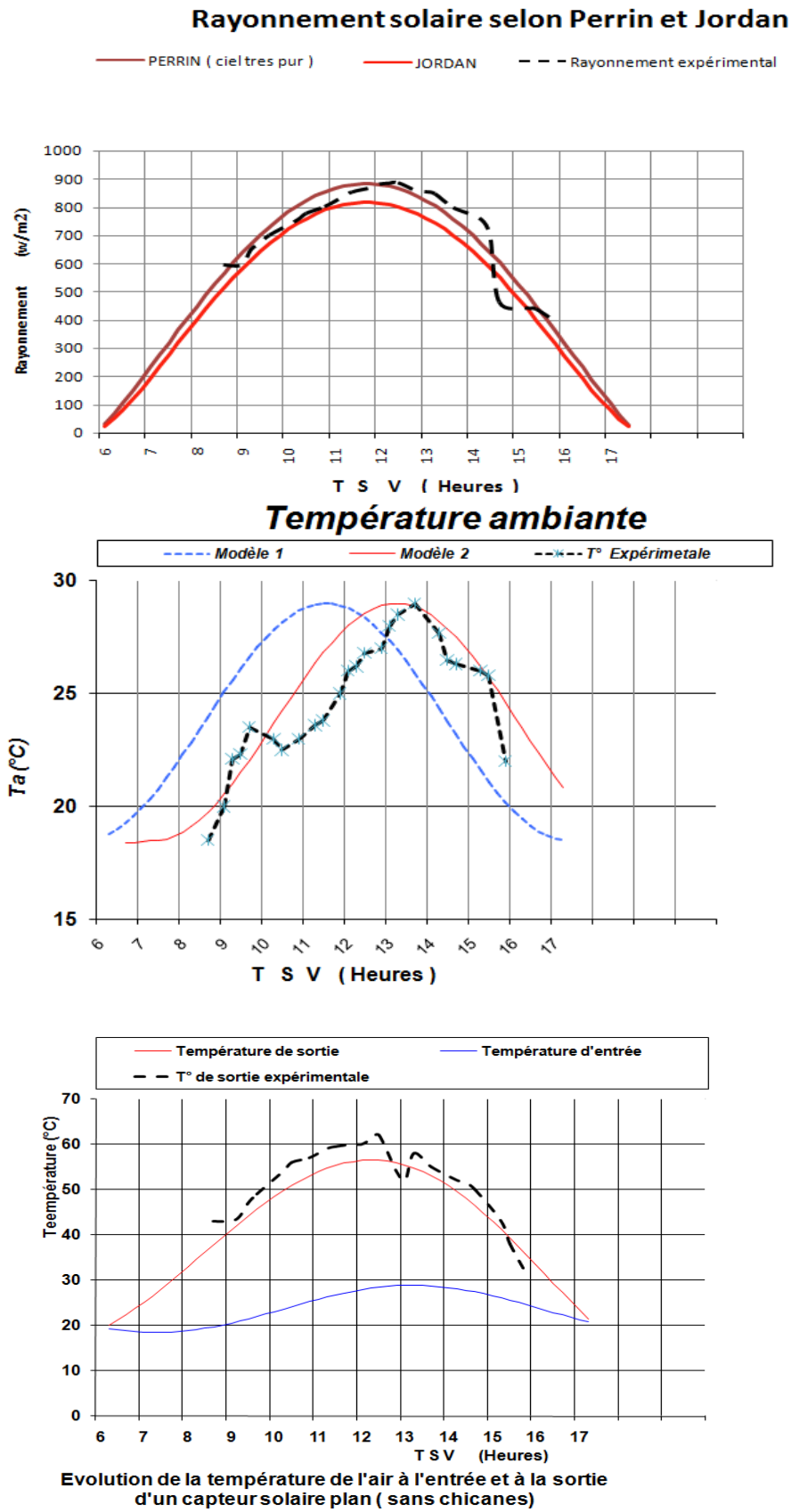


Figure II-7 Evolution du rayonnement, température ambiante et température du fluide à la sortie de l'insolateur à Biskra (16 /03/2009)

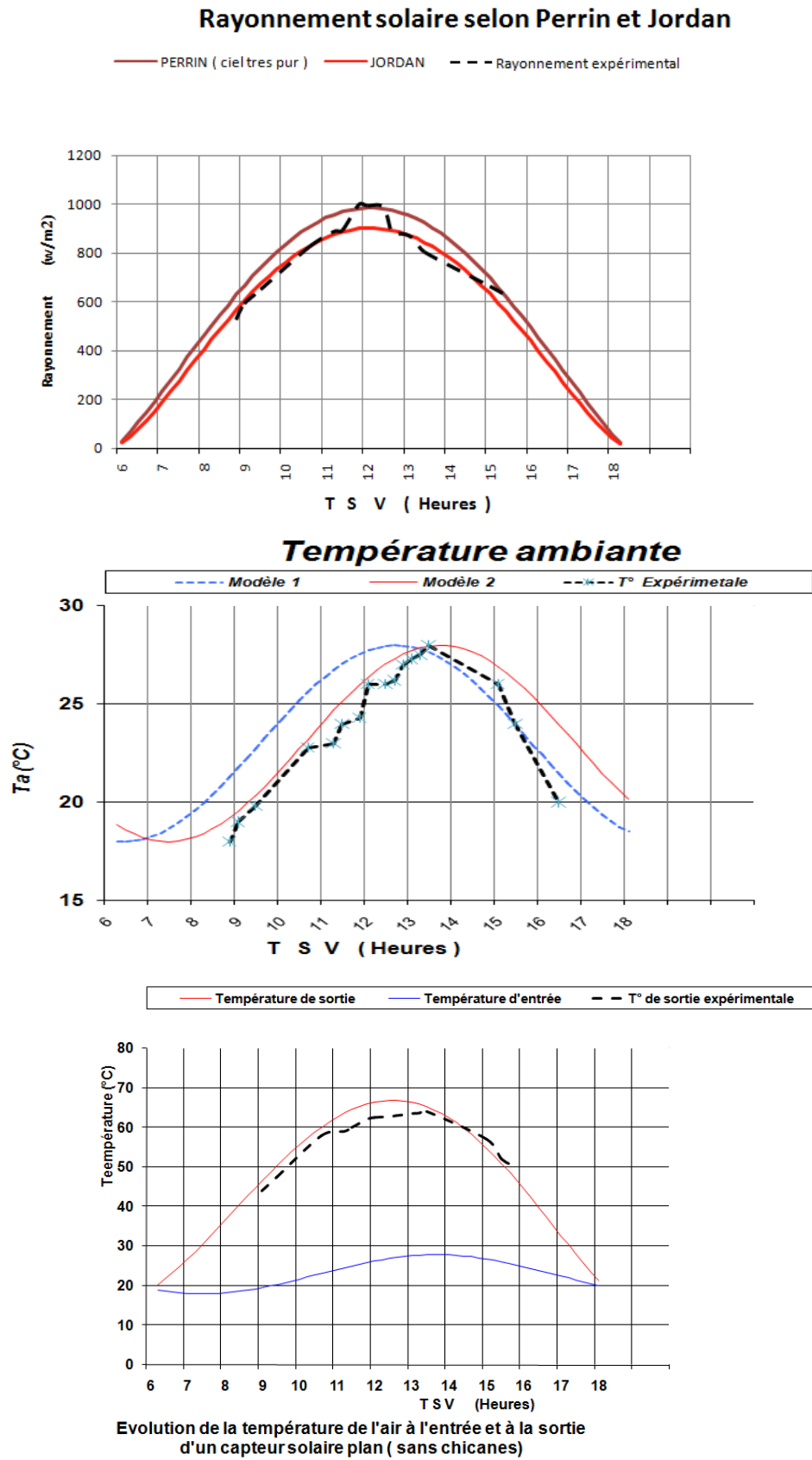


Figure II-8 Evolution du rayonnement, température ambiante et température du fluide à la sortie de l'insolateur à Biskra (06 /04/2009)

II.8. CONCLUSION

L'objectif est de permettre à l'utilisateur d'apprécier l'intérêt de ce programme en mettant en commun deux aspects (théorie et expérimentation), alliant ainsi la similitude. Ce programme de calcul est adopté en faisant le choix de deux approches théoriques, pour l'estimation des irradiances incidentes sur un plan horizontal. Nous avons utilisé les modèles de Perrin de Brichambaut et Liu et Jordan qui. Les valeurs calculées montrent que la comparaison est acceptable. En effet, cette confrontation entre les données recueillies et les résultats nous amène à voir que le cadre théorique retenu est une grille d'analyse performante.

Pour l'atlas solaire de l'Algérie, l'utilisation du modèle de Perrin de Brichambaut simplifié donne de meilleurs résultats [12]. Selon d'autres travaux [53] le même modèle est le plus performant à l'approche du midi solaire, l'écart existant entre ce dernier étudié comparativement aux valeurs expérimentales n'est pas important, par conséquent ce modèle peut être considéré pour une simulation de l'éclairement solaire.

CHAPITRE

III

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure de préparation de la matière première des éprouvettes, ainsi que les équipements nécessaires pour cette tâche, une présentation des séchoirs à chambres industriels, pour la réalisation des expériences une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences.

III.1. INTRODUCTION

Les matériaux à base d'argile concurrencent aujourd'hui les matériaux composites et trouvent des applications importantes dans divers domaines de l'industrie moderne notamment en génie civil pour la construction d'ouvrages importants : monuments et bâtiments, barrages, installations portuaires, ponts, terrains d'aviation, asphaltage des routes...

Les argiles sont également utilisées dans l'industrie des matériaux réfractaires pour la fabrication des faïences émaillées et des porcelaines (matériels de laboratoire, sanitaire et cuisine), des céramiques (objets d'art, poterie).

La meilleure tenue mécanique d'une structure à base d'argile dépend non seulement de la composition chimique de la matière première, c'est à dire du site de prélèvement et des minéraux qui la constituent, mais aussi des conditions expérimentales de mise en forme (consistance de la pâte, contraintes mécaniques externes appliquées, conditions de séchage).

III.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

III.2.1. Analyse Chimique du modèle d'argile étudié

Cette étape est importante dans l'étude et la caractérisation, c'est pour déterminer de manière quantitative la composition des argiles que nous l'exprimons en pourcentage d'oxyde par rapport à 100 g d'argile, elle permet de déterminer la formule structurale globale de l'argile...

Les résultats de l'analyse chimique sur les deux variétés d'argile sont présentés sur le tableau ci-dessous. Le Silicium est l'élément majeur comme toutes les argiles et la composition est analogue à celle donnée par la bibliographie.

La perte au feu qui est de l'ordre de 14% est l'ensemble des matières perdues par le matériau au cours d'une calcination et résultant soit d'un dégagement gazeux, soit d'une évaporation de l'humidité ou des matières organiques, soit d'une décomposition de l'eau de constitution, gaz carbonique, etc..... C'est aussi la différence entre le résidu sec et le résidu calciné. Elle correspond approximativement à la teneur en substances organiques du résidu sec.

S. chimique	Nature des éléments	Formulation	Pourcentage massique		
			Tolérances(%)	Argile 1	Argile 2
Si	Silice	SiO_2	38 à 85	49.21	51.12
Al	Alumine	Al_2O_3	9 à 25	10.78	9.95
Ca	Chaux	CaO	0 à 25	14.22	15.13
Mg	Magnésie	MgO	0 à 5	2.15	2.25
Na , K	Oxydes alcalins	$Na_2O + K_2O$	1 à 5	1.9	1.84
Fe	Trioxyde de fer	Fe_2O_3	3 à 9	5.01	5.06
Ti	Oxyde de titane	TiO_2	0.3 à 2	0.64	0.73
S	Anhydride sulfurique	SO_3	0 à 3	0.07	0.05
P	Oxyde de phosphore	P_2O_5	0 à 13	0.16	0.14
	Pertes au feu	H_2O	5 à 17	15.87	13.76

Tableau III-1 Résultats de l'analyse chimique

III.2.2. Préparation de la pâte d'argile

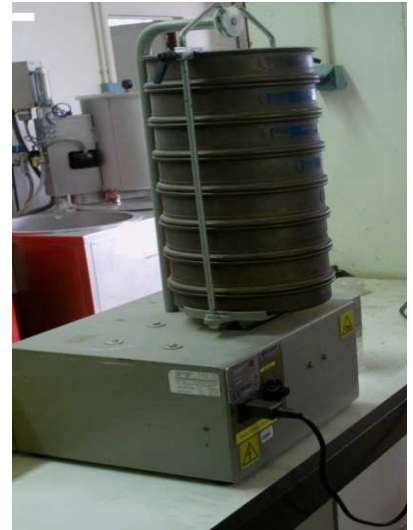
L'argile utilisée pour la briqueterie et la poterie est en général un mélange naturel de trois constituants principaux [6].

- l'argile pure kaolinitique [alumine (Al_2O_3), silice ($2SiO_2$), eau ($2H_2O$)]
- un flux (le feldspath) apportant les atomes de sodium (Na) ou de potassium (K) qui entrent dans la composition de la phase vitreuse,
- une charge comme du sable (quartz) qui réduit le retrait, mais n'intervient pas lors des réactions de cuisson.

Plus une argile est plastique, plus elle nécessitera d'eau pour former une pâte de consistance dite « normale », ne collant pas aux doigts. Elle peut donc supporter des corps inertes (dégraissants) tout en conservant une aptitude appréciable au toucher et une résistance mécanique au modelage [36].

a. Teneur en eau

La poudre d'argile est placée pendant 24 heures dans une étuve à 60°C, (figure III-1) pour une dessiccation totale. La granulométrie joue un rôle non négligeable sur la consistance de la pâte d'argile (Figure III-2) En effet, plus les grains sont fins, plus la pâte est plastique. Les particules de plus petite taille sont plus réactives et rehaussent très rapidement la densification de la pâte.

**Figure III-1** *Etuve***Figure III-2** *Granulomètre*

La masse d'eau et de poudre d'argile sont mesurées à l'aide d'une balance SARTORIUS (Figure III-3) modèle CP622, de précision de 0,01g.

**Figure III-3** *balance SARTORIUS*

Une teneur en eau de 18% a été retenue après appréciation de la fluidité, de la consistance de la pâte et de l'aspect extérieur des éprouvettes après démoulage. La teneur en eau pour la variété d'argile étudiée se situe entre 15% à 20%. Ce domaine de plasticité de la pâte d'argile préparée est inclus dans les limites définies par Atterberg [18 et 35]. Les pâtes d'argiles se comportent comme des solides et peuvent se rompre par fracture en fonction de leur teneur en eau [7 et 19].

b. Propriétés de la pâte

Le mélange obtenu est ensuite pétri et malaxé (pendant environ 2H) dans un mélangeur TURBULA T10 (Figure III-4) jusqu'à obtention d'une pâte homogène. La pâte est ensuite stockée hermétiquement dans une enceinte climatique pendant 24 heures au minimum, pour rendre homogène la teneur en eau tout en évitant l'évaporation de l'eau et augmentant la plasticité de la pâte sous l'effet de micro-organismes.

Les pâtes d'argile sont formées de particules en feuillets polarisés électriquement avec des charges opposées sur les deux faces. Ces charges attirent dans l'argile des molécules d'eau qui jouent le rôle de lubrifiant entre feuillets rendant plastique la pâte d'argile. Ceci pourrait s'expliquer par l'existence des forces de liaison entre les particules des minéraux eux-mêmes et les molécules d'eau : forces électrostatiques entre particules, forces dynamiques entre les filons d'eau et les particules, forces de type Van der Waals, forces de pesanteur et forces d'origine capillaire [24 et 61]. Les feuillets peuvent donc glisser facilement les uns sur les autres, lubrifiés par les couches d'eau ; on dit que la pâte d'argile est hydroplastique.

Pour une teneur en eau appropriée, les argiles peuvent être moulées, extrudées, tournées ou modelées.



Figure III-4 *Mélangeur*

III.2.2. Elaboration et séchage des éprouvettes

a. Compactage de la pâte d'argile

Les conditions retenues pour l'élaboration des éprouvettes sont proches de celles utilisées en tuilerie industrielle. Toutes les éprouvettes ont été élaborées dans les mêmes conditions expérimentales à partir de la poudre de la variété d'argile choisie dans une étireuse pour façonnage des tessons briques figure III-5.



Figure III- 5 Façonneuse des tessons



Figure III-6 Séchage des échantillons

b. Observations visuelles sur les éprouvettes

Les caractéristiques et les observations sur les pâtes et les éprouvettes élaborées sont décrites dans le Tableau III-2.

Argile	Teneur en eau (%)	Consistance de l'éprouvette	Aspect de l'éprouvette
Argile 1	18	Pâteuse plastique	Lisse, humide et sans fissures
Argile 2	18	Pâteuse plastique	Lisse, humide et sans fissures

Tableau III-2 Caractérisation et observation des éprouvettes

c. Précautions de séchage

Les éprouvettes démoulées sont confinées dans une grande boîte étanche que l'on ouvre de temps en temps pour le renouvellement de l'air séchant. L'ensemble est à la température ambiante de la salle. La teneur en eau des éprouvettes est réduite progressivement par un séchage très lent pour ne pas perturber le retrait normal de la matrice. Dans le cas contraire, ceci engendre des fissures localisées.

