



ÉCOLE DOCTORALE MSII

« **Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur** »

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I
Discipline: Sciences pour l'Ingénieur

par

Haoua AMADOU

MODELISATION DU SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE DES BOUES
DE STATIONS D'EPURATION URBAINES

Soutenue publiquement le 04 mai 2007

Membres du jury

Directeur de thèse : M. Jean-Bernard POULET, Professeur, INSA Strasbourg
Rapporteur interne : M. Abdellah GHENAIM, Professeur, INSA - ULP Strasbourg
Rapporteur externe : M. Abdelkrim HAZZAB, Professeur, Université de Saïda -Algérie
Rapporteur externe : M. Abdelatif OUAHSINE, Professeur, UTC - Université de Compiègne
Examineur : M. Robert MOSE, Professeur, ENGEES
Examineur : M. Christian BECK, Maître de conférences, ENGEES

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été effectuée au sein du Laboratoire *Systèmes Hydrauliques Urbains (S.H.U)* de l'ENGEES, en collaboration avec le laboratoire *Génie de la conception* de l'INSAS. Elle a été soutenue financièrement par l'union européenne et la région d'Alsace.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Antoine Georges Sadowski, directeur de l'UPR SHU qui m'a accordé sa confiance dès la réalisation de mon travail de fin d'études approfondie et qui m'a ensuite permis de poursuivre dans la voie de la recherche par la réalisation d'un doctorat. Son sens de l'analyse, ses suggestions pertinentes ont grandement contribué à la finalisation de ce travail.

Je remercie également Christian Beck Maître de conférence du laboratoire pour m'avoir accompagné tout au long de ce travail par de nombreux conseils et par l'exigence d'une rigueur scientifique poussée. Je le remercie particulièrement pour le temps qu'il a consacré à la relecture attentive et critique du manuscrit.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Jean-Bernard Poulet, professeur à L'INSAS, pour avoir dirigé cette thèse.

Toute ma reconnaissance au professeur Robert Mosé. Son soutien, tant moral que scientifique, m'a profondément touché.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Martin Fischer, technicien du laboratoire, pour le temps qu'il a consacré au montage des dispositifs expérimentaux et de sa disponibilité appréciée.

Mes remerciements vont à mes rapporteurs de thèse, Abdellah GHENAIM Abdelkrim HAZZAB, et Abdelatif OUAHSINE pour avoir consacré du temps à l'examen de ce travail. Je suis sensible à l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à mon jury de thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude !

Mes remerciements à José Vasquez, pour m'avoir initié à Matlab. Et un grand merci aux autres permanents du laboratoire, à Jean-Bernard, Nicolas, Jonathan, Gaby, Matthieu et Georges. Une attention particulière à Adrien pour son soutien inconditionnel à chaque moment de doute.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans ce travail me permettant ainsi de garder un excellent souvenir de ces trois années.

Enfin, merci à mes proches. Par leur compréhension, leur aide et leur soutien permanent, j'ai pu, pendant ces trois années, m'investir totalement dans ce travail.

RESUME

Système adapté pour les stations de petites et moyennes capacités de moins de 100.000 EH, le séchage solaire s'est rapidement imposé comme une solution efficace de déshydratation des boues permettant de répondre aux attentes des collectivités dans le respect des contraintes réglementaires. Toutefois les règles de dimensionnement et de conception de ce procédé restent d'une part très empiriques, et d'autre part trop rudimentaires pour traduire la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Cette thèse s'inscrit donc dans une optique d'amélioration et d'optimisation des méthodes de dimensionnement et de conception du séchage solaire des boues, en mettant l'accent sur le développement et l'utilisation d'outils de simulation numérique.

Après une présentation générale de la problématique des boues résiduelles urbaines en France et de celle du séchage solaire des boues, quelques notions essentielles à l'étude du séchage sont présentées dans le chapitre II. Après une revue des différents types d'eau que l'on trouve dans les boues, le concept d'isotherme de sorption est présenté. Les modes de transport d'eau pendant le séchage sont ensuite rappelés. La fin du chapitre se concentre sur la modélisation de la cinétique du séchage.

Le développement d'un modèle numérique simulant le transfert d'eau de la boue lors du séchage solaire sous serre est abordé dans le chapitre III de ce travail. Une mise en équations des différents phénomènes complexes est effectuée. Le modèle développé est constitué de trois équations de bilan d'énergie et d'une de transfert de matière, couplées et non linéaires. Une approche de résolution numérique du problème est également présentée.

L'ensemble des dispositifs expérimentaux et des méthodes utilisées tout au long de ce travail est décrit dans le chapitre IV. Basée principalement sur l'utilisation de deux types de modèles réduits (modèles I et II), placés dans une enceinte climatique, la méthode

expérimentale fait appel à un plan d'expérience mené en deux étapes, de manière à mieux appréhender le couplage très complexe des différents transferts thermiques et massiques.

Le chapitre V est consacré à la validation du modèle numérique. Le premier volet de ce chapitre expose les résultats expérimentaux des paramètres de la boue intervenant dans la modélisation. Des formulations semi-empiriques concernant ces grandeurs (isothermes de désorption et chaleur spécifique massique) ont été proposées. Dans le second volet, les résultats numériques sont confrontés à ceux des expériences. La comparaison s'est avérée souvent très satisfaisante, tant au niveau des transferts couplés de chaleur et de masse qu'au niveau de l'évaluation des vitesses de séchage. Néanmoins, plusieurs phénomènes échappant à la formulation macroscopique et mono dimensionnelle du code ont été évoqués pour expliquer certains écarts entre les simulations et le comportement observé.

Le chapitre VI aborde la problématique de l'extrapolation du modèle développé à une installation à l'échelle réelle. La première étape est ainsi consacrée à coupler ce modèle à un générateur de données qui permet de reconstituer au pas horaire une journée climatique « type ». Enfin, quelques paramètres nécessaires à l'extrapolation sont évoqués.

Le travail se termine par une conclusion rassemblant l'ensemble des résultats et par l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite intéressante à cette étude, notamment la prise en compte des variations spatiales et l'adaptation du modèle dans l'objectif du développement d'un outil de dimensionnement ou d'optimisation de sites industriels.

Mots clés: eaux usées, boue, séchage solaire, transfert thermique modélisation, séchoir- serre.

ABSTRACT

Solar drying method has quickly stood out as an effective solution for the dehydration of the sludge produced by waste water treatment plants built for less than 100.000 pop. Eq. It allows small communities to fill up the lawful constraints. However the design rules of this process remain empirical and do not take in account the complexity of the involved physical phenomena. Thus, this thesis presents an improvement and an optimization of the design using numerical simulation tools.

After a general presentation of the problems of urban residual sludge in France and those concerning solar drying of sludge, some essential concepts in the study of the drying are presented in chapter II. After a review of the various types of water that can be found in sludge, the concept of sorption isotherm is introduced. The ways of transport of water during the drying are then pointed out. The end of the chapter focuses on the modelling of the kinetics of drying.

The development of a numerical model, simulating the transfer of sludge water during the solar drying under greenhouse, is described in chapter III. A setting of the equations of the various complex phenomena is carried out. The developed model consists in writing three equations of assessment of energy and one of transfer of matter, coupled and nonlinear. A numerical approach of resolution of the problem is also presented.

Experimental devices and methods used throughout this work are described in chapter IV. Based mainly on the use of two types of small-scale models (model I and II), placed in a climatic chamber, the experimental method calls upon an experimental design carried out in two stages, so as to better apprehend the very complex coupling of the various thermal and mass transfers.

Chapter V is devoted to the validation of the numerical model. The first part of this chapter exposes the experimental results of the parameters of sludge involved in modelling.

Semi-empirical formulations concerning these sizes (isothermal of desorption and mass specific heat) were proposed. In the second part, the numerical results are compared with those of the experiments. The comparisons are often very satisfactory, as well for the transfers coupled of heat and mass as with the evaluation speeds of drying. Nevertheless, several phenomena escaping from the macroscopic and monodimensional formulation are mentioned to explain some differences between simulations and the observed behaviour.

Chapter VI approaches the problems of the extrapolation of the developed model to an installation on a real scale. The first stage is devoted to couple this model with a generator of data, which makes it possible to reconstitute with a time step a climatic day "type". Finally, some parameters necessary to extrapolation are mentioned.

This Work ends by a conclusion collecting all the results and the statement of prospects, which could constitute an interesting continuation with this study, in particular to take into account the space variations, and the adaptation of the model aiming the development of a tool of dimensioning or optimization of industrial site.

Keywords: wastewater, sludge, solar drying, thermal transfer, modelling, drier tightens.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES	7
I.1 Problématique des boues résiduaires urbaines	9
I.1.1 Origine des boues	9
I.1.2 Composition globale des boues et production de boues d'une station d'épuration d'eaux usées urbaines	12
I.1.3 Contraintes réglementaires	14
I.1.3.1 Obligations concernant le traitement des eaux usées urbaines	15
I.1.3.2 Obligations concernant la destination finale des boues	15
I.1.4 Différentes filières de traitement des boues sur site	17
I.1.4.1 Epaississement	18
I.1.4.2 Stabilisation des boues	20
I.1.4.3 Conditionnement et déshydratation des boues	21
I.1.5 Destination finale des boues et contraintes afférentes	26
I.1.5.1 Valorisation agricole	27
I.1.5.2 Valorisation énergétique	28
I.1.6 Place du séchage dans une optique valorisation	30
I.1.6.1 Séchage et épandage	30
I.1.6.2 Séchage et valorisation énergétique	30
I.2 Contexte de développement du séchage solaire des boues	32
I.2.1 Historique de développement des procédés	32
I.2.2 Avantages du séchage solaire	33
I.2.3 Contraintes du séchage solaire	34
I.2.4 Problématique actuelle du séchage solaire	34
I.3 Différents procédés de séchage solaire	35
I.3.1 Géométrie et dimensionnement des serres	36
I.3.2 Alimentation de la serre	37
I.3.3 Ventilation et désodorisation	38
I.3.4 Retournement et fermentation des boues	38
I.3.4.1 Cochon électrique	38
I.3.4.2 Robot scarificateur (Degrémont)	39
I.3.4.3 Procédé Soliamix (Véolia)	40
I.3.5 Synthèse des principales techniques du marché	43
I.4 Verrous actuels et besoins en terme de modélisation	43
I.5 Références	45
CHAPITRE II NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE	47
II.1 Les formes d'eau dans les boues d'épuration	49
II.2 L'activité de l'eau dans un produit	49

II.2.1	Isothermes de sorption	50
II.2.2	Formes et modèles des isothermes de sorption	51
II.2.3	Chaleur isostérique de désorption	52
II.3	Différentes étapes du séchage d'un produit humide	53
II.3.1	Caractérisation de la boue	53
II.3.1.1	Matières sèches (Ms)	53
II.3.1.2	Calcul de la siccité (Si)	53
II.3.2	Etablissement des courbes de séchage	53
II.3.3	Analyse de la cinétique de séchage	54
II.3.3.1	Période de mise en température	54
II.3.3.2	Période à vitesse ou flux constant	54
II.3.3.3	Les deux périodes de ralentissement	55
II.3.3.4	La classification de Sherwood	56
II.3.4	Modélisation simplifiée des phases de séchage	57
II.3.4.1	Période à vitesse constante	57
II.3.4.2	Période à flux décroissant	58
II.3.5	Courbe caractéristique de séchage	60
II.4	Références	62
CHAPITRE III DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE		65
III.1	Objectifs et destination du modèle développé	67
III.2	Démarche globale de modélisation	67
III.3	Analyse physique du modèle	71
III.3.1	Représentation des composants de la serre	71
III.3.1.1	Géométrie globale de la serre	71
III.3.1.2	Représentation de la couverture	71
III.3.1.3	Représentation de l'air intérieur	71
III.3.1.4	Représentation de la boue	72
III.3.1.5	Représentation du plancher	72
III.3.1.6	Environnement extérieur	72
III.3.2	Ecriture des bilans thermiques et massiques	73
III.3.2.1	Convention de notation des flux	73
III.3.2.2	Bilans énergétiques	74
III.3.2.3	Bilans massiques	75
III.4	Expression des flux énergétiques	76
III.4.1	Flux radiatifs solaires	76
III.4.2	Flux radiatifs Infrarouges	77
III.4.2.1	Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture	77
III.4.2.2	Flux radiatif infrarouge au sein du modèle	78
III.4.3	Flux convectifs	79
III.4.3.1	Echange convectif milieu extérieur / couverture	80
III.4.3.2	Echange convectif au sein du modèle	80
III.4.4	Transfert de masse	82
III.4.5	Inertie thermique	82

III.5 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation	82
III.6 Formulation et résolution du système d'équations	83
III.6.1 Formulation du système d'équations	83
III.6.2 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle	85
III.6.3 Résolution du système d'équations	88
III.7 Références	89
CHAPITRE IV MATERIELS ET METHODES	91
IV.1 Estimation des caractéristiques des boues intervenant dans la modélisation	93
IV.1.1 Origine des boues utilisées	93
IV.1.2 Estimation des isothermes de sorption	94
IV.1.2.1 Principe de détermination des isothermes	94
IV.1.2.2 Matériel utilisé et mode opératoire	95
IV.1.3 Mesure de la capacité calorifique massique	96
IV.1.3.1 Principe de la méthode	96
IV.1.3.2 Matériel utilisé et mode opératoire	97
IV.2 Etude de du séchage sur un pilote de laboratoire	98
IV.2.1 Présentation du dispositif expérimental	98
IV.2.1.1 Différentes configurations du pilote	99
IV.2.1.2 Instrumentation du pilote	100
IV.2.2 Méthodologies d'obtention des courbes de séchage	103
IV.2.2.1 Calcul de la vitesse de séchage	103
IV.2.2.2 Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage	104
IV.2.2.3 Détermination de la première phase et la teneur en eau critique	105
IV.2.3 Plan expérimental de l'étude du séchage	106
IV.3 Recueil de données sur un site industriel	106
IV.4 Conclusion	107
IV.5 Références	108
CHAPITRE V ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE	109
V.1 Résultats sur les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation	112
V.1.1 Isothermes de désorption	112
V.1.2 Capacité calorifique massique	116
V.2 Modèle I : Formulation mathématique, résultats expérimentaux et validation	117
V.2.1 Formulation mathématique du modèle I	117
V.2.1.1 Hypothèses du modèle	117
V.2.1.2 Equations du modèle I	117
V.2.2 Résultats expérimentaux	118
V.2.2.1 Cinétique du séchage	119
V.2.2.2 Courbe caractéristique du séchage	120
V.2.3 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés	123
V.2.3.1 Évolution de la teneur en eau	125
V.2.3.2 Évolution de la température de la boue	125

V.2.4	Validation du modèle _____	126
V.3	Modèle II : Résultats expérimentaux et validation du modèle _____	128
V.3.1	Résultats expérimentaux _____	128
V.3.2	L'analyse énergétique de la serre expérimentale _____	132
V.3.2.1	Estimation expérimentale du coefficient de transmission de la couverture _____	132
V.3.2.2	Evolution type de la température de la couverture: vérification de l'hypothèse de l'uniformité de la température _____	134
1.1.1	Evolution type de la température de l'air _____	135
V.3.2.3	Evolution type de l'humidité relative de l'air _____	137
V.3.3	Cinétique du séchage _____	138
V.3.3.1	Evolution type de vitesse de séchage _____	138
V.3.3.2	Courbe caractéristique _____	140
V.3.3.3	Calcul de la première phase _____	141
1.1.2	Calcul du coefficient de convection air intérieur – boue _____	142
V.3.4	Confrontation des résultats expérimentaux et simulés _____	144
V.3.4.1	Valeurs des paramètres physiques entrés dans le code _____	144
V.3.4.2	Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue _____	145
3.1.1	Confrontation des résultats au niveau de la température de la couverture. _____	147
V.3.4.3	Confrontation des résultats au niveau de la température de l'air intérieur _____	148
V.3.4.4	Confrontation des résultats au niveau de la teneur en eau _____	149
V.3.5	Validation du modèle _____	151
V.4	Conclusion d'ensemble sur la partie expérimentale _____	154
V.5	Références _____	155
CHAPITRE VI ETUDE SUR SITE REEL: CAS DE LA STATION DE BRUMATH _____		157
VI.1	Validation des corrélations semi-empiriques des paramètres climatiques _____	159
VI.1.1	Formulation mathématique des corrélations _____	160
VI.1.1.1	Corrélation de la température de l'air ambiant _____	160
VI.1.1.2	Corrélation de l'humidité relative de l'air _____	160
VI.1.1.3	Corrélation de la vitesse moyenne du vent _____	161
VI.1.1.4	Corrélation du rayonnement solaire _____	162
VI.1.2	Données expérimentales _____	163
VI.1.3	Vérification des corrélations semi-empiriques _____	165
VI.1.3.1	Température de l'air ambiant _____	165
VI.1.3.2	L'humidité relative de l'air extérieur _____	166
VI.1.3.3	Rayonnement solaire _____	166
VI.2	Performances climatiques de la serre _____	167
VI.2.1	Interactions température de l'air intérieur - extérieur _____	168
VI.2.1.1	Effet radiatif _____	168
VI.2.1.2	Effet convectif (ou effet « d'abri ») _____	169
VI.2.2	Interactions de l'humidité relative de l'air intérieur - extérieur _____	169
VI.3	Quelques éléments d'extrapolation du modèle à une installation à l'échelle réelle _____	170
VI.4	Références _____	172
CHAPITRE VII CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES _____		173

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

A_1, A_2, A_3	coefficients caractéristiques du séchage	(-)
a_b	coefficient d'absorption de la couverture	(-)
a_c	coefficient d'absorption de la couverture	(-)
a_w	activité de l'eau	(-)
C	concentration	(kg.m^{-3})
C_{BET}	constante BET	(-)
Cc	capacité thermique surfacique de la couverture	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
CDL	correction de la longitude	(h)
CDT	correction du temps	(h)
C_G	constante de Guggenheim	(-)
C_{pb}	capacité thermique massique de la boue	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
C_{Pe}	capacité thermique massique de l'eau	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
C_p	capacité thermique massique de l'air	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
$C_{p_anhydre}$	capacité thermique massique de la boue	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
D	coefficient de diffusion	($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
$Delt$	déclinaison solaire en degré	(°C)
E	énergie	(W)
$E.H$	équivalent habitant	(-)
EQM	erreur quadratique moyenne	(-)
$f(X_r)$	vitesse de séchage réduite	(-)
Hr	humidité relative de l'air	(%)
Hre	humidité relative de l'air extérieure	(%)
Hri	humidité relative de l'air intérieure	(%)
Hr_{\max}	humidité relative de l'air maximale	(%)
Hr_{\min}	humidité relative de l'air minimale	(%)

H	hauteur solaire	(°C)
h	coefficient de convection	(W/ m ² /K)
h_{ci}	coefficient d'échange convectif entre couverture et air intérieur	(W/ m ² /K)
h_{ce}	coefficient d'échange convectif entre couverture et air extérieur	(W/ m ² /K)
h_b	coefficient d'échange convectif entre boue et l'air asséchant	(W/ m ² /K)
J	flux de matière	(k mol.m ⁻² s ⁻¹)
K	coefficient de transfert de matière	(m.s ⁻¹)
k	constante du modèle GAB	(-)
$kr(t)$	coefficient de calcul de l'humidité relative dépendant de l'heure et de la saison	(-)
$kt(t)$	coefficient de calcul de la température dépendant de l'heure et de la saison	(-)
L	longueur de la serre	(m)
l	largeur de la serre	(m)
lat	latitude	(°C)
LC	limite de confiance	(-)
Lon	longitude en degré décimaux	(°C)
l_v	chaleur latente de vaporisation d'eau	(J/kg)
m_b	masse de la boue	(kg)
Ms	masse sèche	(kg)
m_i	masse initiale	(kg)
me	masse d'eau	(kg)
\dot{m}	vitesse d'évaporation d'eau	(Kg eau/h)
Nu	nombre de Nusselt	(-)
P	pression atmosphérique	(Pa)
P_{cal}	puissance calorifique	(W)

P_v	pression partielle de vapeur	(Pa)
P_{vs}	pression de saturation	(Pa)
$P_{méca}$	puissance mécanique	(W)
Pr	nombre de Prandt	(-)
Q	débit d'air de la serre	(m ³)
R	renouvellement d'air de la serre	(m ³)
Re	nombre de Reynolds	(-)
R_g	intensité du rayonnement solaire	(W.m ⁻²)
S	surface d'échange	(m ²)
S_b	surface d'échange boue- air intérieur	(m ²)
S_c	surface d'échange couverture	(m ²)
T_{ae}	température de l'air extérieur	(°C)
T_{ai}	température de l'air intérieur	(°C)
$T_{ae\max}$	température de l'air extérieur maximale	(°C)
$T_{ae\min}$	température de l'air extérieur minimale	(°C)
T_c	température de la couverture	(°C)
T_b	température de la boue	(°C)
T_f	température du fluide	(°C)
T_h	température humide de l'air	(°C)
T_s	température du solide	(°C)
TU	temps universel	(h)
T_v	température de la voûte céleste	(°C)
t	temps	(h)
U_i	vitesse moyenne de l'air intérieur	(m/s)
U_v	vitesse moyenne du vent	(m/s)
U_z	vitesse moyenne du vent mesurée à la hauteur z	(m/s)
V	volume d'air de la serre	(m ³)

W	angle horaire en degré	(°C)
X	teneur en eau de la boue en base sèche	(kg eau /kg ms)
X_{eq}	teneur en eau en équilibre	(kg eau /kg ms)
X_{cr}	teneur en eau critique	(kg eau /kg ms)
X_i	teneur en eau initiale	(kg eau /kg ms)
$\left(-\frac{dX}{dt}\right)$	vitesse de séchage	(kg eau /kg ms)
$\left(\frac{dX}{dt}\right)_1$	vitesse de séchage à phase constante	(kg eau /kg ms)
Lettres grecques		
ε_c	coefficient d'émissivité de la couverture	(-)
ε_b	coefficient d'émissivité de la couverture	(-)
ρ_b	coefficient de réflexion de la couverture	(-)
τ_c	coefficient de transmission de la couverture	(-)
σ	constante de Stephan Boltzmann	(W.m ⁻² .K ⁻⁴)
λ	conductivité thermique de l'air	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
μ	viscosité dynamique	(Pa.s)
ρ	masse volumique	(kg.m ⁻³)

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Schéma simplifié d'un procédé par boues activées	11
Figure I.2 Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées	12
Figure I.3 Schéma général des différentes filières du traitement des boues.....	18
Figure I.4 Schéma d'une centrifugeuse	23
Figure I.5 Schéma d'un filtre bande	24
Figure I.6 Schéma d'une filière de traitement par filtre presse	25
Figure I.7 Schéma d'une filière complète de séchage solaire sous serre	32
Figure I.8 Exemple de serre ouverte.....	36
Figure I.9 Exemple de serre fermée - Extraction en pignon.....	37
Figure I.10 Exemple de serre fermée - Extraction par cheminée	37
Figure I.11 Cochon électrique "Elektrischer Schwein"	39
Figure I.12 Schéma de fonctionnement du rouleau scarificateur	40
Figure I.13 Rouleau scarificateur du système IST	40
Figure I.14 Système de retournement du procédé Soliamix.....	41
Figure II.1 Courbe de Krischer théorique.....	54
Figure II.2 Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche référencées par Sherwood (1936).	56
Figure III.1 Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de sécheur solaire	70
Figure III.2 Schéma des flux solaires absorbés	76
Figure IV.1 Photographie du système DVS	96
Figure IV.2 Photographie du calorimètre C80	97
Figure IV.3 Photographie de l'enceinte climatique SAPRATIN	99
Figure IV.4 Configuration du pilote pour le modèle I.....	99
Figure IV.5 Configuration du pilote pour le modèle II	100
Figure IV.6 Répartition des capteurs sur la serre	101
Figure IV.7 Exemple de courbe de vitesse de séchage bruitée	104
Figure V.1 Isotherme de désorption à une température de 30°C et à 50°C.....	112
Figure V.2 Comparaison valeurs expérimentales et celles de l'ajustement du modèle d'Oswin à	114
Figure V.3 Comparaison valeurs expérimentales et celles de l'ajustement du modèle d'Oswin à	115
Figure V.4 Courbes de séchage représentant l'évolution des teneurs en eau sur base sèche, en fonction du temps.	119
Figure V.5 Profil des courbes de vitesse de séchage.....	120
Figure V.6 Courbe caractéristique de séchage	122
Figure V.7 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 1 (Ta=29,7°C, Hr=44,95%, V=0,5m/s).	123
Figure V.8 Comparaison valeurs simulées et expérimentales essai2 (Ta=29,7°C, Hr=58,06%, V=0,5m/s).....	124
Figure V.9 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 3 (Ta=29,81°C, Hr=42,35%, V=1,65m/s).	124

Figure V.10 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 4 ($T_a=48,04^\circ\text{C}$, Hr=30,52%, $V=1,65\text{m/s}$).....	125
Figure V.11 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 6 ($T_a=29,55^\circ\text{C}$, Hr=58,24%, $V=0,944\text{m/s}$).....	127
Figure V.12 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 7($T_a=29,71^\circ\text{C}$, Hr=37,06%, $V=1,06\text{ m/s}$).....	127
Figure V.13 Courbe de l'humidité relative de l'air de séchage utilisé mettant en évidence la fluctuation de ce paramètre.....	130
Figure V.14 L'évolution type de température de la boue sans rayonnement essai 2 (T_{ae} $=49,2^\circ\text{C}$; $H_{re}=39,0$; $R_g=0\text{ W/m}^2$).....	131
Figure V.15 L'évolution type de température de la boue avec rayonnement essai 10 (T_{ae} $=49,5^\circ\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $R_g=315\text{W/m}^2$).....	132
Figure V.16 Répartition des sondes Pt sur la couverture ; Tc1 et Tc3 sont sur la face externe et Tc2 et Tc4 sur la face interne de la serre.....	134
Figure V.17 Evolution type de la température de la couverture sans rayonnement.....	135
Figure V.18 Evolution type de la température de la couverture avec rayonnement.....	135
Figure V.19 Evolution type de la température de l'air intérieur à rayonnement nul pour deux essais différents : essai 1 ($T_{ae}=49,7^\circ\text{C}$, $H_{re}=54,2\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$, $R_g=0\text{ W/m}^2$); essai 6 ($T_{ae}=29,7^\circ\text{C}$, $H_{re}=46,4\%$; $U_i=1,8\text{m/s}$, $R_g=0\text{W/m}^2$).....	136
Figure V.20 Evolution type de la température de l'air intérieur avec rayonnement pour deux essais différents : essai 8 ($T_{ae}=50,5^\circ\text{C}$, $H_{re}=63,6\%$; $U_i=1,7\text{m/s}$, $R_g=728\text{ W/m}^2$) ; essai 14 ($T_{ae}=10,4^\circ\text{C}$, $H_{re}=90,9\%$; $U_i=1,7\text{m/s}$, $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	136
Figure V.21 Evolution type de la température de l'air intérieur avec ou sans rayonnement. Essai 3 ($T_{ae}=30,0^\circ\text{C}$, $H_{re}=61,3\%$; $U_i=1,6\text{m/s}$, $R_g=0\text{W/m}^2$).....	138
Figure V.22 Evolution type de vitesse de séchage pour un essai à rayonnement nul. Essai 6 ($T_{ae}=29,7^\circ\text{C}$, $H_{re}=46,4\%$; $U_i=1,8\text{m/s}$, $R_g=0\text{ W/m}^2$).....	139
Figure V.23 Evolution type de vitesse de séchage pour un essai avec rayonnement. Essai 10 ($T_{ae}=49,5^\circ\text{C}$, $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$, $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	139
Figure V.24 Courbe caractéristique des différentes conditions examinées.....	141
Figure V.25 Logarithme du nombre de Nusselt en fonction du logarithme $Re^{0,8}Pr^{0,33}$ obtenu d'après l'expérience.....	143
Figure V.26 Comparaison de la relation $Nu = f(Re, Pr)$ établie expérimentalement avec une loi adimensionnelle proposée dans la littérature.....	144
Figure V.27 Comparaison des températures simulée et expérimentale de la boue pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^\circ\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$).....	145
Figure V.28 Comparaison des températures simulée et expérimentale de la boue pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^\circ\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	146
Figure V.29 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^\circ\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$).....	147
Figure V.30 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^\circ\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	147
Figure V.31 Évolution des températures simulée et expérimentale de l'air intérieur pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^\circ\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$).....	148
Figure V.32 Évolution des températures simulées et expérimentales de l'air intérieur pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^\circ\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	149
Figure V.33 Évolution des teneurs simulées et expérimentales pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^\circ\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$).....	150

Figure V.34 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,42\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)	150
Figure V.35 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 16 ($T_{ae}=40,7^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39,2\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)	152
Figure V.36 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 15 ($T_{ae}=38,8^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=64,2\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)	153
Figure VI.1 Evolution de la température (de l'air extérieur) simulée et mesurée	165
Figure VI.2 Evolution de l'humidité relative (de l'air extérieur) simulée et mesurée	166
Figure VI.3 Evolution de l'intensité du rayonnement solaire simulée et mesurée	167
Figure VI.4 Evolution des températures de l'air extérieur et intérieur sur 2 jours.....	168
Figure VI.5 Evolution des humidités relatives de l'air extérieur et intérieur sur 2 jours.	170

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Production de boues d'une station d'épuration d'eau urbaine	12
Tableau I.2 Evolution de la composition des boues en fonction de la ligne de traitement d'eau	13
Tableau I.3 Etats physiques des boues	14
Tableau I.4 Importance des filières de valorisation des boues au niveau européen	26
Tableau I.5 Synthèse des données techniques sur les principaux procédés des constructeurs ..	42
Tableau II.1 Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés	52
Tableau III.1 Récapitulatif de la notation des flux	74
Tableau III.2 Formulation du système d'équation du modèle	84
Tableau III.3 Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle	86
Tableau V.1 EQM relatifs à l'ajustement des modèles d'isothermes de désorption pour les boues à deux températures données	113
Tableau V.2 Paramètres du modèle d'Oswin et EQM pour chaque ajustement	114
Tableau V.3 Plan expérimental modèle I	118
Tableau V.4 Paramètres A_1 , A_2 , A_3 avec la limite de confiance de chaque paramètre	122
Tableau V.5 Plan expérimental modèle II	129
Tableau V.6 Valeurs de coefficients de transmission suivant différentes conditions opératoires	133
Tableau V.7 Paramètres A_1 , A_2 , A_3 avec la limite de confiance de chaque paramètre	141
Tableau VI.1 Coefficients α et β pour le calcul de la vitesse moyenne du vent	161
Tableau VI.2 Relevés expérimentaux des données climatiques (intérieur et extérieur) d'une serre de la station d'épuration de Brumath.	164
Tableau VI.3 Valeurs des paramètres a et b du modèle et leur EQM relatif à l'ajustement ...	167

INTRODUCTION

Le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une consommation d'eau croissante qui se traduit par des rejets d'eaux usées croissants, avec pour conséquence une diminution conjointe de la quantité et de la qualité des eaux douces terrestres. Les ressources en eau ne sont pas inépuisables et leur dégradation, sous l'effet des rejets d'eaux polluées, peut non seulement détériorer gravement l'environnement, mais aussi entraîner des risques de pénurie. De ce fait l'assainissement des eaux usées est devenu un impératif pour nos sociétés modernes.

Les premiers réseaux d'égouts structurés sont apparus vers 1850, essentiellement dans un but d'assainissement des villes. Quant aux stations d'épuration modernes, elles se sont développées en Europe au début du 20ème siècle (Edeline, 1993). Si l'homme voulait continuer à jouir de son environnement, il était en effet nécessaire de réduire la charge polluante des eaux usées, tant domestiques qu'industrielles.

Qui dit épuration des eaux, dit également production de boues. Pourtant, dans un premier temps, l'objectif de ces stations a été essentiellement de garantir le rejet d'une eau de qualité définie en se préoccupant peu des boues engendrées par les procédés d'épuration. La tendance actuelle est différente car les boues, au même titre que l'eau épurée, sont considérées comme un élément qui contribue à l'impact environnemental d'une station d'épuration.

Au-delà du cadre réglementaire français défini par l'arrêté du 21 juin 1996 complété par la circulaire N°97-31 du 17 février 1997, c'est la directive du Conseil du 21 mai 1991 qui fixe les objectifs en terme de traitement des eaux usées au niveau européen. Les évolutions réglementaires récentes, comme la directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE), transcrite en droit français en 2004 (loi n°2004-338), ou la nouvelle loi sur l'eau (loi n°2006-1772), finalement adoptée en décembre 2006, ne remettent pas en cause ces orientations. Suite à l'application de ces contraintes réglementaires, les quantités de boues sont amenées à croître de manière drastique dans les prochaines années.

La conception des filières de traitement des boues est fortement liée à la destination finale de celles-ci (épandage agricole, compostage, mise en décharge, incinération, etc.). Dans tous les cas les boues extraites de la filière eau des stations de traitement contiennent principalement de l'eau (plus de 97%) et nécessitent donc d'abord d'être concentrées puis

déshydratées. Le taux de déshydratation nécessaire et donc la conception et le coût inhérent dépendent de la siccité finale requise pour la filière de valorisation des boues.

Dans le même temps, les filières d'élimination s'amenuisent notamment suite à la réduction, planifiée par l'Union Européenne, des quantités de déchets biodégradables mis en décharge (Conseil de l'Union Européenne, 1999). Dès lors, la gestion des boues produites va devenir une question cruciale à court terme.

Face à l'inflation sur les exigences en terme de siccités, qui conduit au développement de filières de plus en plus pointues et coûteuses, les concepteurs de stations tentent de développer de nouveaux procédés de traitement de boue, efficaces et moins coûteux en énergie. Ce problème se pose d'autant plus pour les petites collectivités, pour lesquelles des procédés rustiques et économiques en fonctionnement sont particulièrement adaptés.

Dans ce contexte et devant les incertitudes qui pèsent sur les autres filières de traitement, le séchage solaire sous serre se positionne comme une alternative pour les petites et moyennes stations allant de quelques milliers à plus de 100.000 EH.

Technique empruntée aux industriels céréaliers, le séchage solaire des boues s'effectue par évaporation naturelle de l'eau contenue dans les boues, en utilisant comme source d'énergie le rayonnement solaire. Les boues provenant de la filière eau doivent au préalable être déshydratée par des procédés classiques (filtre à bande, centrifugeuse, filtre presse, etc.) de manière à obtenir une structure suffisante avant d'être introduites dans les serres de séchage. Les procédés existants se distinguent ensuite essentiellement les uns des autres en fonction du mode de retournement et de déplacement des boues sous les serres. La siccité finale obtenue dépend ensuite, pour une installation donnée, du temps de séjour des boues dans le dispositif et des conditions climatiques extérieures.

A l'état actuel les règles de dimensionnement et de conception de ce procédé restent d'une part très empiriques, et d'autre part trop rudimentaires pour traduire la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Par ailleurs, les caractéristiques spécifiques des boues résiduaires sont peu prises en compte dans les approches dimensionnelles actuelles, ce qui peut partiellement s'expliquer par la difficulté à les déterminer.

L'un des points clés à maîtriser dans une optique de dimensionnement est la prévision de vitesses de séchage en fonction à la fois de la configuration de l'installation et des conditions climatiques locales. Pour un site donné, il existe bien entendu également des

variations climatiques d'ensoleillement, température et humidité de l'air, ceci à différentes échelles de temps (alternance jour-nuit, variations saisonnières ou annuelles, ...).

Le processus de séchage solaire sous serre présente donc un comportement éminemment dynamique, avec des variations continues des vitesses d'évaporation de l'eau des boues dans le temps.

Il apparaît donc nécessaire de développer une meilleure connaissance de l'outil 'serre-boue' et par ailleurs de mettre au point des outils d'aide au dimensionnement et à la conduite de cette famille de procédés, en intégrant l'aspect dynamique de leur fonctionnement. En effet, si en première approche il est possible de se contenter d'estimer des vitesses moyennes d'évaporation pour évaluer des dimensions d'ouvrages sur un site donné (ceci en utilisant éventuellement des méthodes empiriques), une approche plus fine ne pourra être atteinte qu'avec des outils de simulation numérique.

Cette thèse s'inscrit donc dans une optique d'amélioration et d'optimisation des méthodes de dimensionnement et de conception du séchage solaire des boues, en mettant l'accent sur le développement et l'utilisation d'outils de simulation numérique.

Les objectifs de cette étude sont de trois ordres :

- dégager les processus mis en jeu, et analyser via une approche thermodynamique les éléments et conditions clés intervenant au cours du séchage solaire des boues,
- accroître les connaissances en matière de dimensionnement et de gestion des dispositifs de séchage solaire sous serre,
- développer un modèle de simulation numérique permettant de prévoir des vitesses et des temps de séchage en fonction de la configuration des installations, de leur mode de gestion et des conditions climatiques locales, avec dans la mesure du possible une validation sur des sites industriels.

Notre démarche scientifique s'articule autour d'une modélisation rigoureuse intégrant d'une part l'ensemble des processus physiques qui régissent les échanges thermiques entre la couverture de la serre, l'air intérieur et la boue, et d'autre part les caractéristiques de la boue (chaleur spécifique, isotherme de désorption).

La première partie du travail sera consacrée à une synthèse bibliographique sur les filières de traitement et de valorisation des boues. Il sera ici fait cas du séchage solaire des boues, de ses spécificités, des contraintes qu'il impose, des attentes des professionnels et des besoins de connaissance au niveau de la recherche.

La seconde partie envisage le développement d'un modèle numérique par la mise en place d'un système d'équations décrivant les différents mécanismes énergétiques des serres.

La validation du modèle passant par une approche expérimentale, au laboratoire puis sur le terrain. La présentation du dispositif expérimental, de l'appareillage de mesure et de la méthodologie adoptée seront abordés dans une troisième partie.

Dans une quatrième partie, les données collectées par l'outil expérimental seront confrontées avec les résultats simulés pour valider ses prédictions.

La problématique de l'extrapolation du modèle développé à une installation à l'échelle réelle sera finalement abordée, avec l'exposé de perspectives de développement et d'améliorations ultérieures du modèle proposé.

CHAPITRE I
APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE
SECHAGE SOLAIRE DES BOUES

La France possède en 2002 un parc de stations qui voisine les 160000 unités. L'ensemble de ces installations fournit annuellement plus de 880 000 tonnes de matières sèche de boues. Chaque station possède une filière de traitement des eaux usées associée à une filière de traitement des boues. C'est pourquoi dans la première partie de ce chapitre nous verrons, en suivant les différentes étapes du traitement de l'eau usée dans une station d'épuration, comment la matière en suspension est concentrée jusqu'à former une boue, et le contexte législatif qui régit ces boues. Ces nouvelles législations sur le traitement des eaux usées et sur les filières d'élimination vont conduire à l'émergence de solutions techniques nouvelles et vont imposer de s'orienter dans un futur proche vers une logique de valorisation.

Dans ce contexte, le séchage solaire sous serre se positionne comme une étape intermédiaire dans la filière du traitement de la boue avant une valorisation énergétique ou agricole ou comme un traitement ultime. Les avantages du séchage solaire par rapport à la problématique des boues ainsi que les contraintes techniques et pratiques liées aux attentes des différents acteurs de ce secteur seront présentés dans la deuxième partie de ce chapitre. Une revue bibliographique des procédés utilisés pour le séchage solaire des boues urbaines en France nous conduira à mettre en évidence les besoins actuels de la technologie.

I.1 Problématique des boues résiduaires urbaines

I.1.1 Origine des boues

Les boues sont composées d'éléments recueillis à différents stades de l'épuration d'une eau usée: matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et microorganismes, ces derniers résultant de l'épuration biologique. Parmi les boues, on distingue les boues urbaines et les boues industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épuration traitant des effluents dits 'urbains', c'est-à-dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles.

Selon l'origine urbaine ou industrielle de la boue et les traitements physico-chimiques, qu'elle a subi, ses caractéristiques et donc son comportement seront différents. Dans ce travail, nous nous préoccupons **uniquement de boues urbaines**.

Les caractéristiques des boues résiduaires dépendent alors fortement du procédé de traitement biologique des eaux usées qui est utilisé. Les traitements biologiques reposent sur l'utilisation des micro-organismes naturellement présents dans les eaux que l'on concentre dans les bassins d'épuration par floculation ou par fixation sur des supports inertes.

Diverses techniques sont possibles :

- **le lagunage naturel ou aéré**, qui peut accepter des eaux brutes mais nécessite des temps de séjour longs;
- **les lits bactériens** à ruissellement et **les disques biologiques**;
- **des réacteurs à milieu support granulaire fin fixe ou mobile** ;
- **les boues activées** qui comportent un bassin d'aération et un clarificateur et peuvent suivant les dispositions prises accepter des charges massiques plus ou moins fortes.

Les boues étudiées dans le présent travail sont issues d'un procédé de traitement par boues activées. Dans le procédé par boues activées, la dégradation est assurée par voie biologique aérobie à l'aide de populations bactériennes maintenues dans le système épuratoire sous forme floculée. Ce principe naturel de floculation permet de séparer l'eau traitée de la biomasse par simple décantation et de recycler une partie de la masse active vers le réacteur biologique pour maintenir une activité biologique optimale.

Les systèmes par boues activées ont une action épuratoire sur la plupart des polluants (soluble et particulaire), mais le degré d'efficacité dépend du dimensionnement choisi. La principale difficulté est souvent de maîtriser par une exploitation soignée la phase de clarification finale et la recirculation de la biomasse active de façon à éviter à la boue de rencontrer des conditions néfastes (anaérobiose), qui affecteraient son activité et ses propriétés de décantation.

Un procédé à boues activées classique comprend:

- un bassin d'aération dans lequel l'eau à épurer est mise en contact avec la biomasse;
- un dispositif de brassage et d'aération;
- un décanteur (secondaire) dans lequel s'effectue la clarification des eaux et l'épaississement de la biomasse;
- un dispositif de recyclage qui permet de soutirer les boues en excès au bas du décanteur et d'en renvoyer une partie vers le bassin d'aération. Les boues en excès sont envoyées vers un épaisseur.

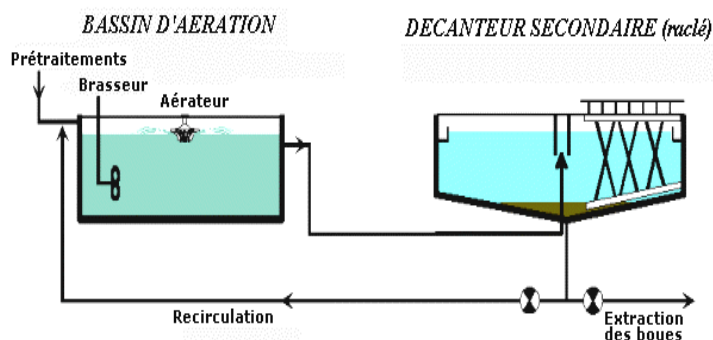


Figure I.1 Schéma simplifié d'un procédé par boues activées

Le processus complet de traitement se décompose donc généralement en plusieurs étapes, chacune d'entre elles générant des boues de qualités différentes. On distingue ainsi notamment les traitements : primaire, secondaire et tertiaire

Le traitement primaire se limite à des opérations de séparation liquide-solide comme la décantation gravitaire et la flottation. **Les boues primaires** soutirées en pied de décanteur sont composées à la fois de matières minérales et organiques. Dans certains cas, un traitement de coagulation-floculation est effectué pour améliorer la décantation. On parle alors de **boues primaires physico-chimiques**.

Le traitement secondaire est essentiellement biologique et a pour but la dégradation des matières organiques biodégradables, de l'azote et du phosphore. L'assimilation de ces matières organiques par une flore de microorganismes produit des composés gazeux d'une part et de la biomasse d'autre part (croissance cellulaire). La biomasse produite en excès, la **boue secondaire**, doit être retirée du système afin d'assurer la continuité de l'épuration. Ces boues sont très organiques (plus de 70% en MVS) et contiennent essentiellement des microorganismes et leurs sécrétions.

Le traitement tertiaire a pour but d'affiner l'épuration selon les qualités exigées pour l'eau rejetée. Les traitements tertiaires les plus courants sont la déphosphatation et la désinfection. Dans le cas de la déphosphatation tertiaire, il s'agit d'un traitement physico-chimique qui produit des **boues dites tertiaires**.

Il est devenu habituel de parler de **boues mixtes** en référence au mélange des boues primaires et secondaires qui est effectué avant le traitement des boues proprement dit.

La Figure I.2 représente schématiquement les différents types de boues rencontrées dans une station d'épuration avec le procédé boues activées.

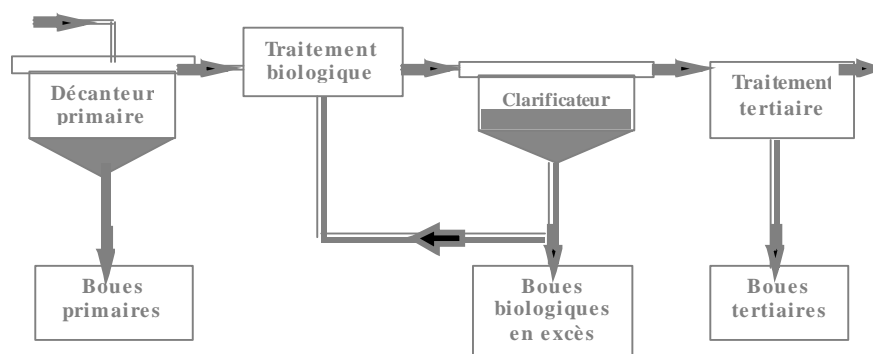


Figure I.2 Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées

I.1.2 Composition globale des boues et production de boues d'une station d'épuration d'eaux usées urbaines

Toute filière de traitement biologique produit un mélange de boues primaires, de boues biologiques, soit en phase séparée (décantation primaire + biologique) soit conjuguées (aération prolongée).

Globalement, la production de boues d'une station d'épuration d'eau urbaine peut être estimée comme suit :

Tableau I.1 Production de boues d'une station d'épuration d'eau urbaine.

Type de boue	MES en g/eq ha/jour	% MES boue épaisse	l/eq ha/jour boue épaisse
<i>Primaire fraîche</i>	45-60	8-12	0,4-0,75
<i>Primaire digérée</i>	30-40	7-11	0,3-0,55
<i>Mixte fraîche</i>	75-90	4-6	1,2-2,2
<i>Mixte digérée</i>	50-60	2,5-4,5	1,1-2,4

Les boues primaires comportent pour l'essentiel des matières minérales, cellulose, fibres et autres constituants bien structurés. Leur traitement ultérieur est facile. Les boues biologiques sont très organiques et colloïdales, donc fortement hydrophiles et difficilement déshydratables. Cependant, elles comportent la majeure partie de l'azote et du phosphore (Cornice, 1992).

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES

Tableau I.2 Evolution de la composition des boues en fonction de la ligne de traitement d'eau

Composants % /MS	Décantation primaire	Biologique $C_m > 0,1$	Aération prolongée	Lagunage	Chimique
<i>Matières organiques</i>	55-65	70-85	60-75	45-60	35-55
<i>N total</i>	25-3	4-6	4-5	2-3	1,5-2
<i>P</i>	1-1,5	2,5-3	2-2,5	1,5-2,5	1,5-3
<i>K</i>	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,1-0,2
<i>Carbone</i>	33-40	38-50	33-40	25-35	20-30
<i>Calcium</i>	5-15	5-15	5-15	5-15	5-30
<i>Magnésium</i>	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	0,4-0,8	1,7-4,5
<i>Fer</i>	1-3	1-3	1-3	1-3	3-15
<i>Al</i>	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1-15
<i>Pouvoir fermentescible</i>	++	++	+	-	(++) (-)
<i>Contamination bactériologique</i>	++	++	+	+	(++) (-)
<i>Production de boues</i>	+	+	-	-	++
<i>Concentration des boues en sortie de traitement d'eau</i>	30-90 g/l	5-10 g/l	6-8 g/l	60-120 g/l en moyenne stratification	20-60 g/l

L'extraction plus ou moins poussée de l'eau conduit à des états physiques allant du liquide au solide.

La notion de siccité n'est pas toujours représentative de l'aspect physique du sédiment déshydraté. La réversibilité est toujours possible : thixotropie du sédiment.

Tableau I.3 Etats physiques des boues.

Siccité	Etat
jusqu'à 8-9 %	liquide
12-16 %	pâteux pelletable
16-25 %	pâteux gerbable
25-35 %	solide avec retrait
> 35 %	solide sans retrait

Il est très difficile de faire une liste exhaustive de la composition d'une boue. Outre l'eau qui est son constituant principal, elle est essentiellement composée :

- pour la matière organique : de graisses, de protéines, de fibres et d'une grande variété de micro-organismes, Guibelin, (1999) ; Legrand, (1997). La boue biologique contient un grand nombre d'agents pathogènes ;
- pour la matière minérale : essentiellement de $CaCO_3$, de Al_2O_3 et de P_2O_5 [23], mais aussi de toutes sortes de métaux lourds sous formes de traces, Wiart and Reveillere, (1995).

D'une station à l'autre, les proportions varient et certains composés apparaissent en fonction des données locales (industries raccordées au réseau). La boue est donc définie plus comme le résultat de l'épuration, que par sa composition. Cette composition n'est pas homogène et constitue un danger sanitaire potentiel pour l'environnement. Depuis la loi du 15 juillet 1975, relative aux déchets, la boue est assimilable à un déchet.

I.1.3 Contraintes réglementaires

La France suit dans sa politique environnementale les directives de l'Union Européenne. Ainsi les directives du Conseil sont transcrites en droit français. Les réglementations deviennent de plus en plus exigeantes et précises quant au devenir des boues. C'est pourquoi on prévoit, sous peu, un changement dans la donne des filières d'évacuation.

1.1.3.1 Obligations concernant le traitement des eaux usées urbaines

La directive européenne 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (JOCE N° L.135/40 du 30 mai 1991) prévoit:

- l'équipement des villes de 15000 EH avant le 31/12/2000 ;
- l'équipement des villes comprises entre 2000 et 15000 EH avant le 31/12/2005 ;
- l'amélioration des capacités épuratoires ;
- le développement de l'assainissement des eaux de pluies en milieu urbain ;
- la mise en place de procédés de déphosphatation et de traitement de l'azote.

C'est cette directive qui est à l'origine de l'augmentation prévue du tonnage de boues. Même si l'application a pris du retard, l'objectif de collecter 80% de la pollution urbaine et d'atteindre un taux de collecte au niveau national de 65% semble être réalisable (OTV, 1997). Cette même source prévoit la construction de 9000 stations d'épurations, dont 80% pour des villes de moins de 2000 EH.

1.1.3.2 Obligations concernant la destination finale des boues

➤ **La filière agricole**

L'ambiguïté entre produit de fertilisation et déchet a été levée par le décret N° 97-1133 du 8 décembre 1997. Ce décret classe définitivement la boue comme un déchet, selon la loi du 15 juillet 1975. Le producteur de boues est l'exploitant des unités de traitement : il doit fournir l'assurance de l'innocuité des produits épandus et mettre en place une gestion professionnelle de la filière de recyclage agricole. Ce décret a été suivi par d'autres textes réglementaires:

- L'arrêté du 8 janvier 1998, sur l'épandage des boues de stations d'épuration qui précise les prescriptions techniques applicables ;
- La circulaire du 16 mars 1999, relative à l'épandage des boues de stations d'épuration urbaines fixe la responsabilité entière de l'exploitant de la station d'épuration.

Ces textes fixent de manières précises, et beaucoup plus sévèrement qu'auparavant, les conditions d'épandage et les teneurs minimums d'un grand nombre de polluants, tant organiques que métalliques. Enfin la directive « nitrate » du 12 décembre 1991, fixe les contraintes en matière de dose et de périodes d'épandage.

➤ **La mise en décharge**

Le stockage des déchets fait l'objet de réglementations spécifiques, notamment :

- la directive du Conseil du 26 avril 1999 (1999/31/CE) concernant la mise en décharge des déchets ;
- l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, modifié par l'arrêté du 31 décembre 2001 et l'arrêté du 3 avril 2002 ;
- La circulaire du 4 juillet 2002 relative aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés.

Actuellement, en France, il existe trois types de décharges:

- Site de classe 1: réserve aux Déchets Industriels Spéciaux susceptibles de contenir des éléments toxiques. Ces sites doivent être imperméables ;
- Site de classe 2: réserve aux déchets urbains (ordures ménagères) et aux déchets industriels assimilables aux déchets urbains ;
- Site de classe 3: réserve aux matériaux inertes de type gravats.

Pour l'instant, les boues sont dirigées sous certaines conditions de ratio avec les ordures ménagères vers les sites de classe 2. Le problème de la mise en décharge de boues pâteuses est la lixiviation. C'est pourquoi la loi 92-646 du 13 juillet 1992 prévoit, à partir du 2 juillet 2002, que les sites de classe 2 n'acceptent plus que les déchets dits ultimes. Est dit déchet ultime, « un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est pas susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ».

L'interprétation de ce texte pour les boues pose problème. En effet, s'agira-t'il d'une siccité limite, de la combustion totale de la matière organique? La directive 91-628 du 12 décembre 1991 relative aux déchets dangereux, précise que les boues ne pouvant être épandues sont des déchets dangereux. Il est prévu que les sites de classe 1 n'acceptent plus les boues classées comme déchets dangereux par cette directive.

➤ **L'incinération**

La réglementation sur l'incinération n'est pas spécifique au domaine des boues. Il s'agit d'installations classées et donc soumises à autorisation préfectorale. L'arrêté ministériel du 25 janvier 1991 incite les installations à s'équiper pour respecter les valeurs limites fixées par la directive CEE/89/369 du 8 juin 1989. Il est difficile de juger de l'impact qu'a l'apport de la boue sur le bilan des incinérateurs, ou même, du respect des normes lors de l'incinération spécifique.

➤ **Le séchage**

Les unités de séchage devront, dès juillet 2003, respecter la norme ATEX 137 99/92/EG (cette norme concerne la mise en place sur le marché des appareils et systèmes de protection destinés aux atmosphères explosives). En outre, chaque installation devra faire l'objet d'études de sécurité HAZOP (Hazard and Operability) et avoir été validée par un organisme agréé par l'INERIS.

I.1.4 Différentes filières de traitement des boues sur site

Les objectifs principaux d'une filière boue sont la réduction des volumes et des nuisances de la filière finale de valorisation. En effet, telles qu'elles ont été évacuées de la filière eau, les boues sont constituées à 90% d'eau, ce qui engendre des volumes de stockage conséquents. De plus, elles sont très fermentescibles donc dégagent rapidement des odeurs désagréables.

Les différentes étapes du traitement des boues ont pour but la réduction de la teneur en eau par épaissement, la réduction du pouvoir fermentescible par une phase de stabilisation et enfin une phase de déshydratation plus ou moins poussées avant stockage et valorisation.

La Figure I.3 ci-dessus représente le schéma général des différentes filières de traitement des boues.

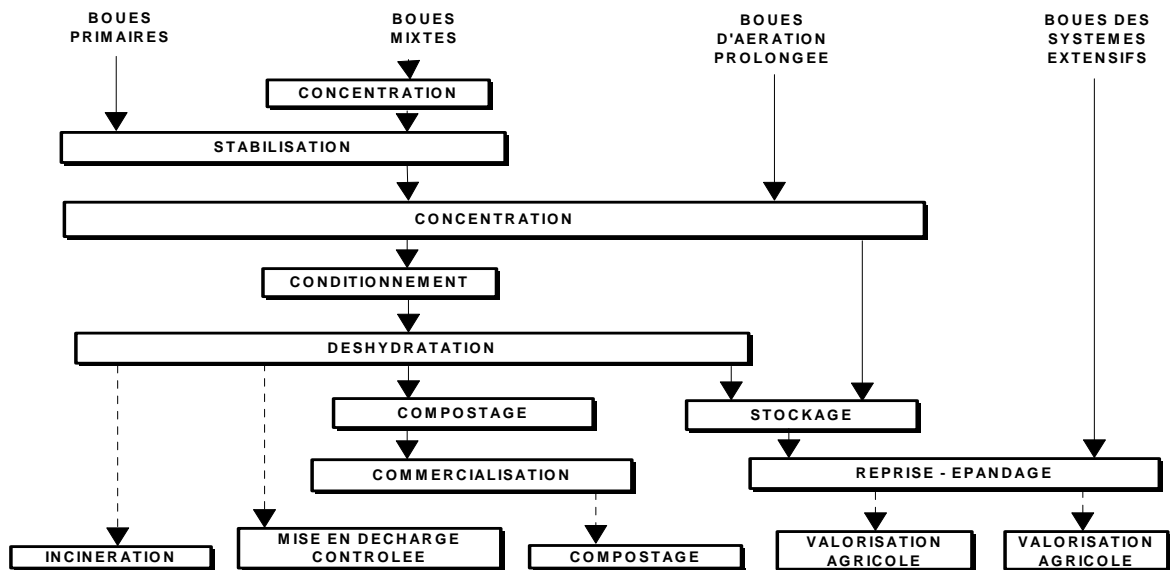


Figure I.3 Schéma général des différentes filières du traitement des boues

1.1.4.1 **Épaississement**

Si nous observons les modes d'extraction des boues des différents ouvrages de traitement d'eau nous pouvons constater que :

- la concentration des extractions des différents ouvrages de traitement d'eau fonctionnant en marche continue ou cyclique est faible et dépasse rarement 10 g/l (4 à 10 g/l en eau résiduaire urbaine) ;
- les ouvrages fonctionnant en chasse périodique donnent des boues plus concentrées mais l'élimination globale des MES entraîne systématiquement une dilution surabondante des fins de purges ;
- Différents moyens sont mis en oeuvre pour l'épaississement des boues. Ces moyens sont de deux ordres :
 - o épaississement par décantation ou épaississement statique;
 - o épaississement dynamique : flottation, égouttage, centrifugation.

Épaississement par décantation ou épaississement statique

L'épaississement se fait par décantation en piston des boues. La décantation est aidée par une herse à mouvement lent qui, en faisant rouler les particules de boues les unes sur les autres, favorise l'écoulement de l'eau interstitielle et l'évacuation des gaz occlus. Le tassement des boues est donc ainsi favorisé.

Epaississement par flottation

Le principe consiste à réduire la masse volumique apparente de la phase solide par adsorption ou absorption de bulles gazeuses pour en provoquer l'entraînement vers la surface avec une vitesse ascensionnelle qui, en modèle laminaire, sera donnée par la loi de Stokes.

Epaississement par égouttage

Différents dispositifs peuvent être utilisés (tambours, poches filtrantes, grilles d'égouttage), mais la grille d'égouttage est l'appareil qui allie à la fois simplicité d'emploi et fiabilité. Cet appareil à fonctionnement continu est placé directement au refoulement de la pompe d'alimentation en boues fraîches. La boue, préalablement floculée au polymère de synthèse, est épandue sur un champ horizontal de grille fine raclée en permanence par des lames en caoutchouc.

La concentration des boues augmente progressivement en avançant sur le champ de grille, le réglage est optimal lorsque la boue ne contient plus d'eau libre en fin de parcours. Le débit de la pompe à boue, de l'injection du polymère ainsi que la vitesse de raclage sont réglables. Le lavage de la grille est réalisé de façon cyclique au moyen de pulvérisation d'eau sous pression.

L'apport d'agent de floculation s'effectue à travers un mélangeur statique placé en aval de la pompe à boues. La consommation de polymère est relativement élevée (5 à 8 kg/tonne de MES) mais cette dépense demeure faible sur de petites stations, surtout eu égard aux avantages que présente cet épaississement :

- **soutirage direct de boues en excès** peu concentrées depuis la recirculation en boues urbaines;
- **réduction de 2 à 3 fois du volume de stockage des boues** avant leur reprise en agriculture;
- **réduction dans les mêmes proportions du coût de transport des boues.**

Epaississement par centrifugation

L'épaississement par centrifugation présente les inconvénients d'être lourds en investissement et en coût d'exploitation (consommation d'énergie 150 à 300 kWh/tonne de MES. Par contre, il a l'avantage de n'occasionner que peu de nuisances olfactives (car l'appareil est fermé) et

d'être très compact. L'épaississement obtenu est plus important que par flottation. Par ailleurs, sous peine d'avoir des rendements de capture et des débits alimentaires possibles faibles, l'emploi d'un polymère (1 à 2 kg/t MES) est indispensable. Nous risquons aussi en cas de fonctionnement sans polymère d'avoir une classification des boues avec départ de fines. La centrifugation consiste en une décantation accélérée par force centrifuge.

I.1.4.2 Stabilisation des boues

Les boues de stations, en grande proportion à caractère organique, sont instables dans la mesure où des fermentations s'y développent, qui sont à l'origine d'une mauvaise qualité des eaux et de nuisances olfactives. La stabilisation vise donc à réduire le taux de matières organiques de manière à empêcher ou tout du moins limiter les fermentations.

La stabilisation, qui n'est pas effectuée de manière systématique, a pour but d'éviter une reprise de la fermentation des boues qui entraînerait des nuisances olfactives. Dans le même temps, le taux d'agents pathogènes est réduit dans des proportions qui varient selon le type de traitement. On distingue les stabilisations biologique, chimique et thermique. La stabilisation biologique peut être atteinte par méthanisation (digestion anaérobie mésophile), et stabilisation aérobie thermophile. Le traitement chimique peut s'effectuer par un chaulage ou une stabilisation aux nitrites. Le séchage (siccité supérieure à 90%) quant à lui constitue une forme de stabilisation thermique (Apeša, 2000).

La stabilisation par digestion anaérobie

La stabilisation par voie anaérobie, appelée digestion anaérobie, est une fermentation bactérienne réalisée dans une cuve appelée digesteur. Les bactéries dégradent la matière organique en dioxyde de carbone et en méthane. Cette technique s'applique aux boues épaissies et a pour objectif la réduction de la masse de boue en dégradant une partie des MV (et donc des MS).

La digestion agit de la manière suivante sur les caractéristiques des boues :

- disparition de 1/3 environ des MES boueuses (45 à 50 % des matières organiques disparaissent), d'où la production d'une boue non putride et moins organique;
- minéralisation de l'azote organique : eau interstitielle riche en NH_4^+ (1 à 2 g/l);
- boue plus homogène (disparition de corps fibreux) et plus diluée.

La stabilisation aérobie thermophile

C'est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie avec dégagement de chaleur et production de CO₂. Pour être optimale, la réaction doit se dérouler à une température comprise entre 50 et 55°C.

Les applications actuelles de ce procédé visent deux objectifs différents :

- réaliser un prétraitement (pasteurisation et chauffage) avant une digestion anaérobie (temps de séjour de 18 à 36 heures). Ceci se rencontre essentiellement en Suisse et en Allemagne ;
- opérer en 6 à 10 jours un traitement de stabilisation des boues avant leur évacuation. Cette application n'est pour l'heure que peu répandue.

La stabilisation chimique

Cette technique de stabilisation des boues comporte une opération consistant à ajouter des réactifs chimiques qui permettent de diminuer le pouvoir fermentescible de la boue. Cet apport ne modifie pas la quantité de matières biodégradables mais agit essentiellement par action bactéricide. Parmi les nombreux produits susceptibles d'inhiber le développement bactérien, la chaux est celui qui s'impose économiquement (Baudez, 2001). Les boues, ayant subies une stabilisation chimique, sont assez favorables en déshydratation, mais souvent difficiles à flocculer à cause des pH élevés (plus de 12).

I.1.4.3 Conditionnement et déshydratation des boues

L'épaississement naturel des boues est limité par des phénomènes physiques. Des forces électriques de répulsion entre les particules de boues empêchent leur rapprochement et en conséquence ne permettent pas l'évacuation d'une part importante de l'eau interstitielle. Pour rendre exploitables les différents équipements de traitement des boues, il est donc nécessaire de procéder à la floculation de celles-ci pour en casser la stabilité colloïdale et pour augmenter artificiellement la taille des particules. C'est le conditionnement qui a recours à des procédés de nature physique (thermique), mais plus souvent de nature chimique (ajout de réactifs minéraux ou de polymères de synthèse). Un conditionnement adéquat de la boue est la base du bon fonctionnement de l'atelier de traitement des boues.

Conditionnement par ajout de réactifs minéraux

C'est le conditionnement adapté à la déshydratation sur filtres presses, appareils mettant en oeuvre une filtration à travers un gâteau en formation avec un support filtrant à mailles

fines (100 à 200 μm). Ce conditionnement nécessite l'emploi de réactifs minéraux conduisant à la formation de floccs fins, mais mécaniquement stables.

Pour des raisons d'économie et d'efficacité, on emploie le plus souvent des sels de fer. Sur des boues organiques, l'ion Fe^{3+} est de loin le plus efficace. L'action de ces sels de fer est double :

- action coagulante (leur charge est souvent opposée à celle des particules boueuses);
- action floculante (formation d'hydroxydes complexes hydratés tels que $(\text{Fe}(\text{OH})_3, 6\text{H}_2\text{O})_n$ qui joue le rôle d'un polymère minéral).

Une introduction de chaux consécutive à celle du sel de Fe est toujours nécessaire pour améliorer la filtrabilité :

- $\text{pH} > 10$, pH de floculation correcte;
- précipitation d'un certain nombre de sels de Ca favorables à la filtration;
- apport d'une charge minérale dense.

Conditionnement aux polyélectrolytes

C'est le conditionnement adapté à la déshydratation sur filtres à bandes presseuses, centrifugeuses, parfois en flottation, épaissement par égouttage et, sous certaines conditions, sur filtres presses .

Les polyélectrolytes ont pour effet :

- une floculation très marquée par la **formation de ponts entre particules** grâce aux longues chaînes ramifiées. Cette floculation est renforcée par une action coagulante dans le cas de polymères cationiques;
- une forte **diminution de la résistance spécifique de la boue floculée** avec une augmentation de l'hydrophilie particulaire et du coefficient de compressibilité.

Un grand nombre de polyélectrolytes est à disposition. Il faut donc effectuer des tests simples de floculation pour déterminer le produit le mieux adapté à la boue à traiter. Les polymères cationiques sont surtout efficaces pour le conditionnement des boues organiques, les anioniques pour les boues d'eau potable.

Conditionnement thermique

Il consiste à chauffer les boues entre 150 et 200 °C pendant 30 à 60 minutes selon le type de boues et la filtrabilité désirée. Au cours de cette "cuisson", les gels colloïdaux sont détruits et l'hydrophilie particulaire diminue. On assiste également à 2 phénomènes simultanés :

- **solubilisation de certaines MES** (hydrolyse de l'amidon avec formation de sucres) et ammonisation de l'azote organique;
- **précipitation de quelques matières dissoutes.** Selon le type de boues, la cuisson solubilise 20 à 40 % des MO et conduit à des jus présentant des DBO₅ de 3000 à 6000 mg/l. L'azote est présent dans la phase liquide à des taux relativement élevés (0,5 à 1,5 g/l en NH₄⁺), mais le phosphore ainsi que les métaux restent précipités dans les boues.

Il existe principalement deux grandes familles de techniques de déshydratation (Bongiovanni, 1998) la décantation (centrifugation) et la filtration (filtres à bande presseuse ou filtre presse). Le choix de l'une ou de l'autre de ces techniques dépend du type de boue à déshydrater, des performances recherchées, de la disponibilité et de la technicité de la main d'œuvre, mais aussi du type d'équipement utilisé en épaissement préalable. On peut également citer la déshydratation sur lits de séchage en marge de ces deux grandes familles.

I.1.4.3.1 Déshydratation par centrifugation

La centrifugation sera utilisée sur des boues flocculées aux polymères de synthèse. C'est une technique de séparation de l'eau de la boue sous l'effet d'une accélération de plusieurs milliers de gramme. Les centrifugeuses sont constituées d'un bol tournant à grande vitesse et d'une vis racleuse hélicoïdale coaxiale au bol qui permet l'extraction des boues déshydratées en continu (Figure I.4) . L'alimentation peut être centrale ou tangentielle. La circulation de la suspension et de la boue déshydratée peut s'effectuer à co- ou contre courant. D'autres variables de type constructif (géométrie du bol, rapport longueur /diamètre, angle de conicité,...) peuvent également distinguer les différentes machines commercialisées. On obtient ainsi une siccité de l'ordre de 19 - 23 % (boues biologiques).

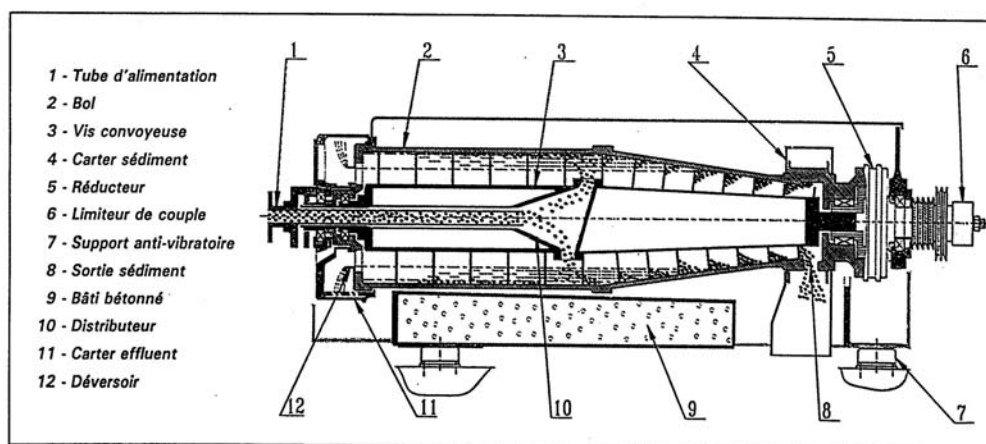


Figure I.4 Schéma d'une centrifugeuse

I.1.4.3.2 Filtration

La filtration peut être menée sous vide ou sous pression. Dans le premier cas, les filtres sont des tambours rotatifs ouverts. Dans le second cas, la filtration peut être menée dans un filtre à bandes ou un filtre à plateaux.