Au cours du séchage (lors de la consolidation de la structure) (Figure III-6) on observe toujours une contraction des dimensions et de la masse due à l'évaporation de l'eau et de la réduction de certains pores.

d. Naissance de Fissures.

La fissuration d'une structure après la mise en forme dépend de plusieurs facteurs d'origines diverses, couplés ou non. On peut citer les facteurs les plus courants : la nature de l'argile, les contraintes au démoulage, le retrait du matériau au séchage.

III.3. APPAREILLAGE DE MESURE UTILISE

a- Caractéristiques géométriques de l'insolateur

L'insolateur plan à air utilisé comme batterie de chauffage est incliné d'un angle de 45° ; il est relié au séchoir, la jonction entre les deux est isolée et étanche.

- caisson de parois en bois d'épaisseur 2.5 cm et de conductivité thermique 0,10 W/m.K
- longueur $L = 2\text{m}$
- largeur $l = 0,8\text{m}$
- surface de captation $A = 1,6\text{m}^2$
- épaisseur de la veine d'air mobile $e = 0,025\text{m}$
- transparent en polycarbonate alvéolaire à triple paroi de coefficients d'émissivité 0,9 et de transmittivité 0,84
- absorbeur en aluminium peint en noir mat, d'épaisseur 4 mm, de coefficients d'émissivité 0,95 et d'absorptivité 0,95 et de conductivité thermique 205 W/mK
- isolant en polystyrène de 2 cm d'épaisseur et de conductivité thermique 0,04 W/mK

b- Mesure de l'éclairement

L'éclairement dû au rayonnement global est mesuré à l'aide d'un pyranomètre (Kypp & Zonen) relié à un intégrateur de type « Solarimeter Integrator CC2 » de marque Eppley (USA).

c- Mesure de la température

Les sondes de température (thermocouples) sont reliées à un enregistreur de température de marque Philips.

d- Mesure du débit d'air (vitesse)

Un anémomètre à hélice, permet le calcul de la vitesse « v_c » de l'écoulement d'air. Avec une section de passage de l'air à travers l'appareil connue, on calculera le débit du fluide.

e- Mesure de la masse du produit

Le poids de l'échantillon Figures III-8, au cours du séchage, est mesuré par une balance de marque SARTORIUS. Au moment de la mesure, on retire le produit de l'armoire en ouvrant les tiroirs, on s'assure que le temps d'ouverture est très court pour s'assurer qu'il y ait le moins de pertes de chaleur possible du séchoir.

f- Mesure de la masse volumique

La masse volumique est déterminé à l'aide du pycnomètre à hélium Micromeritics AccuPyc qui permet de déterminer la masse volumique d'un matériau massif, divisé ou poreux à partir de la mesure très précise du volume de l'échantillon de masse connue.



Figure III- 7 Pycnomètre



Figure III-8 Les échantillons avant et après séchage



Figure III-9 Les échantillons après cuisson

III.4. DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE

Le moyen le plus simple lorsque l'on souhaite suivre et quantifier la variation progressive de l'humidité absolue moyenne M du produit c'est la pesée des tessons au cours du séchage. Cette teneur en eau est définie par le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit à l'instant t à la masse m_{sec} du produit anhydre.

L'humidité absolue du produit passe de la valeur initiale M_0 à la valeur finale M_e imposée par l'air asséchant. La valeur de M_e du produit peut être obtenue à partir de la corrélation du modèle de G.A.B (Tableau I-3, cf. chapitre I). On atteint l'état d'équilibre, pour une température de séchage fixée constante, lorsque pour deux pesées successives la masse du produit est la même.

Sachant que m_{sec} est la masse finale du tesson, mesurée à l'état d'équilibre et $m(t)$ la masse du même tesson mesurée à l'instant t , la teneur en humidité absolue du produit se détermine par la formule suivante :

$$M = \frac{m(t)(1 + M_e) - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \quad (\text{III.1})$$

La masse de l'eau contenue dans le produit à l'instant t , $m_{\text{eau}}(t)$ est calculée par l'équation suivante :

$$m_{\text{eau}}(t) = m(t) - \frac{m_{\text{sec}}}{1 + M_e} \quad (\text{III.2})$$

La perte de masse relative du produit Δm s'exprime en %, en fonction de la masse initiale du produit m_{ini} et sa masse $m(t)$ au temps t , par la formule suivante :

$$\Delta m = 100 \frac{m_{\text{ini}} - m_{\text{pr}}(t)}{m_{\text{ini}}} \quad (\text{III.3})$$

Les diverses phases de séchage se traduisent par des courbes appelées vitesses de séchage représentées par l'évolution de la pente de la cinétique de séchage en fonction de l'humidité absolue du produit ($-dM_{\text{exp}}/dt = f(M_{\text{exp}})$).

III.5. LES SECHOIRS INDUSTRIELS A CHAMBRES EXISTANTS

Ces séchoirs atteignent des capacités qui leurs permettent de rivaliser les autres types de séchoirs sur le coût d'exploitation et la souplesse du fonctionnement.

La ventilation et le recyclage permettent d'améliorer les échanges air-produits, en fonction des vitesses de séchage recherchées. Cette vitesse pour des chambres ventilées et de l'ordre de 1 m/s à 3 m/s [3 et 74] selon les temps recherchés.

Avec des brasseurs installés dans les chambres, le recyclage s'effectue dans chaque cellule. Ces brasseurs, placés sous les bouches d'air chaud réglables en débit, un complément d'air humide est repris dans la chambre et mélangé pour avoir un air moins chaud et plus humide permettant ainsi de limiter le taux de casse.

Le recyclage prend donc de l'importance pour amener l'air chaud par mélange à des caractéristiques de séchage compatibles avec la fragilité des produits. En moyenne, la valeur de recyclage représente 4 fois le débit d'air chaud.

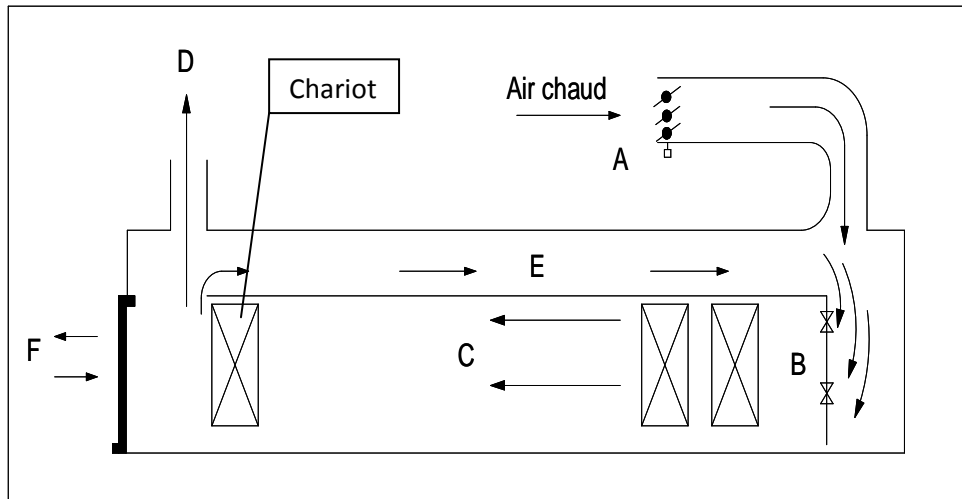


Figure III-11 Séchoir à chambres ventilées [74]

- A : Vanne motorisée d'admission d'air chaud
- B : Ventilateurs de recirculation
- C : Sens de progression du séchage
- D : Extraction d'air humide
- E : Recyclage d'air humide
- F : Portes

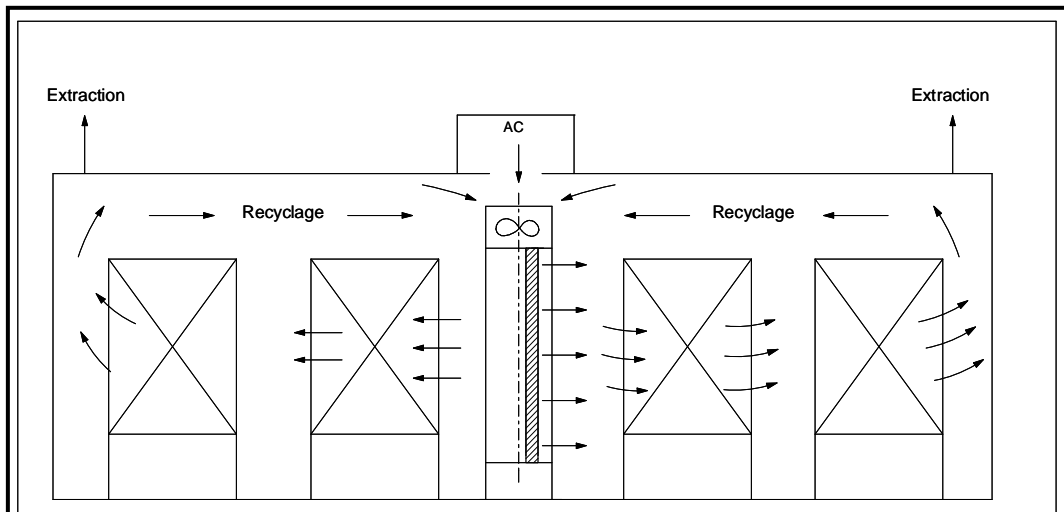


Figure III-12 Séchoir à chambres avec brasseurs rotatifs [74]

III.6.VALEURS DES PRINCIPAUX PARAMETRES RELEVES LORS DES VISITES DES BRIQUETERIES

II.6.1. La température

La température habituelle de l'air chaud dans les séchoirs est de 80 à 110°C. En dessous, il y a risque d'eau résiduelle et de condensation. Au dessous, il y a des risques de vaporisation de l'eau dans les produits.

III.6.2. Le débit d'air

En plus de la température, le débit joue un rôle de répartition dans la section du séchoir.

Le tableau ci-dessous met en évidence la quantité d'air nécessaire à fournir pour avoir une quantité de chaleur constante.

Q_{chaleur} [kcal/h]	T [°C]	C [kcal/kg]	Q_{air} [kg/h]
270000	110	29.36	9.196
270000	100	24.41	11.061
270000	80	14.57	18.531

Tableau III-3 Le débit d'air en fonction des températures [74]

Q_{chaleur} : Chaleur nécessaire au séchoir [kcal/h]

C : Chaleur spécifique aux températures indiquées [kcal/kg]

Q_{air} : Débit d'air à fournir [kg/h]

T : Température de l'air chaud [°C]

III.6.3. La vitesse de l'air séchant

Pour les séchoirs modernes la vitesse de l'air est ente 1 et 5 m/s, celle-ci est utilisée pour équilibrer le séchage entre les points d'un produit et les produits eux-mêmes. C'est pour cette raison que l'on sèche de plus en plus vite, même dans les séchoirs ordinaires.

La vitesse de l'air a été mise à profit pour faire du séchage rapide qui était réservé aux produits fabriqués à la vapeur et qui, maintenant s'applique également aux produits fabriqués à froid. Pourvu que l'argile s'y prête à ce mode de séchage.

II.6.4. Circulation de l'air séchant

Les progrès récents réalisés dans les séchoirs depuis quelques années sont dus à une meilleure utilisation de l'air. La technique est d'améliorer les échanges entre l'air du séchage et les produits, on y parvient par divers moyens :

- Brassage de l'air.
- Eloignement longitudinal des charges de produits.
- Diminution de l'importance des supports de produits.
- Espacement calculé des produits entre eux.

III.7. PROCEDURE EXPERIMENTALE

III.7.1. Essais par plans d'expériences

Nous nous servirons des plans d'expérience pour quantifier les influences des variables température et temps. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Design-Expert (version 8). C'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- établissement du but et des objectifs des essais ;
- sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- choix du type de plan d'expérience ;
- conduite des essais ;
- détermination des facteurs influents ;
- modélisation rapide des réponses ;
- recherche des paramètres optimaux ;
- validation des résultats.
- diminution du nombre des essais, donc du coût des essais ;
- détection des interactions entre les facteurs ;
- détection des conditions optimales ;
- meilleure précision des résultats ;
- modélisation des résultats.

La différence capitale entre la méthode d'un facteur à la fois et la méthode des plans d'expérience tient au fait qu'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience.

III.7.2. Plans d'expériences

a) Terminologie (Réponses, facteurs, niveaux)

Avant d'aborder l'étude des plans d'expériences, il convient de préciser le vocabulaire que nous allons utiliser. Nous nous inspirerons pour cela de la norme AFNOR X 06-080 et des usages des différentes disciplines auxquelles nous ferons appel.

Un phénomène peut toujours être mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{III-4})$$

Avec

Y_i : grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur : cette grandeur est appelée la réponse ou la grandeur d'intérêt ;

X_i : variables sur lesquelles l'expérimentateur peut agir ; ces variables peuvent être continues ou discontinues ; on les appelle les facteurs ; les plans d'expériences permettent d'étudier l'influence d'un grand nombre de facteurs sans multiplier exagérément le nombre des essais ;

f : fonction mathématique qui explique le mieux les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux X_i . Dans le cas des plans d'expériences, cette fonction mathématique

Lorsque l'on étudie un facteur X_i , par exemple température (T°), on ne le fait pas varier dans de larges proportions. On définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes. La borne inférieure retenue par l'expérimentateur est appelée niveau bas et la borne supérieure, niveau haut. On a l'habitude de désigner par le signe moins (-) le niveau bas d'un facteur et par le signe plus (+) son niveau haut [27 et 69].

b) Notion d'espace expérimental

Supposons qu'un expérimentateur lance une étude. Il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » nous emploierons le mot facteur. On dit que la réponse dépend de plusieurs facteurs.

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figure III-10). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsque l'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes :

- la borne inférieure est le niveau bas ;
- la borne supérieure est le niveau haut.

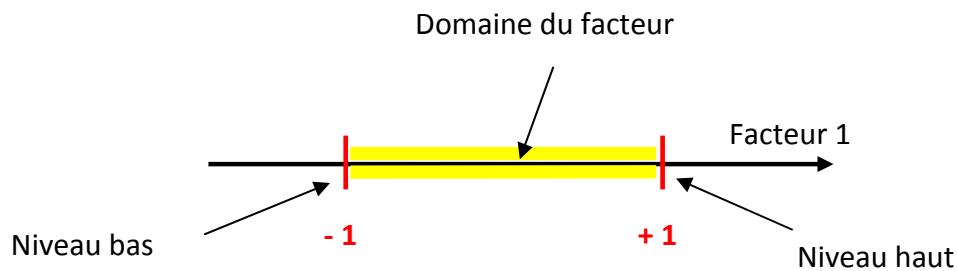


Figure III-13 *Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut*

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur, ou plus simplement, le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

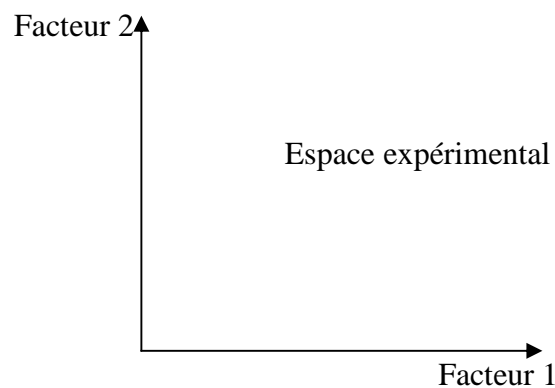


Figure III-14 *Définition de l'espace expérimental*

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier.

On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (figure III-11).

Le niveau X_1 du facteur 1 et le niveau X_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (figure III-12). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

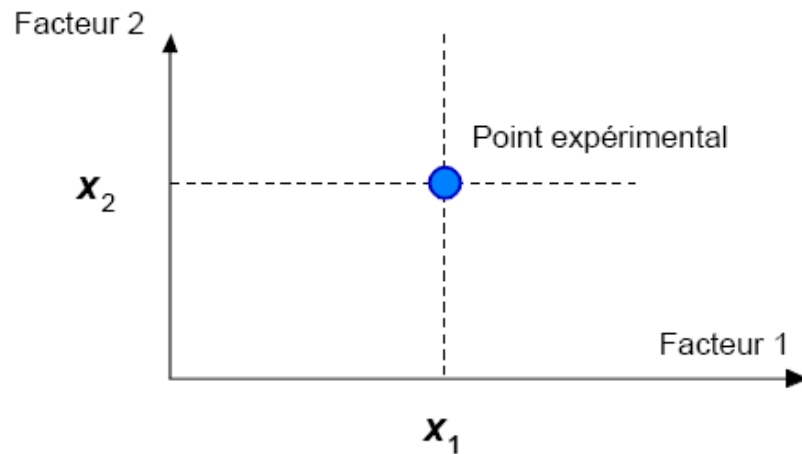


Figure III-15 Niveaux des facteurs définissant des points expérimentaux dans l'espace expérimental

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « domaine d'étude ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure III-13).

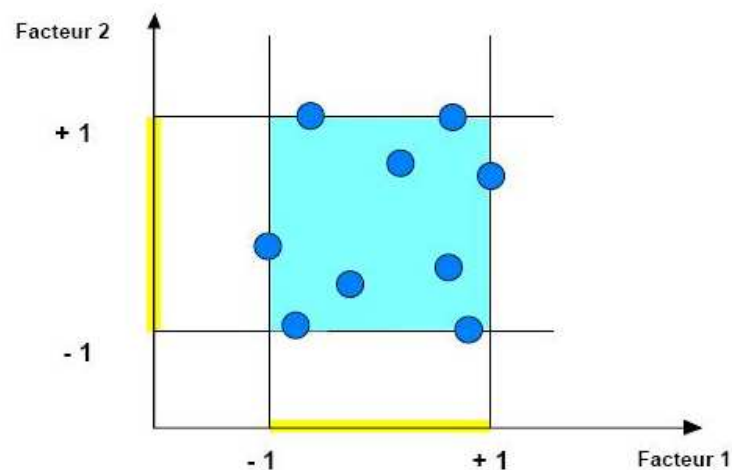


Figure III-16 Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

La définition que nous venons de donner s'applique bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables qui ne sont pas continues.

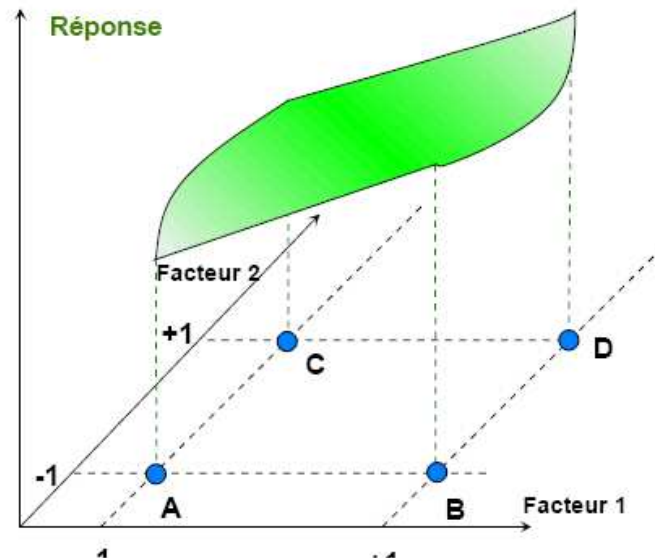


Figure III-17 Définition de la surface de réponse

Les niveaux X_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et Y est la valeur de la réponse en ce point. On attribue à la réponse un axe orthogonal à l'espace expérimental. La représentation géométrique d'un plan d'expériences et des réponses associées nécessite donc un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. La représentation géométrique des résultats d'un plan à deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une pour la réponse, deux pour les facteurs.

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (figure III-14).

III.8. CONDITIONS EXPERIMENTALES

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le séchage, on peut citer les éléments *temps* et *température*,

Conditions du séchage	Température $T \cdot C$	Temps t (minutes)
	20 ; 50 ; 80.	60 ; 210 ; 360.

Tableau III-4 Conditions de séchage pour un plan 3^2

III.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé pour la préparation des tessons (argile, granulomètre, agitateur, la balance, étuve, l'insolateur plan et les moyens utilisés pour la mesure du rayonnement et la température), ainsi qu'une description des plans d'expérience pour déterminer les conditions expérimentales.

Une description des séchoirs industriels à chambres utilisés actuellement dans presque toutes les briqueteries était nécessaire pour confronter la théorie avec l'expérimental.

La planification et la réalisation des expériences ont été établies dans deux centres.

CHAPITRE

IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et numériques du rayonnement solaire, des températures ambiante et de sortie ainsi que des résultats sur le séchage ; ainsi qu'une analyse statistique des différents résultats.

IV.1. INTRODUCTION

Le séchage est une étape incontournable des produits argileux et cela pour leurs préparations à la cuisson et pour faciliter leurs transports sans se détériorer, le dispositif que nous avons utilisé (séchage indirect) semble plus adapté par rapport au séchage solaire direct. Son utilisation est très utile, d'un point de vue économique ou écologique.

Les préparations des pâtes d'argile se sont d'abord effectuées au sein du centre de contrôle des matériaux de construction (analyse chimique et réalisation des éprouvettes ainsi que le séchage) de BOUMERDES et à BOUSMAIL ; afin de mener à bien l'étude de leur influence sur le processus de séchage. Ensuite, nous expérimentons en ensoleillement naturel sur le site de Boumerdes ; ville dans le Nord de l'Algérie, d'altitude 09 mètres, de latitude $36^{\circ}46'$ N et de longitude $3^{\circ}28'$ Est. Bousmail ; ville près du centre, d'altitude 11 mètres, de latitude $36^{\circ}38'$ et de longitude $2^{\circ}45'$.

IV.2. REPRESENTATION GRAPHIQUES DES MODELES THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX

Les courbes qui suivent, ont été obtenues en introduisant dans l'interface graphique les paramètres météorologiques ainsi que les caractéristiques physiques et géométriques du capteur de l'expérimental.

IV.2.1. Rayonnement solaire

Les figures (IV-1 à IV-4) représentent l'évolution du rayonnement global journalier sur un plan d'une inclinaison égale à la latitude du lieu d'expérience selon deux modèles semi empiriques (Perrin DE Brichambaut et Liu Jordan) et les résultats obtenus expérimentalement en fonction du temps pour Boumerdes (16/12/2011)et (16/04/2012) et Bousmail (21/03/2012) et (21/10/2012).

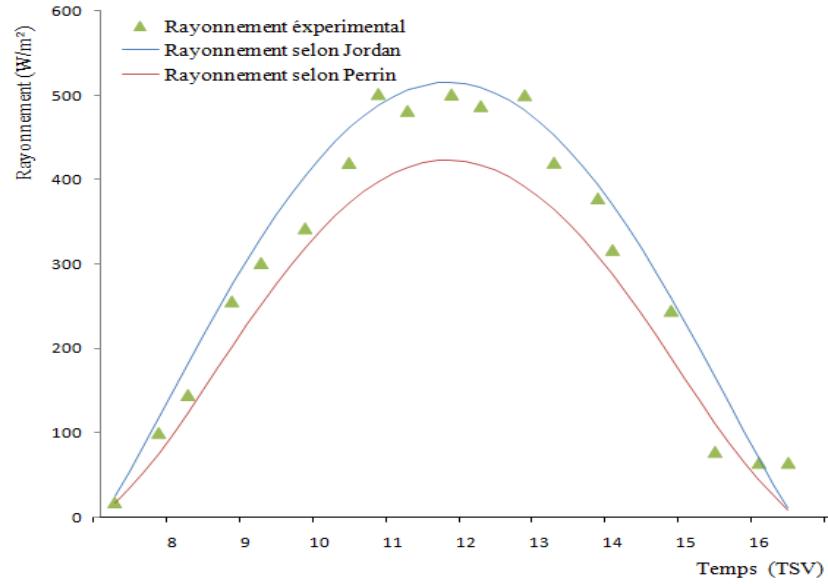


Figure IV-1 Evolution du rayonnement solaire à Boumerdes (16/12/2011)

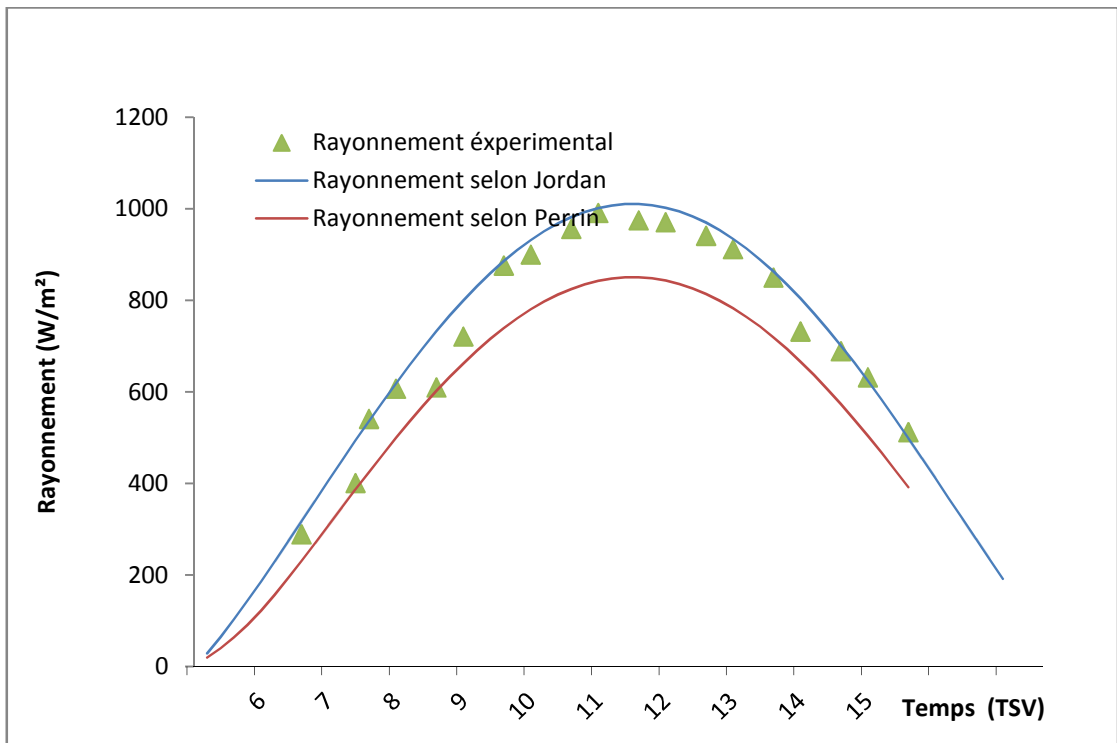


Figure IV-2 Evolution du rayonnement solaire à Boumerdes (16/04/2012)

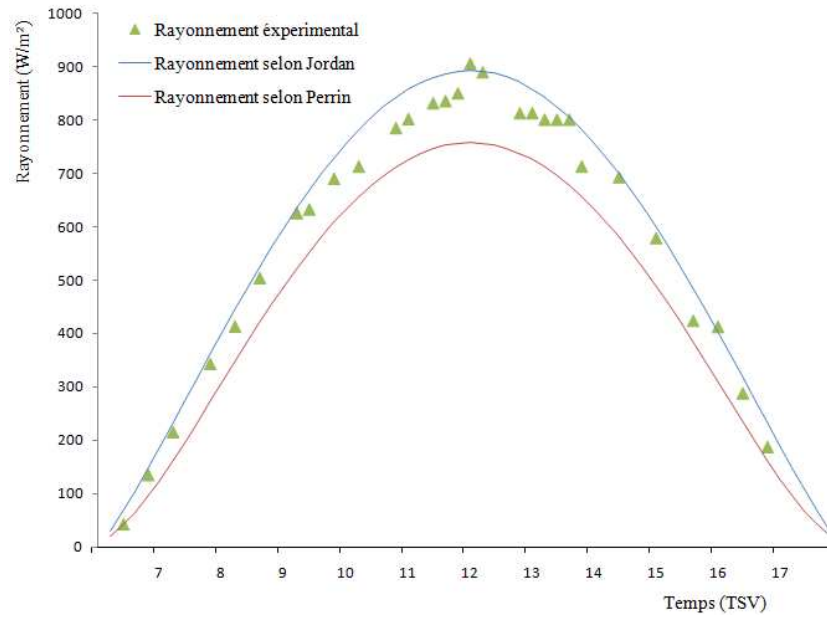


Figure IV-3 Evolution du rayonnement solaire à Bousmail (21/03/2012)

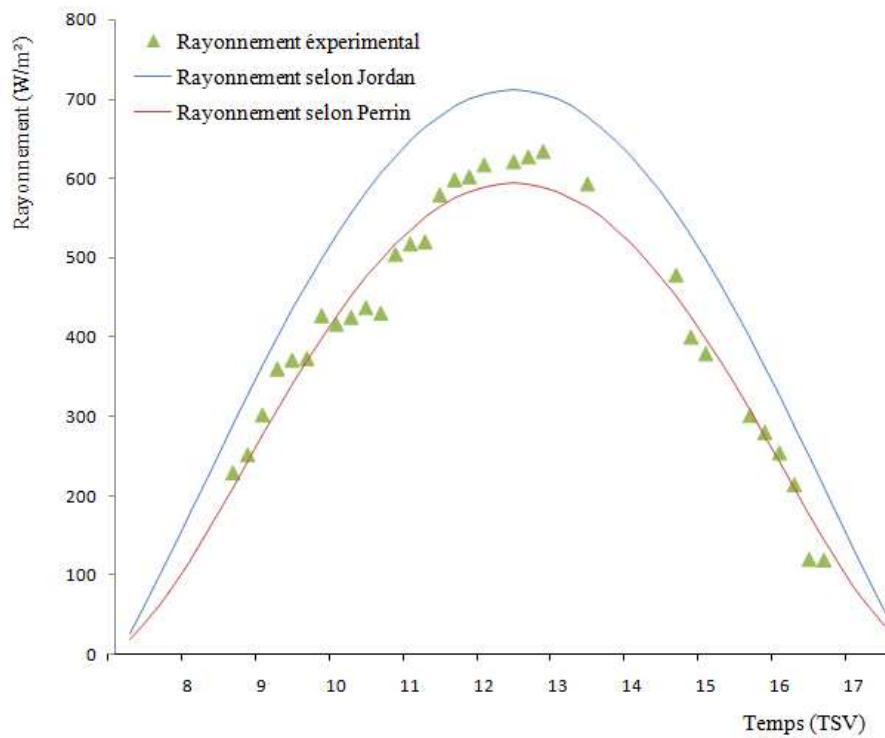


Figure IV-4 Evolution du rayonnement solaire à Bousmail (21/10/2012)

Interprétation des résultats

Les résultats expérimentaux comparés à ceux de la simulation montrent que l'utilisation des modèles de Perrin de Brichambaut ainsi que celui de Liu et Jordan s'avère fiable pour la détermination du rayonnement solaire global. Selon d'autres travaux [66], [67], le même de Perrin de Brichambaut est le plus performant à l'approche du midi solaire, l'écart existant entre ce dernier étudié comparativement aux valeurs expérimentales n'est pas important et ne dépassant pas 90 w/m², par conséquent ce modèle peut être considéré pour une simulation de l'éclairement solaire.

IV.2.2. Température ambiante et température à la sortie de l'insolateur

Nous présentons sur les abaques qui suivent, les courbes représentatives des températures ambiantes selon le modèle proposé (II-1) et de sortie selon (II-34) obtenues pour les sites: Boumerdes (latitude 36°46' N et de longitude 3°28' Est), ciel clair
Bousmail (latitude 36° 38' et de longitude 2° 45'), ciel clair.

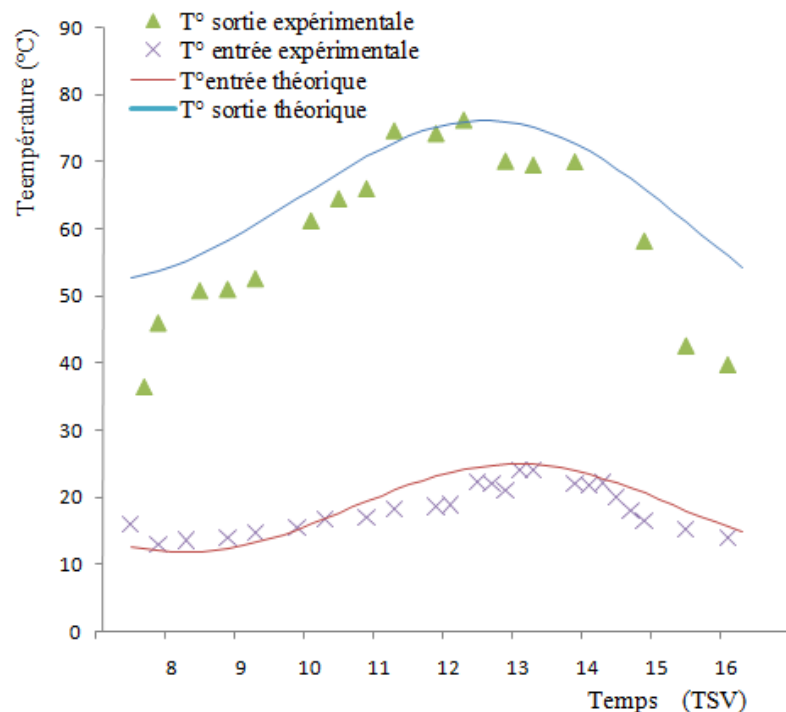


Figure IV-5 Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Boumerdes (16/12/2011)