Filtre à bandes presseuses

Le processus de filtration comporte toujours les étapes suivantes:

- floculation avec des polyélectrolytes dans des flocculateurs à faible temps de séjour ;
- drainage de la boue floculée ;
- pressage de la boue drainée: la boue est emprisonnée entre deux toiles filtrantes qui forment un coin et la comprime progressivement. L'efficacité de la déshydratation dépend de la pression effective appliquée sur la boue et aussi du temps de pressage. On obtient une siccité de l'ordre de 14 –18 % (boues biologiques).

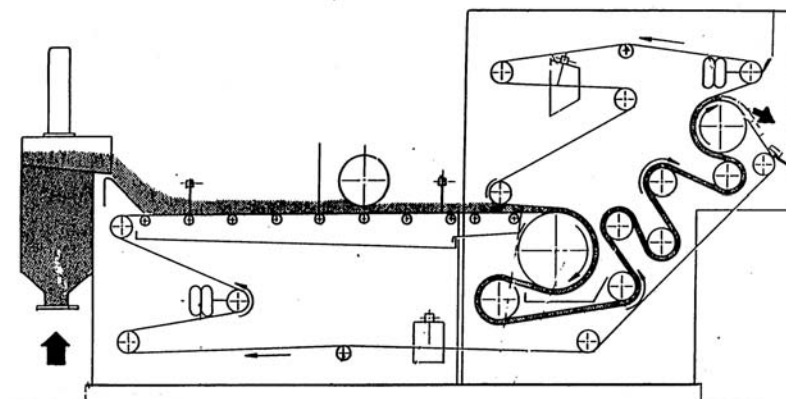


Figure I.5 Schéma d'un filtre bande

Filtre presse

Le filtre presse est un appareil qui permet de filtrer des boues en chambre étanche sous des pressions de l'ordre de 5 à 15 bars. Le filtre à presse reçoit les boues envoyées sous pression sur une série de toiles filtrantes retenant les sédiments à la manière d'un tamis. Il se crée peu à peu un bouchon augmentant la pression en amont du filtre ; à ce moment les toiles sont séparées et les résidus éliminés. On obtient une siccité de l'ordre de 25- 28% pour un conditionnement polymère. Pour des boues chaulées, selon le dosage de la chaux, on peut atteindre des siccités de l'ordre de 30 à 35%.

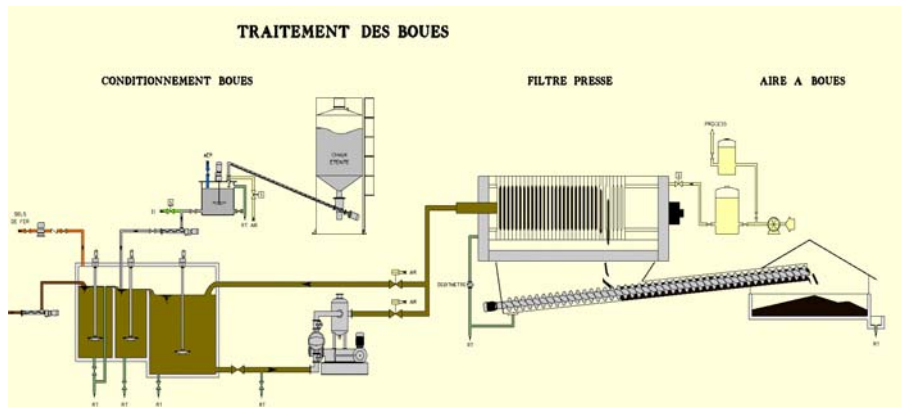


Figure I.6 Schéma d'une filière de traitement par filtre presse

I.1.4.3.3 Lits de séchage

Lits de séchages (non plantés)

Cette technique se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation naturelle et drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sables et de graviers, sur une épaisseur d'environ 30cm de boue. On obtient une siccité de l'ordre de 30% après un temps de séjour de trois semaines mais dépend des conditions météorologiques (Cemagref et Satese, 1991).

Lits de séchages plantés de roseaux

Cette technique se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine drainage et évapotranspiration. En effet les roseaux de types phragmites plantées sur un massif filtrant constitué de différentes couches de sable de granulométries différentes se reposent sur un radier, qu'ils colonisent en développant un tissu complexe de racines (rhizomes) assimilable à un réseau de drainage (OTV, 1997). On obtient une siccité de l'ordre de 20 à 30% au bout de 10 ans et dépendant des conditions météorologiques.

I.1.4.3.4 Séchage thermique

Le séchage thermique des boues revêt un effet temporaire de stabilisation (par absence d'eau), persistant aussi longtemps que les boues ne sont pas réhumectées. Pour des raisons de coût, le séchage se pratique sur des boues déjà déshydratées mécaniquement. On peut obtenir une siccité de l'ordre de 90-95%. Les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés.

I.1.4.3.5 Oxydation thermique

L'oxydation thermique est la filière qui répond le mieux aux critères de réduction du volume et d'hygiénisation. La boue est complètement minéralisée et les germes pathogènes sont réduits. Quelle que soit la technique utilisée, les traitements font appel à des réactions de combustion, qui mettent en œuvre des phénomènes d'oxydation, ou bien à la dégradation de la MO par la chaleur sans oxydation. Il existe deux grands principes d'oxydation (OTV,1997): en phase gazeuse (incinération) et en phase liquide (oxydation par voie humide). Deux autres techniques sont en développement: la thermolyse ou la pyrolyse et la gazéification.

I.1.5 Destination finale des boues et contraintes afférentes

Au niveau européen, les principales filières de gestion des boues sont la valorisation en agriculture, la mise en décharge et l'oxydation thermique par incinération ou par voie humide. Le rejet en mer est interdit depuis 1998. Les boues sont également utilisées dans de moindres quantités comme combustible pour les cimenteries et les briqueteries (Gross, 1993) ou sont épandues sur des sols non agricoles (essais en zones forestières). La répartition moyenne entre les trois filières principales diffère quelque peu selon les sources et l'année considérée, comme indiqué dans le Tableau I.4.

Tableau I.4 Importance des filières de valorisation des boues au niveau européen

VALORISATION AGRICOLE	MISE EN DECHARGE	INCINERATION	REJETEN MER	
40%	38%	11%	-	(ADEME et al.,1999)
50-55%	30%	15-20%	-	(Apeasa, 2000)
39,5%	40,2%	10,6%	9,7%	(OTV,1997) Données décennie 1990

Suite à la politique de l'Union Européenne en matière d'enfouissement de déchets urbains municipaux, la mise en décharge des boues devra être abandonnée au profit de voies d'élimination écologiquement et économiquement durables. À moyen terme, il semble donc que la valorisation agricole et la valorisation énergétique (incinération et oxydation par voie humide) soient les deux voies qui subsisteront. De nouvelles pistes sont également explorées. Parmi celles-ci, citons la gazéification des boues séchées.

1.1.5.1 Valorisation agricole

Cette forme de valorisation bénéficie d'un savoir faire important du fait d'une pratique répandue et ancienne, mais aussi encadrée par une réglementation sans cesse renouvelée. D'autre part les boues possèdent une forte valeur agronomique. Elles contiennent en effet des éléments fertilisants naturels comme l'azote et le phosphore, des oligo-éléments comme le zinc et le cuivre, des matières organiques et peuvent jouer un rôle d'amendement lorsqu'elles sont chaulées. Elles contiennent donc la plupart des éléments présents dans les engrais de synthèse (Briscoe et al., 1994).

Cependant cette filière est liée à des contraintes : la première contrainte est **la réglementation** qui, dans le souci d'apporter des garanties sanitaires maximales aux usagers et aux consommateurs, exige que les boues soient un produit de qualité. Aussi le producteur doit être en mesure de fournir un produit dont les critères agronomiques sont parfaitement connus. Sur le plan sociologique, les boues d'épuration souffrent du **climat de méfiance**, vis à vis des produits agroalimentaires, qui s'est installé depuis l'apparition de la maladie de la «vache folle ». Les entreprises agroalimentaires mettent actuellement en place des cahiers de charges de plus en plus restrictifs vis à vis des cultures fertilisées à partir des épandages de boues.

Enfin, l'épandage agricole des boues subit la concurrence des sous-produits de l'agriculture : les déjections animales et les sous-produits des industries agro-alimentaires.

L'épandage après **compostage** constitue une solution alternative à l'épandage direct. En effet, le compostage dégrade les matières organiques fermentescibles et donne un produit riche en éléments fertilisants, mais aussi en matières humiques qui permet une bonne revégétalisation des sols appauvris par les engrais minéraux.

Qualité des boues

On distingue trois familles d'éléments ou composés pouvant altérer la qualité des boues destinées à l'épandage:

- les éléments traces métalliques et plus particulièrement les métaux lourds (Cd, Hg, Pb). Certains de ces métaux se classent dans la catégorie des oligo-éléments (Zn,Cu) et sont utiles à la croissance végétale. Cependant, en teneurs trop élevées, ils deviennent toxiques. Quant aux métaux lourds, les risques pour la santé sont aujourd'hui bien connus. Les teneurs admises sont précisées dans les textes réglementaires ;

- les polluants organiques : pesticides, détergents, PCB, HAP. Sauf cas particulier (pollution, accident), les teneurs couramment observées restent faibles ;
- les micro-organismes pathogènes : bactéries, parasites, virus, champignons.

D'un point de vue épidémiologique, les seuls risques majeurs pour l'homme et les animaux sont la présence de salmonelles ou d'œufs de ténia. Pour faire face à ces risques sanitaires (ainsi qu'aux nuisances olfactives), les directives imposent un traitement afin de réduire le pouvoir fermentescible des boues et de les hygiéniser.

Nature et localisation des sols

Les quantités de boues épandues sont déterminées en fonction de leur composition et de celle du sol. La proximité de nappes phréatiques, sources ou rivières est bien entendu prise en compte avant tout épandage. Des distances minimales par rapport à ces zones sensibles sont exigées. En outre, l'épandage n'est pas permis en cas de gel, de fortes pluies ou sur des sols saturés d'eau pour éviter tout ruissellement ou percolation rapide vers des nappes.

I.1.5.2 Valorisation énergétique

I.1.5.2.1 Incinération

L'incinération des boues doit permettre l'oxydation complète de leur fraction organique, à 800-900°C, en atmosphère oxydante (excès d'air). Différentes mises en œuvre sont possibles.

Incinération dans un four spécifique

Cette solution est adoptée par des stations qui produisent de grandes quantités de boue mais peut aussi être le résultat d'une association de plusieurs stations d'épuration qui valorisent leurs boues conjointement.

Co-incinération avec ordures ménagères

Cette option est envisagée lorsque le volume de boue ne justifie pas la construction d'un four et qu'un incinérateur ménager est situé à proximité (Surh, 2002). La capacité thermique du four doit être telle qu'elle permet l'introduction de boues. La boue sous forme pâteuse (15 à 30% MS) est plutôt considérée comme un fluide de refroidissement alors qu'une boue de teneur en matières sèches supérieure à 60% possède un pouvoir calorifique inférieur proche des ordures et fait office de combustible.

I.1.5.2.2 Oxydation par voie humide (OVH)

Les boues épaissies (3 à 4% MS) sont éliminées par oxydation à chaud (220- 230°C) en présence d'air ou d'oxygène pur, sous pression (4000 à 13000 kPa) et en milieu humide. Après traitement on obtient les sous-produits inertes suivants:

- un résidu minéral à 97% pouvant être recyclé dans les bétons ou la fabrication de tuiles ;
- une solution aqueuse (5 à 10 g/l DCO) réinjectée en tête de station ;
- des gaz résiduels ne nécessitant aucun traitement complexe avant rejet.

L'oxydation par voie humide a été validée à l'échelle pilote et sur quelques installations à grandeur réelle. Cette technique pourrait constituer une alternative à l'incinération pour un coût global de traitement généralement inférieur (OTV, 1997). Cependant, des difficultés technologiques liées à la corrosion, à la précipitation de sels inorganiques et au travail sous pression retardent son développement industriel.

I.1.5.2.3 Thermolyse

La thermolyse ou pyrolyse des boues (> 85% MS) est obtenue en l'absence d'air ($O_2 < 2\%$), à moyenne (400-500°C) ou haute (500-700°C) température. Cette distillation thermique nécessite un apport externe d'énergie et produit du gaz et du coke. Les gaz de pyrolyse (PCI de 10 à 20 MJ/Nm³) sont en général brûlés et fournissent une part de l'énergie requise par les processus endothermiques (Antonini, 2000). Quant au coke, il peut être utilisé comme combustible secondaire. En fonction de la composition initiale des boues, une épuration du coke peut s'avérer nécessaire. En effet, la charge polluante (métaux lourds, chlore,...) se retrouve alors concentrée dans le coke.

I.1.5.2.4 Gazéification

La gazéification vise la conversion totale de la charge organique en gaz combustible. Le carbone est gazéifié par la réaction de Boudouard et/ou par la réaction de gaz à l'eau pour donner d'une part un gaz combustible et un résidu inerte d'autre part. La conversion est réalisée en défaut d'air global par combustion de la boue (> 85% MS) à l'air, à l'air enrichi ou à l'oxygène. De la vapeur d'eau est parfois additionnée à l'agent gazéifiant. Les températures s'élèvent à 900-1100°C en cas d'utilisation d'air et à 1000-1400°C lors de l'emploi d'oxygène. La gazéification à l'air fournit un gaz pauvre (PCI de 4 à 7 MJ/Nm³), tandis que

l'utilisation d'oxygène conduit à la production d'un gaz plus riche (PCI de 10 à 20 MJ/Nm³) par suppression du ballast d'azote (Antonini, 2000).

I.1.6 Place du séchage dans une optique valorisation

Une opération de séchage des boues après déshydratation mécanique présente différents atouts tant en amont de la valorisation agricole que de l'incinération. La siccité visée par le séchage dépend de l'application. En épandage, on a tendance à pousser le séchage à son terme, alors qu'un séchage partiel est parfois recherché pour l'incinération.

1.1.6.1 Séchage et épandage

Une opération de séchage avant épandage présente de nombreux intérêts et permet notamment de rencontrer les exigences européennes en matière d'hygiénisation et de stabilisation.

Ces intérêts sont les suivants :

- diminution du volume et de la masse par élimination de l'eau. Ces réductions influencent directement les frais de stockage, de transport et de manutention. Les boues granulées, en particulier, ne nécessitent pas de maintenance particulière durant le stockage ;,
- concentration des éléments nutritifs au sein du solide sec ;
- stabilisation (réduction du pouvoir fermentescible), réduction des odeurs lorsque la siccité est supérieure à 90%. A ces siccités, la faible activité de l'eau inhibe tout développement bactérien ;
- hygiénisation par destruction des micro-organismes pathogènes si la température est suffisamment haute (30 min à 70°C suffisent) ;
- passage d'une texture pâteuse à une texture solide qui facilite l'épandage.

1.1.6.2 Séchage et valorisation énergétique

L'oxydation par voie humide mise à part, tous les procédés de valorisation énergétique utilisent de la boue partiellement ou complètement séchée. L'intérêt principal du séchage est l'augmentation du pouvoir calorifique. En effet, le PCI d'une boue déshydratée à 20% MS est voisin de 1,25 MJ/kg alors que celui d'une boue séchée à 90% MS se situe entre 14,5 et 16,8 MJ/kg. Un séchage partiel jusqu'à des siccités comprises entre 30 et 45% permet d'obtenir

l'auto-combustibilité des boues et trouve son application avant incinération dans un four spécifique. Un séchage mené de manière à atteindre 60 à 90% de matières sèches permet d'élever le PCI des boues au niveau de celui des ordures ménagères (~8400 kJ/kg), ce qui est intéressant pour la co-incinération. De cette façon, l'introduction de boues séchées ne perturbe pas le fonctionnement du four. En ce qui concerne la pyrolyse ou la gazéification, le pré-séchage de la boue (85% MS) est généralement intégré au procédé et est obtenu dans un sécheur en amont.

Quelle que soit la filière de valorisation, l'étape de séchage en aval de la déshydratation présente des avantages certains et est même le plus souvent indispensable. Compte tenu des quantités croissantes de boues à gérer dans le futur, la conception rationnelle des unités de séchage et le choix des conditions de traitement adaptées à chaque type de boue deviendront des étapes essentielles au développement de filière de traitement optimales. C'est loin d'être le cas actuellement. Une meilleure compréhension du procédé est indispensable et passe nécessairement par la recherche scientifique.

Dans ce contexte, depuis quelques années, des laboratoires européens conscients des enjeux et du manque d'informations scientifiques disponibles ont entrepris des recherches fondamentales dans le domaine. Ces nouveaux développements sont bien illustrés par cinq thèses publiées de 1998 à 2006 :

Bongiovanni (1998) étudie l'influence de l'étape de déshydratation sur le séchage convectif de boues synthétiques (suspension de PVC, bentonite), et de boues urbaines.

Carrère-Gée (1999) envisage le séchage en couche mince par ébullition de boues d'hydroxyde d'aluminium et développe une méthode pour la conception et le dimensionnement du procédé.

Ferrasse (2000) développe des outils pour la caractérisation et la compréhension du comportement de boues d'épuration dans un procédé de séchage conductif avec agitation.

Léonard (2003) aborde le séchage convectif d'un échantillon individuel de boue obtenu par extrusion suivi de sa texture.

Botramamy (2006) traite sur la modélisation et l'identification d'un procédé de commande d'un séchoir de type serre agricole pour boue d'épandage.

I.2 Contexte de développement du séchage solaire des boues

I.2.1 Historique de développement des procédés

L'utilisation des lits de séchage recouverts de films de polyane dans les années 80, pour tenir l'eau de précipitation à l'écart, constituait déjà un procédé précurseur du séchage solaire. Le principe utilisé consistait alors à :

- écarter les eaux de pluie ;
- créer un courant d'air orientable à l'aide de vanelles (le taux d'évaporation étant augmenté par l'effet de serre): l'ouverture des côtés favorisant les échanges d'air, donc de l'eau évaporée, ce qui permettait d'éviter une atmosphère saturée empêchant l'évaporation de l'eau de se poursuivre ;
- tourner régulièrement la boue pour évacuer l'eau capillaire emprisonnée dans les boues.

Le principe des procédés actuels de séchage solaire des boues résiduaires consiste à utiliser l'effet de serre pour à la fois réchauffer l'air intérieur et les boues de manière à augmenter les vitesses de séchage. La puissance thermique transmise par convection, et rayonnement, réchauffe les boues et provoque l'évaporation de l'eau qu'elles contiennent.

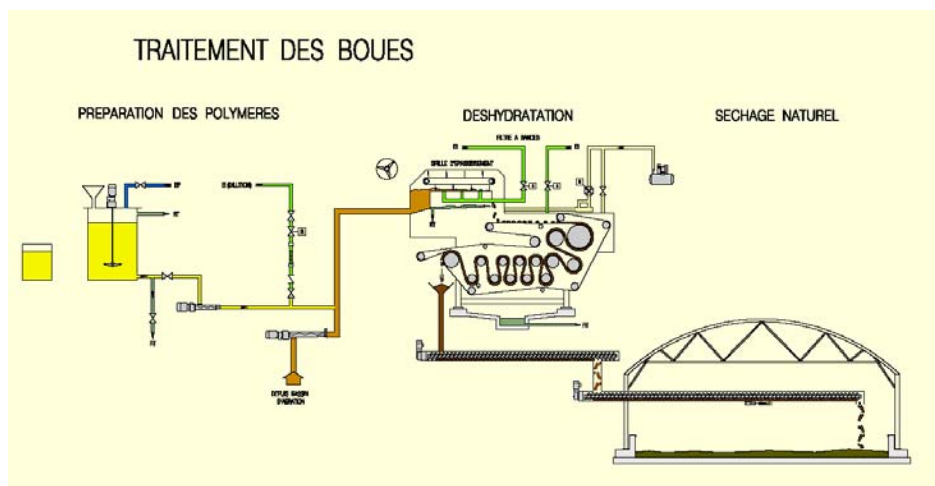


Figure I.7 Schéma d'une filière complète de séchage solaire sous serre

Les serres utilisées sont en général du même type ou dérivent des serres horticoles. Les principales différences entre les procédés proposés concernent la gestion du renouvellement de l'air (serres ouvertes ou fermées, cheminées, présence de ventilateurs ou brasseurs d'air,

etc....) et le mode de disposition (couches ou andains) et de retournement des boues (systèmes rotatifs, cochon électrique,).

Ces procédés se sont développés en Europe, notamment en Allemagne (procédé IST) au cours des années 1990 et sont en pleine expansion en France actuellement. C'est l'exemple de Heliantis avec le procédé IST proposé par Degrémont, Solia avec le procédé Soliamix proposé par Veolia....

I.2.2 Avantages du séchage solaire

Système adapté pour les stations de petites et moyennes capacités de moins de 100.000 EH, le séchage solaire s'est rapidement imposé comme une solution efficace permettant de répondre aux attentes des collectivités dans le respect des contraintes réglementaires, en offrant un choix multiple de débouchés pour le traitement des boues d'épuration.

Il permet:

- la réduction du volume (les volumes de boues sont réduits de 3 à 5 fois): l'influence est directe sur le coût de transport et sur le stockage ;
- l'hygiénisation : les températures et les temps de séjour entraînent généralement l'élimination des micro-organismes au cours séchage ;
- la stabilisation : la diminution de la teneur en eau, rendant toute activité biologique impossible, stabilise la boue sèche ;
- la réduction des odeurs émises : le stockage de la boue sèche n'engendre pas de problèmes d'odeurs, contrairement à celui de la boue fraîche ;
- l'augmentation du pouvoir calorifique des boues qui peut être intéressant en vue d'une incinération ;
- la mise en forme accompagnant le séchage : une mise en forme (granulée) de la matière séchée est souvent possible, facilitant transport et manutention ;
- un bilan environnemental positif puisqu'il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre, de plus la consommation énergétique n'est que de 20 à 80 kWh électriques par tonne d'eau éliminée (contre 700 à 1000 kWh thermiques/t d'eau évaporée - 70 à 120 kWh électriques / t d'eau évaporée pour les procédés conventionnels de séchage thermique).

Ce procédé réussit à convaincre bon nombre de collectivités grâce à ses très bonnes performances, comparables à celles du séchage thermique poussé (siccité finale comprise entre 60 et 80 %), et à un moindre coût en investissement, mais aussi grâce aux faibles coûts de fonctionnement qu'il engendre. En effet, les installations fonctionnent en mode entièrement automatisé, sans nécessiter de surveillance permanente, ce qui leur confèrent une grande souplesse d'utilisation et d'exploitation par l'exploitant. Aucune manipulation dans la serre n'est nécessaire grâce aux systèmes de retournements de boue; les exploitations ne requièrent que quelques heures de main d'œuvre par semaine (ou par jour, selon les périodes de l'année) pour acheminer et évacuer les boues.

I.2.3 Contraintes du séchage solaire

Le séchage solaire dépend fortement des conditions climatiques et atmosphériques. En effet en période hivernale la serre est souvent utilisée en lieu de stockage. Ce système nécessite de la place (une parcelle ensoleillée) et du temps pour que la boue puisse sécher à la siccité désirée. En terme d'exemple:

- la station d'épuration de Brumath (67) d'une capacité de 21 000 EH, possède 2 serres de dimension 960m² chacun (procédé Heliantis) ;
- la Station d'épuration de Forbach (57) d'une capacité de 70 000 EH possède également deux serres de 250 et 4 800 m² (procédé Solia).

Le séchage solaire présente également des contraintes par rapport aux odeurs générées. Pour un site situé à proximité d'habitations, les émissions d'odeurs lors du séchage peuvent être source de nuisances plus ou moins importantes selon la direction et la force des vents dominants et la présence ou non d'un dispositif de traitement de l'air.

I.2.4 Problématique actuelle du séchage solaire

Le séchage solaire sous serre des boues est une technique toute récente où la problématique industrielle bute sur deux points clefs: le dimensionnement du procédé et une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques de la boue.

Concernant le premier point, le séchage solaire sous serre implique un bon transfert thermique à l'intérieur de la serre favorisant l'évaporation. A l'heure actuelle, le

dimensionnement et les méthodes de conceptions des unités sont assez empiriques. Un outil prédictif capable de guider le concepteur serait un atout majeur.

Le second point important concerne la caractérisation de la boue en vue du séchage. De ce point de vue, la notion d'eau libre - eau liée, qui permet d'évaluer la disponibilité de l'eau contenue dans le matériau à sécher, est fondamentale en séchage. L'une des méthodes permettant de mesurer cette grandeur est la mesure d'isothermes de sorption. Outre la quantité d'eau libre et d'eau liée, cette méthode permet aussi de déterminer une seconde grandeur intéressante pour le dimensionnement, la teneur en eau minimale pouvant être atteinte par séchage.

I.3 Différents procédés de séchage solaire

Technique empruntée aux industriels céréaliers, le séchage solaire est désormais appliqué au séchage des boues urbaines. Ce procédé consiste en un ensemble de serres qui, en piégeant le rayonnement solaire, permettent d'augmenter la température ambiante et d'évaporer l'eau interstitielle contenue dans les boues. En hiver, lorsque l'ensoleillement est faible, les serres permettent alors de stocker les boues à l'abri des événements climatiques (pluie et froid), préjudiciables à leur séchage. Plusieurs systèmes ont été développés pour permettre d'améliorer le taux d'évaporation. Ces dispositifs concernent essentiellement:

- la ventilation forcée de la serre à un débit élevé (taux de renouvellement de $10 \text{ V.V}^{-1}.\text{h}^{-1}$ minimum) afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide et vicié vers une unité de désodorisation ;
- le retournement automatisé des boues. Ce qui doit permettre un brassage régulier et uniforme pour renouveler les surfaces d'évaporation, et une aération de la couche de boues afin de limiter les réactions de fermentation anaérobie, sources d'importantes nuisances olfactives ;
- le chauffage de l'air ambiant ou du radier en vue de réduire les surfaces de séchage à mettre en œuvre. Ce type de dispositif n'est généralement proposé que pour les très grandes installations, qui ont la possibilité de recycler les énergies issues d'autres procédés épuratoires comme sources de chauffage de la production de boues.

Il n'existe pas de règles générales de conception du procédé. Chaque concepteur dispose de sa technologie.

I.3.1 Géométrie et dimensionnement des serres

La serre est constituée en général de parois en matière plastique transparente, ou en verre: elle est utilisée pour maximiser l'effet serre. Elle est comparable aux serres utilisées en agriculture. Bien qu'il n'existe pas de règles générales. La surface utile de séchage est calculée sur la base de la capacité d'évaporation des boues, de paramètres dépendant essentiellement de la saison et de la localisation géographique. En valeur guide, il peut être retenu une capacité évaporatoire de l'ordre d'une tonne par mètre carré de serres, impartie au séchage. Le sol de la serre doit être imperméabilisé, et drainé: en général il s'agit d'une couche de béton. La largeur standard des serres, est comprise entre 9 et 10 m. Les boues sont soit stockées sur de faibles hauteurs, quelques dizaines de centimètres (entre 20 et 50 cm) compatibles avec la taille des retourneurs ou alors disposées en andains. La hauteur de la serre doit être conçue afin de permettre l'entrée et la circulation aisée d'un chargeur.

Il existe 2 types de serre dont le choix dépend des conditions d'installation et des garanties demandées:

- La serre ouverte

La serre ouverte a des ouvertures en partie basse et en partie haute afin de favoriser la convection naturelle (cas typique des serres horticoles) et est démunie de porte.

La gestion de l'atmosphère dans la serre est assurée par convection naturelle. Le taux de renouvellement de l'air dans la serre n'est pas parfaitement maîtrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet de gérer le débit de ventilation dans la serre.

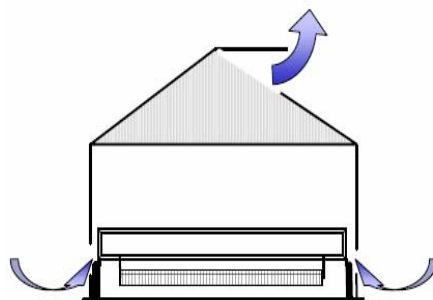


Figure I.8 Exemple de serre ouverte

- La serre fermée

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
APPROCHE GENERALE DES PROCEDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES

La serre fermée ne contient aucune ouverture libre. La ventilation de la serre est exclusivement forcée. Celle-ci est effectuée par des ventilateurs situés en pignon ou par une cheminée dans le cas d'un environnement "sensible".

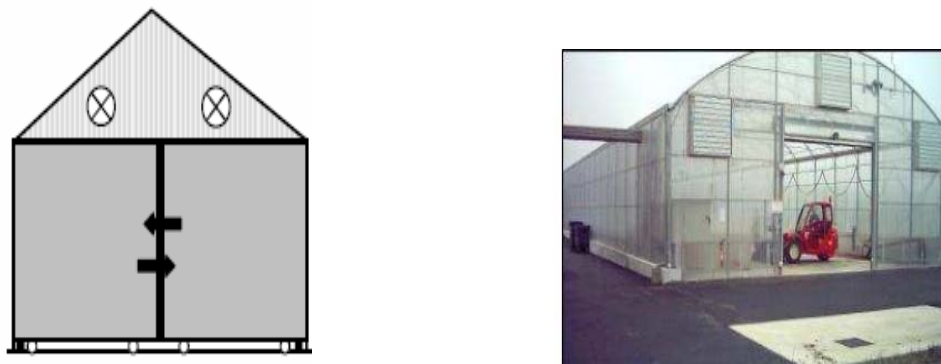


Figure I.9 Exemple de serre fermée - Extraction en pignon

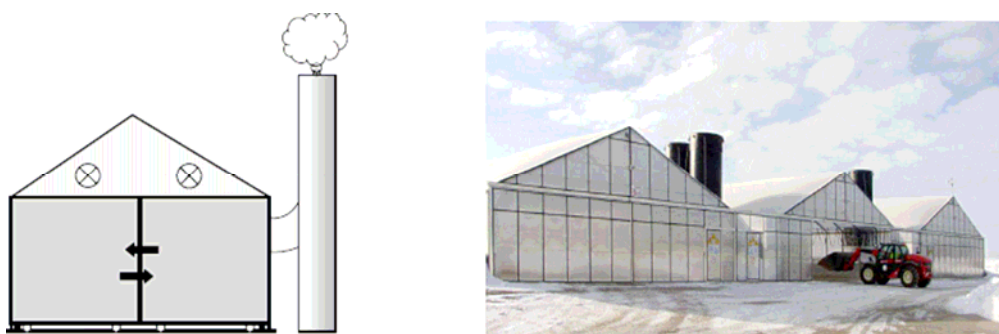


Figure I.10 Exemple de serre fermée - Extraction par cheminée

I.3.2 Alimentation de la serre

L'alimentation des serres dépend du procédé utilisé pour le retournement de la boue. Il existe deux types d'alimentation, l'alimentation discontinue utilisée par le système Thermo-system et l'alimentation continue pratiquée par le système IST, Soliamix et Huber.

Le remplissage et la vidange des serres sont fait à l'aide:

- soit d'un chargeur mécanique automatisé: dans ce cas, les boues sont introduites à une extrémité de la serre et nécessitent d'être étalées et poussées vers l'autre extrémité ;
- soit d'une pompe gaveuse: les boues sont déposées à intervalles réguliers sur toute la longueur de la serre. Dans ce cas, et compte tenu de la viscosité des boues entrantes, un

dispositif de lubrification consistant en une injection de polymère est couramment utilisé dans le collecteur de distribution, pour faciliter l'écoulement des boues, et ce sur toute la longueur de distribution.

I.3.3 Ventilation et désodorisation

Afin de réduire les consommations électriques, les ventilateurs peuvent être proposés à vitesse variable et/ou asservis à divers capteurs de mesure différentielle de l'humidité et de la température, à l'intérieur et à l'extérieur de la serre.

Le confinement de la serre permet en outre de canaliser les flux d'air vicié vers une unité de désodorisation. Afin de conserver le caractère rustique et écologique du procédé solaire, il est ordinairement proposé une désodorisation par bio-filtration.

I.3.4 Retournement et fermentation des boues

Le retournement des boues est réalisé quotidiennement, et voire même plusieurs fois par jour en hiver lorsque l'évaporation naturelle est réduite. L'aération, induite par le brassage des boues, engendre une fermentation aérobie. Cette réaction étant exothermique, il peut alors être envisagé une hygiénisation des boues dès lors que les conditions de température sont atteintes (55 °C minimum pendant six jours).

Les retourneurs sont les pièces maîtresses du procédé par séchage solaire : chaque concepteur dispose d'ailleurs d'un brevet et/ou d'une marque déposée, protégeant son dispositif de brassage. Que ce soit un rouleau- couloir ou un robot scarificateur multidirectionnel, le retourneur est conçu pour fonctionner sans surveillance du personnel, sur programmation de l'automate de la station.

Les principaux dispositifs de retournement actuellement proposés par les constructeurs sont présentées ci-dessous.

1.3.4.1 Cochon électrique

Ce système qui est un séchage solaire simple utilise un robot mobile et partiellement automatisé (voir photo ci-dessus). Ce séchage nécessite des investissements relativement faibles. Une bêche de retournement automatique «cochon électrique» est utilisée pour retourner la boue stockée sur le sol du hall. Le remplissage et la vidange sont exécutés par un

chargeur qui doit circuler sur le hall. Cet appareil ne peut intervenir que dans une exploitation séquentielle : toute la masse de boue du lit doit être séchée et éliminée en une seule fois avant de pouvoir ramener de la boue humide. Des feuilles translucides couvrent les halls. L'aération forcée se fait grâce à des vantelles qui sont des ventilateurs à clapet se trouvant sur les murs de pignon fermés. Plusieurs autres ventilateurs travaillent dans le hall pour la création sur la boue d'un courant d'air intensif.