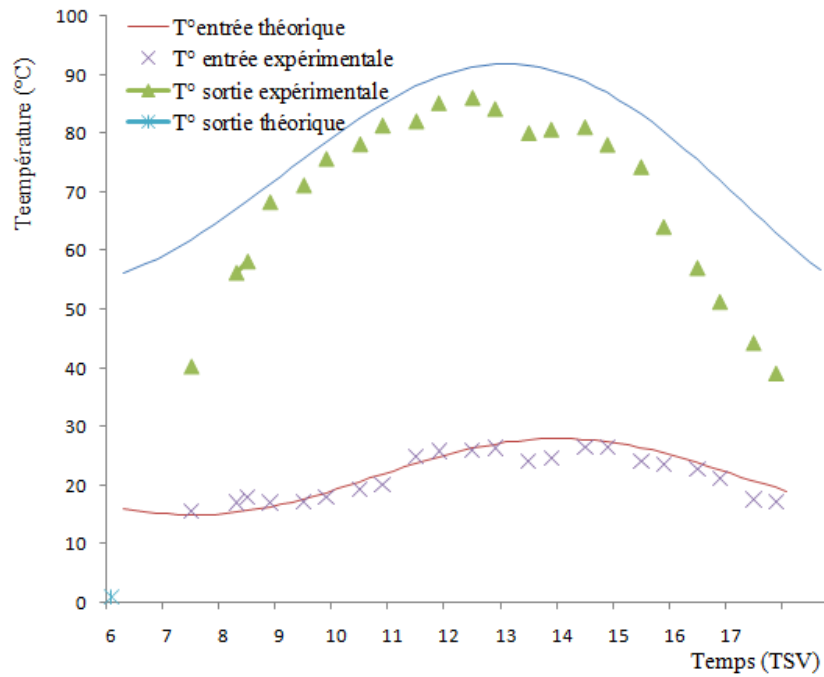


Figure IV-6 Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Boumerdes (16/04/2012)

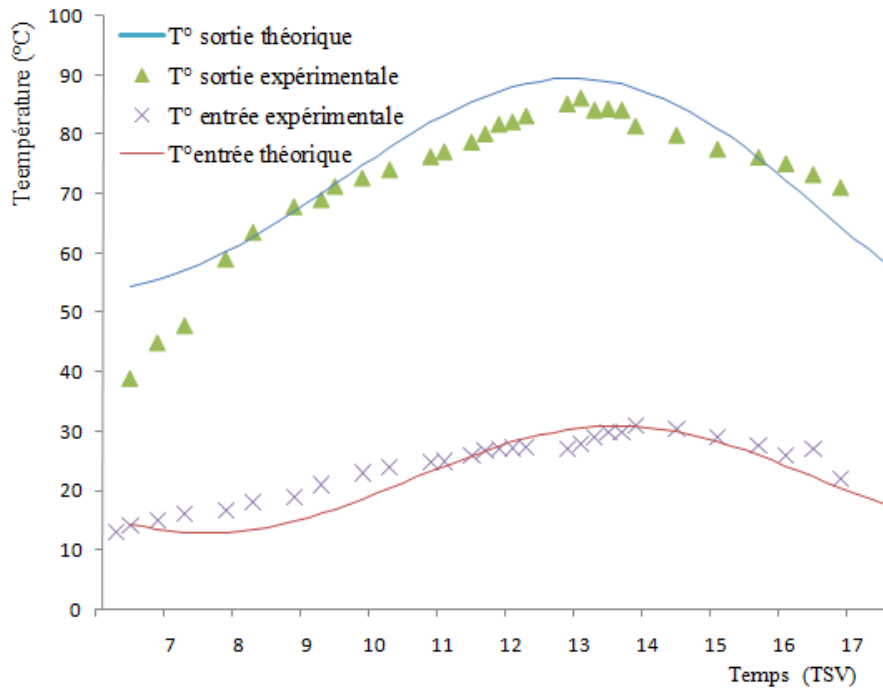


Figure IV-7 Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Bousmail (21/03/2012)

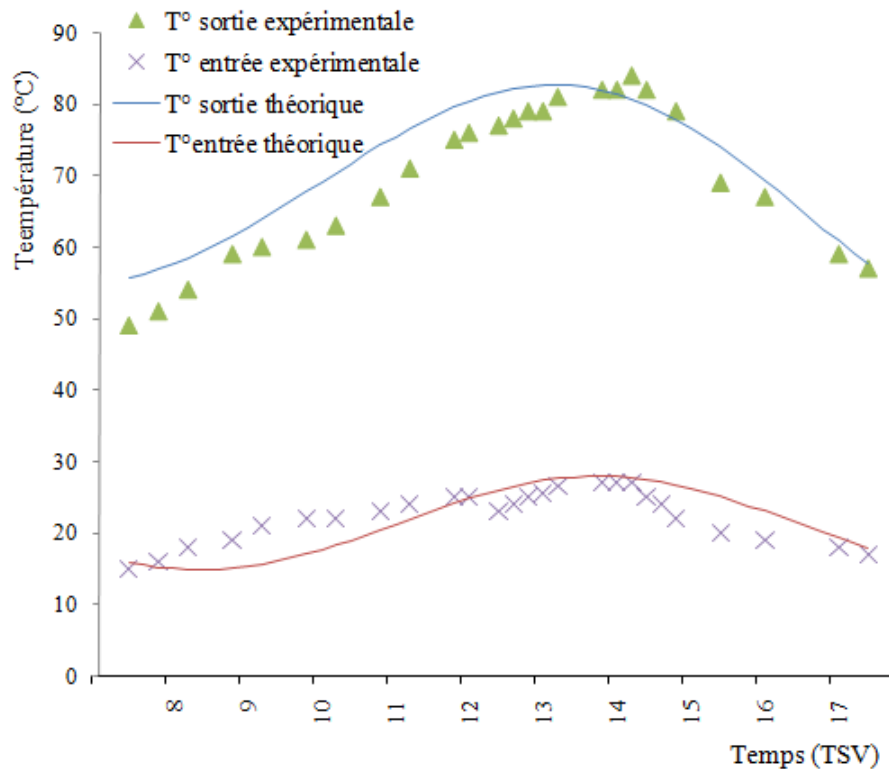


Figure IV-8 Evolution de la température ambiante et à la sortie de l'insolateur à Bousmail (21/10/2012)

Interprétation des résultats

Les résultats de la température ambiante obtenus à travers le modèle théorique corrigé (II-1), sont proches de ceux expérimentaux, par conséquent ce modèle peut être adopté. En ce qui concerne la température à la sortie de l'insolateur, le modèle obtenu à partir du bilan thermique reflète bien l'évolution journalière de cette dernière (parfois l'écart est de plus ou moins 5°, cela est dû à la variation de la vitesse du vent ainsi que le passage des nuages).

D'un autre côté aussi ces courbes montrent que dans tous les cas, par ciel clair comme par ciel couvert, il y'a un écart de température (entrée-sortie) considérable.

A noter également que les valeurs obtenues de la température de sortie dépassent assez largement, pour un ciel clair 80°C pour un débit de 35 m³/h.m² ce qui nous laisse penser à beaucoup d'applications qu'on peut adapter à ces régions.

IV.2.4. Variation de l'humidité en fonction du retrait (courbe de BIGOT)

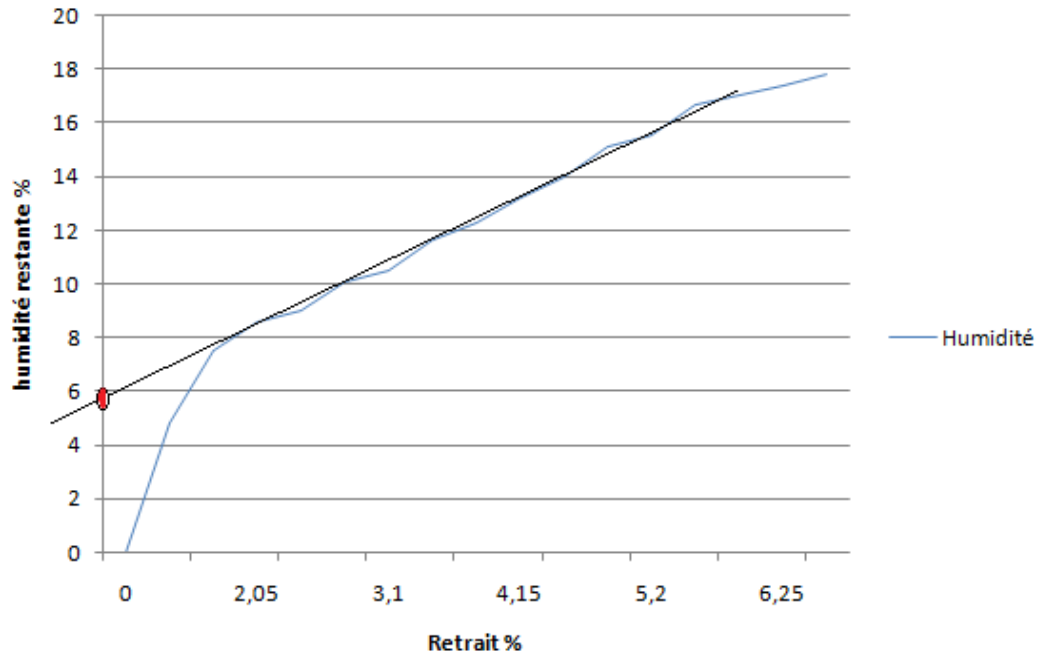


Figure IV-9 Courbe de Bigot pour l'échantillon 1

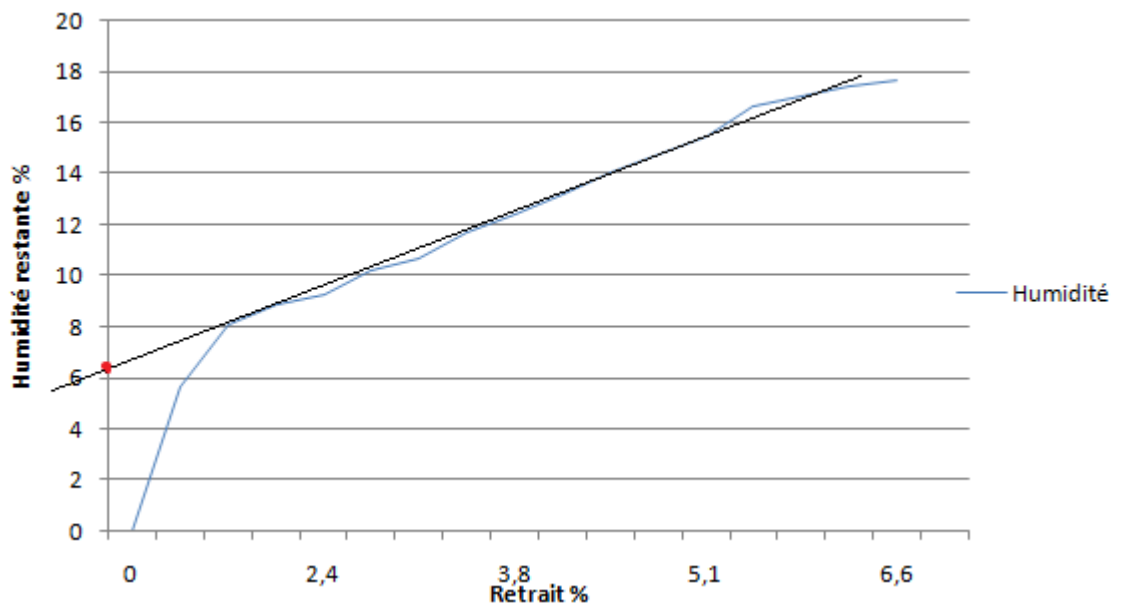


Figure IV-10 Courbe de Bigot pour l'échantillon 2

Interprétation

On montre des courbes de séchage selon Bigot pour différentes argiles. Le retrait initial est toujours linéaire. Par contre les pentes dépendent maintenant de la densité de l'argile sèche

et de l'anisotropie du matériau. Les non linéarités éventuelles sont principalement liées à la présence de porosités préexistantes dans les échantillons. La partie la plus caractéristique des courbes se situe quand sa linéarité s'achève. Plus la courbe est longue, plus le retrait est important par définition. Une forte eau d'interposition indique que l'argile est facile à sécher car l'eau colloïdale est réduite d'autant et parce que c'est une indication de la porosité du matériau sec. Pour les pâtes utilisées des échantillons, les concentrations d'eau totale sont de l'ordre de 18 % et les concentrations d'eau d'interposition sont pour le premier échantillon est de 5.9 % et pour le deuxième est de 6.4 %. Le retrait peut atteindre 7 % environ et cela dû à la nature minéralogique de l'argile, la granulométrie, la teneur en éléments dégraissants, la teneur en eau de façonnage, la compression subie par l'argile lors de son passage dans la façonneuse, etc.). Les retraits supérieurs à 8 % posent beaucoup de problèmes de production.

Selon le retrait obtenu (limité), nos mélanges argileux présentent une bonne aptitude au séchage et ils sont prêts pour l'étape suivante qui est la cuisson.

IV.2.5. résultats du séchage (appelé séchage rapide)

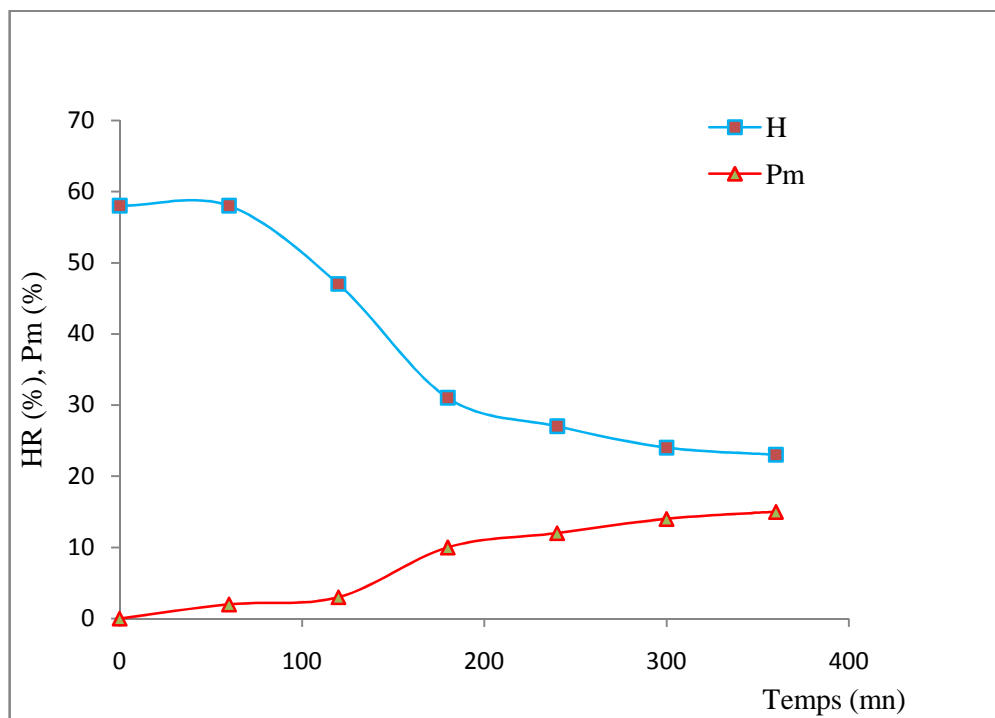


Figure IV-11 Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 1)

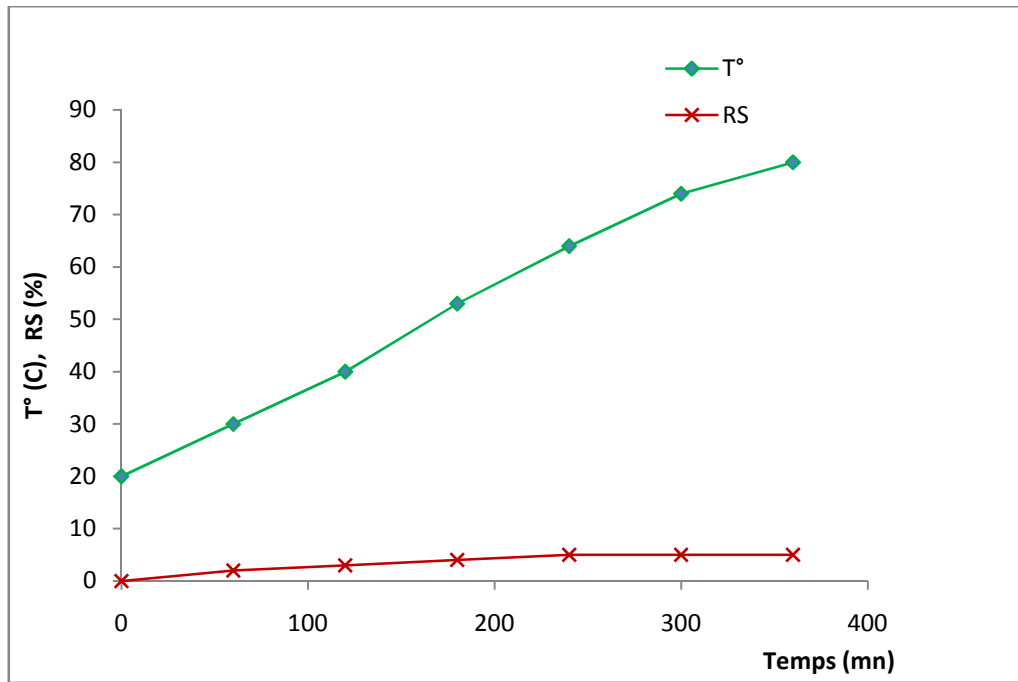


Figure IV-12 Variation de la température et du retrait sur sec en fonction du temps
(Echantillon 1)