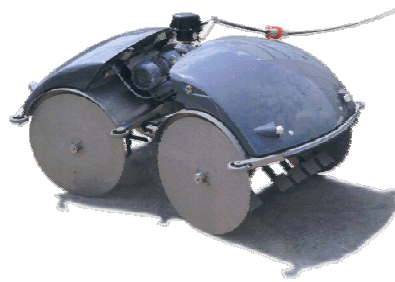


Figure I.11 Cochon électrique “Elektrischer Schwein“

1.3.4.2 Robot scarificateur (Degrémont)

Le système est conçu en prenant en compte les fonctions élémentaires et contient tous les éléments nécessaires au procédé pour un fonctionnement automatisé. Là aussi, la boue est stockée sur le sol du hall. Elle est retournée automatiquement par un scarificateur horizontal et en même temps, selon les besoins, elle peut être déplacée dans le hall. A une extrémité, la boue humide est approvisionnée, à l'autre extrémité on retire la boue séchée. Ainsi, on a une exploitation en continu. Il n'y a pas nécessité de circuler dans le hall avec un appareil de chargement. Les halls sont également couverts de feuilles plastiques translucides. Les pignons sont ouverts, pour obtenir un échange d'air naturel permanent. En complément on peut installer une cheminée d'évacuation pour l'élimination de l'air humide. Dans le cas de la variante serre vitrée, les ouvertures d'aération sont disposées longitudinalement dans la faîtière.

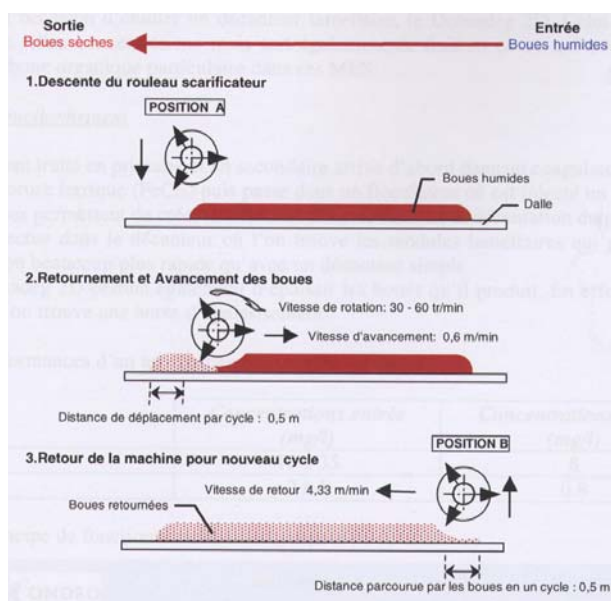


Figure I.12 Schéma de fonctionnement du rouleau scarificateur

Le rouleau scarificateur a un diamètre de 1 mètre et une emprise de 3 mètres comprenant un système d'arrêt d'urgence en cas de contact.



Figure I.13 Rouleau scarificateur du système IST.

I.3.4.3 Procédé Soliamix (Véolia)

Les boues déshydratées à leur arrivée dans la serre, sont disposées sous forme d'andains grâce au système Soliamix. Ces andains sont retournés périodiquement afin de

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES

renouveler la surface d'échange et de les aérer. La gamme de retourneurs Soliamix est disponible en 3 dimensions et leur fonctionnement peut être automatisé.

Pour une surface de serre équivalente, la forme en andains triangulaires offre une surface d'échange plus importante que dans le cas d'un lit de boues, d'où un séchage plus rapide. Elle permet, en outre, le stockage d'une quantité de boues plus importante.

Le séchage est optimisé par une ventilation double. En effet la serre est équipée de deux types de ventilation :

- une ventilation de déstratification qui garantit une homogénéisation optimale de l'ambiance de la serre ;
- une ventilation forcée permettant l'extraction de l'air humide.



Figure I.14 Système de retournement du procédé Soliamix.

*Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES*

Tableau I.5 Synthèse des données techniques sur les principaux procédés des constructeurs

Nom du procédé	Type de serres		Mode de répartition des boues	Mode de retournement/ déplacement des boues		Traitement de l'air	Dispositifs d'apport d'énergie
	Géométrie et Particularités	Serres ouvertes ?		Description	Fonctionnement		
Héliantis (Degrémont)	<i>Serres de 10 m de large et de 50 à 120 m de long</i>	<i>OUI</i>	<i>Les boues sont étalées en lits et avancent progressivement pendant le séchage. Boues brutes à l'entrée et boues séchées à la sortie.</i>	<i>Un grand bras perpendiculaire à l'axe de la serre. Des godets brassent les boues</i>	<i>Le bras avance progressivement. A chaque passage les boues sont avancées de 50 cm environ.</i>	<i>Pas de traitement d'odeurs. Elles sont diluées à l'extérieur de la serre via un renouvellement d'air très important</i>	<i>Non prévu</i>
Solia (Veolia)	<i>RAS</i>	<i>NON</i>	<i>Boues étalées en andains de 1m de haut environ.</i>	<i>Les andains de boues sont simplement retournés.</i>	<i>Retournement par intervention manuelle.</i>	<i>Biofiltre</i>	<i>Non prévu</i>
Ecodyer (Thermosystem)	<i>RAS</i>	<i>NON</i>	<i>Étalées sur un lit dans la serre. Fixes</i>	<i>« Sanglier » électrique, composé de deux roues avec des godets pour retourner les boues</i>	<i>Le sanglier se déplace aléatoirement. Il retourne les boues à son passage.</i>	<i>Biofiltre</i>	<i>Non réalisé</i>
KULT SRT (Huber technology)	<i>Dispositif de circulation d'eau et d'insufflation d'air dans le sol</i>	<i>OUI / NON</i>	<i>Étalées sur un lit dans la serre. Il n'est pas prévu de les stocker.</i>	<i>Bras perpendiculaire à la serre (comparable à celui de d'Héliantis). Une insufflation d'air peut être aussi utilisée.</i>	<i>Le bras avance, mais sans faire avancer les boues</i>	<i>Filtre sur pouzzolane si la serre est fermée, aucun sinon.</i>	<i>Pompe à chaleur, la source chaude étant l'effluent de la STEP</i>

I.3.5 Synthèse des principales techniques du marché

Différents systèmes sont proposés par les constructeurs selon les solutions techniques adoptées pour la ventilation des serres, le retournement et déplacement des boues, la gestion des odeurs, l'utilisation ou non d'apport d'énergie supplémentaire.

On citera notamment les noms commerciaux des procédés suivants :

- **Hélianthis** : procédé IST proposé par Degremont
- **Solia** : procédé Soliamix proposé par Veolia
- **Ecodryer** : procédé Cochon électrique proposé par Thermo-system
- **KULT SRT** : procédé Cochon électrique proposé par Huber technology

Le Tableau I.5 résume les principales données techniques de ces quatre types de systèmes.

I.4 Verrous actuels et besoins en terme de modélisation

Le séchage solaire sous serre des boues est une technique toute récente où la problématique industrielle bute sur deux points clefs: le dimensionnement du procédé et la connaissance de la boue.

L'intérêt scientifique pour le séchage des boues, à la fois en terme d'optimisation des procédés et de connaissance de la boue à traiter, est relativement récent. En effet depuis quelques années, des laboratoires européens conscients des enjeux et du manque d'informations scientifiques disponibles ont entrepris des recherches fondamentales dans le domaine.

Le processus d'élaboration de la boue est long, et passe par différentes étapes qui conditionneront sa qualité et son comportement futur. La problématique des boues est un sujet d'actualité qui concerne à la fois la protection de l'environnement et de l'homme. Ce sujet sensible pose des problèmes juridiques, scientifiques et technologiques, dont les solutions devront être trouvées à court terme.

Dans ce contexte et devant les incertitudes qui pèsent sur les filières de valorisation, le séchage solaire sous serre se positionne comme un procédé alternatif, qui permet de réduire les volumes des boues avec un minimum de dépenses énergétiques et préserve, en ajustant au

mieux la valeur de la siccité finale de la boue. Toutefois, à l'heure actuelle les connaissances scientifiques le concernant sont extrêmement réduites. Par ailleurs, les méthodes de dimensionnement et de conception de cette famille de procédés sont assez empiriques. Pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés du séchage solaire sous serre des boues, il apparaît aujourd'hui nécessaire de développer une meilleure connaissance de l'outil 'serre-boue', ceci afin d'aboutir à des règles de conception moins empiriques qu'actuellement et prenant mieux en compte les processus mis en jeu. L'intégration des connaissances acquises sous forme d'un modèle global de séchage solaire de boues résiduaires urbaines permettrait par ailleurs, pour une configuration de système donnée, de prévoir l'évolution des vitesses de séchage et indirectement les temps nécessaires à l'obtention d'une siccité souhaitée.

Afin de contribuer à l'amélioration et à l'optimisation des méthodes de dimensionnement et de conception du séchage solaire des boues, la démarche scientifique que nous proposons s'articule donc autour d'une modélisation mettant en évidence le couplage des différents transferts thermique et massique intervenants. La validation du modèle se fera ensuite à travers une approche expérimentale dans des conditions maîtrisées. La problématique de l'extrapolation du modèle développé à une installation à l'échelle réelle sera finalement abordée.

I.5 Références

ADEME, et Cabinet Arthur Andersen., Examen de la situation de la filière de recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde, Ademe Editions (1999).

ADEME, et CETIAT., Les procédés de séchage dans l'industrie, ADEME et CETIAT, eds; ADEME Editions : Angers (2000).

Agence Nationale pour la récupération et l'élimination des déchets., *La valorisation agricole des boues de stations d'épurations urbaines*, Les transformeurs, Bernard Lajouanie Service de l'information et de la communication, éd.(1988).

Antonini, G., "Les procédés de valorisation thermique des boues," *Actes Du Colloque Les Boues. Quels Enjeux ? Quelles Solutions ?*, Pau, France, 23-24 Février, 2000.

Apesa., "Eléments bibliographiques," *Actes Du Colloque Les Boues. Quels Enjeux? Quelles Solutions ?*, Pau, France, 23-24 Février, 2000.

Association Française de Normalisation., *La filière des boues: Normes et réglementations*, (1999).

Bongiovanni, J.-M., Traitement des boues résiduaires par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).

Boudez, j.-c., Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage. Thèse de doctorat Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts(ENGREF) de Paris (2001).

Briscoe, B. J., Luckham, P. F and Ren, S. R. The properties of drilling sludge at high pressures and high temperatures. *Phil. Trans. Soc. Lond. A*, 348:179, (1994).

Carrère-Gée, C., Etude du séchage indirect d'une fine couche de boue d'hydroxyde d'aluminium en ébullition : application au cylindre sécheur, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse 3, (1999).

Cemagref. Satese. Production et gestion des boues dans les stations d'épuration, rapport de synthèse, (1991).

Conseil de l'Union Européenne., Directive 1991/271/EC du 21 mai 1991 du Conseil relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, OJ L 135 30.05.1991.

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
APPROCHE GENERALE DES PROCÉDES DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES

Conseil de l'Union Européenne., Directive 1999/31/EC du 26 avril 1999 du Conseil relative à la mise en décharge des déchets, OJ L 182 16.07.1999.

Conseil de l'Union Européenne., Directive 86/278/EC du 12 juin 1986 du Conseil relative à la protection de l'environnement lors de l'utilisation de boues en agriculture, OJ L 186/6 04.07.1986.

Cornice, R., "Conditionnement et traitement des boues des stations d'épuration des eaux résiduaires urbaines et des usines de production d'eau potable." Institut National Agronomique de Paris, cycle "Valorisation agricole des déchets des usines de traitement des eaux", 13-17 avril 1992.

Edeline, F., *L'épuration biologique des eaux*, Editions Cebedoc : Liège (1993).

Ferrasse, J.-H., Développement d'outils expérimentaux pour le dimensionnement de procédés de séchage conductif avec agitation : application à des boues de stations d'épuration urbaines, Thèse de doctorat, Centre Energétique & Environnement, Ecole des Mines d'Albi Carmaux (2000).

Guibelin, E., Lutte contre la pollution des eaux: Traitements des boues d'épuration. Technique de l'ingénieur, traité Environnement, (1999).

Gross, T. S. C., "Thermal drying of sewage sludge," *J. IWEM*, **7**, 255-261 (1993).

Kazakura, T., et Hasatani, M., "R&D needs - Drying of sludges," *Drying Technol.*, **14**, 1389-1401 (1996).

Legrand, V., Etude du gonflement et de la floculation de gels de polyelectrolytes : application à la déshydratation des boues de stations d'épuration. PhD thesis, Université Paris VI, (1997).

Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par microtomographie à rayons x, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège (2002).

OTV., Traiter et valoriser les boues, collection OTV édition, (1997).

Surh, P., "Incinération combinée des boues d'épuration et des ordures ménagères: une filière qui séduit," *L'eau, l'industrie et les nuisances*, **209**, 34-36 (2002).

Wiar, J., and Reveillere, M., La teneur en éléments traces métalliques des boues résiduaires des stations d'épuration urbaines françaises. *Techniques, Sciences et méthodes*, (12): 913 - 922,(1995).

CHAPITRE II
NOTIONS GENERALES SUR LE SECHAGE

II.1 Les formes d'eau dans les boues d'épuration

On peut distinguer deux types d'eau d'un point de vue thermodynamique : l'eau libre et l'eau liée. Ces concepts ne sont pas respectés au sens strict dans la littérature abordant la répartition des différents types d'eau dans les boues d'épuration. On constate l'apparition de sous-catégories particulières selon les auteurs et les méthodes utilisées pour caractériser les formes d'eau.

Vesilind et Martel (1989) proposent la classification suivante suite à des tests dilatométriques : l'eau libre est celle qui peut être éliminée par simple décantation gravitaire ; l'eau interstitielle est celle qui est enfermée dans les floes ou dans des structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des floes ou des cellules ; l'eau vicinale est celle qui est retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique; enfin l'eau d'hydratation est celle qui est chimiquement liée et qui nécessite une importante dépense énergétique pour son enlèvement.

Smollen (1990) utilise un séchage basse température pour distinguer les catégories d'eau dans une boue déshydratée. L'eau qualifiée de libre est celle qui a pu être éliminée par déshydratation mécanique. Lors du séchage, l'auteur constate qu'une certaine quantité d'eau appelée 'eau immobilisée' est éliminée à une vitesse constante. L'eau qui subsiste est de l'eau liée, physiquement et chimiquement.

Tsang et Vesilind (1990) utilisent également une méthode thermogravimétrique pour distinguer les types d'eau dans une boue déshydratée. L'eau libre est la somme de l'eau éliminée par déshydratation et par séchage à vitesse constante. Les ruptures de pente de la courbe de séchage leur permettent de distinguer l'eau interstitielle, l'eau de surface (eau vicinale) et l'eau liée chimiquement qui n'est pas éliminée.

II.2 L'activité de l'eau dans un produit

Dans un matériau humide l'eau libre se comporte comme de l'eau pure: sa tension de vapeur correspond à la saturation à la température considérée. Par contre, l'eau liée va développer une tension de vapeur inférieure à la valeur de saturation. L'activité de l'eau vaut 1 dans le cas de l'eau libre et est inférieure à 1 dans le cas de l'eau liée. L'activité de l'eau est

définie comme le rapport de la pression partielle de l'eau dans le mélange par la pression à saturation de l'eau pure à la même température :

$$a_w = \frac{p_v}{p_{sat}(T)}$$

Équation II-1

Il est à noter que l'activité ainsi formulée est aussi la définition de l'humidité relative pour l'air humide (contenant de la vapeur d'eau), d'où le terme « d'humidité relative d'équilibre » employé parfois pour remplacer celui « d'activité ». L'équilibre, dans le mélange solide-eau, se traduit par une teneur en eau dite teneur d'équilibre et notée X_{eq} .

Dans le domaine du séchage, cet équilibre, obtenu à une température constante, est présenté sous forme d'un diagramme (a_w, X_{eq}) appelé ***isotherme de sorption***. Selon que l'on atteigne l'équilibre par prise ou perte de solvant, on obtient respectivement une ***isotherme d'adsorption*** ou ***de désorption***. Précisons que ces deux courbes présentent une hystérésis plus ou moins importante selon le produit.

II.2.1 Isothermes de sorption

L'isotherme de sorption lie la teneur d'équilibre en eau du solide à la teneur en humidité de l'environnement, à une température donnée. Elle est caractéristique des nombreuses interactions qui ont lieu à l'échelle microscopique entre le squelette solide et les molécules d'eau. Cette courbe permet donc de décrire le comportement hygroscopique du solide. On peut déterminer des isothermes d'adsorption ou de désorption selon que l'échantillon est soumis à des humidités croissantes (prise d'eau) ou décroissantes (perte d'eau).

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 définies (température et humidité), 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, 2000). A partir des isothermes, il est également possible de déterminer la chaleur isostérique de sorption qui est une mesure du degré de liaison de l'eau et de la quantité d'énergie à fournir pour libérer cette eau. Cette contribution énergétique doit être prise en compte lors du dimensionnement de sècheurs destinés à traiter des produits fortement hygroscopiques.

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.

II.2.2 Formes et modèles des isothermes de sorption

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 II 1 reprend les modèles les plus couramment utilisés.

L'équation de Langmuir (1918) fait référence à une adsorption mono-couche et n'est donc valable que dans la première partie de l'isotherme. Le modèle de Brunauer-Emmet-Teller (BET) tient compte d'une adsorption multicouche. Il suppose que la chaleur de sorption de la première couche est différente des couches suivantes, assimilées à de l'eau pure (Brunauer et al., 1938). X_m est la teneur en eau de la monocouche et C_{BET} la constante BET. Ce modèle est utilisé pour des isothermes de forme sigmoïdale, pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 40%. L'équation de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) peut être considérée comme l'amélioration du modèle BET en introduisant un comportement intermédiaire différent de l'eau pure pour les couches suivant la mono-couche initiale (Anderson, 1946 ; De Boer, 1953 ; Guggenheim, 1966). La zone de validité est très large ($HR < 95\%$). C_G est appelée la constante de Guggenheim et correspond à la chaleur de sorption totale de la première couche adsorbée. k est un facteur correctif tenant compte des propriétés de sorption des multicouches. Les équations de Chung-Pfost (1967), d'Halsey (1948), d'Harkins-Jura (1944), d'Henderson (1952), de Kuhn (1967), d'Oswin (1946) et de Smith (1947) sont empiriques ou semi-empiriques. Certains de ces modèles existent également en versions dites modifiées afin de tenir compte de la température (Veltchev et Menkov, 2000).

Tableau II.1 Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés

<i>Modèle</i>	<i>Formulation de $X_{eq}=f(H_r)$</i>	<i>Conditions d'utilisation</i>
Langmuir	$X_{eq} = \frac{kn Hr}{1+Hr}$	Faibles Hr
BET	$X_{eq} = \frac{XmC_{BET}Hr}{(1-Hr)(1+(C_{BET}-1)Hr)}$	$Hr < 0,5$
GAB	$X_{eq} = \frac{XmC_G K Hr}{(1-KHr)(1+(C_G-1)KHr)}$	$0,1 < Hr < 0,9$
Chung-Pfost	$X_{eq} = \frac{1}{n}(\ln k - \ln(-\ln Hr))$	$0,2 < Hr < 0,9$
Halsey	$X_{eq} = \left(-\frac{k}{\ln Hr} \right)^{\frac{1}{n}}$	$0,1 < Hr < 0,8$
Harkins-Jura	$X_{eq} = \left(-\frac{n}{\ln(Hr)-k} \right)^{\frac{1}{2}}$	$Hr > 0,8$
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1-Hr)}{k} \right)^{\frac{1}{n}}$	$0,5 < Hr < 0,95$
Kuhn	$X_{eq} = \frac{k}{\ln(Hr)} + n$	$Hr < 0,5$
Oswin	$X_{eq} = k \left(\frac{Hr}{1-Hr} \right)^n$	$0,1 < Hr < 0,9$
Smith	$X_{eq} = k - n \ln(1-Hr)$	$0,5 < Hr < 0,95$

II.2.3 Chaleur isostérique de désorption

La chaleur isostérique de désorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron (Équation II-2) (Labuza, 1984 ; Tsami et al., 1990 ; Veltchev et Menkov, 2000). Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative en fonction de

l'inverse de la température, pour un teneur en eau d'équilibre fixée. Cependant, à partir des équations modifiées, il est possible d'obtenir l'expression analytique de la chaleur de sorption Q_s .

$$Q_s = -R \frac{d \ln \frac{Hr}{100}}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$$

Équation II-2

Avec :	Qs	=	chaleur isostérique de désorption	(J ⁻¹)
	R	=	constante des gaz parfaits	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
	Hr	=	humidité relative en %	
	T	=	température de l'air	(K ⁻¹)

II.3 Différentes étapes du séchage d'un produit humide

II.3.1 Caractérisation de la boue

II.3.1.1 Matières sèches (Ms)

Cette mesure s'effectue par la mise en place de l'échantillon dans une étuve à 105°C durant 24 h. Connaissant la masse initiale et la masse finale après perte d'eau, la teneur en matières sèches est calculée.

II.3.1.2 Calcul de la siccité (Si)

La siccité est le pourcentage de matière sèche. En effet, une boue avec une siccité de 10 % correspond à 90 % d'eau.

II.3.2 Etablissement des courbes de séchage

Les courbes de séchage désignent, soit les variations de la teneur en eau moyenne $\left(X = \frac{m - Ms}{Ms}\right)$ de la boue en fonction du temps, soit celle donnant la vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Krischer $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en fonction de X, soit enfin une forme réduite de ces premières et visant à donner une représentation unique pour différentes conditions de séchage.

II.3.3 Analyse de la cinétique de séchage

L'examen de l'allure des courbes de Krischer permet une première approche macroscopique du comportement du produit pendant le séchage. Sur la courbe schématisée présentée à la Figure II.1, on peut distinguer 3 ou 4 phases selon les cas.

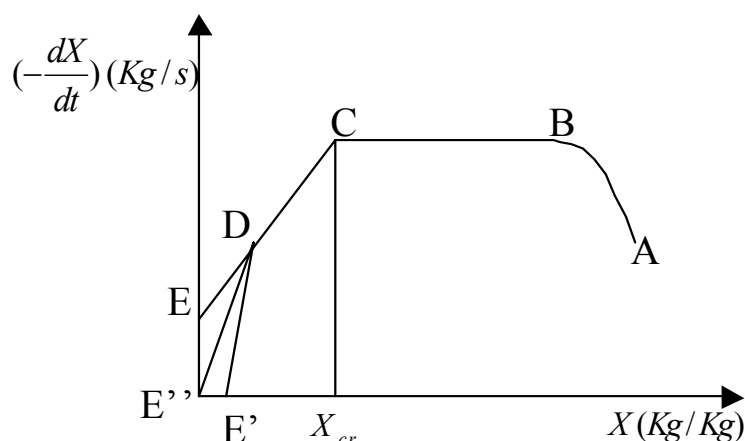


Figure II.1 Courbe de Krischer théorique

II.3.3.1 Période de mise en température

C'est une phase durant laquelle les transferts de chaleur et de masse à la surface du produit s'établissent jusqu'à une valeur d'équilibre. La température du matériau à sécher monte jusqu'à atteindre la température humide correspondant à l'environnement séchant (zone A-B). Cette période est généralement très courte vis-à-vis du temps de séchage total.

II.3.3.2 Période à vitesse ou flux constant

Pendant cette phase, souvent isenthalpique, l'eau est évacuée à flux constant (zone B-C). Le qualificatif isenthalpique est employé lorsque la chaleur échangée par convection est intégralement utilisée pour la vaporisation de l'eau. Ceci n'est plus vrai lorsqu'une partie de la chaleur est échangée par rayonnement ou par conduction en plus de la convection. On considère que l'évaporation s'effectue à la surface du matériau et que la surface est couverte d'un film d'eau continu. L'eau éliminée est libre et la surface conserve la température humide mentionnée dans la première période. Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur du solide. Le flux de chaleur demeure constant lui aussi pendant toute cette période. Les résistances au transfert se situent presque exclusivement dans la couche limite. La vitesse de séchage ne dépend donc principalement

que des conditions externes, c'est-à-dire la vitesse superficielle, l'humidité et la température de l'agent séchant, la surface exposée au séchage et la pression. Toutefois, l'état de surface peut avoir une importance : le flux peut être plus important pour une surface rugueuse que pour une surface plane (Geankoplis, 1993).

II.3.3.3 Les deux périodes de ralentissement

Les interprétations sont différentes quelque peu selon le modèle évoqué. Deux modèles sont couramment cités: le 'receding front model' et le 'wetted-surface model' (Keey, 1978). Le premier modèle pose l'hypothèse que le front de vaporisation se déplace vers l'intérieur du matériau alors que le second postule que la vaporisation se déroule en surface, mais que celle-ci est partiellement sèche.

- ***Receding front model***

La première période de ralentissement (zone C-D) commence lorsque la surface du matériau en contact avec l'air chaud atteint soit le seuil hygroscopique (toute l'eau libre a été éliminée en surface) -une partie du matériau se situant dans le domaine hygroscopique-, soit une teneur en eau nulle pour les matériaux non hygroscopiques. On définit la teneur en eau à partir de laquelle le ralentissement se produit. Le front de séchage qui se trouvait en surface migre vers l'intérieur du matériau. Dans cette phase, ce sont les différentes résistances internes du matériau aux transferts de chaleur et de matière qui contrôlent la vitesse de séchage. Ces résistances seront d'autant plus grandes que le front de séchage se situe loin de la surface externe du matériau (Nadeau et Puiggali, 1995).

Une fois que l'ensemble du matériau se situe dans le domaine hygroscopique, c'est-à-dire qu'il ne subsiste plus que de l'eau liée, la seconde phase de ralentissement commence. Le séchage est terminé lorsque le solide a atteint sa teneur en eau d'équilibre dans les conditions opératoires considérées (zone D-E'). Pour rappel, la teneur d'équilibre ne dépend que de la température et de l'humidité relative de l'agent séchant. Si le matériau est non hygroscopique, cette seconde période n'existe pas: la première zone de décroissance se poursuit jusqu'au terme du séchage (zone D-E).

- ***Wetted-surface model***

La chute du flux de séchage est liée à l'apparition de zones sèches à la surface du matériau, correspondant à une teneur en eau globale. Cependant, si on rapporte le flux à la

fraction de surface mouillée, celui-ci est constant. Cette période se poursuit jusqu'à assèchement complet de la surface externe (Keey, 1978 ; Nadeau et Puiggali, 1995) (zone C-D). La seconde zone de ralentissement est le reflet d'un contrôle de la vitesse par la diffusion de l'eau à l'intérieur du matériau. Le séchage se termine à teneur en eau nulle (zone D-E'') ou à X_{eq} pour les matériaux hygroscopiques (zone D-E'). Le front de séchage peut également se retirer dans le matériau et on retrouve alors le premier modèle.

II.3.3.4 La classification de Sherwood

L'interprétation des courbes de Krischer (Figure II.1) correspond à des cas idéaux. Dans la pratique, la situation peut être plus complexe, avec des zones de transition. Globalement, on peut retenir que les courbes présentent :

- une zone de préchauffage ;
- une phase à vitesse constante contrôlée par les conditions externes ;
- une phase de décroissance majoritairement contrôlée par les transferts internes.

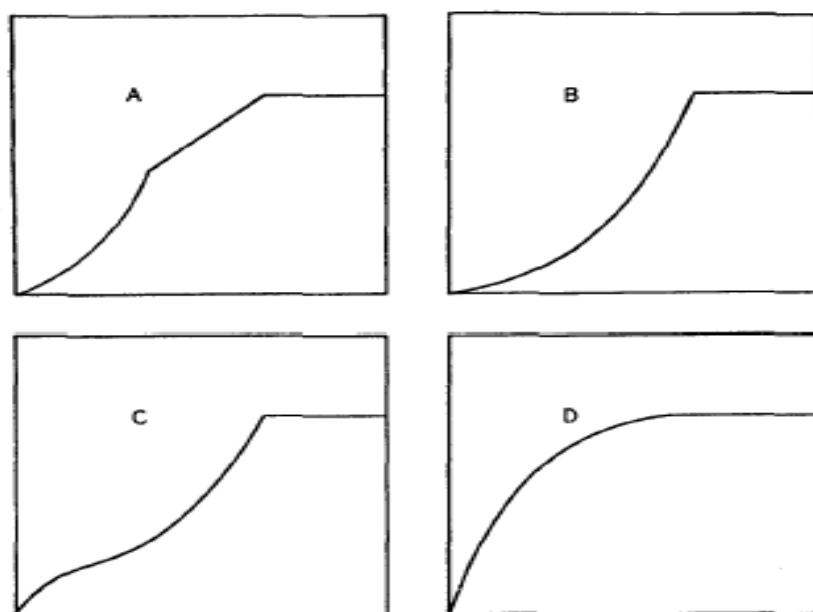


Figure II.2 Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche référencées par Sherwood (1936).

Selon la forme de la courbe et l'orientation des concavités (Figure II.2), Sherwood (1936) fut l'un des premiers à proposer une classification portant sur l'importance plus ou moins grande des résistances aux transferts. La courbe B, de concavité tournée vers le haut, est

typique d'un séchage contrôlé par des limitations intragranulaires ; la phase à flux constant décrite par la zone B-C sur la Figure II.1 n'est pas toujours présente. La courbe D, de concavité orientée vers le bas, illustre le cas inverse pour lequel les transferts sont limités par les transferts externes dans la couche limite. La courbe A est un cas mixte: la portion de décroissance linéaire est contrôlée par des résistances externes au transfert, alors que la fin de la courbe ressemble à la courbe B (concavité vers le haut) et indique des limitations intragranulaires en fin de séchage. La courbe C correspond à un matériau dans lequel le front de séchage se retire. Au début du recul du front, la diffusion du liquide est limitante. Vers la fin du séchage, c'est la diffusion de l'eau en phase vapeur à travers le solide qui est limitante.

II.3.4 Modélisation simplifiée des phases de séchage

Dans une première approche de modélisation, on peut envisager séparément les périodes à vitesse constante et à vitesse décroissante, et décrire les mécanismes de transfert de matière et de chaleur qui sont rencontrés.

II.3.4.1 Période à vitesse constante

Les résistances au transfert pendant cette période sont presque exclusivement confinées dans une couche limite à la surface du matériau humide. La nature et la structure interne du solide n'interviennent pas. Dans ce cas, les quantités de matière (Équation II-3) et de chaleur (Équation II-4) peuvent être exprimées comme le produit d'un coefficient de transfert (k ou h) et d'un potentiel moteur au transfert. La quantité de chaleur est liée à celle de matière via la chaleur latente de vaporisation (Équation II-5).

$$M_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) = K S (P_{sat} - P_v)$$

Équation II-3

$$Q = h S (T_a - T_s)$$

Équation II-4

$$Q = M_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) L_v$$

Équation II-5

Dans le cas où l'activité de l'eau vaut 1, la température qui règne à l'interface est la température humide et la pression correspond à la pression de saturation. Si l'apport de chaleur par radiation ou conduction est négligé, pendant la période de séchage à vitesse constante, l'expression de la vitesse devient donc :

$$Ms \left(-\frac{dX}{dt} \right)_1 = K S (P_{sat}(T_h) - Pv)$$

Équation II-6

Lorsqu'une autre forme d'énergie telle que l'énergie solaire intervient, la surface du produit pendant cette phase a une température supérieure à la température humide. La valeur de cette température de quasi-équilibre est donnée par l'équilibre entre l'apport d'énergie thermique sous toutes ses formes (convective et radiative) et la consommation de l'énergie pour l'évaporation de l'eau.

L'équation (Équation II-6) montre qu'une augmentation du flux peut donc être provoquée par :

- une augmentation du coefficient de transfert ;
- une diminution de la teneur en humidité de l'air de séchage ;
- une augmentation de la température humide.

Les coefficients de transferts de chaleur et de matière peuvent être déterminés à partir de la mesure du flux pendant cette période contrôlée par les résistances extra granulaires (cf. Éq. II.3 et II.4). Lorsque l'activité de l'eau devient inférieure à 1, on peut observer que la température à l'interface augmente et que le potentiel moteur diminue suite à l'abaissement de la teneur en humidité à l'interface. Progressivement les résistances intra granulaires deviennent limitantes.

II.3.4.2 Période à flux décroissant

- **Modes de transport de l'eau**

Durant la période à flux décroissant, la structure du matériau détermine la manière dont le transport de l'eau (sous forme liquide ou vapeur) s'effectue. Les deux principaux mécanismes sont la diffusion et la capillarité. En général un mécanisme prédomine à un temps donné, mais différents mécanismes peuvent se succéder dans le temps. Dans le cas de systèmes homogènes où les phases solide et liquide sont mutuellement solubles (savons,

colles, pâtes, gélatine,...), le transport s'effectue par diffusion. On peut également inclure dans cette catégorie les matériaux dont les pores sont suffisamment fins ($r_p < 0.1 \mu\text{m}$) pour lesquels le liquide est réparti uniformément et les matériaux fibreux. Bien que le transport de l'eau puisse être très complexe dans cette dernière catégorie (forces osmotiques, capillaires,...), il est assimilé à la diffusion pour la modélisation (Vanderschuren, 2000). Le transport s'effectue aussi par diffusion lors de la fin du séchage de certains matériaux comme l'argile, l'amidon, la farine, le papier, le bois, ... Les modèles utilisés se basent sur la loi de Fick (Éq. II.7). J est le flux en $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, D le coefficient de diffusion en m^2/s et C la concentration en kg/m^3 .

$$J = -D\nabla C$$

Équation II-7

Dans les milieux granulaires ou capillo-poreux ($r_p > 0.1$ à $1 \mu\text{m}$), le transfert de liquide est assuré par capillarité (papier, textile, sable, briques,...). Le transfert de liquide obéit à la loi de Darcy (Éq. II.8). Le mouvement de l'eau s'effectue dans le sens des pressions négatives croissantes, c'est-à-dire vers les zones où le liquide est en tension. K est la perméabilité en m^2 , μ la viscosité dynamique en $\text{Pa}\cdot\text{s}$, la masse volumique en kg/m^3 et P_l la pression de liquide en Pa .

$$J = -\rho \frac{k}{\mu} \nabla P_l$$

Équation II-8

Quand l'eau se trouve sous forme de vapeur, son déplacement peut s'effectuer par diffusion (receding front) ou diffusion-sorption dans le cas de vapeur d'eau liée.

Historiquement, les premières études sur le séchage ne considéraient que le mode de transport par diffusion suivant la loi de Fick (Lewis, 1921 ; Sherwood, 1929). Quelques années plus tard, notamment sous l'impulsion des recherches dans le domaine de la physique des sols, le transport de liquide lors du séchage de matériaux poreux a été attribué à la capillarité (Comings et Sherwood, 1934). Ceaglske et Hougen (1937) ont émis des restrictions quant à l'utilisation du concept de diffusion de liquide et ils ont affirmé que le transport d'eau est induit par des gradients de pression dans les solides granulaires.