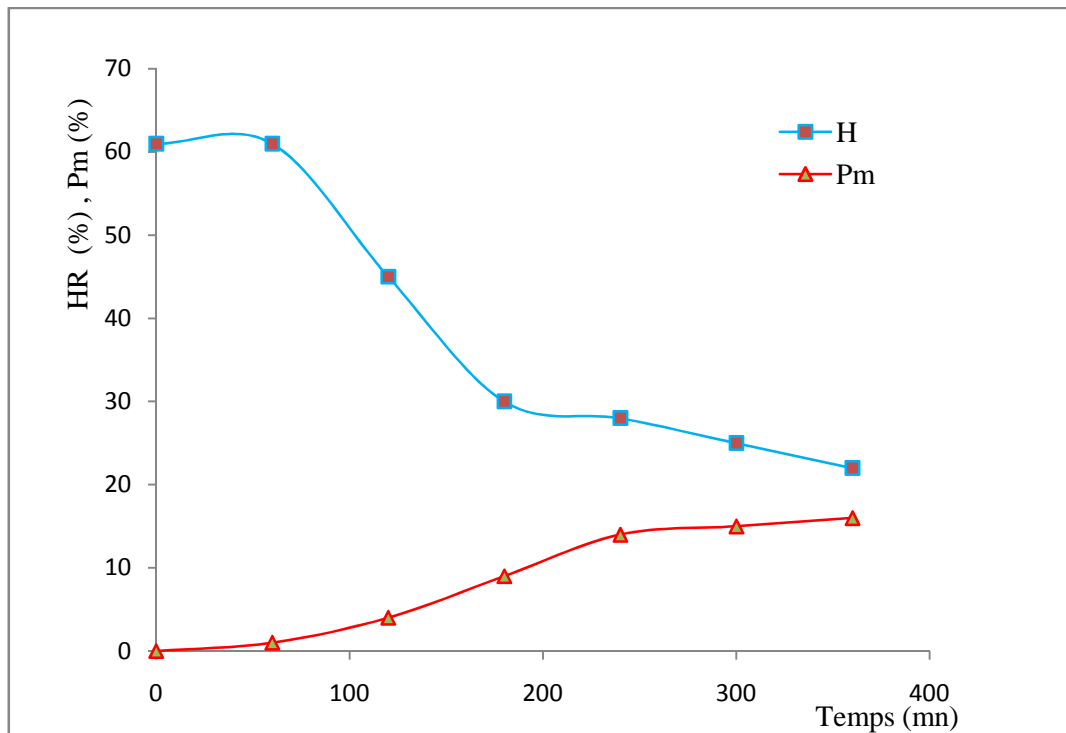


Figure IV-13 Variation de l'humidité résiduelle et de la perte de masse en fonction du temps (Echantillon 2)

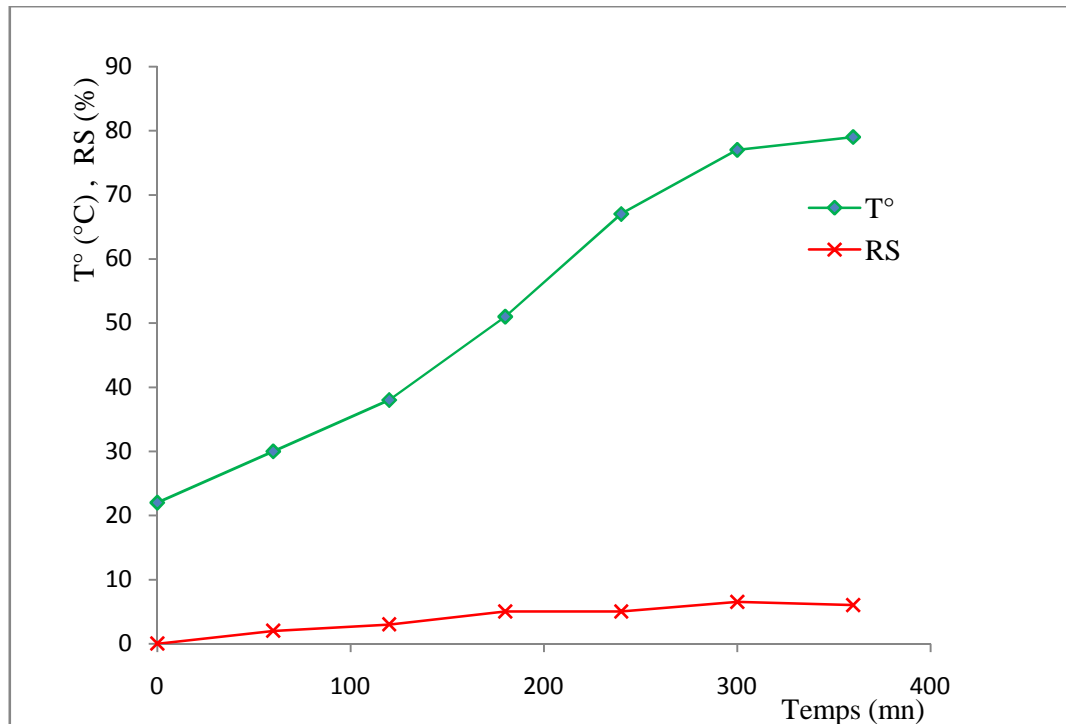


Figure IV-14 Variation de la température et du retrait sur sec en fonction du temps
(Echantillon 2)

Interprétation

A l'issue des résultats expérimentaux obtenus, avec source en ensoleillement naturel, Les figures (IV-11 et IV-13) nous indiquent l'évolution de l'humidité résiduelle ainsi que la perte de masse sur sec. Les courbes représentatives de l'humidité décroissent selon trois phases (initiale, à vitesse constante et à vitesse décroissante), on constate que la perte en masse croît avec la diminution de l'humidité et ne dépasse pas les 20% ce qui est dans les normes. Pour l'évolution de la température et le retrait sur sec, nous trouvons un comportement classique figures (IV-12 et IV-14) Les résultats sont : tout d'abord une montée de la température dans la première phase de chauffage ; ensuite une stabilisation pendant la phase isenthalpe où l'énergie apportée au milieu est dégagée en grand partie pour le flux de vapeur sortant à la surface ; enfin la température augmente à cause de la baisse du flux de masse à la surface et le milieu arrive à une température proche de celle de l'environnement de séchage.

Le retrait sur sec ne dépasse pas les 7% tout au long de la variation de la température, ce qui confirme les résultats des courbes expérimentales de BIGOT alors, nos mélanges

argileux présentent une bonne aptitude au séchage et ils sont prêts pour l'étape suivante qui est la cuisson.

IV.2.6. Variation de la masse volumique

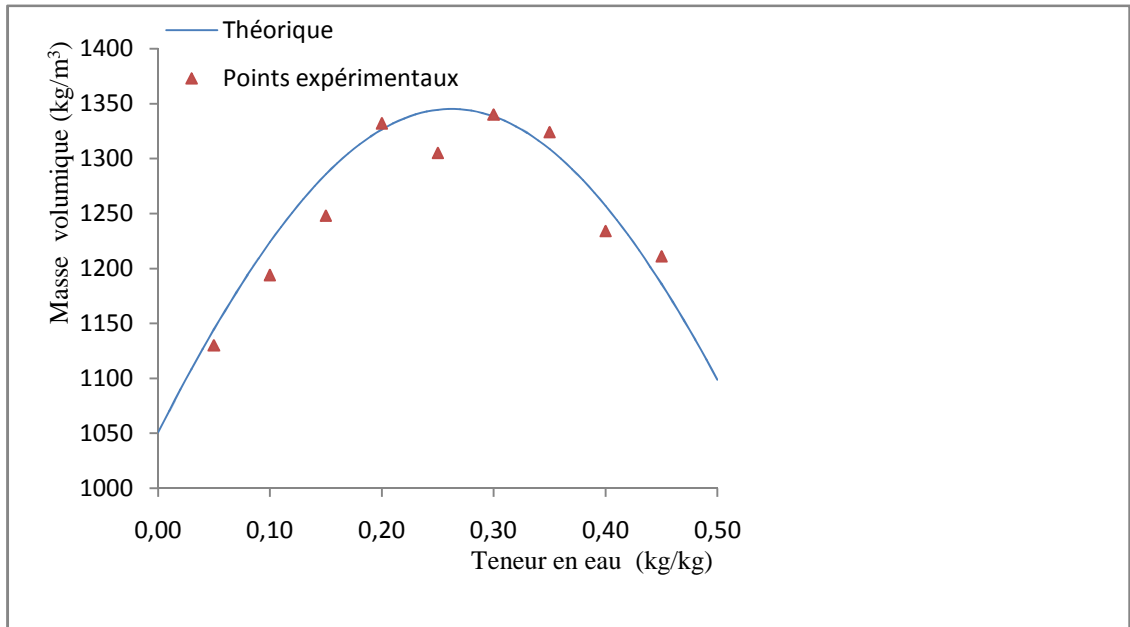


Figure IV-15 Evolution de la masse volumique de l'échantillon 1 en fonction de la teneur en eau

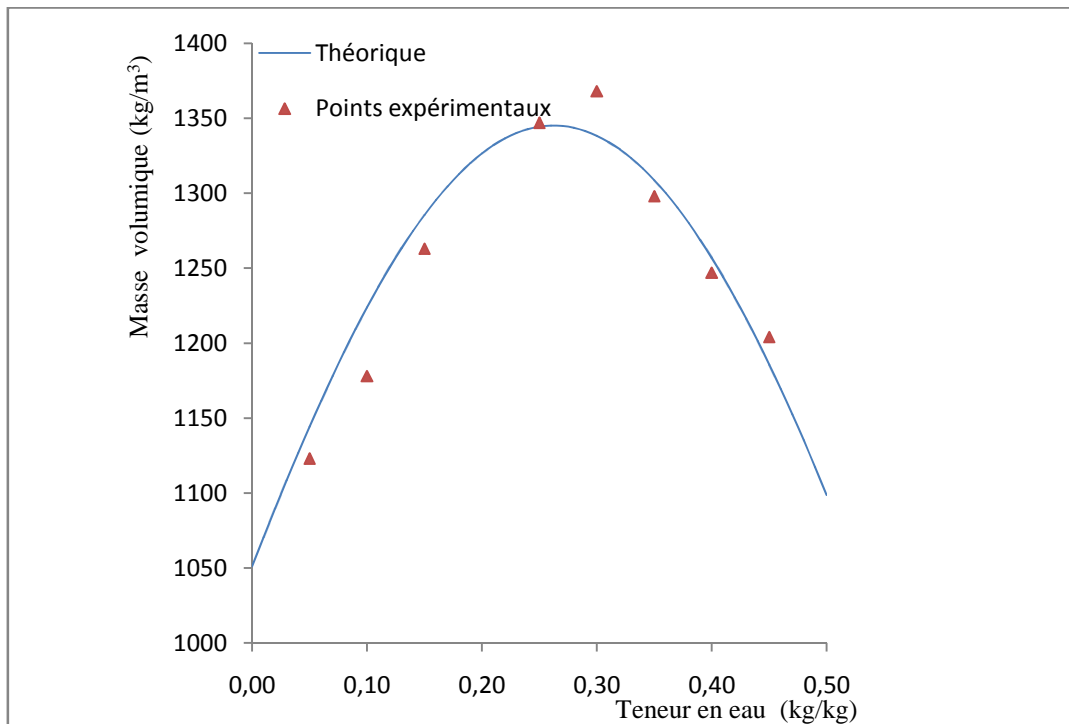


Figure IV-16 Evolution de la masse volumique de l'échantillon 2 en fonction de la teneur en eau

Interprétation

Les figures (IV-15 et IV-16) présentent la variation de la masse volumique expérimentale et en trait continu c'est selon la corrélation mathématique (I-12). Cette présentation confirme les travaux qui ont montré que la masse volumique ne dépendait pas des conditions de séchage, son évolution étant seulement liée à la quantité d'eau dans le produit [37 et 83].

IV.3. ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS

IV.3.1. Introduction

Cette partie est consacrée à présenter les résultats des modèles mathématiques des différents essais étudiés. Ces derniers permettent d'exprimer la relation entre les paramètres (t et T) et les paramètres technologiques étudiés (humidité résiduelle (HR), retrait linéaire ($Ret.$) et variation de la masse volumique (VMV)).

L'objectif de cette analyse (ANOVA) est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques étudiés, déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (SR) et pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « Design-Expert ».

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes [27] :

- 1) définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de MSR ;
- 4) analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de MSR et de décider si le modèle de MSR à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (humidité résiduelle (HR), retrait linéaire (Ret) et variation de la masse volumique (VMV)), en fonction d'un certain nombre

de variables indépendantes (paramètres), X_1, X_2, \dots, X_k , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{IV-1})$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur : elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au paramètre i : c'est la valeur de la coordonnée du paramètre i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} : sont des coefficients des termes linéaires, d'interactions entre variables et quadratiques, ils doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (IV-2).

$$R^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV-2})$$

avec $\begin{array}{ll} Y_i & \text{valeur de la réponse calculée à la } i^{\text{e}} \text{ expérience ;} \\ \bar{Y}_i & \text{valeur mesurée à la } i^{\text{e}} \text{ expérience ;} \\ \bar{y} & \text{valeur moyenne des réponses mesurées.} \end{array}$

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. ANOVA permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres d'entrées sur les résultats (humidité résiduelle (HR), retrait linéaire ($Ret.$) et variation de la masse volumique (VMV)).

IV.3.2. Modélisation de l'humidité résiduelle, retrait linéaire et variation de la masse volumique en fonction des paramètres temps et température

Le tableau IV-1 présente les paramètres des essais (temps et température), et les résultats expérimentaux correspondants à l'humidité résiduelle (HR), le retrait ($Ret.$) et la variation de la masse volumique (VMV). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des paramètres des essais (matrice de planification des expériences pour un

plan complet $N = 3^2$), lors du séchage des échantillons d'argile. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale de l'humidité résiduelle (*HR*) a été trouvée suivant les conditions de l'essai N° 2 c.-à-d. pour les conditions suivantes (80°C et 360 minutes), Mais les valeurs minimale du retrait linéaire et la masse volumique ont été observée dans l'essai N° 1 c.-à-d. (20°C et 60 minutes). La valeur maximale de l'humidité résiduelle était lors de l'essai N°1, alors que le maximum du retrait linéaire et de la masse volumique ont été observées lors de l'essai N°2.

Facteurs							
Valeurs codifiées			Valeurs réelles		Réponses		
N° Essais	X ₁	X ₂	T (°C)	t (min)	HR (%)	Ret (%)	VMV (%)
1	-1	-1	20	60	58	1,7	1,9
2	+1	+1	80	360	15	6,8	11,8
3	-1	+1	20	360	21	5,9	10,6
4	0	0	50	210	24	4,5	8,3
5	-1	0	20	210	28	3,8	6,1
6	0	+1	50	360	16	6,2	11,3
7	+1	-1	80	60	22	3,1	6,8
8	+1	0	80	210	23	4,8	10,3
9	0	-1	50	60	34	2,4	3,4

Tableau IV-1 Résultats du retrait, l'humidité résiduelle et variation de la masse volumique en fonction des différentes combinaisons de la température et du temps

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour l'humidité résiduelle (*HR*)

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour l'humidité résiduelle (*HR*), sont exposés dans le tableau IV-2. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (c.-à-d. pour un niveau de confiance de 95%). Dans ce tableau sont mentionnées les valeurs des degrés de liberté (ddl), la somme des carrés des écarts (SCE), les carrés moyens (CM), la probabilité (Prob.) et la contribution en pourcentage (Cont. %) de chaque facteur et des différentes interactions.

L'analyse détaillée des valeurs de l'humidité résiduelle (*HR*) présentées dans le tableau IV-1 et les valeurs du tableau IV-2 permet de classer les deux paramètres de l'essai (*T* et *t*) et leurs interactions par ordre d'influence sur l'humidité résiduelle (*HR*). Le temps de maintien vient en première position avec une contribution de 50,52% suivi du facteur température avec 29,03%. Les interactions n'ont pas d'effet significatif sur *HR*.

Source	ddl	SCE	CM	Fobs	Prob.	Cont. %	Remarque
T (°C)	1	368,166667	368,166667	11,8198573	0,0413	29,03	Significatif
t (min)	1	640,666667	640,666667	20,568371	0,0201	50,52	Significatif
$T \times t$	1	225	225	7,2235434	0,0746	17,74	Non significatif
T^2	1	20,0555556	20,0555556	0,64387634	0,4810	1,58	Non significatif
t^2	1	14,2222222	14,2222222	0,45659929	0,5476	1,12	Non significatif
Erreur	3	93,4444444	31,1481481				
Total	8	1361,55556				100	

Tableau IV-2 Analyse de la variance (ANOVA) pour HR

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit (figure IV-15). Cette figure classe les paramètres des essais et leurs interactions suivant leur influence décroissante sur l'humidité résiduelle (HR). Les valeurs standardisées (Fobs) de cette figure sont obtenues en divisant la valeur de CM de chaque facteur par l'erreur. Plus l'effet standardisé est élevé, plus le facteur considéré a une influence.

Une ligne limite les effets significatifs de ceux qui ne le sont pas avec un intervalle de confiance choisi de 95%.