Le mécanisme de transport d'eau par diffusion est souvent utilisé en modélisation même si certaines réserves peuvent être émises sur le sens physique d'un tel mécanisme.

- **Modélisation**

La zone de séchage à flux décroissant peut être modélisée par des lois comportementales simples. Le modèle décrit par l'Equation II 9 exprime la décroissance du flux observée sous la teneur en eau critique X_{cr} reliée par une loi de puissance à la réduction de la teneur en eau. Cette écriture permet de rendre compte, de manière simple, la cinétique de séchage de différents types de produits séchés dans diverses configurations (Nadeau et Puiggali, 1995).

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 (T, Hr, Ui) \left(\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}\right)^\beta$$

Équation II-9

L'écriture et l'intégration des bilans complets de matière et de chaleur ont été largement étudiées dans le cas de solides rigides. Depuis les premiers travaux de Lewis (1921) jusqu'à ce jour, des modèles phénoménologiques de plus en plus élaborés ont été proposés par différents auteurs. Luikov (1966) a appliqué la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour modéliser le transfert couplé de chaleur et de matière dans un milieu poreux. Plus tard, il proposa un modèle à deux zones dans le cas de solides capillo-poreux qui développent une zone sèche en surface (receding front model) (Luikov, 1975). Pour la détermination des coefficients de transfert de masse, Suzuki et Maeda (1968) formulèrent un modèle tenant compte de la coexistence de zones sèches et humides à la surface du matériau. Krisher et Kast (1978) ont proposé un modèle 'multi-mécanisme' en considérant que le transfert d'eau s'effectue par capillarité et par diffusion en phase gazeuse. La théorie de la prise de moyenne sur un volume élémentaire représentatif a été introduite dans le domaine du séchage par Whitaker (1977). Perré a développé des outils mathématiques adaptés à cette théorie (Perré et Degiovanni, 1990 ; Perré et Turner, 1999).

II.3.5 Courbe caractéristique de séchage

La complexité des phénomènes intervenant au cours du séchage, la difficulté de déterminer certains paramètres comme la diffusivité, et le fait qu'il est toujours nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation pour ajuster des constantes, ont fait que certains spécialistes se sont orientés vers une démarche empirique, l'idée étant, à partir de quelques

simples expériences de séchage, de déterminer une loi applicable au plus grand nombre de conditions opératoires.

C'est ainsi que Van Meel (1957) puis Krischer et Kast (1978), ont proposé un mode de représentation des résultats de différentes expériences permettant, pour un produit donné, de tracer une courbe unique dite courbe caractéristique de séchage. Cette courbe permet le regroupement de résultats acquis dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air.

II.4 Références

- Anderson, R., "Modifications of the BET equation," *J. Am. Chem. Soc.*, 68, 689-691 (1946).
- Bogdanis, E., *Modélisation des transports de chaleur et de matière lors du séchage d'un milieu élastique ou viscoélastique. Résolution par des méthodes aux éléments finis.*, Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour (2001).
- Brunauer, S., Emmet, P. H., et Teller, E., "Adsorption of gases in multimolecular layers," *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319 (1938).
- Ceaglske N., et Hougen, O. A., "Drying granular solids," *Ind. Eng. Chem.*, 29, 805-813 (1937).
- Chung, D. S., et Pfof, H. B., "Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products," *Trans. ASAE*, 10, 552-575 (1967).
- Comings, E. W., et Sherwood, T. K., "The drying of solids VII," *Ind. Eng. Chem.*, 26, 1096-1098 (1934).
- Coumans, W. J., "Models for drying kinetics based on drying curves of slabs," *Chem. Eng. Process.*, 39, 53-68 (2000).
- De Boer, J. H., *The dynamic character of adsorption*, Clarendon Press : Oxford, UK (1953).
- Geankoplis, C. J., *Transport processes and unit operations*, Prentice-Hall : Englewood Cliffs, New Jersey (1993).
- Guggenheim, E., *Applications of statistical mechanics*, Clarendon Press : Oxford, UK (1966).
- Halsey, G., "Physical adsorption on non-uniform surfaces," *J. Chem. Phys.*, 16, 931 (1948).
- Harkins, W., et Jura, G., "Surfaces of solids. XIII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the areas occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid," *J. Am. Chem. Soc.*, 66, 1366 (1944).
- Henderson, S. M., "A basic concept of equilibrium moisture," *Agric. Eng.*, 33, 29-32 (1952).
- Keey, R. B., *Introduction to industrial drying operations*, Pergamon Press : Oxford (1978).
- Ketelaars, A. A. J., Jomaa, W., Puiggali, J. R., et Coumans, W. J., *Drying shrinkage and stresses*. Elsevier Science Publishers : (1992).

- Krischer, O., et Kast, W., *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Springer : Berlin (1978).
- Kuhn, I., "Generalized potential theory of adsorption," *J. Colloid Sci.*, 23, 563 (1967).
- Labuza, T. P., *Moisture sorption : Practical aspects of isotherm measurement and use*, American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN (1984).
- Langmuir, I., "The adsorption of gases on plane surfaces of glass," *J. Am. Chem. Soc.*, 40, 1361-1402 (1918).
- Lewis, W. K., "The rate of drying of solid materials," *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 427-438 (1921).
- Luikov, A. V., *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, Pergamon Press : Oxford (1966).
- Luikov, A. V., "Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillaryporous bodies," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 1-14 (1975).
- Moyne, C., "Etablissement des courbes de séchage - Courbes caractéristiques et exploitation," *Cahier De L'AFSIA N°1*, pp.3-18, 1985.
- Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., *Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels*, Technique et Documentation - Lavoisier : Paris (1995).
- Oswin, G. R., "The kinetics of package life," *Int. Chem. Ind.*, 65, 419 (1946).
- Perré, P., et Degiovanni, A., "Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et haute température," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33, 2463-2478 (1990).
- Perré, P., et Turner, I., "A 3D version of Transpore : A comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42, 4501-4521 (1999).
- Ratti, C., "Shrinkage during drying of foodstuffs," *J. Food Eng.*, 23, 101-105 (1994).
- Smith, S. E., "Sorptions of water vapor by proteins and high polymers," *J. Am. Chem. Soc.*, 69, 646 (1947).
- Sherwood, T. K., "The drying of solids-I," *Ind. Eng. Chem.*, 21, 12-16 (1929).
- Sherwood, T. K., "The air drying of solids," *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 32, 150-168 (1936).

Sjoholm, I., et Gekas, V., "Apple shrinkage upon drying," *J. Food Eng.*, 25, 123-130 (1995).

Smollen, M., "Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction," *Wat. Sc. Tech.*, 22, 153-161 (1990).

Suzuki, M., et Maeda, S., "On the mechanism of drying of granular beds, mass transfer from discontinuous source," *J. Chem. Eng. Jpn.*, 1, 26-31 (1968).

Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D., et Savaracos, G. D., "Heat sorption of water in dried fruits," *Int. J. Food Sci. Tech.*, 25, 350-359 (1990).

Tsang, K. R., et Vesilind, P. A., "Moisture distribution in sludges," *Wat. Sc. Tech.*, 22, 135-142 (1990).

Van meel (D.A.). Adiabatic convection batch drying with recirculation of air *Chem. Eng. Sci.*, 9, p. 36 (1957).

Vanderschuren, J., "Les principes fondamentaux du séchage," *Le Séchage : État De La Question, SRBII, Comité Valorisation & Technologie Des Solides, 30 Mars 2000, 2000.*

Veltchev, Z. N., et Menkov, N. D., "Desorption isotherms of apples," *Drying Technol.*, 18, 1127-1137 (2000).

Vesilind, P. A., et Martel, C. J., "Freezing of water and wastewater sludges," *J. Environ.Eng. - ASCE*, 116, 854-861 (1989).

Whitaker, S., Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media : a theory of drying. *Advances in Drying, HPC : New York ; Vol.1, pp.23-61 (1977).*

CHAPITRE III
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE
NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE
SOUS SERRE

III.1 Objectifs et destination du modèle développé

Pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés du séchage solaire sous serre des boues, il apparaît nécessaire de développer une meilleure connaissance de l'outil 'serre-boue', ceci afin d'aboutir à des règles de conception moins empiriques qu'actuellement et prenant mieux en compte les processus mis en jeu. L'intégration des connaissances acquises sous forme d'un modèle global de séchage solaires de boues résiduaires urbaines a pour but de permettre, pour une configuration de système donnée, de prévoir l'évolution de la vitesse de séchage nécessaires à l'obtention d'une siccité souhaitée. Par ailleurs la conception du modèle devra pouvoir intégrer en entrée la prise en compte des conditions climatiques locales (ensoleillement, températures moyennes, etc.) du lieu d'implantation du dispositif de séchage.

Le modèle recherché devra par ailleurs permettre de comparer différents mode de conduite du procédé et donc œuvrer à une gestion plus optimale de ce moyen de séchage.

Dans la première partie de ce chapitre la démarche globale de la modélisation entreprise est présentée. La deuxième partie consistera à définir les bases physiques du modèle, à illustrer l'expression des différents flux thermique et massique intervenant dans le modèle, à définir les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation, et à présenter l'approche de résolution numérique du problème.

III.2 Démarche globale de modélisation

Le séchage solaire des boues repose sur la mise en contact, sous une serre, d'un air régulièrement renouvelé et d'une boue étalée sur une dalle béton et brassée mécaniquement. Un système de ventilation assure un écoulement de l'air dans la serre afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide.

A ce jour, au niveau bibliographie, il n'existe que très peu de travaux abordant spécifiquement la modélisation des procédés de séchage solaire appliqués aux boues résiduaires urbaines. Ruiz et al., (2005) étudient la caractérisation de l'aptitude de boues résiduaires à la déshydratation dans le cas particulier d'un séchage sous atmosphère immobile et confinée, où les phénomènes de convection et rayonnement sont limités.

Botramamy (2006) étudie la modélisation et l'identification d'un procédé de commande d'un séchoir de type serre agricole pour boue d'épandage. Ce travail est consacré à la modélisation d'un séchoir serre et à étudier l'influence du chauffage de la boue à travers son

Modélisation du séchage solaire des boues résiduelles urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

support (la dalle) chauffé au moyen de réseaux de tubes enterrés véhiculant de l'eau chaude. Le travail s'est porté également à établir une commande de température et d'humidité relative pour le séchoir

En revanche de nombreux travaux ont porté sur l'application du séchage solaire et à la déshydratation de produits agroalimentaire (fruits, légumes notamment).

La littérature spécialisée, fait ainsi état de plusieurs modèles mathématiques du séchage solaire des produits agricoles (Diamente, et Munro (1993) pour la patate douce ; Madamba, Driscoll, et Buckle (1996) pour l'ail; Midilli (2001) pour les pistaches ; Yaldız, Ertekin, et Uzun (2001) pour le raisin ; Basunia et Abe (2001) pour le riz ; Panchariya, Popovic, et Sharma (2002) pour le thé noir ; Dandamrongrak, Young, et Mason (2002) pour la banane ; Lahsasni et al., (2004) pour la figue; Hossain et al., (2005) pour le piment; Hirunlabh (1988) , Mustapha (1986) pour diverses produits agroalimentaires...).

Dans ce domaine, plusieurs modèles énergétiques de serre ont été également publiés, dont celui de Comary et Nicolas (1985), qui présentent un ouvrage de synthèse permettant d'appréhender les problèmes de la serre dans leur globalité. Leur modèle de serre, très complet, établit le bilan énergétique dynamique de dix sept composants, avec la possibilité de tenir compte d'un écran thermique.

Monteil (1985) présente une modélisation fine du comportement énergétique de la serre agricole et détaille particulièrement l'analyse des échanges par rayonnement infrarouge long et développe un outil informatique d'aide au dimensionnement de la puissance du système de chauffage principal et d'appoint d'une serre.

Une revue bibliographique de plusieurs modèles de serre a été détaillée dans l'ouvrage de Kittas (1980), puis dans celui de Issanchou (1991).

D'une manière générale, quel que soit le produit à sécher, les éléments de base à représenter pour construire un modèle de sécheur solaire direct sont les suivants :

- l'environnement extérieur ;
- la couverture ;
- l'air intérieur ;
- le produit à sécher (la boue dans notre cas) ;
- le support sur lequel repose le produit (plancher chauffant dans certains cas).

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

L'ensemble des modèles répertoriés repose sur l'écriture de bilans massiques et énergétiques sur ces différents éléments. La modélisation du séchage solaire des boues est basée sur la prise en compte simultanée d'échanges de chaleur et d'échanges de vapeur d'eau, physiquement très couplés.

La serre constitue un système énergétique complexe dans lequel la plupart des modes de transferts thermiques sont mis en jeu.

Les différents modes de transferts thermiques mis en jeu sont:

- les apports solaires au travers du matériau de la couverture ;
- les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments ;
- les échanges de convection à la surface de la couverture et à celle de la boue ;
- l'évaporation au niveau de la boue ;
- le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.

La figure ci-dessous (Figure I.1) représente schématiquement l'ensemble des éléments à prendre en compte et les différents processus mis en jeu.

Les différences entre les modèles proposés dépendent notamment du mode de représentation des phénomènes mis en jeux, des hypothèses posées pour simplifier leur représentation mathématique, des valeurs estimées ou mesurées des paramètres caractéristiques, notamment ceux liés à la nature du produit à sécher.

Le modèle que nous proposons repose sur une approche globalement similaire: c'est un modèle de connaissance dynamique mono dimensionnel, qui s'articule autour de la formulation des bilans d'énergie instantanés des différents composants de la serre.

Chacun des éléments du modèle est caractérisé par une variable d'état: la température. La boue est en plus caractérisée par sa teneur en eau. On retiendra l'hypothèse d'une distribution uniforme des différentes variables. Cette hypothèse à l'avantage de permettre la formulation d'équations dont la solution représentera l'état moyen des variables. On suppose également que :

- la serre est considérée comme un système physique dont les conditions aux limites sont les données météorologiques (température et humidité de l'air extérieur, vitesse du vent, rayonnement solaire global) ;

Modélisation du séchage solaire des boues résiduelles urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

- la couverture de la serre est considérée comme une surface de faible épaisseur où l'échange par conduction entre la face extérieure et intérieure peut être négligé.

Sont négligés les apports énergétiques éventuels:

- la convection des faces latérales avec le milieu extérieur ainsi que l'intérieur de la serre et ceux des radiations solaires captées par les faces latérales de la serre ;
- l'échange conductif entre la boue et son support.

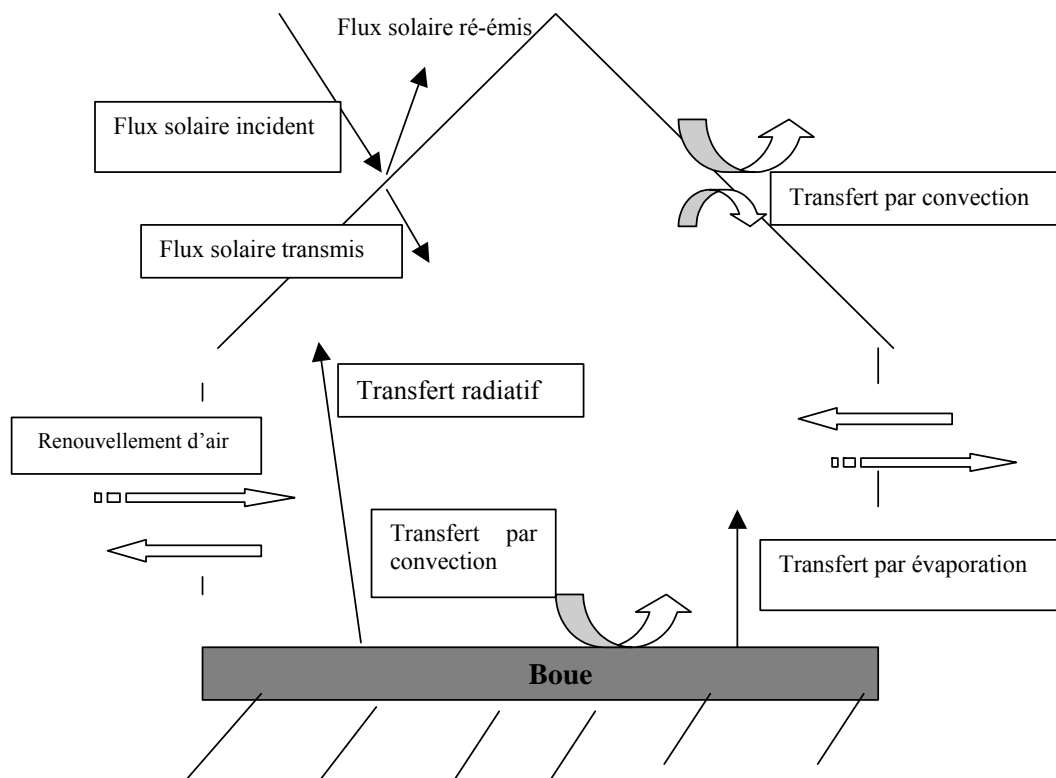


Figure III.1 Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de sécheur solaire

III.3 Analyse physique du modèle

III.3.1 Représentation des composants de la serre

III.3.1.1 Géométrie globale de la serre

Quatre paramètres géométriques définissent la structure globale de la serre : sa longueur (L) , sa largeur (l), son volume intérieur (V), et la direction de son grand axe par rapport à l'axe géographique nord-sud et comptée positivement vers l'ouest. La serre étant supposée symétrique, son orientation est définie à 180 degrés près.

Les propriétés tant géométriques que physiques de la serre seront supposées uniformes dans la direction de son grand axe: la serre sera donc assimilée à sa section droite transversale et les effets de bord liés aux extrémités seront négligés.

III.3.1.2 Représentation de la couverture

Dans le cas le plus général, la couverture est subdivisée en trois éléments:

- une paroi extérieure (qui sera dite 'couverture extérieure' C_e) ;
- une paroi intérieure (dite 'couverture intérieure' C_i) ;
- un fluide inter-parois (F).

Le fluide inter-parois correspond à l'espace compris entre les parois de couverture et pourra être soit de l'air (classiquement), soit un autre gaz (mélange gaz air/gaz carbonique par exemple) soit un liquide (eau ou solution aqueuse).

La couverture intérieure lorsqu'elle est présente, est supposée être de même taille que la couverture extérieure. A chacun de ces éléments est associée sa température comme variable d'état. Dans le cas de notre étude, la couverture est considérée comme simple paroi et les éléments C_i et F seront ignorés, de même que leur variable d'état associée.

III.3.1.3 Représentation de l'air intérieur

L'air intérieur est caractérisé par une variable d'état: sa température. L'hypothèse d'uniformité volumique de la variable d'état a été admise par souci de simplification; il faut cependant garder à l'esprit le fait que, dans la réalité, un gradient de température pourra apparaître au niveau vertical entre le haut et le bas de la serre, ou même au niveau horizontal

entre une extrémité et l'autre de la serre. La température de l'air ainsi définie doit être considérée comme une valeur moyenne conduisant aux mêmes effets globaux.

III.3.1.4 Représentation de la boue

Dans les serres industrielles les boues sont stockées à quelques dizaines de centimètres de hauteurs (30 à 40 cm), compatibles avec la taille des retourneurs. Dans notre modèle, nous considérons le séchage à couche mince d'environ 2 à 3 cm de hauteur de boue afin de se détacher du retournement de la boue lors des essais expérimentaux sur pilote.

L'état de la boue est caractérisé par sa température et la teneur en eau supposées uniformes sur l'ensemble de la couche.

III.3.1.5 Représentation du plancher

Le support de la boue dans les serres industrielles est une dalle en béton. Certains procédés comme Heliocycle développé par le groupe Saur intègre à la dalle des plaques chauffantes. La plaque chauffante est constituée de tubes circulaires régulièrement espacés. A l'intérieur des tubes circulent de l'eau à une température élevée. Lors des essais expérimentaux sur pilote nous utiliserons une plaque plane de plexiglas étanche et dont la température est supposée s'équilibrer très rapidement avec la température de la boue. Le transfert thermique par conduction entre la boue et son support est ainsi négligé.

III.3.1.6 Environnement extérieur

L'environnement extérieur, intervient par un ensemble de paramètres climatiques qui conditionnent l'intensité de divers flux énergétiques. Il est caractérisé par les paramètres suivants :

- la température, et l'humidité relative de l'air extérieur, mesurées à une distance supposée constante de la paroi, sont des facteurs qui interviennent d'une part dans l'échange convectif avec la face externe de la couverture, d'autre part dans l'échange par renouvellement d'air ;
- la vitesse moyenne du vent, mesurée à une certaine hauteur au dessus du sol, agit sur la valeur du coefficient d'échange convectif à la face externe de la couverture, et sur l'intensité du renouvellement d'air ;
- le rayonnement solaire global parvenant au sol, sur une unité de surface horizontale.

III.3.2 Ecriture des bilans thermiques et massiques

Pour construire le modèle mathématique, la méthode des bilans thermiques pour chaque composant est utilisée. En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du modèle.

Le premier principe exprime la conservation de l'énergie de l'ensemble {Système + milieu extérieur} pour un système fermé limité par une surface au travers de laquelle peuvent s'effectuer des échanges énergétiques. Il s'écrit sous forme de bilan où la variation d'énergie ΔE totale du système entre deux états t_1 et t_2 est égale à la somme des travaux W et chaleurs Q reçus par le système pendant son évolution entre ces deux états :

$$\Delta E = W + Q \quad \text{ou} \quad E_2 - E_1 = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2}$$

Équation III-1

Le premier principe est aussi connu sous le nom de principe d'équivalence, dans la mesure où il exprime l'équivalence entre les diverses formes d'énergie. En d'autres termes, il s'agit d'un bilan global dans lequel l'énergie peut se manifester ou se transformer sous une forme ou une autre.

Le premier principe s'écrit sous la forme d'un bilan de puissances mécaniques et calorifiques en travaillant entre deux instants voisins t et $t+dt$:

$$\frac{dE}{dt} = P_{méca} + P_{cal}$$

Équation III-2

III.3.2.1 Convention de notation des flux

Par souci de simplification et de clarté dans l'écriture des différents bilans, il a été convenu de noter les flux énergétiques de la façon suivante :

$$\varphi_{IndF \quad IndE \quad IndR}$$

Avec : $IndF$ = indice correspondant à la nature du flux

$IndE$ = indice correspondant à l'élément émetteur

$IndR$ = indice correspondant à l'élément récepteur

*Modélisation du séchage solaire des boues résiduelles urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE*

Lorsque l'élément de départ (*IndE*) n'est pas précisé dans le flux, cela signifie que l'expression du flux correspond à un bilan net de ce qui est capté par l'élément, c'est à dire la différence, pour une nature de flux donnée, entre le flux reçu et le flux transmis (cas du rayonnement solaire, et de l'inertie thermique pour la couverture par exemple).

Le Tableau I.1 récapitule les différentes notations des indices selon la nature des flux et des types d'éléments émetteurs ou récepteurs.

Tableau III.1 Récapitulatif de la notation des flux

<i>Nature de flux (IndF)</i>	<i>Type d'élément (IndE/IndR)</i>
<i>R</i> : Flux de rayonnement solaire	<i>ae</i> : air extérieur
<i>I</i> : Flux de rayonnement infra rouge de grande longueur d'onde	<i>c</i> : couverture <i>ai</i> : air intérieur
<i>C</i> : Flux de convection	<i>b</i> : boue
<i>i</i> : Inertie thermique	<i>v</i> : voûte céleste

III.3.2.2 Bilans énergétiques

- Bilan sur la couverture

$$\varphi_{Rc} + \varphi_{Icv} + \varphi_{Icb} - \varphi_{Ccae} + \varphi_{Caic} = \varphi_{ic}$$

Équation III-3

- avec :
- φ_{Rc} = flux net de rayonnement solaire reçu par la couverture
 - φ_{Icv} = flux de rayonnement infra rouge émis vers la voûte céleste
 - φ_{Icb} = flux de rayonnement infra rouge émis vers la boue
 - φ_{Ccae} = flux convectif de la couverture vers l'air extérieur
 - φ_{Caic} = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture
 - φ_{ic} = flux d'accumulation d'inertie thermique de la couverture

- Bilan sur l'air intérieur

$$\varphi_{Cbai} - \varphi_{Caiae} - \varphi_{Caic} = \varphi_{iai}$$

Équation III-4

- avec :
- φ_{Cbai} = flux convectif de la boue vers l'air intérieur
 - φ_{Caiae} = flux convectif de l'air intérieur vers l'air extérieur
 - φ_{Caic} = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture
 - φ_{iai} = flux d'accumulation d'inertie thermique de l'air intérieur

- Bilan thermique de la boue

$$\varphi_{Rb} + \varphi_{Ibc} - \varphi_{Cbai} - \dot{m}Lv = \varphi_{ib}$$

Équation III-5

- avec :
- φ_{Rb} = flux net de rayonnement solaire reçu par la boue
 - φ_{Ibc} = flux de rayonnement infra rouge émis vers la couverture
 - φ_{Cbai} = flux convectif de la boue vers l'air intérieur
 - φ_{ib} = flux d'accumulation d'inertie thermique de la boue
 - \dot{m} = flux massique d'eau évaporée de la boue
 - Lv = chaleur latente de vaporisation de l'eau

III.3.2.3 Bilans massiques

- Bilan massique en eau sur la boue

$$\dot{m} = M_s \left(- \frac{dX}{dt} \right)$$

Équation III-6

- Avec :
- \dot{m} = flux massique d'eau évaporée de la boue
 - M_s = masse sèche de la boue
 - X = teneur en eau de la boue en base sèche
 - $\left(- \frac{dX}{dt} \right)$ = vitesse de séchage

III.4 Expression des flux énergétiques

III.4.1 Flux radiatifs solaires

Ce sont les flux liés au rayonnement émis par le soleil, et dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 0,2 et 2,5 μm . L'intensité du rayonnement parvenant au sol se répartit pour moitié dans le visible (0,4 à 0,8 μm), et pour moitié dans l'infrarouge de courte longueur d'onde (au delà de 0,8 μm), une très faible part se situant dans l'ultraviolet.

En admettant comme suffisante l'hypothèse que, la couverture se comporte globalement comme une paroi horizontale de même surface que la surface du sol de la serre, la détermination des différents bilans nets du flux solaire absorbé par chaque élément est effectuée en utilisant des coefficients globaux de transmission et de réflexion non liés à l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur les différentes parois.

Les propriétés spectrales des éléments (couverture, boue) vis à vis du rayonnement solaire sont donc des propriétés moyennes qui constituent des paramètres d'entrée du modèle :

- Coefficient de transmission (τ_c) et d'adsorption (a_c) de la couverture ;
- Coefficient d'absorption (a_b) et de réflexion (ρ_b) de la boue (transmissivité nulle car la boue est supposée opaque au rayonnement solaire).

Les flux nets absorbés par la couverture et par la boue sont formulés en se limitant aux nombres de réflexion des rayons solaires schématisés ci-dessous.

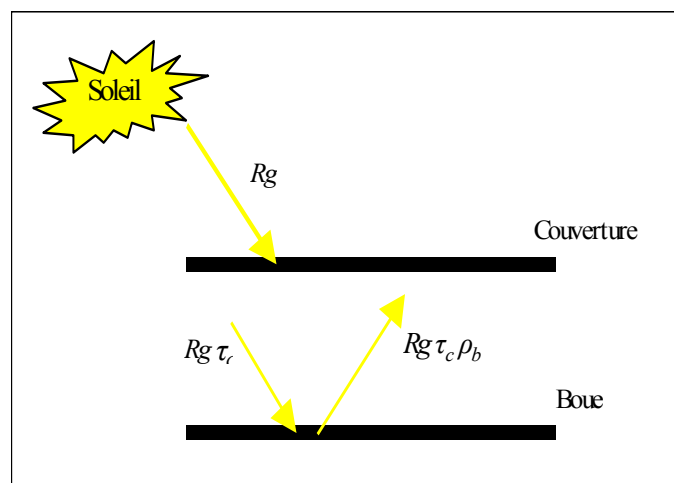


Figure III.2 Schéma des flux solaires absorbés

- **Flux net absorbé par la couverture**

$$\varphi_{Rc} = Rg a_c (1 + \tau_c \rho_b) \quad (W/m^2)$$

Équation III-7

Avec :	Rg	= intensité du rayonnement solaire	(W.m ⁻²)
	a_c	= coefficient d'absorption de la couverture	(-)
	τ_c	= coefficient de transmission de la couverture	(-)
	ρ_b	= coefficient de réflexion de la couverture	(-)

- **Flux net absorbé par la boue**

$$\varphi_{Rb} = Rg \tau_c a_b \quad (W/m^2)$$

Équation III-8

Avec :	a_b	= coefficient d'absorption de la boue	(-)
--------	-------	---------------------------------------	-----

III.4.2 Flux radiatifs Infrarouges

Ils correspondent aux rayonnements émis par les différents éléments de la serre et dont le spectre se situe, compte tenu des températures de ces corps, dans le domaine de l'infrarouge de grande longueur d'onde (5 à 50 μm). De façon évidente est également incluse comme source de rayonnement la voûte céleste.

Le bilan net de l'énergie absorbée ou perdue par chacun des corps est le résultat de ces émissions simultanées, compte tenu de réflexions multiples sur chacun des différents éléments. Les paramètres nécessités par l'analyse infrarouge, outre les paramètres géométriques correspondent à :

- la transmissivité et l'émissivité de la couverture ;
- l'émissivité de la boue ;
- la voûte céleste est caractérisée par une température apparente de rayonnement (dite température de voûte céleste ou température de ciel), calculée en fonction de la température extérieure.

III.4.2.1 Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture

La puissance de rayonnement infrarouge atteignant par unité de surface la couverture extérieure est due à la voûte céleste.

Le flux total reçue par la couverture du milieu extérieur s'écrit :

$$\varphi_{I_{cv}} = \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) \quad (W/m^2)$$

Équation III-9

- Avec :
- σ = Constante de Stefan –Boltzmann (W/m²/K⁴)
 - ε_c = émissivité de la couverture (-)
 - T_v = température de la voûte céleste (K)
 - T_c = température de la couverture (K)

La température équivalente de la voûte céleste est donnée par la relation de Swinbank (1963) :

$$T_v = 0,0552 T_{ae}^{1,5} \quad (K)$$

Équation III-10

- Avec :
- T_{ae} = température de l'air extérieur (K)

III.4.2.2 Flux radiatif infrarouge au sein du modèle

Nous restreignons l'échange par rayonnement infrarouge au milieu Couverture boue. Le flux net perdu par la surface de la boue S_b est égal au flux net gagné par celle de la couverture S_c . Ce flux est encore égal au flux net échangé entre S_b et S_c .

Nous avons donc l'égalité : $\varphi_{I_{cb}} = - \varphi_{I_{bc}}$

Le flux d'énergie échangé entre la surface de la boue et celle de la couverture est donné par la relation :

$$\varphi_{I_{bc}} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4)$$

Équation III-11

- Avec :
- ε_b = Emissivité de la boue (-)
 - T_b = température de la couverture (K)

III.4.3 Flux convectifs

Ils concernent principalement les transferts d'énergie entre la paroi d'un solide (S) et le fluide (f) qui se situe à son contact. L'énergie étant transmise par déplacement du fluide, le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases :

1ère phase : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince couche de fluide (appelée "film") au voisinage de la surface.

2ème phase : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide.

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

- la convection libre ou naturelle: le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champs de force extérieure (la pesanteur) ;
- la convection forcée: le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de températures (pompe ventilateur).

Selon la nature de l'écoulement du fluide, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement. Pour le régime laminaire l'écoulement du fluide s'effectue par couches pratiquement indépendantes par opposition au régime turbulent où l'écoulement n'est pas unidirectionnel. Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), La puissance échangée s'écrit :

$$\varphi_{Csf} = h S (T_s - T_f) \quad (W)$$

Équation III-12

Avec : h = coefficient de convection (W/m²/°C)

S = surface d'échange (m²)

T_s, T_f = températures respectives du solide et du fluide (°C)

Toute la difficulté réside dans l'évaluation du coefficient h , sa valeur dépend :

- des températures du solide et fluide (ce qui introduit une non linéarité) ;
- de la nature et vitesse du fluide ;
- de la surface du solide.

III.4.3.1 Echange convectif milieu extérieur / couverture

Cet échange traduit l'effet du vent sur la face extérieure de la couverture. Le coefficient de convection est donné par l'équation de Mc Adams (1954) :

$$h_e = a + b \cdot U_v \quad (W.m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$$

Équation III-13

Avec :

U_v	= vitesse du vent	(m/s)
a	= 5,67	$W.m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
b	= 3,86	$W.m^{-3} \cdot s \cdot ^\circ C^{-1}$

III.4.3.2 Echange convectif au sein du modèle

Pour les échanges convectifs entre l'air intérieur et respectivement la face interne de la couverture et la surface de la boue, l'estimation des coefficients d'échange convectif est exprimée à partir du nombre de Nusselt :

$$Nu = h \frac{L}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad h = Nu \frac{\lambda}{L} \quad (W/m^2/^\circ C)$$

Équation III-14

Le nombre de Nusselt est relié aux conditions opératoires par l'intermédiaire de lois de puissance portant sur des nombres adimensionnels. En convection forcée, le nombre de Nusselt est donné par l'expression :

$$Nu = a (Pr)^m (Re)^n$$

Équation III-15

où :

Nombre de Prandtl :	$Pr = \frac{\nu C_p \rho}{\lambda}$
Nombre de Reynolds :	$Re = \frac{U L}{\nu}$

Avec :

U	= vitesse moyenne de l'air	(m/s)
C_p	= chaleur massique de l'air sec	$(W/m^{-1} \cdot ^\circ C)$
L	= longueur caractéristique	(m)
ρ	= massique volumique de l'air	(kg/m^3)
ν	= viscosité cinématique de l'air	(m^2/s)
λ	= conductivité thermique de l'air	$(W/m^{-1} \cdot ^\circ C)$

Modélisation du séchage solaire des boues résiduelles urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

Les relations utilisées pour calculer les différentes grandeurs (ρ , ν , λ , C_p) qui interviennent dans les nombres adimensionnels se trouvant à l'annexe I.