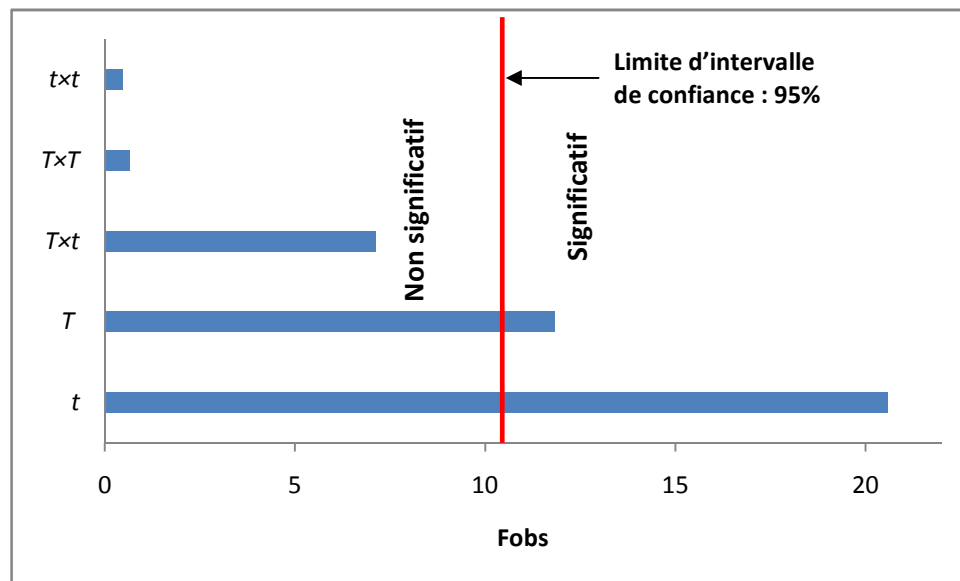


Figure IV-15 Graphe de PARETO des effets des paramètres sur HR

b) Analyse de régression : HR en fonction de T et t

L'analyse de régression de HR en fonction de température et le temps donne l'équation du modèle complet (IV-3) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 93,44\%$).

$$HR = 81,93407 - 0,202 t - 0,96296 T + 1,66667 \times 10^{-3} T \times t + 3,51852 \times 10^{-3} T^2 + 1,18519 \times 10^{-4} t^2$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de HR en fonction de T et t donne l'équation (IV-4) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 73,54\%$).

$$HR = 55,784 - 0,261t - 0,073T$$

La présentation en 3D de la surface de réponse est donnée par la figure IV-16, cette figure montre que l'humidité résiduelle est affectée par le temps car la pente est grande comparativement par l'effet de la température. Le graphe de contour montre la relation entre une variable de réponse (HR) et deux facteurs à partir d'un modèle d'équation.

Design-Expert® Software
 HR
 58
 15
 X1 = A: T
 X2 = B: t

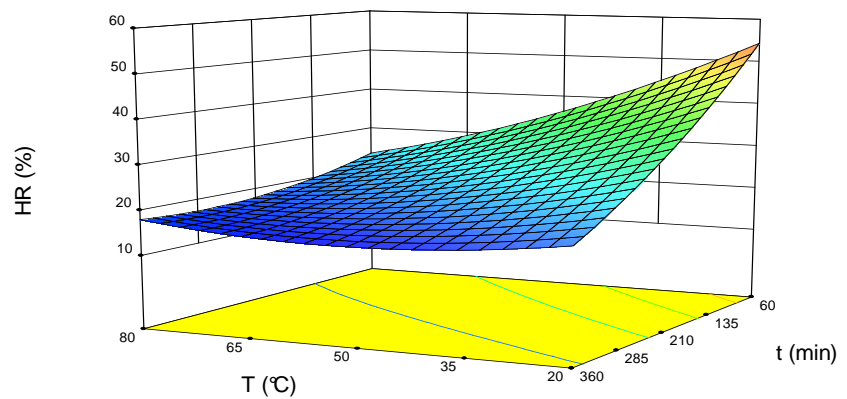


Figure IV-16 Evolution de l'humidité résiduelle en fonction de T et t

Design-Expert® Software
 HR
 58
 15
 X1 = A: T
 X2 = B: t

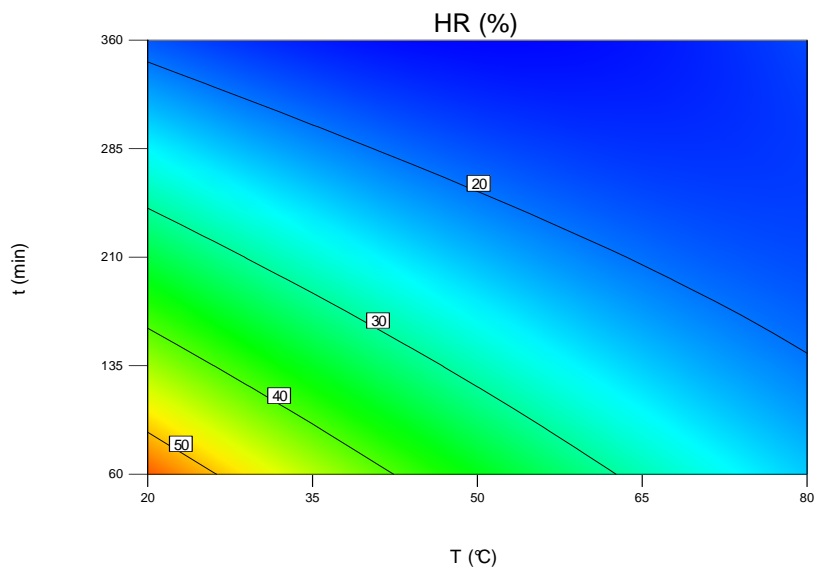


Figure IV-17 Graphe de contour de l'humidité résiduelle en fonction de T et t

Les graphes des effets moyens de *HR* en fonction des paramètres d'entrée (figure IV-17), montrent que la température a un effet significatif sur *HR*.

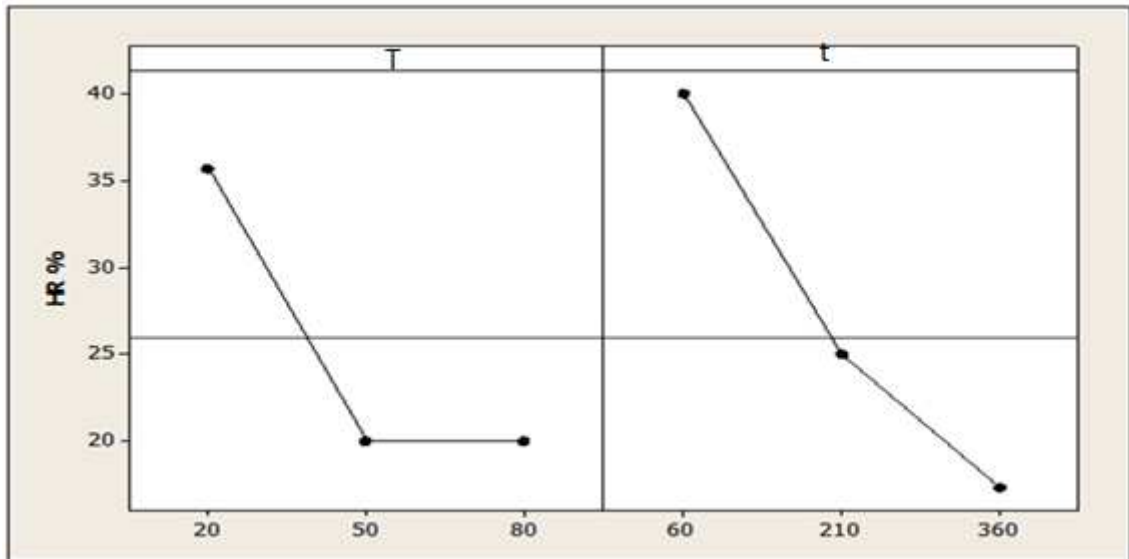


Figure IV-18 Graphe des effets principaux de *t* et *T* sur *HR*

c) Analyse de la variance (ANOVA) pour le retrait (Ret.)

Le tableau IV-3 présente l'analyse de variance ANOVA pour le retrait. On remarque que la température et le temps de maintien ont un impact significatif. On enregistre des contributions successivement de (7,35 et 92,39) %. Par contre les interactions n'ont pas d'effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0,05. On note que le temps de maintien est le paramètre le plus prépondérant.

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
<i>T</i> (°C)	1	1,815	1,815	112,011429	0.0018	7,35	Significatif
<i>t</i> (min)	1	22,815	22,815	1408,01143	< 0.0001	92,39	Significatif
<i>T</i> × <i>t</i>	1	0,0625	0,0625	3,85714286	0.1443	0,25	Non significatif
<i>T</i> ²	1	0,00055556	0,00055556	0,03428571	0.8649	0,002	Non significatif
<i>t</i> ²	1	0,00055556	0,00055556	0,03428571	0.8649	0,0023	Non significatif
Erreur	3	0,04861111	0,0162037				
Total	8	24,7422222				100	

Tableau IV-3 Analyse de la variance (ANOVA) pour le retrait (Ret.)

a) Facteurs influents

Le graphe de Pareto (figure IV-19) montre que les variables supérieures à la ligne de limite d'intervalle de confiance (95%) présentent un effet significatif sur le retrait.

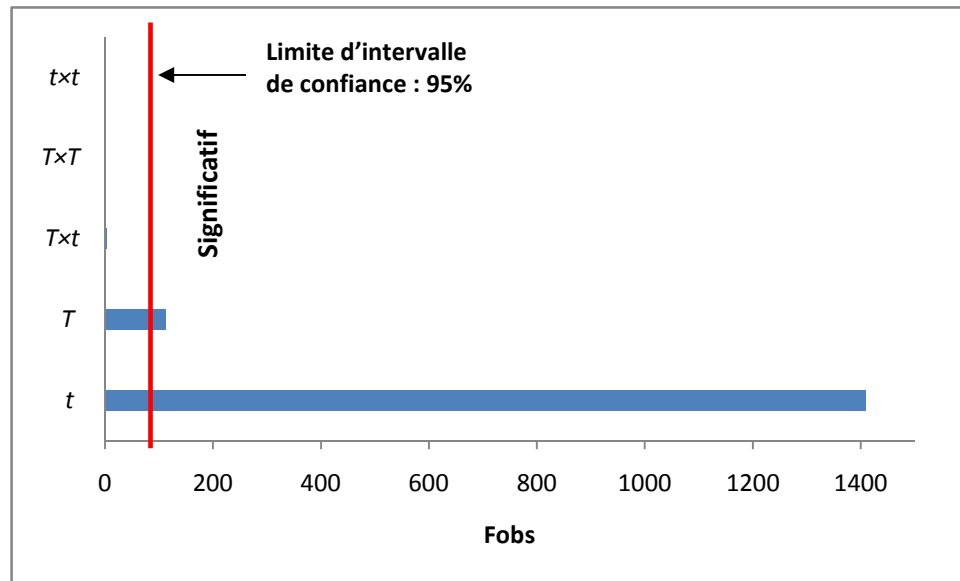


Figure IV-19 Graphe de PARETO des effets des paramètres sur le retrait (*Ret.*)

d) Analyse de régression : Retrait en fonction de T et t

L'analyse de régression du retrait en fonction de la température et du temps donne l'équation du modèle complet (IV-3) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,76\%$).

$$Rt = 0,36048 + 0,0147 t + 0,026019 T - 2,77778 \times 10^{-5} T \times t \\ - 1,85185 \times 10^{-5} T^2 - 7,4071 \times 10^{-7} t^2$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de retrait en fonction de T et t donne l'équation (IV-4) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,45\%$).

$$Rt = 0,7115 + 0,0183t + 0,0129T$$

La présentation en 3D de la surface de réponse est donnée par la figure IV-20, cette figure montre l'influence du temps (t) et de la température (T) sur le retrait (Ret). Les résultats d'ANOVA montrent que l'effet du temps sur le retrait sont statistiquement significatif (tableau IV-3). La valeur du plus grand du retrait est obtenue avec la combinaison du temps le plus grand et de la température la plus élevée. Le graphe de contour permet de visualiser la surface de réponse (figure IV-21).

Design-Expert® Software
 Ret
 6.8
 1.7
 X1 = A: T
 X2 = B: t

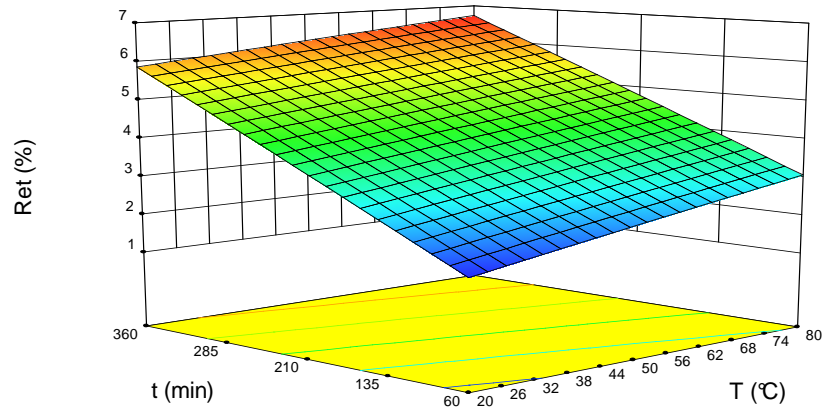


Figure IV-20 Evolution du retrait en fonction de T et t

Design-Expert® Software
 Ret
 6.8
 1.7
 X1 = A: T
 X2 = B: t

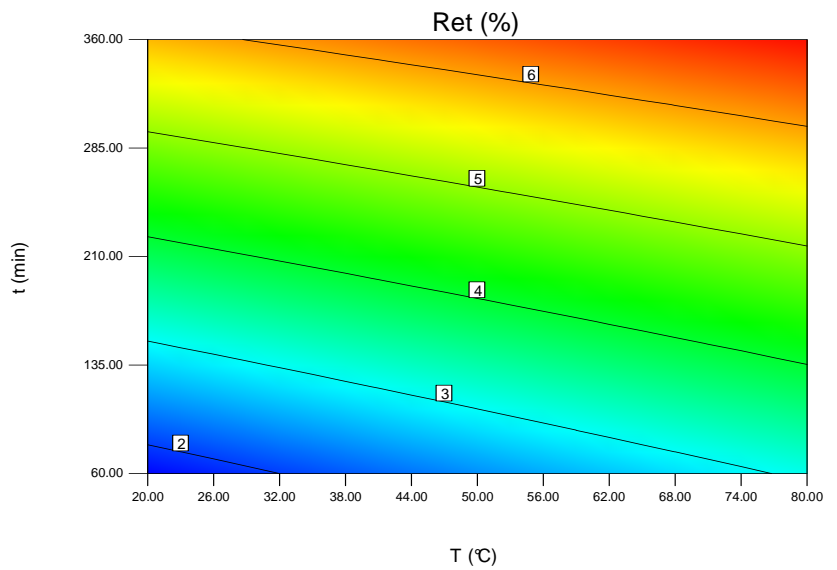


Figure IV-21 Graphe de contour du retrait en fonction de T et t

La figure IV-22 est obtenue pour illustrer les effets moyens des paramètres du temps et la température sur le retrait Ret .

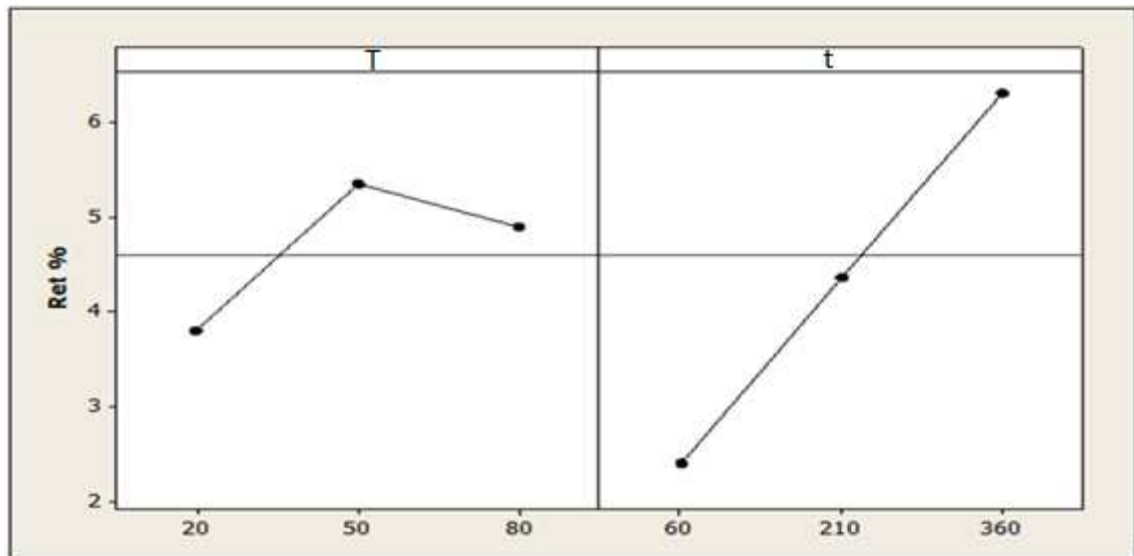


Figure IV-22 Graphe des effets principaux de t et T sur Ret

e) Analyse de la variance (ANOVA) pour la variation de la masse volumique (VMV)

Le tableau V-3 présente l'analyse de variance ANOVA pour la masse volumique (RMV). On remarque que la température (T), le temps de maintien (t), et l'interaction ($T \times t$) ont un impact significatif. On enregistre des contributions respectivement (17,73; 77,98 et 3,43) %. Par contre les interactions ($T \times T$) et ($t \times t$) n'ont pas d'effet significatif puisque la valeur de probabilité (Prob.) est supérieure à 0,05. On note que le temps de maintien est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est 77,98%.