La variabilité des hypothèses de calcul, la détermination expérimentale de valeurs par l'intermédiaire de maquettes (qui met à profit l'aspect adimensionnel des coefficients) ont conduit les auteurs à proposer des formules de calcul de h très différentes les unes des autres. Il a été retenu, l'expression du coefficient de convection entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant, ainsi que entre la boue et l'air asséchant – la surface de la boue est assimilée à une surface plane- la corrélation proposée par Sacadura (1978) pour un écoulement d'air sur une plaque plane:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,66 Re^{0.5} Pr^{1/2} & Re \leq 10^5 \text{ et } 0,6 \leq Pr \leq 15 \\ Nu &= (0,0337 Re^{0.8} + 872) Pr^{1/3} & 510^5 < Re \leq 10^7 \\ Nu &= 0,0336 Re^{0.8} Pr^{1/3} & Re > 10^7 \text{ et } 0,5 \leq Pr \leq 50 \end{aligned}$$

Équation III-16

L'échange convectif dû au renouvellement d'air intérieur est un cas particulier : le flux est lié à la différence d'énergie interne entre l'air entrant et l'air sortant. La puissance échangée s'exprime par la relation :

$$\varphi_{Caiae} = \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (W)$$

Équation III-17

Avec :

C_p	= chaleur massique de l'air sec	(W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)
ρ	= massique volumique de l'air	(kg/m ³)
Q	= débit volumique de l'air	(m ³ /s)

Le débit volumique de l'air est fonction du taux de renouvellement (R) et du volume d'air intérieur de la serre V

$$Q = RV \quad (m^3/s)$$

Équation III-18

Le renouvellement d'air de la serre est la conséquence de trois mécanismes :

- les fuites, dues aux défauts d'étanchéité de la serre ;
- la ventilation naturelle, correspondant à l'ouverture d'ouvrants ;
- la ventilation forcée, liée à la présence d'un ventilateur (ou extracteur) dans la serre.

III.4.4 Transfert de masse

Les transferts de masse sont liés aux évaporations au niveau de la boue. Le transfert de matière peut être calculé à partir de la valeur du flux, en se basant sur l'équation (Équation II-3) et son équivalent pour le transfert de chaleur (Équation II-4).

$$Ms \left(-\frac{dX}{dt} \right) = KS (P_{sat} - P_v) \quad (\text{kg}_{\text{eau}}/\text{s})$$

Équation III-19

Avec : P_{sat} = pression de vapeur saturante à la température de la boue (Pa)
 P_v = pression partielle de vapeur à la température de l'air asséchant (Pa)
 K = coefficient de transfert massique (kg/m²/s)

Le coefficient de transfert K se déduit du coefficient d'échange convectif h par la relation de Lewis :

$$K = \frac{h}{\rho C_p} \quad (\text{kg}/\text{m}^2/\text{s})$$

Équation III-20

III.4.5 Inertie thermique

L'inertie thermique correspond à la variation d'énergie interne contenue par un corps entre deux instants. Elle sera définie par la relation différentielle suivante :

$$\varphi_i = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (W)$$

Équation III-21

On désigne usuellement le produit $\rho.V.C_p$ comme étant la capacité calorifique du corps exprimé en J/°C et qui quantifie l'énergie totale que doit emmagasiner le corps pour augmenter sa température d'un degré.

III.5 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation

Les propriétés thermodynamiques de la boue intervenant dans la modélisation sont :

- les isothermes de sorption, qui caractérisent l'interaction eau-solide dans les boues ;

- la chaleur massique, quantifie l'énergie emmagasinée par la boue pour augmenter sa température d'un degré.

Ces paramètres sont utiles pour le dimensionnement des séchoirs. En effet l'intérêt 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 définies (température et humidité), appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation. Les méthodes de mesure des isothermes de sorption et de la capacité calorifique massique de la boue seront développées dans le CHAPITRE IV.

III.6 Formulation et résolution du système d'équations

Une fois le modèle conceptuel de la serre défini, il reste maintenant à lui donner une forme concrète de façon à rendre son utilisation effective.

La résolution du système d'équation nécessite le développement d'un programme avec une méthodologie d'analyse rigoureuse capable de garantir la fiabilité du modèle et d'assurer sa souplesse.

III.6.1 Formulation du système d'équations

Les flux thermiques du modèle étant exprimés en fonction des inconnues potentielles la formulation consiste à définir le bilan global avec les variables d'états de chaque élément et l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle.

Tableau III.2 Formulation du système d'équation du modèle

<p><i>Bilan d'énergie sur la couverture</i></p> $Cc \frac{dT_c}{dt} = Rg a_c (1 + \tau_c \rho_b) + \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4)$ $+ h_{ci} (T_{ai} - T_c) + h_{ce} (T_{ae} - T_c)$ <p style="text-align: center;">Équation III-22</p>
<p><i>Bilan d'énergie sur l'air</i></p> $\rho V Cp \frac{dT_{ai}}{dt} = h_b S_b (T_b - T_{ai}) - h_{ci} S_c (T_{ai} - T_c)$ $- \rho Q Cp (T_{ai} - T_{ae})$ <p style="text-align: center;">Équation III-23</p>
<p><i>Bilan d'énergie sur la boue</i></p> $m_b Cp_b \frac{dT_b}{dt} = Rg S_b a_b \tau_c - \frac{\sigma S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) +$ $h_b S_b (T_{ai} - T_b) - \dot{m} Lv$ <p style="text-align: center;">Équation III-24</p>
<p><i>Bilan massique sur la boue</i></p> $\dot{m} = Ms \left(-\frac{dX}{dt} \right)$ <p style="text-align: center;">Équation III-25</p>

III.6.2 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle

Deux types de paramètres d'entrée ont été introduits dans le modèle:

- les **paramètres primaires** constitués de paramètres d'entrée fixe et de paramètres d'entrée évolutives.

Dans cette catégorie, les *paramètres d'entrée fixe* sont ceux liés aux caractéristiques géométriques et physiques de la serre et de ses éléments. Ces données demeureront constantes au cours d'une simulation donnée de fonctionnement de la serre ;

Les *paramètres d'entrée évolutifs* sont ceux qui seront susceptibles de varier au cours de la simulation: ils correspondent essentiellement aux données climatiques extérieures

- les **paramètres secondaires** calculés par le modèle à partir des paramètres primaires.

Le programme fournit à chaque pas de temps de résolution les résultats de la simulation. Le critère d'arrêt de la simulation est fixé sur l'occurrences de l'une des deux conditions suivantes, à savoir que, soit la teneur en eau d'équilibre est atteinte, soit le temps de simulation s'est écoulé.

Les résultats de la simulation, constituent les sorties du modèle :

- la température de la couverture (T_c) ;
- la température de l'air intérieur (T_{ai}) ;
- la température de la boue (T_b) ;
- la teneur en eau en base sèche de la boue (X).

La connaissance de ces paramètres de sortie nous permettra d'évaluer l'évolution de la vitesse de séchage et donc l'évolution du flux d'évaporation dans des conditions climatiques données. L'estimation de la température de la couverture, permettra d'estimer les besoins de chauffage de la serre afin de compenser les déperditions. L'estimation de la température de l'air intérieur permettra d'estimer les besoins de quantité d'énergie à injecter dans le système donc d'estimer les besoins de ventilation.

Tableau III.3 Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle

PARAMETRES D'ENTREE FIXES	Dimensions de la serre <ul style="list-style-type: none"> • longueur • largeur • volume
	Paramètres liés à la couverture <ul style="list-style-type: none"> • émissivité infra rouge de la couverture • transmissivité infra rouge de la couverture • coefficient d'absorption solaire couverture • coefficient de transmission solaire couverture • capacité surfacique de la couverture
	Paramètres liés à la boue <ul style="list-style-type: none"> • émissivité infrarouge de la boue • coefficient d'absorption solaire de la boue • coefficient de réflexion solaire de la boue • chaleur massique anhydre de la boue • vitesse de séchage réduite Autres paramètres <ul style="list-style-type: none"> • surface du support de la boue • constante de Stephan Boltzmann

*Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE*

<p align="center">PARAMETRES D'ENTREE EVOLUTIFS</p>	<p>Données climatiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • température de l'air extérieur • humidité relative de l'air extérieur • vitesse de du vent • rayonnement solaire sur une surface horizontale <p>Données sur la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> • masse initiale • siccité initiale
<p align="center">PARAMETRES SECONDAIRES</p>	<p>Température apparente de rayonnement du ciel</p> <p>Chaleur latente de l'eau</p> <p>Grandeurs caractéristique de l'air :</p> <ul style="list-style-type: none"> • conductivité thermique, • viscosité, • masse volumique, • chaleur massique • pression de vapeur à saturation <p>Coefficients de convection</p> <ul style="list-style-type: none"> • couverture/air extérieur • couverture /air intérieur • air intérieur / boue <p>Données sur la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> • teneur en base sèche • teneur en eau d'équilibre

III.6.3 Résolution du système d'équations

La formulation du bilan d'énergie de chaque élément détermine un système d'équations différentielles non linéaires dont les inconnues sont les variables d'état de chaque élément, la température T et la teneur en eau de la boue. Les non linéarités proviennent :

- des émittances (termes en T^4 des bilans radiatifs infrarouges) ;
- du calcul des pression(s) saturante(s).

Ce système d'équations sera résolu par la méthode classique de Runge Kutta d'ordre 4 dans l'environnement Matlab.

Nous avons opté pour le développement d'un modèle de séchage unidimensionnel combinant les propriétés physiques de la boue et les différents transferts thermiques régissant le séchage. Une mise en équation assez simple des différents phénomènes complexes est effectuée. Nous obtenons ainsi trois équations de bilan d'énergie et une de transfert de matière couplées et non linéaires. Ces équations sont résolues par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Ce programme ne peut acquérir son caractère prédictif qu'après avoir été confronté aux résultats observés et mesurés au niveau expérimental. Pour s'assurer de la validité du modèle numériques, une étude expérimentale s'impose. Un plan d'expérience à deux étapes est envisagé, de manière à mieux appréhender le couplage très complexe des différents transferts thermiques et massiques. Les matériels et méthodes à utiliser à cet effet feront l'objet du prochain chapitre.

III.7 Références

- Basunia, M. A., & Abe, T., Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering*, 47(4), 295–301(2001).
- Botramamy, P-A., Modélisation d'un séchoir-serre pour boue d'épandage. Thèse de doctorat, Université de Perpignan (2006).
- Cormary, Y., Nicolas, C., Christian NICOLAS, Thermique des serres, collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, éditions Eyrolles 357pp (1985).
- Dandamrongrak, R., Young, G., & Mason, R., Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 55(2), 139–146 (2002).
- Diamente, L. M., & Munro, P. A., Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, 51(4), 271–276 (1993).
- Hirunlabh, J., Recherche d'une méthode simple de dimensionnement des séchoirs à chauffage partiellement solaire pour fruits et légumes Thèse de 3eme cycle Université de Nice, 121pp (1988).
- Hossain, M.A., Woods, J.L., Bala, B.K.,. Optimisation of solar tunnel drier for drying of chilli without color loss. *Renewable Energy* 30, 729–742 (2005).
- Issanchou, G., Modélisation énergétique des serres Thèse de 3^{eme} cycle Université de Perpignan (1991).
- Kittas, C., Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres, Thèse de 3^{eme} cycle Université de Perpignan (1980).
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., & Jamali, A., Thin layer convective solar drying and mathematical modelling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*, 29(2), 211–224 (2004).
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A., The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75–97 (1996).
- McAdams, W.H., Heat Transmission, 3rd ed. MC Craw Hill, NewYork (1954).
- Midilli, A., Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*, 25(8), 715–725 (2001).
- Monteil, C., Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles thèse de 3^{eme} cycle Institut national polytechnique de Toulouse, 168pp (1985).

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
DEVELOPPEMENT D'UN MODELE NUMERIQUE DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

Mustapha, El. H., Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agroalimentaire Thèse de 3^{ème} cycle Université de Perpignan (1986).

Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L., Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 349–357 (2002).

Ruiz, T., Wisniewski, C., Kaosol, T., et Persin F., Transfert d'eau et déformation lors du séchage sous atmosphère contrôlée d'une boue résiduaire urbaine. *Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 92 – 2005*.

Sacadura J.F., Initiation aux transferts thermiques. Cast, Insa de Lyon, Technique et Documentation Lavoisier, Paris (1978).

Swinbank, W.C., Long-wave radiation from clear skies. *Q J Roy Meteor Sot* 89 (1963).

Yaldız, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I., Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457– 465 (2001).

CHAPITRE IV
MATERIELS ET METHODES

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description des différentes méthodes utilisées au cours du travail pour déterminer les paramètres de la boue (après déshydratation) intervenant dans la modélisation.

Au vu de la complexité des phénomènes physiques intervenant au cours du séchage solaire sous serre des boues, un pilote expérimental représentatif du séchoir industriel paraît indispensable. La seconde partie du chapitre décrit la mise au point du pilote expérimental correspondant et les équipements servant au suivi du séchage proprement dit, ainsi que les outils et méthodes utilisés pour traiter les résultats.

IV.1 Estimation des caractéristiques des boues intervenant dans la modélisation

Les propriétés thermodynamiques de la boue intervenant dans la modélisation sont :

- les isothermes de sorption ;
- la chaleur massique.

Ce paragraphe sera donc consacré à la revue des méthodes de mesure des isothermes de sorption et de la capacité calorifique Massique de la boue. Ces paramètres sont utiles pour le dimensionnement des séchoirs.

La détermination des paramètres de la boue intervenant dans notre modèle (Isothermes de sorption et capacité calorifique massique) a été faite à l'ENSTIMAC (Ecole des Mines d'Albi carnaux) au sein du laboratoire de génie des procédés des solides. Ces mesures ont été faites sur des boues provenant de la station d'épuration de Rosheim (Strasbourg) .

IV.1.1 Origine des boues utilisées

Les boues utilisées lors de nos expériences, sont de type primaire en provenance de la station d'épuration de Rosheim traitant les effluents urbains d'une capacité de 11000 équivalents habitants et comprend principalement :

- un dégrillage ;
- une installation de limitation et de mesure de débit, avec envoi dans un bassin d'emmagasinage en cas de fortes pluies et recyclage vers la station dès que le débit d'entrée le permet ;

- un dessablage-dégraissage ;
- un traitement biologique par boues activées.

Les boues, issues du clarificateur sont directement mélangées à des polymères avant d'être égouttées via la grille d'égouttage. Elles sont ensuite pressées dans un filtre à bande pour atteindre une siccité finale comprise entre 16 et 19%.

Les boues sont directement prélevées en sortie de filtre et placées au réfrigérateur à 4°C pour les expérimentations.

IV.1.2 Estimation des isothermes de sorption

IV.1.2.1 Principe de détermination des isothermes

Une grandeur est souvent utilisée pour caractériser l'interaction eau-solide dans les boues : il s'agit de la teneur en eau libre. L'eau libre, par opposition à l'eau liée, est définie comme l'eau se comportant thermodynamiquement comme de l'eau pure.

Trois familles de méthodes sont disponibles pour la mesure de l'activité de l'eau:

- les méthodes dans lesquelles une activité de l'air est imposée et où la teneur en eau d'équilibre est mesurée ;
- les méthodes dans lesquelles une teneur en eau du produit est imposée et où l'activité de l'air qui résulte de l'équilibre est directement mesurée ;
- les méthodes qui vont s'affranchir d'une mesure relative à la phase gazeuse.

Les deux premières familles ont en commun la difficulté de mesurer ou d'imposer une humidité relative, mais diffèrent dans l'esprit. Seule la seconde catégorie est à même de fournir une mesure directe de l'activité pour un échantillon brut donné, la première ne fournira qu'une valeur extrapolée.

IV.1.2.1.1 Méthodes gravimétriques

Il s'agit de mesurer la masse d'un échantillon en contrôlant la température et l'humidité relative de l'ambiance gazeuse. La pesée peut être effectuée en continu. Les techniques de contrôle d'humidité relative sont nombreuses. On distingue les techniques dites (chimiques) de celles dites (physiques).

Systemes chimiques: la plus répandue des méthodes utilisées en laboratoire est celle dite des baux. Un récipient hermétique est placé dans une enceinte climatique. Dans ce récipient, l'échantillon est posé dans une coupelle placée au dessus d'une solution aqueuse. Le rôle de cette solution aqueuse est d'assurer une pression partielle de vapeur connue dans

l'ambiance. Ces méthodes ont l'inconvénient d'être longues, Il faut compter de une semaine à un mois pour une mesure.

Systèmes physiques: les méthodes physiques contrôlent la pression partielle de vapeur d'eau en travaillant dans une ambiance de vapeur pure ou d'air humide.

IV.1.2.1.2 Méthodes manométriques

Ces méthodes s'opposent aux méthodes gravimétriques. En effet, le poids de l'échantillon reste fixe durant toute la période de mesure. L'échantillon est mis en contact avec un petit volume d'air. La difficulté de ces méthodes est de maintenir constante la teneur en eau lors de la mise en place de l'échantillon dans l'enceinte.

IV.1.2.2 Matériel utilisé et mode opératoire

La plus part des méthodes de mesure d'isothermes de sorption présentées, utilisent la notion d'équilibre total. D'un point de vue expérimental, on attend la stabilisation de la masse ou de l'humidité relative. La méthode mise en oeuvre dans ce travail utilise la notion d'équilibre local en surface, ce qui réduit le temps de la mesure et dispense d'un contrôle direct de l'humidité relative.

La méthode utilisée se classe dans la famille des méthodes gravimétriques, avec une pesée en continu et un balayage d'air continu. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir une isotherme de sorption complète en une seule expérimentation et pour une durée n'excédant pas quelques heures.

L'appareillage utilisé est le système DVS (Système dynamique de sorption de vapeurs). Le cœur du système DVS est une microbalance à enregistrement continu ultrasensible capable de mesurer des changements de masse de l'échantillon inférieurs à 1 μg . Ce type de microbalance a comme caractéristique principale d'avoir une très bonne stabilité à long terme et est par conséquent idéal pour la mesure de phénomènes de sorption de vapeurs qui durent entre quelques minutes et quelques jours. Cette microbalance est placée dans un incubateur qui permet de générer une température de mesure constante et précise. Les humidités relatives demandées sont générées par le mélange d'un flux de vapeurs sec et d'un flux de vapeurs saturé dans les proportions appropriées à l'aide de fluxmètres de précision. Des sondes combinées d'humidité et de température sont situées juste en dessous des nacelles d'échantillon et de référence afin de permettre une vérification indépendante des performances

du système. Le mécanisme de la microbalance est très sensible à la sorption et à la désorption de l'humidité. L'instrument DVS est complètement automatisé et contrôlé par ordinateur.



Figure IV.1 Photographie du système DVS

Procédure expérimentale : le four de l'appareillage est programmé pour effectuer une montée rapide à la température de l'isotherme souhaitée. Après une stabilisation à la température du four de quelques minutes, l'enregistrement de la perte de masse peut débuter. Le flux gazeux est réglé de façon à ce qu'il soit supérieur (au moins cinq fois) au débit de vapeur d'eau en provenance de l'échantillon.

IV.1.3 Mesure de la capacité calorifique massique

IV.1.3.1 Principe de la méthode

La mesure de la capacité calorifique massique se fait traditionnellement avec des calorimètres. De nombreuses techniques calorimétriques ont été développées et utilisées pour la détermination des capacités calorifiques, avec une large priorité aux techniques de types calorimétries adiabatiques. En effet les calorimétries adiabatiques consistent à délivrer une quantité de chaleur connue à un échantillon que l'on a thermiquement isolé de son environnement et à mesurer l'élévation de température qui en résulte. Au contraire, les techniques dites non adiabatiques s'accommodent de l'existence d'un couplage thermique entre la source froide et l'échantillon. De plus, la présence d'une source froide permet de soumettre l'échantillon à un régime thermique périodique, de moyennner les signaux obtenus, et d'améliorer ainsi le pouvoir de résolution de la méthode.

IV.1.3.2 Matériel utilisé et mode opératoire

L'appareillage utilisé pour la mesure de la capacité calorifique massique est le calorimètre C80 Setaram. Le C80 est un calorimétrie différentiel de réaction permettant de suivre l'évolution du flux de chaleur lors du contact entre deux entités chimiques. Il fonctionne selon le principe de Calvet : deux cellules expérimentales sont placées dans un bloc calorimétrique, géré par un contrôleur, qui impose une température d'expérience, fixe et programmable.

Le principe de fonctionnement repose sur la comparaison des flux de chaleur échangés avec le bloc calorimétrique par les deux cellules expérimentales : la cellule de référence et la cellule de mesure.

Les cellules sont entourées par des thermocouples en série, constituant deux fluxmètres identiques et très sensibles, montés en opposition. Ce montage différentiel fournit un signal proportionnel à la chaleur échangée par l'échantillon, en s'affranchissant des perturbations liées à la régulation du bloc calorimétrique dans lequel sont placés les cellules. La constante de proportionnalité est déterminée au préalable par étalonnage électrique par effet joule. On pourra se reporter à (Gustin, 2002) pour une description détaillée du protocole et du matériel type. La température du four est programmée de façon linéaire avec le temps et l'hypothèse essentielle pour effectuer ce type de mesure est qu'il n'y ait ni perte de masse, ni terme source ou puits durant la mesure.



Figure IV.2 Photographie du calorimètre C80

IV.2 Etude de du séchage sur un pilote de laboratoire

Le dispositif expérimental que nous avons réalisé a un double objectif : d'une part, il est question de mener une caractérisation fine des différents transferts thermiques, puis massiques et d'autre part, il s'agira de mettre en place des protocoles expérimentaux permettant la validation des différents modules du modèle numérique.

Pour mieux appréhender le couplage de ces transferts thermiques et massiques trop complexes intervenant au niveau de notre modèle, nous avons jugé nécessaire de procéder à une expérimentation par étape allant du plus simple au plus complexe.

Etape I ou modèle I : le séchage des boues est purement convectif ; des expérimentations simples sans serre sont menées.

Etape II ou modèle II : le séchage est réalisé sous une serre réduite installée dans l'enceinte climatique. La présence des lampes simule le rayonnement solaire.

Pour chaque cas, un bilan thermique est posé, la vérification des hypothèses et du modèle numérique sera effectuée.

IV.2.1 Présentation du dispositif expérimental

La boucle hygrométrique est un système climatique permettant de maintenir dans une enceinte des conditions particulières de température et d'humidité. La boucle est de marque Sapratin, constituée d'un caisson de préparation d'air et d'une chambre d'essai vitrée d'un volume utile de 2 m³. Cette chambre peut être séparée par une cloison mobile. Pour préparer l'air aux conditions de température et d'humidité souhaitées, la machine est dotée d'un générateur de vapeur, d'un sécheur d'air, d'un groupe frigorifique et de résistances électriques. Le circuit d'air est en boucle fermée, l'ensemble de l'installation est donc isolé par rapport à l'air extérieur. Une turbine à vitesse variable assure la circulation d'air entre la chambre et le caisson.

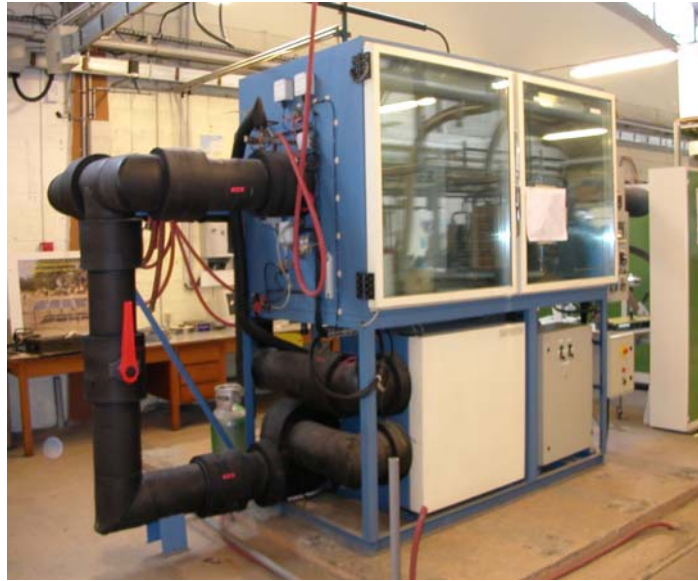


Figure IV.3 Photographie de l'enceinte climatique SAPRATIN

IV.2.1.1 ***Différentes configurations du pilote***

La configuration du pilote est faite selon le modèle étudié.

IV.2.1.1.1 **Modèle I**

La boue est étalée sur une plaque support et placée à l'intérieur de l'enceinte climatique. Les seuls phénomènes physiques pris en compte sont les échanges convectif et massique entre la boue et l'air asséchant .

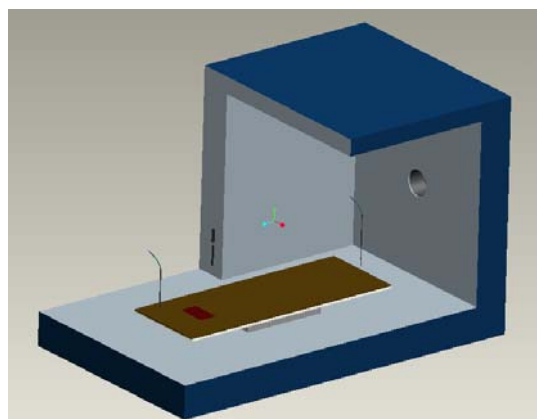


Figure IV.4 Configuration du pilote pour le modèle I

IV.2.1.1.2 Modèle II

La serre réduite a été dimensionnée et conçue en essayant d'optimiser au maximum la surface occupée dans l'enceinte. Elle est constituée de 3 parois souples en plastique à bulles et d'une paroi en PVC sur la face frontale, munie d'un orifice rectangulaire pour la circulation de l'air. L'extraction de l'air de la serre s'effectue via l'orifice. L'air de l'enceinte circule par dépression via la deuxième conduite en PVC.

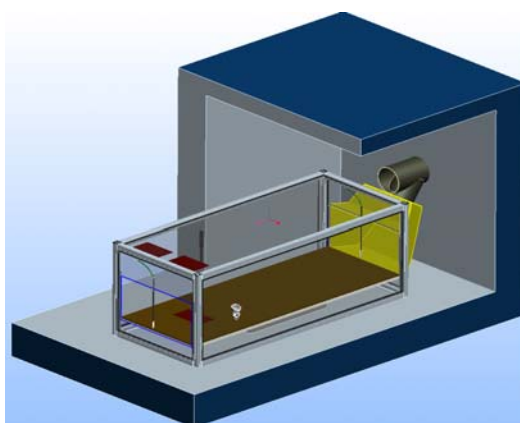


Figure IV.5 Configuration du pilote pour le modèle II

IV.2.1.2 Instrumentation du pilote

L'instrumentation du pilote est faite en tenant compte du modèle à étudier et suivant les paramètres à déterminer pour chaque étape.

IV.2.1.2.1 Instrumentation du modèle I

L'ensemble du dispositif comporte :

- Un support de surface 47cm x 40cm introduit dans le caisson climatique et posé sur une balance électronique de précision $\pm 2g$, munie d'une sortie analogique ;
- Un ventilateur de débit réglable grâce à un générateur variable. La vitesse d'air est mesurée par deux anémomètres thermiques de type FVA645TH2/TH3 de précision $\pm 0,01m/s$ dont l'un est placé à l'amont du support et l'autre à l'aval ;
- Une sonde de mesure thermo-hygrométrique de type MT8636HR de précision $\pm 2\%$ mesurant la température et l'humidité de l'air circulant dans le caisson climatique afin de vérifier la température et l'hygrométrie de consigne fixées au niveau de l'enceinte climatique ;

- Un thermocouple de type K à grande poignée T 150, placé à quelque profondeur de la boue. Ce thermocouple permet de suivre l'évolution de la température de la boue au cours de l'essai.

IV.2.1.2.2 Instrumentation du modèle II

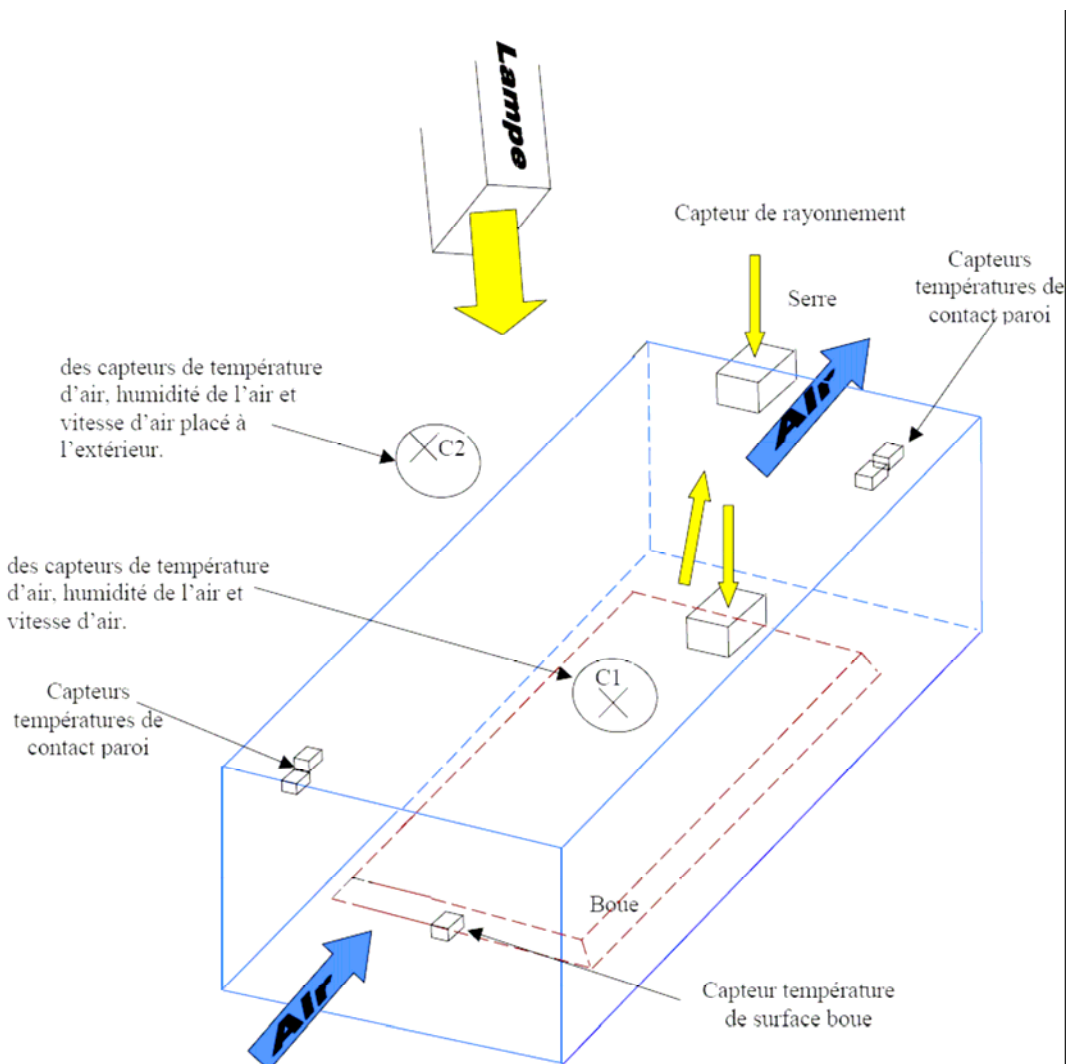


Figure IV.6 Répartition des capteurs sur la serre

C1, C2 : position des capteurs de température, humidité et vitesse d'air.

La serre est équipée de plusieurs thermocouples :

- quatre sondes Pt 100 de précision de $0,1^{\circ}\text{C}$ dont deux sont disposés sur la face extérieure de la couverture et les deux autres sont placées sur la face intérieure de la couverture ;

- deux sondes de mesure thermo-hygrométrique de type MT8636HR de précision $\pm 2\%$ pour la mesure de l'humidité relative et $0,1^\circ\text{C}$ de précision pour la température de l'air. Une des sondes est placée à l'intérieur de la serre et l'autre à l'extérieur mesurant les paramètres de l'air dans le caisson climatique ;
- un ventilateur de débit réglable grâce à un générateur variable ;
- deux anémomètres thermiques de type FVA645TH2/TH3 de précision $\pm 0,01\text{m/s}$, sont utilisés pour évaluer la vitesse de l'air ; l'un est à l'intérieur de la serre, et l'autre à l'extérieur ;
- trois Capteurs de flux thermique destinés à évaluer le flux émis par rayonnement de la source et les flux reçus et émis par la boue, avec une plage de mesure : 0 à 2000 W/m^2 de précision de 5% à 25°C ;
- un thermocouple de type K à grande poignée T150 placé en deux points différents, à quelque profondeur de la boue. Ce thermocouple permet de suivre l'évolution de la température de la boue au cours de l'essai ;
- une lampe type métal Halide simulant le rayonnement solaire. En effet Les lampes Métal Halide constituent des sources efficaces riches en sortie d'ultraviolet et visible. (annexe II) la correspondance sortie de lampe Métal Halide et spectre solaire AM 1 direct ;
- un pyranomètre de type LP PYRA 02 mesurant le rayonnement global dans la gamme spectrale de $0,3\mu\text{m}$ à $3\mu\text{m}$. Avec une sensibilité typique de $10 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$ et d'une température de fonctionnement de -40°C à 80°C , il permet la mesure du rayonnement global des lampes.

Tous les essais ont été réalisés à l'aide d'une balance électronique de marque Sartorius de précision $\pm 2\text{g}$, munie d'une sortie analogique. La balance et tous les capteurs sont reliés à un ordinateur doté du logiciel AMR-CONTROL via une centrale d'acquisition de type RS-232 permettant de stocker et de traiter les données.

IV.2.1.2.3 Fixation des conditions opératoires

Quatre variables opératoires sont fixés durant les essais : la température, la vitesse superficielle, l'humidité de l'air et le rayonnement de la source lumineuse (modèle II, uniquement). L'acquisition de la masse est réalisée toutes les 1 minute.

Toutes nos expériences sont effectuées à une température et humidité de consigne constante.

IV.2.2 Méthodologies d'obtention des courbes de séchage

L'obtention de la courbe caractéristique de séchage, et le calcul du flux massique d'eau nécessitent la connaissance de la vitesse de séchage.

IV.2.2.1 Calcul de la vitesse de séchage

L'acquisition des données expérimentales sur la masse de la boue permet de représenter la courbe donnant la perte de masse (kg) en fonction du temps (s). Cependant on a coutume d'utiliser la teneur en humidité du produit sur base sèche (X, kg eau /kg masse sèche) et non la masse, pour tracer la courbe de séchage.

Selon l'usage, ces données sont transformées afin de tracer soit la courbe de vitesse de séchage soit la courbe dite de Krischer (Kemp et al., 2001) selon que la vitesse de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ est représentée en fonction du temps ou de la teneur en eau sur base sèche.

La dérivation de la courbe de séchage peut s'avérer délicate lorsque cette courbe est bruitée. En effet cette opération est sensible au bruit et accentue celui-ci (Moynes, 1985). Pour éliminer ou réduire ce bruit, il est nécessaire d'effectuer des opérations de filtrage ou de lissage.