Source	ddl	SCE	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
T (°C)	1	17,6816667	17,6816667	56,9865712	0,0048	17,73	Significatif
t (min)	1	77,76	77,76	250,614145	0,0005	77,98	Significatif
$T \times t$	1	3,4225	3,4225	11,0304387	0,0450	3,43	Significatif
T^2	1	0,125	0,125	0,40286482	0,5707	0,13	Non significatif
t^2	1	0,72	0,72	2,32050134	0,2251	0,72	Non significatif
Erreur	3	0,93083333	0,31027778				
Total	8	100,64				100	

Tableau IV-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour la variation de la masse volumique

a) Facteurs influents

Le graphe de Pareto correspondant, montre que le coefficient de détermination de l'ordre de ($R^2 = 89,30\%$), ce qui est très satisfaisant. Le facteur le plus dominant est le temps de maintien suivi par la température.

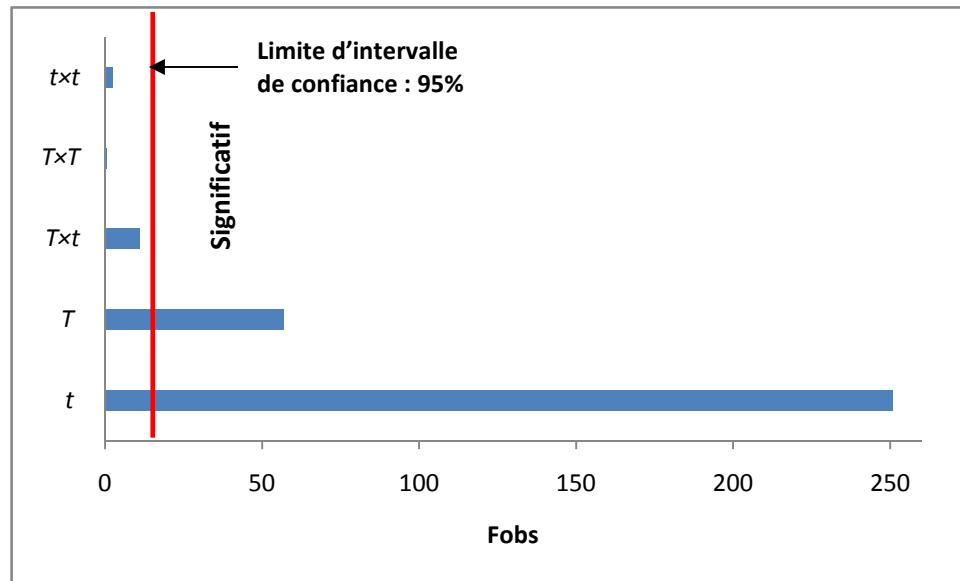


Figure IV-23 Graphe de PARETO des effets des paramètres sur la variation de la masse volumique

f) Analyse de régression : Variation de la masse volumique en fonction de T et t

L'analyse de régression de la variation de la masse volumique en fonction de la température et du temps donne l'équation du modèle complet (IV-3) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,44\%$).

$$R_{mv} = -2,47433 + 0,045478 t + 0,072611 T - 2,05556 \times 10^{-4} T \times t \\ + 2,77778 \times 10^{-4} T^2 - 2,66667 \times 10^{-5} t^2$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de MV en fonction de T et t donne l'équation (IV-4) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,28\%$).

$$R_{mv} = -1,8287 + 0,032T + 0,1t - 2,055 \times 10^{-4} T \times t$$

La présentation en 3D figure IV-24 montre que la pente du temps est supérieure par rapport à celle de la température, ce qui implique que le temps est le facteur le plus prépondérant sur la variation de la masse volumique. Le graphe de contour permet de visualiser la surface de réponse (figure IV-25).

Design-Expert® Software
 Ret Mv
 11.8
 1.9
 X1 = A: T
 X2 = B: t

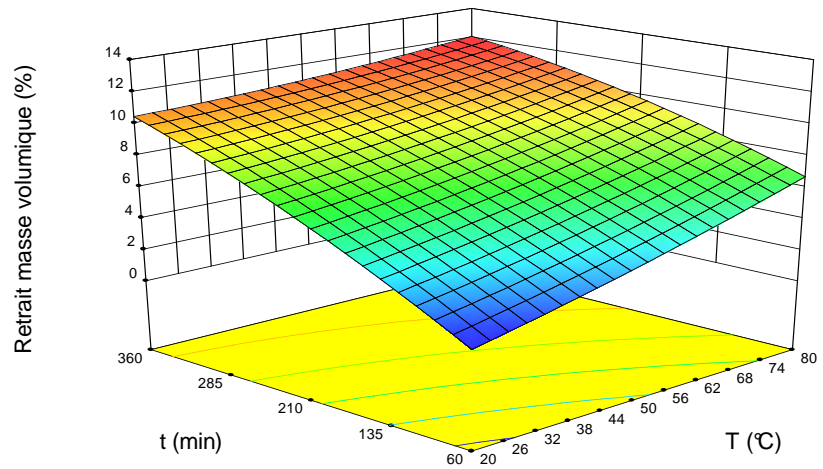


Figure IV-24 Evolution de la variation de la masse volumique en fonction de T et t

Design-Expert® Software
 Ret Mv
 11.8
 1.9
 X1 = A: T
 X2 = B: t

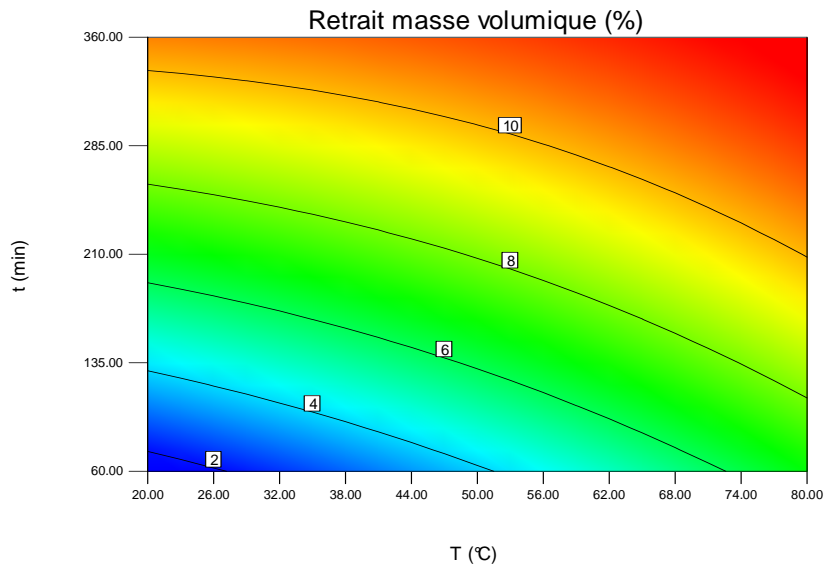


Figure IV-25 Graphe de contour de la variation de la masse volumique en fonction de T et t

La figure IV-26 illustre les effets moyens des paramètres sur la variation de la masse volumique. On remarque que la variation de la masse volumique (VMV) s'élève légèrement avec l'augmentation du temps. L'effet de la température est prépondérant car sa pente est plus grande.

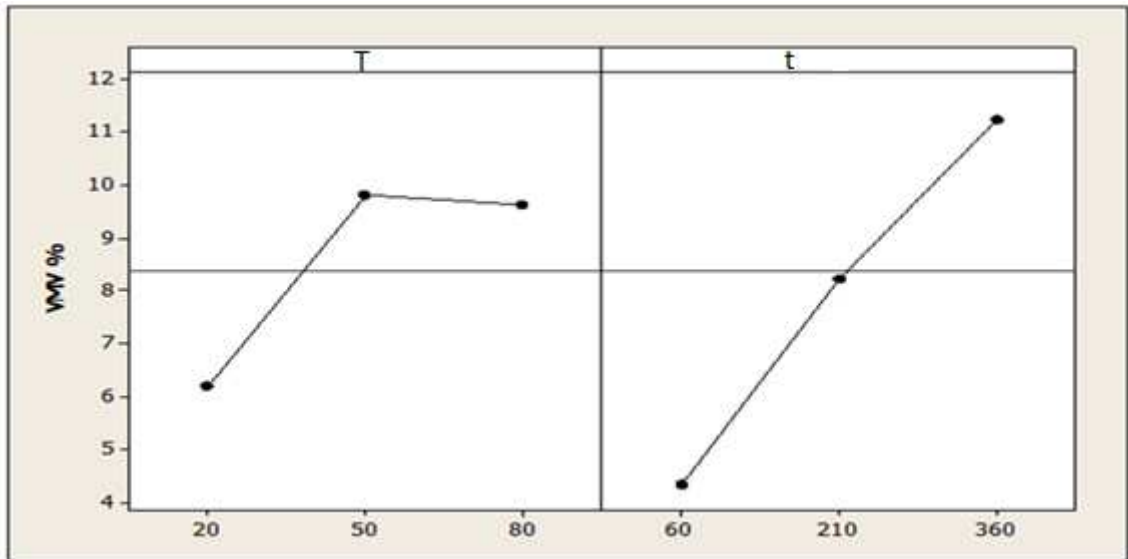


Figure IV-26 Graphe de contour de la variation de la masse volumique en fct de T et t

IV.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'humidité résiduelle, le retrait linéaire et la variation de la masse volumique et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure IV-27. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

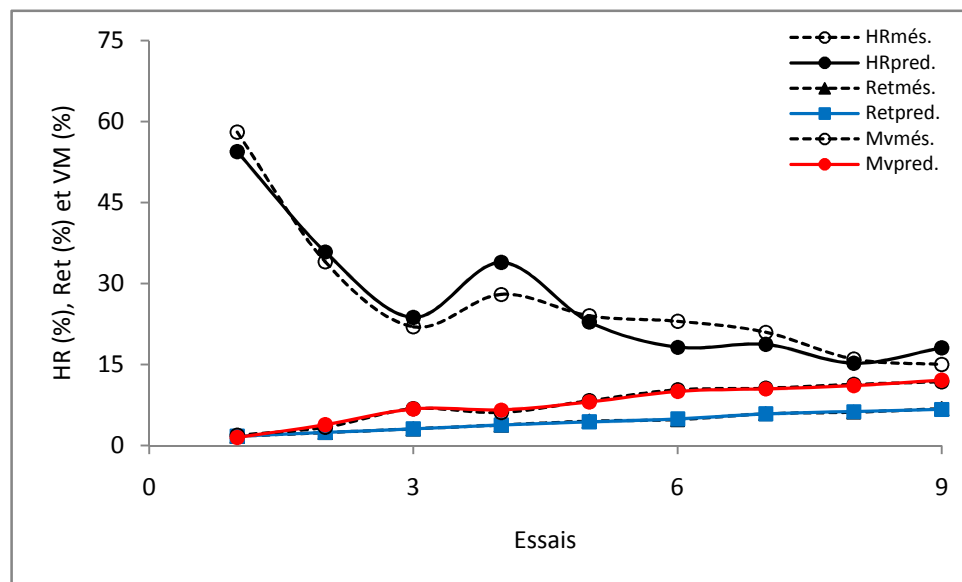


Figure IV-27 Courbes des valeurs expérimentales et estimées des paramètres de sortie

CONCLUSION GENERALE

A travers ce travail, nous espérons avoir contribué à l'étude des performances des séchoirs solaires indirects à convection forcée, pour des applications au séchage de produits rouges. Il apparaît que ce séchage exige la maîtrise de tous les paramètres. Actuellement, on recherche par tous les moyens à augmenter la production et par là, à rendre son traitement de plus en plus rapide et rentable. C'est dans ce contexte que cette étude a été faite, pour donner aux utilisateurs simples et potentiels une vision très exhaustive sur un réel projet solaire à travers la prévision des paramètres de caractérisation des sites.

Au terme de cette étude, une interface de simulation et calcul des performances thermiques instantanées des capteurs solaires a été élaboré. Celle-ci permettra en l'absence de mesure de connaître l'évolution de la température ambiante, du rayonnement solaire selon deux modèles du rendement du capteur et de la température à la sortie de celui-ci sous divers contextes géographiques et climatiques, ainsi on aura la possibilité d'avoir des données au préalable pour tous les sites dépourvus de toutes mesures.

Une méthode d'analyse ANOVA a été introduite pour donner des modèles mathématiques de l'humidité résiduelle, de la variation de la masse volumique et du retrait linéaire en utilisant un plan d'expérience du type complet 3^2 , avec un nombre de 09 essais. Les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées dans les modèles ont été calculées à l'aide du logiciel Design-Expert 8 et cela pour une optimisation des paramètres temps et température.

Les résultats obtenus concernant le séchage de l'argile à travers les modèles théoriques sont avérés en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement. D'un autre côté aussi les résultats théoriques et expérimentaux concernant les performances de l'insolateur plan, nous ont permis de conclure que le séchage des produits rouges est très faisable et que les valeurs des températures de sortie obtenues sont largement exploitables même pour d'autres produits.

Finalement, nous proposons à ce que les sources d'énergie utilisées actuellement dans l'industrie lors de la phase du séchage, puissent être remplacées par l'énergie solaire et que

les capteurs solaires plans munis de chicanes dans la veine d'air dynamique, présentent des performances meilleures puissent être introduits dans de telles chaînes énergétiques [2].

Cette étude pourra être poursuivie par d'autres recherches dans le but de :

- L'élargir à l'étude des différentes phases de séchage ;
- De voir les propriétés mécaniques et thermophysiques après un séchage solaire et faire une comparaison avec le séchage utilisé actuellement
- Développer notre industrie (céramique et produit rouge).

ANNEXES

ANNEXE 1

LES PRODUITS ROUGES EN ALGERIE

GENERALITES

La production algérienne des produits rouges qui font partie du secteur des matériaux de construction concerne essentiellement la fabrication de briques à 98% et en beaucoup plus faible quantité, les tuiles et produits divers. Ce sont des matériaux de structure les plus utilisés dans la construction. En raison de :

- Facilité de leur utilisation
- Bonnes caractéristiques techniques
- Adaptabilité au climat.

GAMMES DES PRODUITS

La production est concentrées sur les produits suivants - brique creuse de 08 trous.- brique creuse de 5, 69 et 12 trous -brique pleine, claustra, tuile.

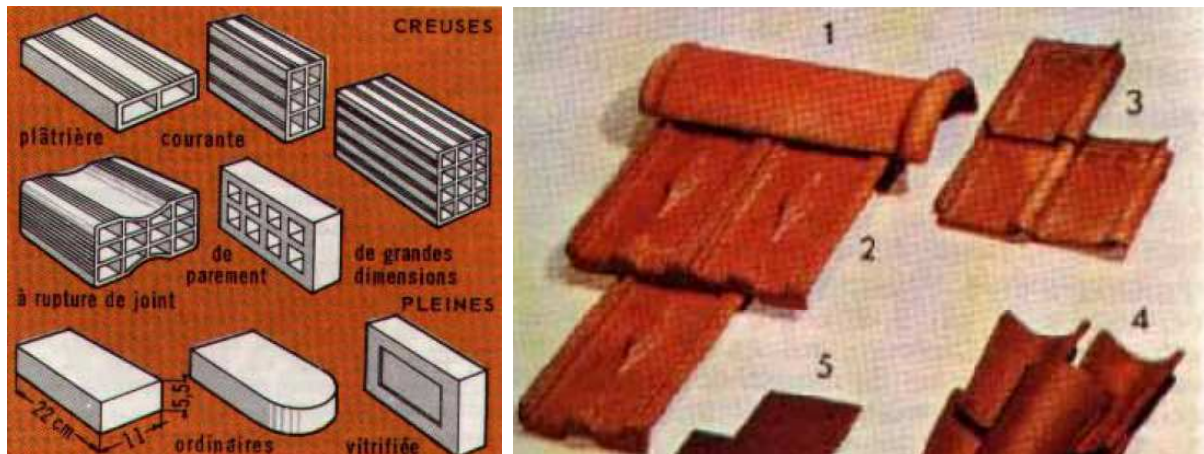


Figure A1-1 es différents produits rouges

PROCESSUS DE PRODUCTION

Longtemps fabriqués selon des méthodes artisanales, l'introduction de fours modernes utilisant l'énergie fossiles (fuel, gaz) et /ou énergie électrique. La technologie a progressé vers l'automatisation entière du processus qui est schématiquement comme suit :

- Extraction de l'argile et du sable et leur acheminement vers l'usine de fabrication.
- Mise en stock des matières primaires pour vieillissement à l'air.
- Broyage et laminage: mélange de l'argile avec du sable (ou dégraissant) et de l'eau.
- Façonnage : mise en forme au niveau des moules.
- Séchage: séchage dans des séchoirs pendant un temps variables suivant le type.
- Cuisson
- Conditionnement

QUELQUES CHIFFRES

Région	Nombre	En activité	En projet	A l'arrêt
Centre	57	35	12	10
Est	51	34	9	3
Ouest	41	31	4	6
Sud	20	16	3	1
Totaux	169	121	28	20

Tableau A1-1 Nombre de briqueteries (année 2006)

Région	En activité	En projet fin 2007	En projet fin 2008	Capacité
Centre	2273500	1565000	575000	4413500
Est	3512000	370000	1103333	4985000
Ouest	2454300	260000	50000	2764300
Sud	1785000	200000	300000	2285000
Totaux	10024800	2395000	2028000	14447800

Tableau A1-2 Capacité de production installée hors briqueterie à l'arrêt (en tonne)

Capacité	A fin	En	A l'arrêt	Projet en discussion	Total
Production	2006	Cours	60%		Fin 2008
Tonne	10 024 800	4 423 000	500 000	500 000	15 447 800

Tableau A1-3 Capacités de production installée à fin 2007 (en tonne)

Source : Diagnostic global d'une pme Algérienne par Salim benotmane Université d'Annaba - mba finances 2009.