Il existe de nombreuses méthodes de filtrage dont :

- la méthode de Lanczos (1956) qui propose une formule de dérivation numérique incluant un filtrage ; Cette méthode sacrifie les premiers et les derniers points de la courbe selon la longueur de filtrage ;
- un autre type de filtrage consiste à utiliser un filtre à réponse impulsionnelle finie ou moyenne mobile. Ce filtre appartient à la catégorie des filtres dynamiques qui constituent une sous-classe des filtres linéaires ;
- la méthode de décomposition par ondelettes, plus récente, a été développée dans les années 80 (Grossmann et al., 1984). Il s'agit d'une méthode d'analyse de signal non stationnaire qui permet d'analyser le contenu fréquentiel d'un signal à un niveau local ;
- une autre méthode consiste à allonger le pas de temps lors de la dérivation. Pour assurer la réduction du bruit, de longs pas de temps sont nécessaires, entraînant une perte d'une partie de l'information contenue dans les données initiales ;
- une des méthodes les plus simples est l'ajustement d'un polynôme sur la courbe de perte de masse comme proposé par Moynes (1985).

Dans cette étude notre choix s'est porté sur la méthode proposé par Moyne. Ceci est illustré par la Figure IV.7 qui correspond à une courbe de séchage $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ en fonction de t) obtenue à partir des données brutes en utilisant le quotient des différences centrées avec un pas de temps de 60 secondes.

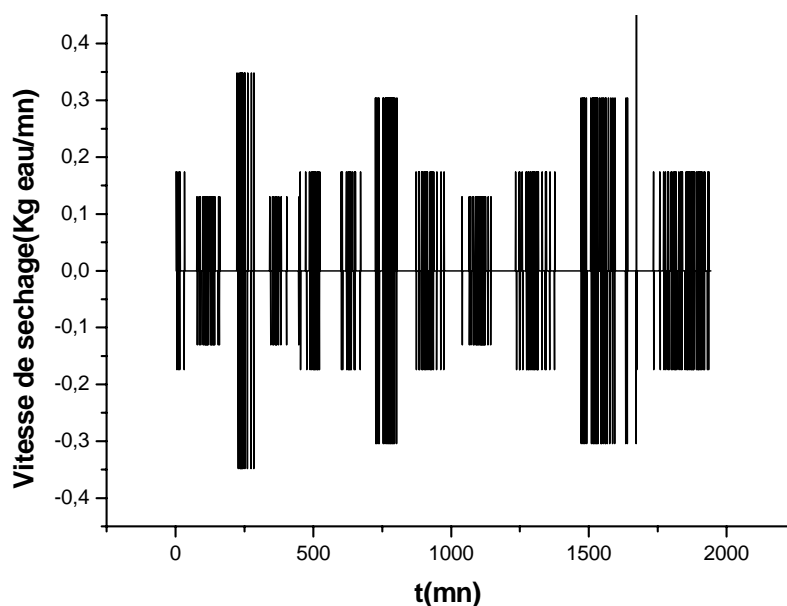


Figure IV.7 Exemple de courbe de vitesse de séchage bruitée

IV.2.2.2 Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage

L'intérêt de cette courbe est important; il suffit de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique du séchage dans n'importe quelle condition de l'air.

Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous forme utilisable non seulement par l'expérimentateur lui-même, mais aussi par l'ensemble de la communauté scientifique (Van Meel, 1958). Pour y parvenir, la démarche suivie consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ à la vitesse de première

phase $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$, dans les mêmes conditions de l'air en fonction de la teneur en eau réduite X_r (Kechaou, 2000 et Kouhila, 2001). La teneur en eau d'équilibre X_{eq} est déduite de l'isotherme de sorption.

Les cinétiques de séchage sont représentées sous la forme :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 f(X_r)$$

Équation IV-1

X_r est la teneur en eau réduite définie par:

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}$$

Équation IV-2

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ est la vitesse de phase constante intervenant pour $X_i \leq X \leq X_{cr}$

$f(X_r)$ est la vitesse de séchage réduite.

On impose arbitrairement une expression mathématique à la fonction $f(X_r)$; cette fonction doit vérifier les propriétés suivantes :

$$f(X_r) = 0 \quad \text{pour } X_r = 0$$

$$0 < f(X_r) < 1 \quad \text{pour } 0 < X_r < 1$$

En général, il est envisagé les fonctions de type polynomial ou de type de puissance pour représenter les courbes caractéristiques. Nous avons exploité dans le cadre de cette étude les fonctions type polynomial de degré 3 présentées sous cette forme simple :

$$f(X_r) = A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3$$

Équation IV-3

A_1, A_2, A_3 : paramètres à déterminer expérimentalement.

IV.2.2.3 Détermination de la première phase et la teneur en eau critique

La teneur en eau critique X_{cr} est généralement fonction des conditions de séchage. Dans le cas des produits biologiques, plusieurs auteurs (Fornell, 1979; Desmorieux et Moyne, 1992 ;

Belghit., 1997) relèvent qu'il est difficile de localiser une première phase de séchage même pour les produits dont l'humidité initiale est importants. Ils identifient la teneur en eau critique X_{cr} à la teneur initiale X_i . L'explication réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits (Kouhila, 2001). Ainsi la phase à vitesse constante peut être déterminée en utilisant une corrélation qui inclut les conditions aérodynamiques externes et en prenant en compte le caractère déformable des produits biologiques ou en utilisant l'analogie des transferts de chaleur et de masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée (Équation IV-3).

IV.2.3 Plan expérimental de l'étude du séchage

L'influence de quatre variables expérimentales sur la cinétique de séchage a été étudiée : la température, la vitesse et l'humidité de l'air et le rayonnement (pour le modèle II).

A cette fin, un plan expérimental pour chaque modèle a été élaboré.

Pour le *modèle I*, un ensemble de huit essais a été réalisés pour des valeurs de température de l'ordre de 30 à 50°C, à différentes valeurs d'humidités relatives de l'ordre de 20 à 60% et pour des valeurs de vitesses d'air comprises (0,5 et 1,65 m/s).

Pour le *modèle II*, un ensemble de dix huit essais a été réalisé pour des valeurs de température de l'ordre de 10 à 50°C, à différentes valeurs d'humidités relatives de l'ordre de 40 à 60%, trois valeurs de rayonnement lumineux (0, 315, 728W/m²). Le débit d'air a été réglé de manière à atteindre des vitesses superficielles de 0,5 à 2 m/s.

Les conditions expérimentales choisies correspondent à des situations rencontrées dans le séchage solaire des boues sur site industriel.

IV.3 Recueil de données sur un site industriel

Afin de modéliser certains paramètres climatiques (Rayonnement solaire, température et l'humidité relative de l'air) pour une validation éventuelle du code numérique sur des sites réels de séchage solaire des boues. Quelques mesures de ces paramètres ont été effectuées sur la station d'épuration de Brumath.

La station d'épuration de Brumath a une capacité de 21000 équivalents habitants dont les principales étapes de traitement mises en œuvre dans la station sont : un dégrillage, un dessablage-dégraissage, un traitement biologique par boue activée. Les résidus du traitement sont Polymérisés, puis par passage sur un filtre presse, les boues sont prélevées à une siccité

de l'ordre de 26%. La station de Brumath dispose également d'une unité de séchage solaire sous la forme de deux serres identiques. Les serres sont de type « serre ouvrant », et le retournement de la boue est assuré par un scarificateur. Les deux serres sont équipées d'un capteur mixte de température et d'humidité extérieure de marque Anjou automation (AT300), deux capteurs mixtes de température et d'humidité intérieure AT301.1 et AT301.2 (marque identique à AT300), un anémomètre (AT302), un capteur de rayonnement solaire (AT303), un pluviomètre (AT304).

L'ensemble des appareils équipant les deux serres de séchage solaire est commandé par un automate programmable Télémécanique TSX Micro.

Deux consoles de commande Telemécanique Magelis permettent de modifier les paramètres de fonctionnement et de consulter l'état des différents capteurs.

IV.4 Conclusion

Ce chapitre concerne le développement de méthodologies pour la mesure de quelques propriétés thermodynamiques de la boue utiles en vue du séchage. Ces méthodologies utilisent un calorimètre C80 pour déterminer la chaleur spécifique massique et un système DVS pour la détermination de l'isotherme de sorption.

Une description détaillée de la maquette de laboratoire et l'ensemble du matériel est mise en œuvre pour traiter les données expérimentales. Puis un plan d'expériences factoriel complet à quatre facteurs et à différents niveaux est posé.

Les résultats expérimentaux permettront de quantifier certains phénomènes et de valider les valeurs du modèle numérique. Ceci fera l'objectif du prochain chapitre.

IV.5 Références

Belghit, A., Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée Rev- Gén Therm 36,837-850 Elsevier (1997).

Desomorieux, H., Moyne, C., Analysis of dryers performance for tropical foodstuffs using the characteristic drying curve concept. In: Drying 92, Elsevier Amsterdam, 834-843 (1992).

Formell A., Séchage de produits biologiques par l'air chaud: calcul de séchoirs. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des industries agricoles et alimentaires, Montpellier (1979).

Gustin, J.L., Management des risques chimiques - Explosion en phase condensée technique de l'ingénieur J3896 (2002).

Grossmann, A., et Morlet, J., "Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape," *SIAM J. Math. Anal.*, 15, 723-736 (1984).

Kechaou, N., Étude théorique et expérimentale du processus de séchage de produits agro-alimentaires, Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences, Tunis (2000).

Kemp, I. C., Fyrh, B. C., Laurent, S., Roques, M. A., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., Sereno, A.A., Bonazzi, C., Bimbenet, J. J., et Kind, J. J., "Methods for processing experimental drying kinetics data," *Drying Technol.*, 19, 15-34 (2001).

Kouhila, M., Etude expérimentale et théorique des cinétiques de séchage convectif partiellement solaire des plantes médicinales et aromatiques de la région de Marrakech, Thèse de Doctorat d'état, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc (2001).

Lanczos, C., *Applied analysis*, Prentice Hall : Englewood Cliffs, N.J (1956) .

Moyne, C., "Etablissement des courbes de séchage - Courbes caractéristiques et exploitation," *Cahier De L'AFSIA N°1*, pp.3-18 (1985).

Van Meel, D. A., Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, Chem. Eng. Sci, vol. 9, pp. 36-44 (1958).

CHAPITRE V
ANALYSE DES RESULTATS
EXPERIMENTAUX ET VALIDATION
DU MODELE

Le modèle décrit dans la partie précédente (CHAPITRE III), est d'ores et déjà un outil d'aide pour comprendre les mécanismes complexes et couplés intervenant durant le séchage. Toutefois, ce programme ne pourra être validé et ainsi acquérir un caractère prédictif fiable qu'après avoir été confronté aux résultats observés et mesurés au niveau expérimental. A l'issue de cette confrontation, nous serons à même de juger la fiabilité des prédictions de l'outil numérique développé et nous pourrons alors envisager, après des améliorations éventuelles au niveau des hypothèses ou de la structure du modèle, de l'utiliser pour prévoir les performances de séchage de différentes configurations de serres, expérimentales ou industrielles.

Ce chapitre présente dans une première partie, les résultats obtenus au niveau de la détermination de paramètres caractéristiques de la boue intervenant dans la modélisation (capacité calorifique massique et isothermes de désorption).

Ses deux parties suivantes sont consacrées à l'analyse des résultats expérimentaux, obtenus sur les deux modèles réduits de serres présentés au chapitre précédent, ainsi qu'à la validation des modèles numériques correspondants (modèle I puis modèle II). Cette étape est réalisée à travers une comparaison des résultats simulés et expérimentaux. L'objectif recherché ici est de valider les prédictions des modèles numériques concernant l'évolution de la teneur en base sèche, ainsi que des températures respectives de la boue, de l'air asséchant (air intérieur) et de la couverture.

V.1 Résultats sur les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation

V.1.1 Isothermes de désorption

La méthode présentée dans le CHAPITRE IV est directement appliquée sur les boues de la station d'épuration de Rosheim. La température considérée pour l'isotherme est la température moyenne de l'air intérieur calculée pour la totalité de la mesure.

Les résultats présentés sur la Figure V.1 sont obtenus pour une boue d'un même lot pour deux températures différentes. On constate que les deux courbes ont pratiquement la même allure et possèdent une forme de type II dans la classification BDDT (Brunauer et al., 1940). Le même type d'isothermes de désorption sur des boues résiduaires urbaines a été observé par Bongiovanni (1998), Léonard (2003) et Vaxelaire et al., (2002). Cette figure montre un taux d'eau liée relativement faible pour une humidité relative faible, celle-ci augmentant progressivement à humidité relative croissante. En effet, la teneur en eau liée dépend de l'air ambiant, la température et l'humidité relative.

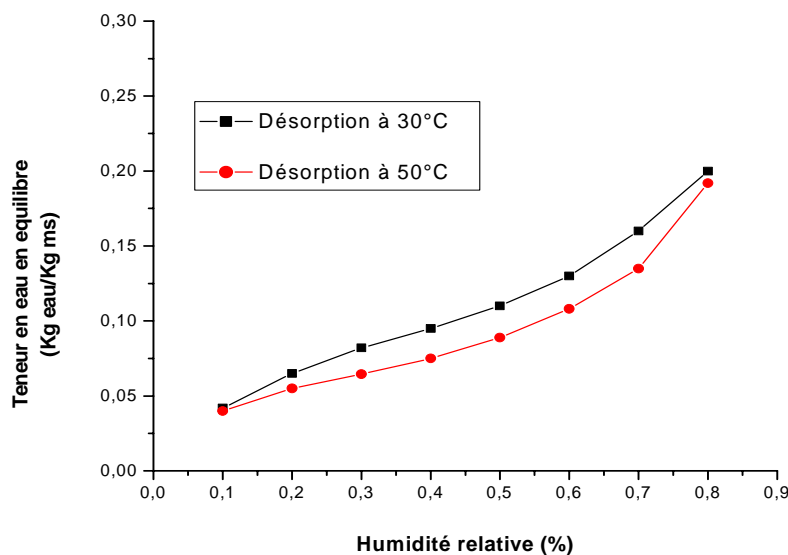


Figure V.1 Isotherme de désorption à une température de 30°C et à 50°C

Un certain nombre des modèles listés dans le CHAPITRE II a été testé pour modéliser les isothermes de désorption. Vu leur faible gamme de validité ou les mauvais résultats

obtenus, les modèles de Langmuir, BET, Chung-Pfost, de Kuhn et de Harkins-Jura n'ont pas été retenus.

Les modèles les plus souvent utilisés pour modéliser des isothermes de type II (Smith, Hasley, Henderson et Oswin) ont été testés dans leur gamme de validité.

Pour chacun des modèles ainsi testés, les paramètres k et n sont déterminés par identification aux courbes expérimentales de désorption, en minimisant l'erreur quadratique moyenne (EQM).

Le Tableau V.1 suivant présente les valeurs des erreurs quadratiques moyennes ($EQM = \frac{1}{N} \sum_1^N |X_{eq\text{cal}} - X_{eq\text{exp}}|^2$) obtenues après ajustement, pour différents modèles d'isothermes de désorption testés.

La comparaison de l'adéquation de chaque modèle pour décrire les résultats expérimentaux est faite sur la base de la valeur de l'EQM. Nous constatons alors que tous ces modèles donnent de bons résultats.

Tableau V.1 EQM relatifs à l'ajustement des modèles d'isothermes de désorption pour les boues à deux températures données.

	<i>T=30°C</i>	<i>T=50°C</i>
Hasley	4,6 E-02	3,05 E-03
Henderson	4,33 E-03	2,30 E-03
Oswin	3,50E-05	2,90 E-04
Smith	1,41 E-04	2,97 E-04

Pour la suite, le modèle d'Oswin (Éq. V.1) sera retenu car il permet d'obtenir l'erreur quadratique moyenne (EQM) la plus faible (Tableau V.1). En outre, sa gamme de validité est cohérente avec toute la gamme des humidités relatives expérimentées, contrairement au cas du modèle de Smith, ou de celui de Henderson. Le modèle d'Oswin est d'ailleurs l'un des plus fréquemment utilisés pour les produits organiques (Bassal, 1993).

Le Tableau V.2 reprend les valeurs des paramètres k et n du modèle d'Oswin donné par l'équation Équation V-1 et l'EQM relatif à chaque ajustement pour les différentes isothermes obtenues.

$$X_{eq} = k \left(\frac{Hr}{1-Hr} \right)^n$$

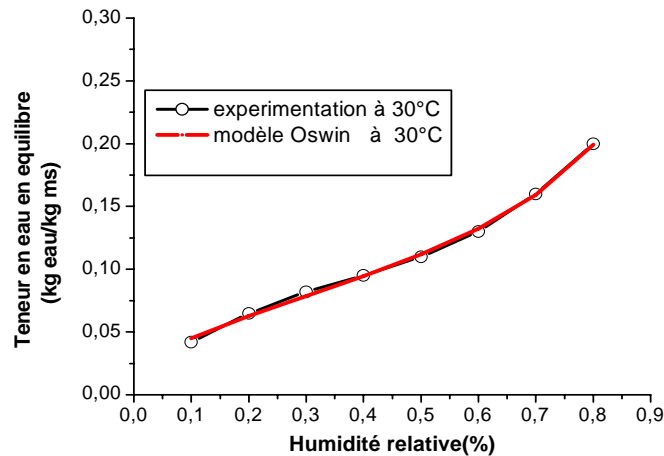
Équation V-1

Tableau V.2 Paramètres du modèle d'Oswin et EQM pour chaque ajustement

<i>Température</i>	<i>Paramètre k</i>	<i>Paramètre n</i>	<i>Domaine de validité</i>	<i>EQM</i>
30°C	0,112	0,416	0,10 ≤ Hr ≤ 0,80	3,50E-05
50°C	0,0938	0,484	0,10 ≤ Hr ≤ 0,80	2,90E-04

On observe que les paramètres k et n ont des valeurs voisines pour les deux températures données. Ceci laisse entrevoir qu'une fluctuation de la température de quelques degrés n'influe pas trop sur les isothermes des boues.

Sur les Figures V.2 et 3 les courbes d'ajustement (modèle d'Oswin) sont représentées. Les valeurs du modèle montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.



**Figure V.2 Comparaison valeurs expérimentales et celles de l'ajustement du modèle d'Oswin à
T= 30°C**

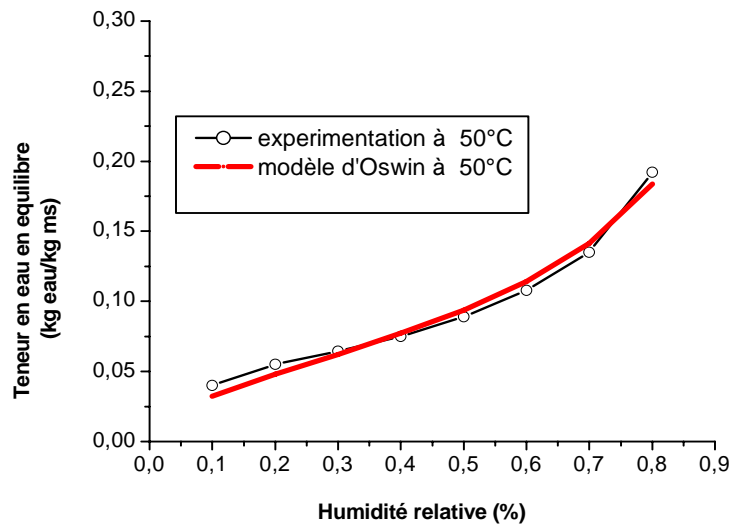


Figure V.3 Comparaison valeurs expérimentales et celles de l'ajustement du modèle d'Oswin à T= 50°C

Les isothermes à 30°C et 50°C ont été déterminées à l'ENSTIMAC, faute de dispositifs expérimentaux adéquats dans notre laboratoire. De ce fait, bien que notre objectif ait été de déterminer les paramètres k et n du modèle d'Oswin en fonction de la température, nous avons été limités à deux essais de température (30 et 50 °C). Afin de pouvoir estimer les teneurs en eau en équilibre dans une gamme de température plus étendue, il conviendrait donc de réaliser des essais complémentaires. Toutefois les températures 30 et 50 °C sont celles rencontrées dans une serre en période estivale, période durant laquelle le séchage sous serre est effectif, par rapport à une période hivernale correspondant plutôt, en pratique, à une phase de stockage.

Par comparaison avec nos valeurs, Certains auteurs comme Léonard (2002) a déterminé des isothermes de désorption de boue urbaine activée de deux stations d'épuration différentes. Les mesures de cet auteur sont faites par la méthodes des bœaux avec des solutions salines à 25°C dont la durée du test est de deux à trois semaines pour les humidités relatives supérieures à 75% et de dix jours pour les autres. Les valeurs de paramètres k et n sont respectivement de l'ordre 0,10 et 0,40.

V.1.2 Capacité calorifique massique

Pour calculer la capacité calorifique massique d'un produit humide, on utilise la loi de composition suivante :

$$Cp = \frac{MsCp_{anhydre} + meCpe}{m}$$

Équation V-2

qui est équivalente à la formule ci après en introduisant la teneur en eau en base sèche X :

$$Cp = \frac{1}{1+X} Cp_{anhydre} + \frac{X}{1+X} Cpe$$

Équation V-3

Avec :

Cp_e : capacité calorifique massique de l'eau (= 4180 J.kg⁻¹.°C⁻¹)

$Cp_{anhydre}$: capacité calorifique massique de la masse sèche de la boue (J.kg⁻¹.°C⁻¹)

La capacité calorifique massique Cp_e de l'eau étant connue, seule la valeur pour la matière sèche des boues $Cp_{anhydre}$ est à déterminer. Le calorimètre C80 a ainsi été utilisé pour déterminer la valeur de $Cp_{anhydre}$ sur des boues séchées sous serre prélevées sur la station d'épuration de Brumath. On obtient alors un $Cp_{anhydre}$ de l'ordre de 1182 J/kg.°C pour une température de référence de 20°C. Cette valeur de 20°C a été choisie de manière arbitraire, la variation de la température n'ayant pas trop d'influence sur la chaleur massique de la masse anhydre de la boue (Vaxelaire et al., 2002).

En revanche la composition (en matière minérale) de la boue joue un rôle non négligeable (Vaxelaire et al., 2002). Dans un registre de comparaison, Vaxelaire et al., (2002) trouve un $Cp_{anhydre}$ de l'ordre 1350 J/kg.°C pour une boue résiduaire urbaine dont le type de traitement amont n'est pas précisé.

De manière générale, selon la nature des eaux usées et suivant le procédé de traitement de ces eaux et des boues (ajout de coagulants, polymères, etc.), la valeur de la chaleur massique anhydre de la boue peut varier significativement. Par conséquent la valeur déterminée dans ce travail, comme toutes les autres, doit être considérée comme caractéristique de la station d'épuration étudiée et n'est pas directement généralisable.

V.2 Modèle I : Formulation mathématique, résultats expérimentaux et validation

La validation d'un modèle numérique aussi complexe que celui d'une serre passe par une validation par étape (Cormary et al., 1985) depuis les situations les plus simples (Modèle I) vers des situations les plus complexes (Modèle II). Afin de séparer les différents paramètres en interaction le modèle I est une première étape de notre modèle de séchage sous serre.

V.2.1 Formulation mathématique du modèle I

Pour rappel, au niveau du modèle I, la boue est étalée sur une plaque support et placée à l'intérieur de l'enceinte climatique. Les conditions opératoires (température, vitesse superficielle et humidité de l'air) sont maintenues constantes.

Le modèle I est un modèle relativement simple mais suffisamment complet pour simuler l'évolution de la teneur en eau et de la température de la boue lors du séchage. Il correspond en fait à une version réduite du modèle global, dans le sens où seuls les phénomènes d'échange convectifs entre l'air et la boue sont représentés dans un premier temps. L'influence des parois de la serre et du rayonnement sont ensuite rajoutés dans le modèle II.

V.2.1.1 Hypothèses du modèle

Nous supposons valable les hypothèses suivantes:

- les échanges radiatifs à l'intérieur de l'enceinte sont négligés ;
- les échanges convectifs entre l'air et les parois de l'enceinte climatique sont négligés ;
- la température et la teneur en eau du produit sont supposées uniformes ;
- la température, l'humidité et la vitesse de l'air en contact avec la couche de boue sont supposées constantes.

V.2.1.2 Equations du modèle I

Les équations qui régissent les échanges thermiques et massiques au niveau du système se traduisent par:

Conservation de l'énergie pour la boue

$$m_b C_{p_b} \frac{dT_b}{dt} = h S (T_{ai} - T_b) - L_v \dot{m}$$

Équation V-4

Conservation de la masse

$$\dot{m} = Ms \left(- \frac{dX}{dt} \right)$$

Équation V-5

Pour résoudre les équations du modèle, nous avons choisi la méthode classique de Runge Kutta d'ordre 4.

V.2.2 Résultats expérimentaux

Comme indiqué au paragraphe IV 2.3, un plan expérimental à trois variables a été considéré pour différentes valeurs de températures, de l'ordre de 30 à 50°C, différentes valeurs d'humidités relatives comprises entre 20 et 60% et des valeurs de vitesses d'air comprises entre 0,5 et 1,65 m/s. 8 essais expérimentaux ont ainsi été réalisés. Comme expliqué dans le paragraphe précédent les températures 30 et 50 °C sont celles rencontrées dans une serre en période estivale.

Tableau V.3 Plan expérimental du modèle I.

Numéro de l'essai	Température de l'air (°C)	Vitesse de l'air (m/s)	Humidité relative de l'air (%)
1	29,79±0,04	0,5	44,95±1,7
2	29,79±0,01	0,5	58,06±0,93
3	29,81±0,87	1,65	42,35±1,67
4	48,04±0,58	1,65	30,52±1,06
5	48,64±0,31	1,65	20,08±1,76
6	29,55±0,08	0,94	58,24±1,45
7	29,71±0,45	1,06	37,06±1,01
8	44,55±0,64	0,5	26,20±0,46

Le Tableau V.3 reprend les conditions opératoires lors des expériences réalisées.

V.2.2.1 Cinétique du séchage

A partir des données expérimentales on obtient une courbe représentant la perte de masse en fonction du temps. L'acquisition de la masse est réalisée toutes les 60 secondes. Toutefois, comme nous l'avons indiqué au CHAPITRE IV, la courbe de séchage est représentée par l'évolution de la teneur en eau sur base sèche, en fonction du temps.

La Figure V.4 représente, pour différentes conditions d'air asséchant, l'évolution des teneurs en eau sur base sèche en fonction du temps. La diminution attendue des vitesses et des temps de séchage est bien observée quand la température de l'air augmente, quand son humidité relative diminue ou quand sa vitesse augmente.

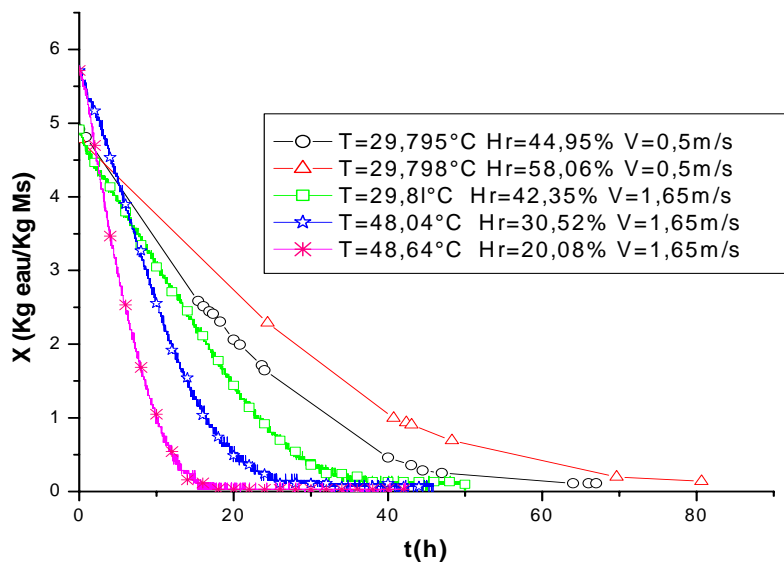


Figure V.4 Courbes de séchage représentant l'évolution des teneurs en eau sur base sèche, en fonction du temps.

Pour rappel, les courbes de vitesse de séchage sont calculées en ajustant un polynôme sur la courbe de l'évolution de teneur en fonction du temps, comme proposé par Moyne (1985). La Figure V.5 montre le type de courbe de vitesse de séchage obtenu pour les essais effectués.

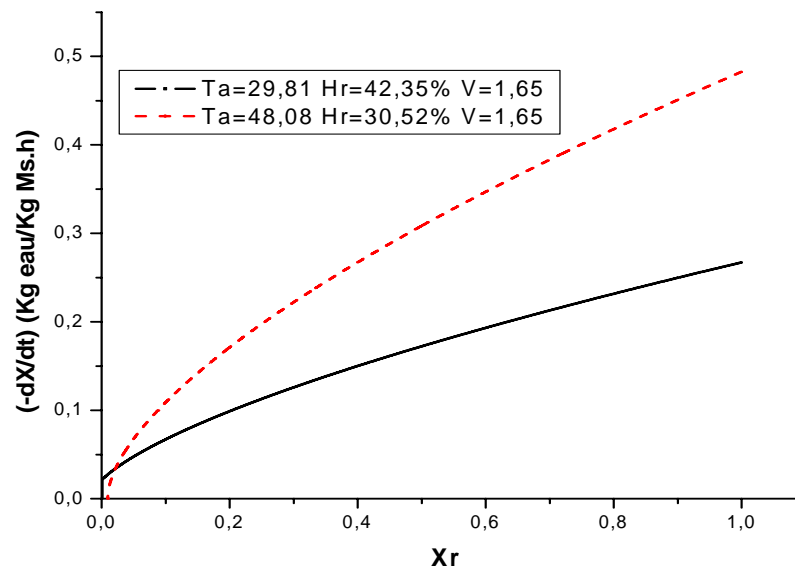


Figure V.5 Profil des courbes de vitesse de séchage

On note l'absence des phases de mise en température, et de séchage à allure constante (phase1). Seule la phase à allure décroissante est présente (figure ci dessus). Ceci est conforme aux résultats expérimentaux de certains auteurs, Ratti and Crapiste (1992), Al Hodali et al., (1997) Yaldyz et al., (2001), Lahsani, Kouhila, Mahrouz, and Jaouhari (2004). L'explication proposée par ces auteurs réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits.

V.2.2.2 Courbe caractéristique du séchage

Pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelle condition de l'air nous avons utilisé le principe de la courbe caractéristique de séchage (I.1.1.1). La détermination de la courbe caractéristique correspond à l'expression de la variation d'une vitesse de séchage réduite en fonction d'une teneur en eau réduite X_r . Nous cherchons donc une expression du type :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) / \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = f(X_r)$$

avec:

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)$: vitesse de séchage à un instant t (kg /kg Ms.h)

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$: vitesse de séchage (kg /kg Ms.h) pendant la première phase (phase à vitesse constante) ; prise égale à la valeur de vitesse de séchage au point $X_r = 1$

X_r est défini de la manière suivante :

$$\begin{cases} X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \\ X_{cr} = X_i \end{cases}$$

X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre donnée par les isothermes de désorption.

X_i est la teneur en eau initiale.

La courbe de vitesse de séchage réduite $f(X_r)$ est déterminée à partir de nos expériences sous la forme polynomiale, comme indiqué au paragraphe IV 2.2.2.

Celle-ci peut être obtenue après avoir effectué plusieurs expériences de séchage (4 ou 5) dans des conditions opératoires différentes (Charreau et al., 1991).

Notre démarche est donc de déterminer la courbe caractéristique avec les 5 premiers points expérimentaux (essais 1 à 5), les 3 autres points (essais 6 à 8) permettant de valider le modèle.

Pour chaque essai, les coefficients d'une fonction polynomiale de degré 3 ajustées aux valeurs expérimentales sont déterminés et on moyenne ensuite la valeur des coefficients pour l'ensemble des essais selon la relation suivante :

$$A_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p A_{ij} \quad 1 \leq i \leq 3$$

Équation V-6

Avec p le nombre d'essais réalisés
 j le numéro de l'essai
 A_i les coefficients des fonctions $f(X_r)$

Les valeurs, A_1 , A_2 , A_3 de la courbe caractéristique sont déterminées ainsi que leurs limite de confiance à 95%.

Tableau V.4 Paramètres A_1 , A_2 , A_3 avec la limite de confiance de chaque paramètre.

Valeur des paramètres		LC à 95%
A_1	2,39	0,670
A_2	3,02	1,30
A_3	1,63	0,660

La Figure V.6 représente les valeurs expérimentales des vitesses de séchage réduites de cinq essais ainsi que la courbe caractéristique obtenue avec les valeurs moyennes des coefficients. Ce graphique montre une faible dispersion autour de la courbe moyenne.

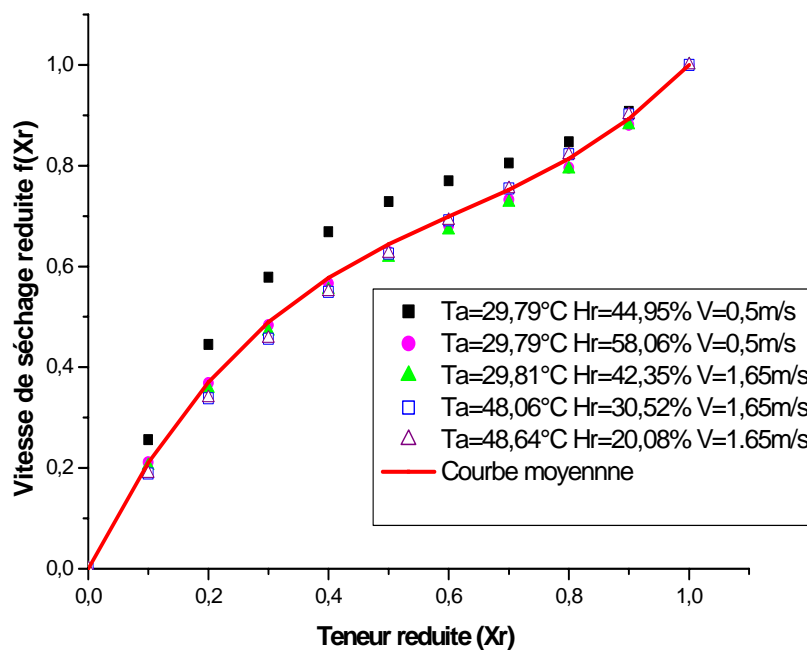


Figure V.6 Courbe caractéristique de séchage

V.2.3 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés

La comparaison des résultats expérimentaux et simulés est effectuée sur la base des évolutions de la teneur en eau et de la température à la surface de la boue. Les données expérimentales utilisées pour cette partie correspondes aux essais 1 à 5.

Les valeurs des paramètres physiques d'entrée fixes dans le code sont : la courbe caractéristique de séchage déterminée avec cinq points expérimentaux, l'équation de l'isotherme de sorption, la chaleur massique de la boue, la surface du support et le coefficient de convection.