ANNEXE 2**PROPRIETES THERMOPHYSIQUES DE L'AIR**

Les propriétés de physique de l'air varient avec sa température et d'après [70], elles peuvent s'écrire comme suit (T_f en °C) :

- La masse volumique

$$\rho_f = 1,1774 - 0,00359(T_f - 27)$$

- La viscosité cinématique

$$\mu_f = (1,983 + 0,00184(T_f - 27)) \cdot 10^{-5}$$

- La capacité calorifique

$$Cp_f = 1005,7 + 0,066(T_f - 27)$$

- La viscosité dynamique

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f}$$

- La conductivité thermique

$$\lambda_f = 0,02624 + 0,0000758(T_f - 27)$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **AFZAL T. M.**, Diffusion in Potato During Far Infrared Radiation Drying, J. Food Eng. 37, pp. 253-365. -1998-
- [2] **ALIA M.** Modélisation des capteurs solaires plans à air destinés au séchage Université Ibn Khaldoun Tiaret. -2005-
- [3] **ALVISET I.** Matériaux de terre cuite ; Technique de l'ingénieur. -1994-
- [4] **AMADOU H.** Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines, thèse doctorat, Université de Strasbourg I. - 2007-
- [5] **ANDRIEU J.; Jallut C. ; Stamatopoulos A. ; Zafiropoulos M.**, Identification of water apparent diffusivities for drying of corn based extruded pasta. Sixth international drying symposium, IDS'88 Versailles, 5-8 September, -1988-
- [6] **ASHBY M.F. ; Jones D.R.H.** "Microstructure et mise en œuvre" Ed. Dunod, pp. 149-194 T2. - 1991-
- [7] **BARTHELEMY B.** "Notions pratiques de la mécanique de la rupture", Ed. Eyrolles, -1980-
- [8] **BECKAMAN W.A.; KLEIN S.A.; DUFFIE J.A.** Solar heating design by the f-cart method Edition John Willey -New York. -1977-
- [9] **BELGHIT A.; BELHAMIDI M.; BENNIS A.; BOUTALEB B.C.; BENET S.** Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée ' Revue générale de thermique vol 36, pp 837-850 -1997-
- [10] **BIGOT V.** Retrait au séchage des kaolins et argiles, CR. Acad. Sci. Paris, Séance 21 mars -1921-
- [11] **BRANDEAU E.; Frangi J.P.; Mohtar R.H.** Characterizing non rigid aggregated soil-water medium using its shrinkage curve, Soil sci. Am. J. Vol 68, 359 -2004-
- [12] **CAPDROU M.** 'Atlas solaire de l'Algérie', OPU Alger -1988-.
- [13] **CHARREAU A.; CAVAILLE R.**, Séchage (théorie et calculs), technique de l'ingénieur, J2480, pp. 1-23.
- [14] **CHEMKHI S.** séchage d'un milieu déformable non saturé : modélisation du couplage hygromécanique, thèse doctorat, Université Bordeaux1, -2008-
- [15] **CHEN Y.; BARTHAKUR N. N.; ARNOLD N. P.** Electrohydrodynamic (EHD) Drying of Potato Slabs, J. Food Eng. 23, pp. 107-119,- 1994-
- [16] **COLLARD J. M.** Etude des transferts d'humidité et des déformations pendant le séchage d'une plaque d'argile, thèse de doctorat, Thèse de l'université de Poitiers, - 1989-
- [17] **CORNELIS W.M.; CORLU J.; Medina H.; Hartmann R.** A simplified parametric model to describe the magnitude and geometry of soil shrinkage, Eur. Jour. of Soil Sci. -2005-
- [18] **COSTET J.** "Cours pratique de mécanique des sols : Plasticité et calcul des tassements" ; troisième édition, Ed. Dunod Tome 1 -1981-1983-
- [19] **COUARRAZE G.; GROSSIORD J. L.** "Initiation à la Rhéologie", pp. 5-20, 51-91, Ed. Lavoisier-Tec et doc, -1991-

- [20] **COUMANS W. J.** Models for drying kinetics based on drying curves of slabs, Chem. Ing. Process. 39, pp 53-68, -2000-
- [21] **CRANK J.** The mathematics of diffusion, 2nd Edition, Clarendon Press, OXFORD, -1975-
- [22] **DIAMANTE L. M.; MUNRO P. A.** Mathematical modeling of the thin layer Solar Drying of sweet Potato slices, Solar Energy 51, pp. 271-276, -1991-
- [23] **DIAMANTE L. M.; MUNRO P. A.** Mathematical modeling of hot air drying of sweet Potato slices, Int. J. Food Science Tech., pp. 99-109, -1993-
- [24] **DRUYANOV B.A.; NEPERSHIN R.I.,** Problèmes de Technological Plasticity. Ed. ELSEVIER (38), PP. 357-389. Collection: Studies in applied Mécanics. -1994-
- [25] **FIES J.C.; Bruand A.** Particle packing and organisation of the textural porosity in clay-silt-sand mixtures, European J. of soil, 49, 557-567. Dec 1998
- [26] **GEKAS V. et LAMBERG I.** Determination of Diffusion Coefficients in Volume-Changing Systems – Application in the Case of Potato Drying, J. Food. Eng. 14, pp. 317-326, -1991-
- [27] **GOUPY J.** La méthode des plans d'expériences – Optimisation du choix des essais & de l'interprétation des résultats. Dunod -1996-
- [28] **GUPTA D.; SOLANKI S. C.; SAINI J.S.** Thermo hydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates. Solar Energy vol. 61, pp 33-42 -1997-
- [29] **HACHEMI A.; ABED B.; ASNOUN A.,** Theoretical and experimental study of solar dryer, Renewable Energy 13, pp. 439-451, -1998-
- [30] **HAROUNA I.** Simulation de séchage du Maïs. Etude des consommations spécifiques en énergie électrique commerciale. Intérêt du séchage à basse température. Utilisation des toitures solaires, thèse doctorat, Université de Toulouse 3, -1992-
- [31] **HAWLADER M. N. A. ; UDDIN M. S.; HO J. C.; TENG A. B. W.,** Drying Characteristics of Tomatoes, J. Food. Eng. 14, pp. 259-268, -1991-
- [32] **IDLIMAN A.** 'Etude théorique d'un système de séchage des peaux de cuirs pour la région de merakech, constitué d'une serre agricole jouant le rôle D'un générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel. These troisième cycle, E N S de Marrakech Maroc -1990-
- [33] **ITAYA Y.; Mabuchi S.; Hasatani M.,** Deformation behaviour of ceramic slabs by non uniform drying, Drying Technology, 13 (3), pp. 801-819. -1995-
- [34] **ITAYA Y.; Okouchi K. ; Mori S.** Effect of heating modes on internal strain-stress formation during drying of molded ceramics, Drying Technology, 19 (7), pp. 1491-1504.- 2001-
- [35] **JOMAA W.** Séchage des matériaux fortement déformables : prise en compte de la vitesse de retrait", Thèse N° 91 BOR 10607, Bordeaux. -1991-
- [36] **JOUENNE C.A.** Traité de Céramiques et Matériaux Minéraux. Editions SEPTIMA, Paris.
- [37] **KECHAOUU N.** Séchage de gels fortement déformables : étude de la diffusion interne de l'eau et Modélisation, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, -1989-.

- [38] **KETELAARS A.A.J.** Drying deformable media. Kinetics, shrinkage and stress, thèse de doctorat, University of Technology, Eindhoven. Netherlands -1992-.
- [39] **KLEIN S.A. ; BACKMAN W.A.** Solar heating design by the f-cart method Solar Energy, Vol. 22 -1979 -
- [40] **KNEULE F.** Séchage, Ed. Eyrolles Paris, -1964-
- [41] **KORNMANN M.** Consultant technique / Technical Consultant, CH-1212 Grand Lancy (Suisse / Switzerland).
- [42] **KORNMANN M.** Matériaux de construction en terre cuite, fabrication et propriétés, Editions Septima Paris -2005-
- [43] **KRAUSE E.** Le séchage en céramique: principe et technique. Traduit de la deuxième édition allemande et adapté par le service de documentation des sociétés françaises de céramique, Editions Septima, Paris, -1977-
- [44] **LAVIALLE PRELOIS E.** Du séchage d'une noix aux procédures de gestion d'un séchoir : Analyse en terme de qualité et d'énergie, thèse doctorat, Université de Bordeaux 1, -1993-
- [45] **MAROULIS Z. B. ; Tsami E. ; Saravacos G. D.,** Application of the GAB Model to the moisture sorption isotherm for dried fruit, Journal of Food Engineering, Vol.7, p. 63-78, -1988-
- [46] **MARTIN M. ; PERRE P. ; MOSER M.,** La perte de température à travers la charge : intérêt pour le pilotage d'un séchoir à bois à haute température, Int. J. Heat Mass Transfer 38, pp. 1075-1088, -1995-
- [47] **MESSAIFA K.** Evaluation de l'Apport Quantitatif des inclinaisons d'un système de photovoltaïque, Enersole'01- 30-31 Oct, ADRAR, pp 255-272, -2001-
- [48] **Mc. ADAMS W. H.** Transmission de la chaleur' Edition DUNOD 2eme édition -1961-
- [49] **MIHOUBI D. ; ZAGROUBA F.; BEN AMOR M.; BELLAGI A.** Study of Process of Clay Drying. I. Material characteristics, Drying Technology, Vol. 20, p.465-486, -2002-
- [50] **MIHOUBI D.; ZAGROUBA F.; VAXELAIRE J.;BELLAGI A.** Thermodynamic analysis of sorption isotherms of visco-elastic cake, 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, Pragh-Tchek, 25-29 Aout, -2002-
- [51] **MIHOUBI D.,** Déshydratation d'argiles par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation, thèse doctorat, Université de Pau et de l'Adour, -2004-
- [52] **MOK C.; HETTIARRACHY** moisture sorption characterises of ground Sulflower Nutmeat and its Products, Journal of Food Science, Vol. 55, p. 756-789, -1990-
- [53] **MOUMMI M. ; HAMANI N. ; MOUMMI N. ; MOKHTARI Z.** Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi-empiriques dans le site de Biskra', 8ième séminaire international sur la physique énergétique, SIPE'8 Béchar 11-12 Novembre 2006, Algérie.
- [54] **MOUMMI A.,** Etude globale et locale du rôle de la géométrie dans l'optimisation des capteurs solaires plans à air' Thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut -1994-

- [55] **MOUMMI N.; MOUMMI A.; AOUES K. ; MAHBOUB C. ; SABRI Y. A.** 'Systematic forecasts of solar collector's performance in various sites of different climates in Algeria', *International Journal of Sustainable Energy*, 29: 3, 142 -150 - 2010-
- [56] **MOURAD M.** Contribution à l'étude des cinétiques de déshydratation et d'évolution de la qualité commerciale du Maïs au cours du séchage en lit fluidisé à flottation, thèse doctorat, INP Toulouse, -1992-
- [57] **MRANI I.** Transport de matière en milieu bi constituant élastique, Thèse, Université de Montpellier II.-1993-
- [58] **MULET A.** Drying Modeling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes, *J. Food Eng.* 22, pp. 329-348, -1994-
- [59] **ONG K. S.** Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure, *Solar Energy* 55, pp. 93-109,- 1995-
- [60] **OUARD S.** Optimisation des formes et dispositions d'obstacles dans la veine d'air mobile des capteurs solaires à air à deux couches d'air en vue de la maximisation du couple rendement et élévation de température' Thèse doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut -1994-
- [61] **PANTALEO A.** Structure et rhéologie de dispersions concentrées de particules manométriques de TiO_2 .
- [62] **PERRE P.; PASSARD J.** A control-volume procedure compared with the finite-element method for calculating stress and strain during wood drying, *Drying Technology*, Vol. 13 (3), pp. 635-660. -1995-
- [63] **POIRIER J.** Analyse de la variance et de la régression. Plans d'expérience. *Techniques de l'Ingénieur*. R 260, pp. 1-21.
- [64] **POURCEL F.** Séchage de gel d'alumine: mise en évidence et définition d'un critère de fissuration, Thèse, ENSAM Bordeaux, 123 p.-2003-
- [65] **REARDON S. A., ; DAVIS M. R.; DOE P. E.** Friction, heat and mass transfer for paper drying, *Int. J. Heat Mass Transfer* 41, pp. 1313-1325, -1998-
- [66] **RROGET M.** Le séchage des produits céramiques, *L'industrie céramique*, 691,17-48.-1976-
- [67] **ROVEDO C. O.; SUAREZ C.; VIOLLAZ P. E.** Drying of Foods: Evaluation of a Drying Model, *J. Food. Eng.* 26, pp. 1-12, -1995-.
- [68] **SABRI Y. ; DESMONS J. Y.** Simulation of a new concept of an indirect solar dryer equipped with offset rectangular plate fin absorber-plate. *International journal of energy research*. 29 pp317-334 -2005-
- [69] **SCHIMMERLING P.; SISSON J-C.; ZAIDI A.** Pratique des plans d'expériences. Lavoisier -1998-
- [70] **SFEIR A.A. ; GUARRACINO G.** Ingénierie des systèmes : Application à l'habitat Technique et documentation -1981-
- [71] **SHARMA V. K.; COLANGELO A.; SPAGNA G.** Experimental Investigation of Different Solar Dryers Suitable for Fruit and Vegetable Drying, *Renewable Energy* 6, pp. 413-424, -1995-

- [72] **SEBASTIAN P., NADEAU J. P. et PUIGGALI J. R.**, Les nombres d'Unités de Transfert, Thermique, Massique, outils rapides de simulation de séchoirs, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, pp. 1773-1782, -1993-.
- [73] **SEBASTIAN P., NADEAU J. P. et PUIGGALI J. R.**, Les réseaux de Modules d'Unités de Transferts, Thermique, Massique, outils pertinents d'analyse de séchoirs, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, pp. 1763-1772, - 1993b-.
- [74] **TALLERES Felipe Verdes ;** Briques et tuiles ; Agemac, Verdes, Technoceramica, Seveco -1999-
- [75] **TECHASENA O., LEBERT A. et BIMBENET J. J.**, Simulation of Deep Bed Drying of Carrots, *J. Food Eng.* 16, pp. 267-281, -1992-.
- [76] **TIRIS C., OZBALTA N., TIRIS M., et DINCER I.**, Performance of a Solar Dryer, *Energy* 19, pp. 993-997, -1994-.
- [77] **TIRIS C., OZBALTA N., TIRIS M., et DINCER I.**, Thermal Performance of a new Solar Air Heater, *Int. Com. in Heat and Mass Transfer* 22, pp. 411-423, -1995-
- [78] **TSAMI E. et Marinos-Kouris D.**, Water sorption isotherm of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots, *Journal of Food Science*, Vol. 55, p.1594-1597, -1990-
- [79] **TURNER I.W., Perré P.**, A comparison of the drying simulation codes TRANSPORE and WOOD2D which are used for the modeling of two-dimensional wood drying processes, *Drying Technology*, Vol. 13 (3), pp. 695-735. -1995-
- [80] **Vergnaud J.M.**, Liquid transport process in polymeric materials. Modeling and industrial applications, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, -1991-
- [81] **VIVIER S.** Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis. Thèse de doctorat à Université des Sciences et Technologies de Lille -2002-
- [82] **V.Y. Chertkov**, Modeling the pore structure and shrinkage curve of soil clay matrix, *Geoderma*, 95 215- 246.-2000-
- [83] **ZAGROUBA F.**, Séchage par convection et un apport rayonnant micro-ondes des milieux déformables. Modélisation des phénomènes de transferts de chaleur et de matière, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, -1993-
- [84] **ZAMAN M. A. et BALA B. K.**, Thin Layer Solar Drying of Rough Rice, *Solar Energy* 42, pp. 167-171, -1989-
- [85] **ZEGHMATI B.**, Modélisation informatique d'un séchoir à effet de serre pour fruits et légumes, thèse doctorat, Université de Perpignan, -1981-