Pour simuler un essai de séchage, les conditions opératoires de séchage au niveau expérimental (la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air), ainsi que les conditions initiales (la masse, la température et la siccité initiale de boue) pour chacun des essais sont les données d'entrée du code.

Les figures suivantes (Figure V.7 à Figure V.10) représentent les différentes comparaisons des résultats obtenus sur les essais qui ont permis de déterminer la courbe caractéristique.

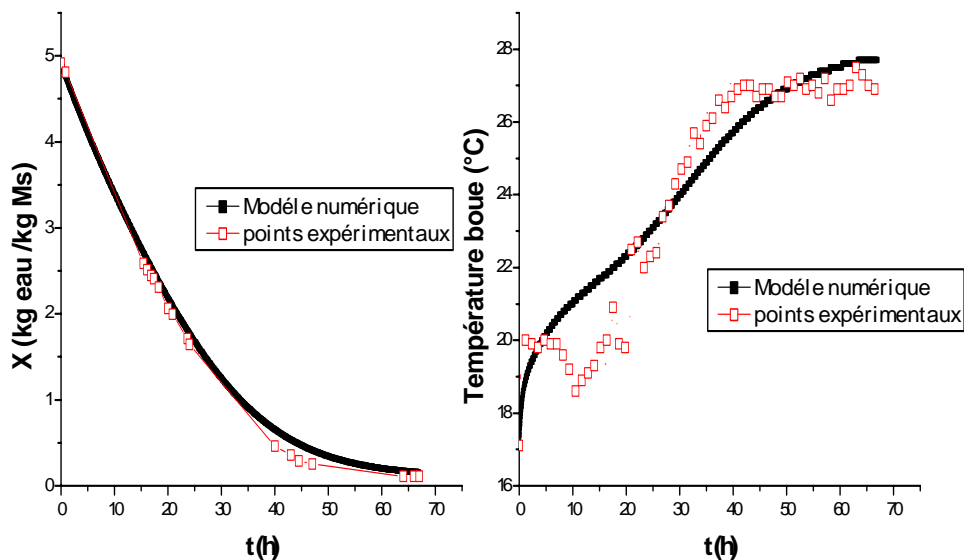


Figure V.7 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 1 ($T_a=29,7^\circ\text{C}$, $H_r=44,95\%$, $V=0,5\text{m/s}$).

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE

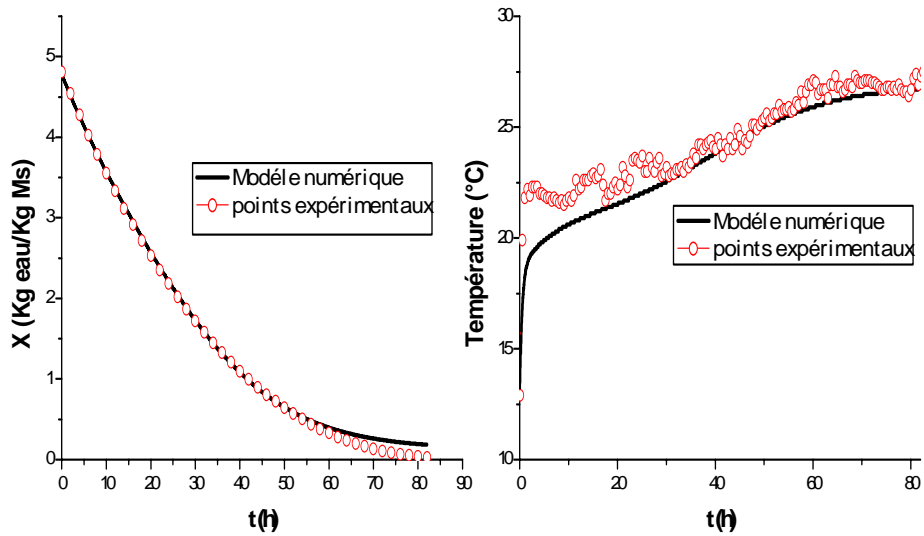


Figure V.8 Comparaison valeurs simulées et expérimentales essai2 ($T_a=29,7^\circ\text{C}$, $H_r=58,06\%$, $V=0,5\text{m/s}$).

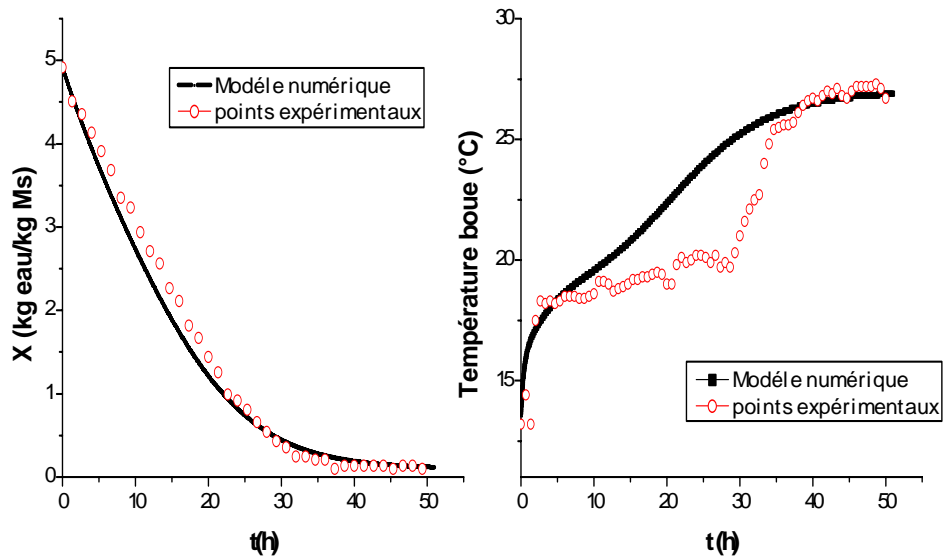


Figure V.9 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 3 ($T_a=29,81^\circ\text{C}$, $H_r=42,35\%$, $V=1,65\text{m/s}$).

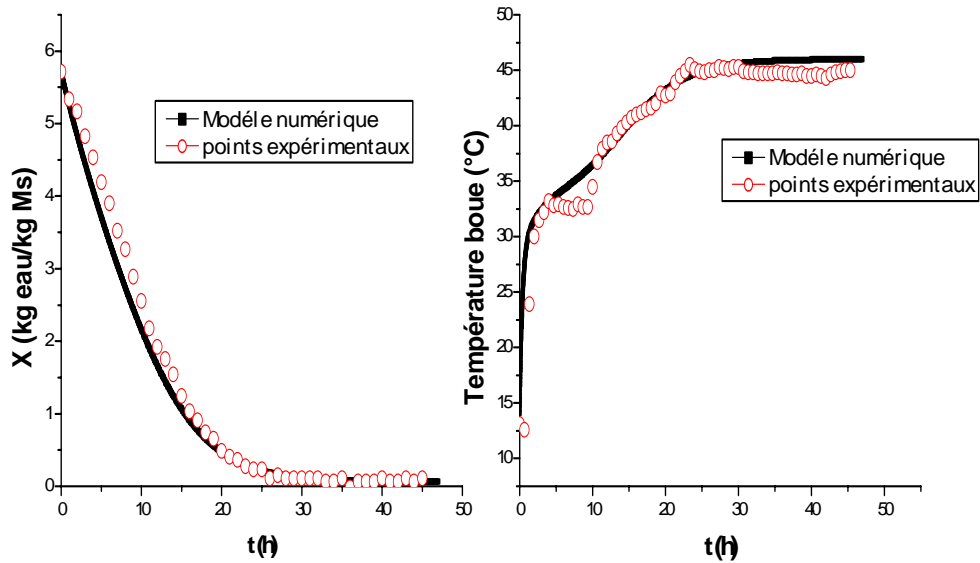


Figure V.10 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 4 ($T_a=48,04^\circ\text{C}$, $H_r=30,52\%$, $V=1,65\text{m/s}$).

V.2.3.1 Évolution de la teneur en eau

Les profils de teneur en eau mesurés au cours des essais ont été comparés à ceux simulés. En observant l'évolution des teneurs en eau de la boue des figures ci-dessus, la simulation montre une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

V.2.3.2 Évolution de la température de la boue

Sur les points expérimentaux, on peut observer une zone pendant laquelle la température est pratiquement constante suivie par une hausse de la température de surface pour atteindre la température de l'air asséchant en fin de séchage. La montée en température peut être le reflet d'un assèchement de la surface ou de l'apparition de résistances intra granulaires au transfert. La présence d'un plateau en température confirme la présence simultanée d'une zone à flux constant lors du séchage.

L'évolution de température de la surface de la boue simulée et celle mesurée expérimentalement est satisfaisante, même s'il existe parfois un écart entre les résultats numériques et expérimentaux.

On pourrait attribuer ces différences aux hypothèses simplificatrices considérées (phénomène de rayonnement et de conduction négligé), au coefficient d'échange convectif de chaleur qui n'est pas bien connu. En effet le coefficient d'échange convectif est pris constant pour une vitesse d'air donnée alors qu'il devrait varier selon l'évolution de la température de surface de la boue.

V.2.4 Validation du modèle

Dans cette partie, nous cherchons à voir dans quelle mesure l'utilisation de la courbe caractéristique obtenue à partir d'une série d'essais (dans notre cas essais 1 à 5) peut être étendue à d'autres essais de séchage, réalisés dans des conditions proches mais différentes et n'étant pas pris en compte pour la détermination de la courbe caractéristique.

Pour cette phase de validation du modèle, différentes expériences autres que celles ayant permis d'établir la courbe caractéristique ont donc été simulées. Les essais 6 à 8 ont ainsi été utilisés pour cette partie du travail. Les résultats correspondants, présentés sur les Figure V.11 et Figure V.12, montrent aussi un accord satisfaisant entre les valeurs simulées et les mesures expérimentales.

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE

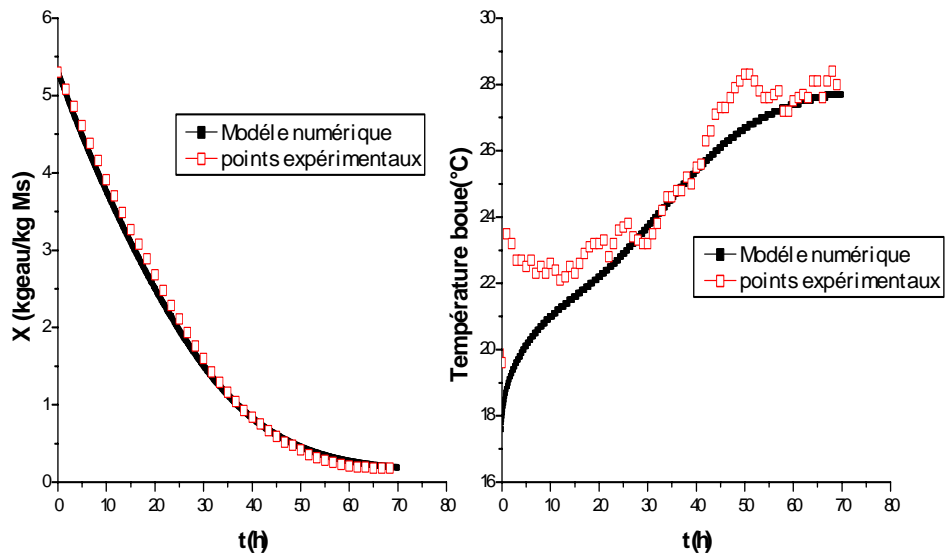


Figure V.11 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 6 ($T_a=29,55^\circ\text{C}$, $H_r=58,24\%$, $V=0,944\text{m/s}$)

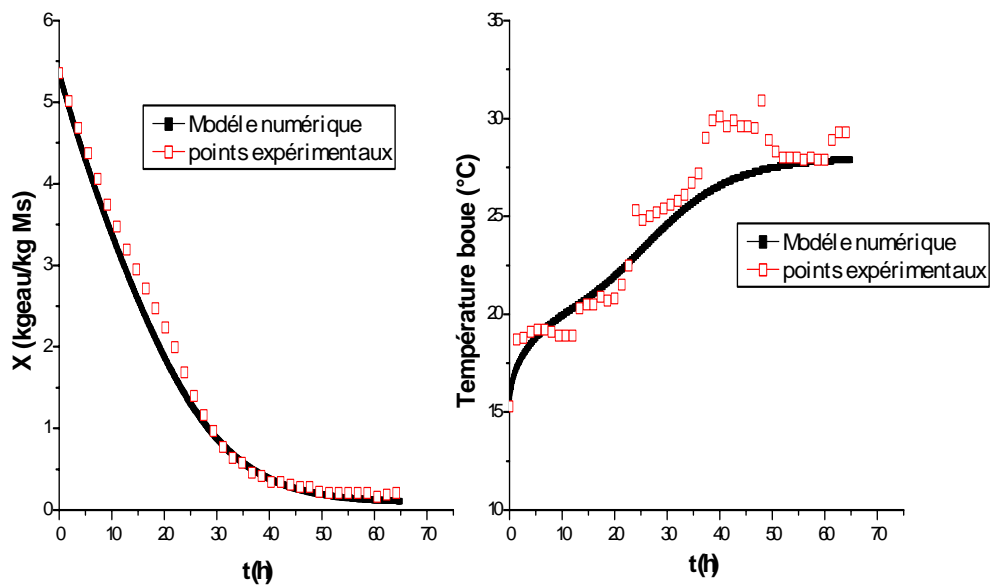


Figure V.12 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 7 ($T_a=29,71^\circ\text{C}$, $H_r=37,06\%$, $V=1,06\text{ m/s}$)

Nous pouvons donc conclure que pour l'ensemble des essais, le modèle de la courbe caractéristique décrit de manière satisfaisante les cinétiques expérimentales.

Le modèle I peut donc être considéré comme validé par les comparaisons des données expérimentales et numériques de température et de teneur en eau de la boue, les valeurs prévues étant dans un accord raisonnable avec les données expérimentales.

V.3 Modèle II : Résultats expérimentaux et validation du modèle

Le modèle II correspond à un modèle réduit de serre intégrant la totalité des mécanismes, c'est à dire non seulement la convection mais aussi l'influence des parois et du rayonnement. Pour des raisons pratiques et suite à une panne définitive sur l'enceinte climatique de l'INSA, nous avons du faire appel à la location pour disposer d'une enceinte climatique, malheureusement de dimensions plus réduites, ce qui a induit également une réduction de la taille du modèle réduit de serre. En dehors des dimensions plus réduites du dispositif, l'intégralité de l'équipement et des protocoles est identique à ce qui est décrit au chapitre IV.

La serre utilisée pour cette série d'essais présente donc les dimensions suivantes : longueur 0,6 m, largeur 0,5 m et hauteur 0,35 m. Ces dimensions de serre ont été retenues en fonction des dimensions internes de l'enceinte : 0,88 m de profondeur, 0,75 m de largeur et 0,76 m de hauteur.

V.3.1 Résultats expérimentaux

Comme indiqué au paragraphe IV 2.3, un plan expérimental à quatre variables a été réalisé avec trois valeurs de rayonnements (0, 728 et 315W/m²), des valeurs de températures d'air comprises entre 10 et 50°C, des humidités relatives entre 40 et 60% et des valeurs de vitesses d'air comprises entre 1 et 2, 5 m/s.

Dix-huit essais expérimentaux ont été menés sur la maquette dont 6 essais avec une radiation solaire nulle. Le Tableau V.5 reprend les conditions opératoires réalisées lors des expériences et les écarts moyen observés.

Tableau V.5 Plan expérimental modèle II

Numéro de l'essai	Rayonnement des lampes halides R_g (W/m^2)	Température de l'air extérieur ($^{\circ}C$)	Vitesse d'air extérieure de la serre (m/s)	Vitesse d'air intérieure de la serre (m/s)	Humidité relative extérieure (%)
1	0	$49,7 \pm 1$	$2,3 \pm 0,5$	$1,4 \pm 0,04$	$54,2 \pm 2,8$
2	0	$49,2 \pm 1,4$	$2,8 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,04$	$39,0 \pm 3,7$
3	0	$30,0 \pm 0,6$	$2,9 \pm 1,3$	$1,6 \pm 0,1$	$61,3 \pm 4,0$
4	728	$30,5 \pm 0,1$	$2,1 \pm 1,7$	$1,5 \pm 0,1$	$47,3 \pm 5,6$
5	728	$52,5 \pm 1,0$	$1,8 \pm 0,7$	$1,6 \pm 0,1$	$58,8 \pm 6,0$
6	0	$29,7 \pm 0,8$	$2,2 \pm 1,6$	$1,8 \pm 0,1$	$46,4 \pm 5,6$
7	728	$30,7 \pm 0,08$	$1,2 \pm 0,05$	$1,4 \pm 0,04$	$64,3 \pm 3,6$
8	728	$50,5 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,08$	$1,7 \pm 0,07$	$63,6 \pm 4,2$
9	728	$38,8 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,1$	$1,3 \pm 0,1$	$62,5 \pm 4,0$
10	315	$49,5 \pm 0,9$	$1,0 \pm 0,0$	$1,3 \pm 0,05$	$50,0 \pm 7,7$
11	315	$49,2 \pm 1,1$	$1,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,07$	$61,2 \pm 2,9$
12	315	$29,6 \pm 1,6$	$1,2 \pm 0,07$	$1,0 \pm 0,07$	$59,0 \pm 6,9$
13	315	$29,7 \pm 0,6$	$1,3 \pm 0,07$	$1,0 \pm 0,07$	$66,5 \pm 3,8$
14	315	$10,4 \pm 1,6$	$1,4 \pm 0,06$	$1,7 \pm 0,06$	$90,9 \pm 1,4$
15	315	$38,8 \pm 1,0$	$1,9 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,07$	$64,2 \pm 5,0$
16	0	$40,7 \pm 1,4$	$2,3 \pm 2,3$	$1,4 \pm 0,1$	$39,2 \pm 6,0$
17	0	$10,1 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,06$	$1,2 \pm 0,04$	$81,3 \pm 3,3$
18	728	$11,4 \pm 0,7$	$1,2 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,08$	$92,6 \pm 1,7$

La teneur en eau initiale lors des essais est de l'ordre de 5 kg_{eau}/kg Ms. La mesure des conditions opératoires (le rayonnement des lampes, la température, l'humidité et la vitesse de l'air intérieur) a été effectuée au centre de la serre.

De manière générale, on a pu remarquer que lors de la conduite des essais réalisés, le fonctionnement du générateur de vapeur est tel que la production de vapeur s'arrête lorsque le niveau d'eau nécessite un remplissage. En conséquence, lors d'un essai de séchage, la production peut être brièvement interrompue plusieurs fois. Ces phases transitoires influencent le déroulement du séchage et ont également pour effet une fluctuation de la teneur en humidité de l'air qui n'arrive pas à se stabiliser autour de la valeur cible du plan expérimental.

La courbe d'humidité relative de l'air (Hr) (Figure V.13) illustre bien le fonctionnement du générateur de vapeur. On observe au début de l'essai une zone de production stable pour laquelle l'humidité de l'air est constante suivie par des zones transitoires caractérisées par une

augmentation du taux d'humidité lorsque la production de vapeur reprend, et enfin une chute de l'humidité de l'air lorsque le générateur est alimenté en eau.

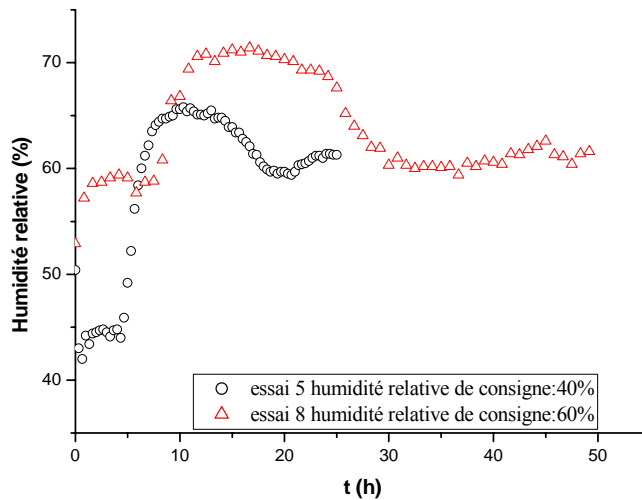


Figure V.13 Courbe de l'humidité relative de l'air de séchage utilisé mettant en évidence la fluctuation de ce paramètre

Il est à noter aussi que, pour la température de la boue, la mesure délivrée par le thermocouple peut s'écarter de plusieurs degrés de la température réelle de la boue. En effet, la température que l'on mesure résulte de l'équilibre thermique de la boue, du thermocouple et de l'air intérieur potentiellement différent de celui de la boue. Le retrait de l'eau de la boue conduit à une fissuration de cette dernière, le thermocouple qui initialement est immergé dans la boue se retrouve à la surface et en contact avec l'air intérieur de la serre.

Toutefois, l'analyse de l'évolution de température de la boue confirme la théorie avancée dans la littérature. L'évolution de la température peut être reliée aux différentes périodes de séchage (phase de mise en température, phase à vitesse constante et enfin la phase à vitesse décroissante). Les Figure V.14 et Figure V.15 montrent l'évolution type de température de la boue avec ou sans rayonnement.

On remarque sur ces figures qu'au début du séchage, la température à la surface de la boue augmente de la température de stockage jusqu'à la température du bulbe humide dite température humide T_h (Figure V.14). La température de surface reste égale à la température humide pendant toute la période de séchage à flux constant. Une fois que le ralentissement du flux de séchage s'opère, la température de l'échantillon monte pour atteindre progressivement

la température de l'agent séchant T_{ai} au terme du séchage (Figure V.14). Ceci est observé lorsque l'énergie apportée à la surface de la boue l'est uniquement de manière convective. Mais lorsqu'une autre forme d'énergie telle que l'énergie solaire intervient, la surface de la boue durant la première phase a une température supérieure à la température humide notée T_h' (Figure V.15).

La température au cœur de l'échantillon suit une évolution pratiquement identique. La principale différence se remarque pendant la période de ralentissement. En effet la température au cœur de l'échantillon augmente moins vite, suite aux problèmes de transferts de chaleur dus à la formation du croûtage.

Puiggali (1993) note que le plateau à température humide n'existe que pour des matériaux dont le séchage présente une phase isenthalpique. Lorsque le produit subit des transformations particulières (gélification, solidification ou retrait), il arrive que le séchage ne se produise pas dans des conditions isenthalpique et la température augmente alors continuellement depuis la température de stockage jusqu'à la température de l'air.

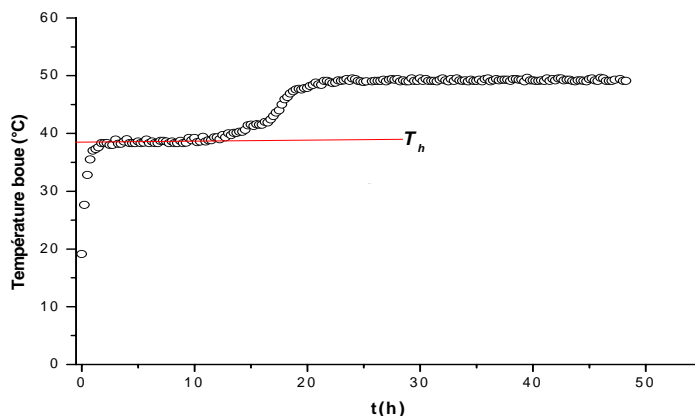


Figure V.14 L'évolution type de température de la boue sans rayonnement essai 2 ($T_{ae} = 49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re} = 39,0$; $R_g = 0 \text{ W/m}^2$)

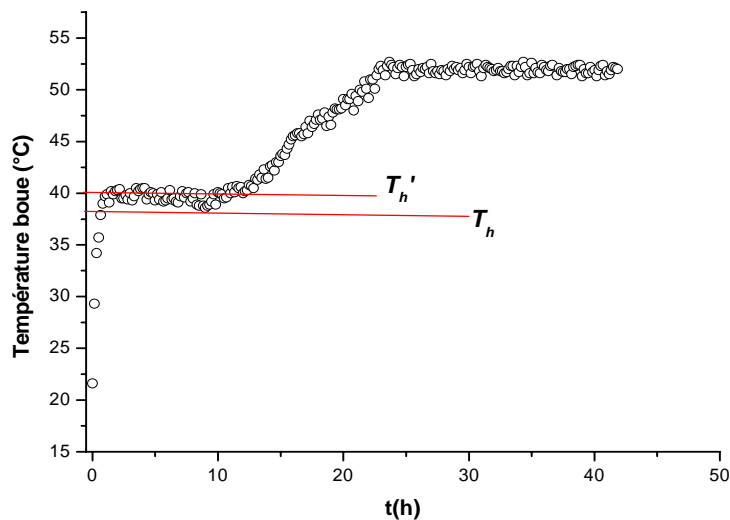


Figure V.15 L'évolution type de température de la boue avec rayonnement essai 10 ($T_{ae} = 49,5^{\circ}\text{C}$; $H_{re} = 50,0\%$; $R_g = 315\text{W/m}^2$).

V.3.2 L'analyse énergétique de la serre expérimentale

V.3.2.1 Estimation expérimentale du coefficient de transmission de la couverture

Pour rappel les lampes utilisées pour la simulation du rayonnement solaire sont de type métal halide. Ces lampes sont positionnées à 20 cm de la couverture extérieure.

Le capteur de rayonnement est positionné au centre sur la couverture extérieure. Le calcul du coefficient de transmission vis-à-vis du rayonnement de ces lampes a été déterminé à travers l'évaluation du rayonnement à l'extérieur et à l'intérieur de la serre.

La couverture est le principal vecteur des transferts énergétiques de la serre vers le milieu extérieur. Elle est caractérisée par des propriétés spectrales (coefficient de transmission, d'absorption et de réflexion) vis-à-vis du rayonnement solaire. Nous supposons que ces propriétés spectrales ne sont pas liées à l'angle d'incidence du rayonnement sur la paroi.

Le coefficient de transmission correspond expérimentalement à la moyenne du rapport des éclairagements globaux que l'on peut mesurer à l'intérieur d'une serre sur les éclairagements globaux mesurés à l'extérieur. A cet effet pour chacun des rayonnements fixés la mesure du rayonnement à l'intérieur de la serre a été menée avec deux conditions opératoires (température et humidité relative de l'air) différentes. Les capteurs de rayonnement, de

température, d'humidité et vitesse d'air sont placés à mi-hauteur et au centre de la serre. Cette position sera retenue lors de tous les essais de séchage. En effet des mesures de profils de rayonnement à l'intérieur de la serre ont montré que l'intensité du rayonnement n'est pas uniforme selon la position (suivant la longueur et suivant la hauteur de la serre) du capteur. Cela est dû à une dispersion de la lumière atteignant la couverture avec différentes longueurs d'ondes. La position retenue finalement correspond au centre de la serre, celle-ci donnant la valeur moyenne de ces paramètres, comme l'ont confirmé différentes mesures.

Le Tableau V.6 présente le rayonnement global mesuré à l'extérieur et à l'intérieur de la serre. La valeur du coefficient de transmission relevé expérimentalement est de l'ordre de 70%, ce qui correspond exactement à celle donnée par la littérature (Bordes, 1993). Les autres caractéristiques (coefficient d'absorption solaire et coefficient d'émissivité) de la couverture correspondent aux propriétés classiques du polyéthylène. Leurs valeurs retenues font référence à des informations relevées dans la bibliographie (Bordes, 1993).

D'une manière générale des caractéristiques radiatives (solaire et infrarouge long) des matériaux de couvertures sont délivrées par les fabricants. Toutefois ces caractéristiques s'altèrent très rapidement sous l'effet de l'abrasion exercée par les intempéries et les poussières et sous l'effet du vieillissement de la couverture (Issanchou, 1991).

Tableau V.6 Valeurs de coefficients de transmission suivant différentes conditions opératoires

Rayonnement global sur la face externe de la couverture (W/m ²)	Conditions opératoires	Rayonnement mesuré à l'intérieur de la serre (W/m ²)	Coefficient de transmission
728	$T_{ae}=50,1\text{ °C}$ $Hr=51,6\%$	560	0,77
728	$T_{ae}=33,0\text{ °C}$ $Hr=61,5\%$	577	0,79
315	$T_{ae}=50,1\text{ °C}$ $Hr=51,6\%$	219	0,70
315	$T_{ae}=33,0\text{ °C}$ $Hr=61,5\%$	223	0,71

V.3.2.2 Evolution type de la température de la couverture: vérification de l'hypothèse de l'uniformité de la température

Les mesures données par les sondes Pt 100 placées sur les faces externe et interne de la couverture lors des essais de séchage (Figure V.16) ont permis de vérifier l'hypothèse de l'uniformité de la température des deux faces de la couverture.

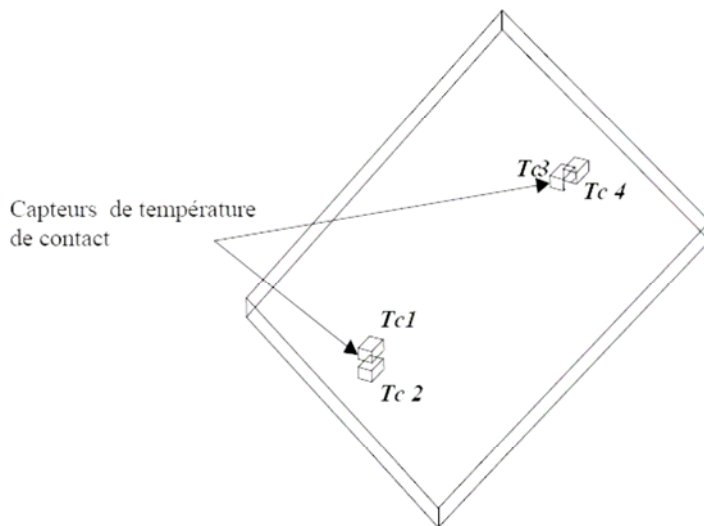


Figure V.16 Répartition des sondes Pt sur la couverture ; Tc1 et Tc3 sont sur la face externe et Tc2 et Tc4 sur la face interne de la serre.

On constate à partir de l'expérimentation que la paroi de la serre constitue un élément qui se met très rapidement en équilibre avec son environnement. L'analyse du bilan d'énergie peut donc se faire en régime stationnaire. La distribution de la température de paroi est homogène lors des essais sans rayonnement (Figure V.17), comme le laissait prévoir la théorie, mais hétérogène dès qu'intervient le rayonnement solaire (Figure V.18). La température de la couverture retenue est la moyenne des mesures obtenues par les différentes sondes Pt 100 placées au niveau de la couverture de la serre.

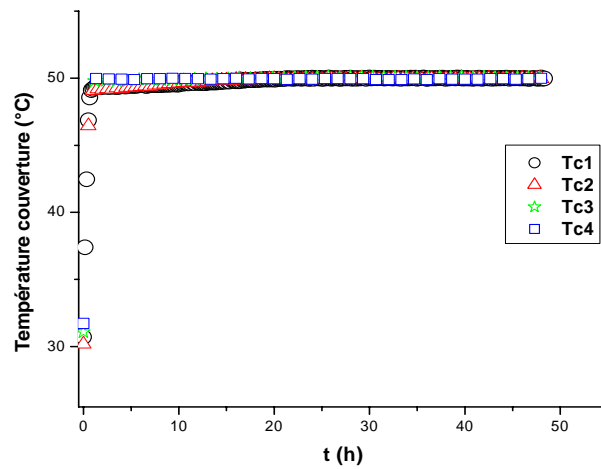


Figure V.17 Evolution type de la température de la couverture sans rayonnement

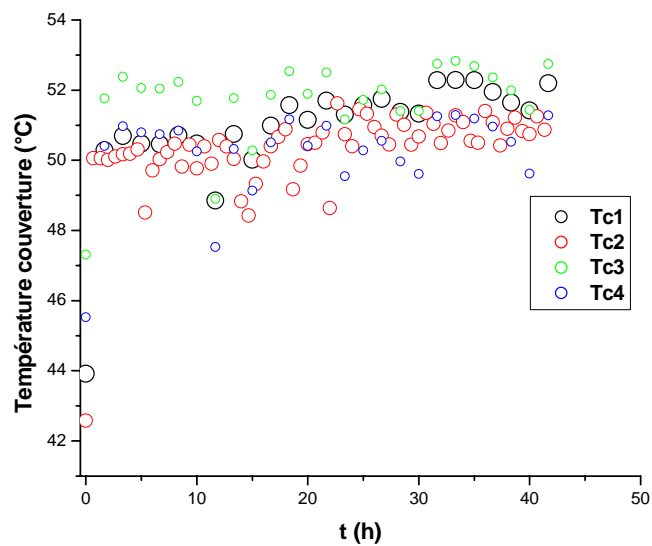


Figure V.18 Evolution type de la température de la couverture avec rayonnement

1.1.1 Evolution type de la température de l'air

La manipulation des données expérimentales a permis de constater que les écarts de températures de l'air intérieur et extérieur étaient liés au rayonnement solaire. Les Figure V.19 et Figure V.20 présentent l'évolution type des températures de l'air intérieur et extérieur.

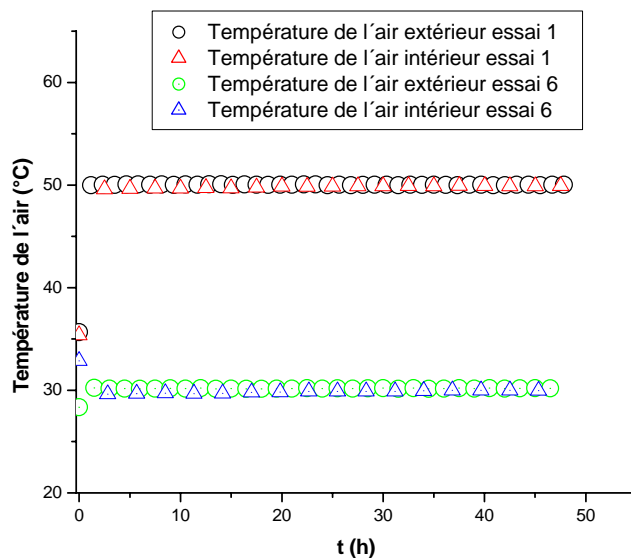


Figure V.19 Evolution type de la température de l'air intérieur à rayonnement nul pour deux essais différents : essai 1 ($T_{ae}= 49,7^{\circ}\text{C}$, $Hre=54,2\%$ $U_i=1,4\text{m/s}$, $Rg=0\text{ W/m}^2$); essai 6 ($T_{ae}= 29,7^{\circ}\text{C}$, $Hre=46,4\%$ $U_i=1,8\text{m/s}$, $Rg=0\text{W/m}^2$).

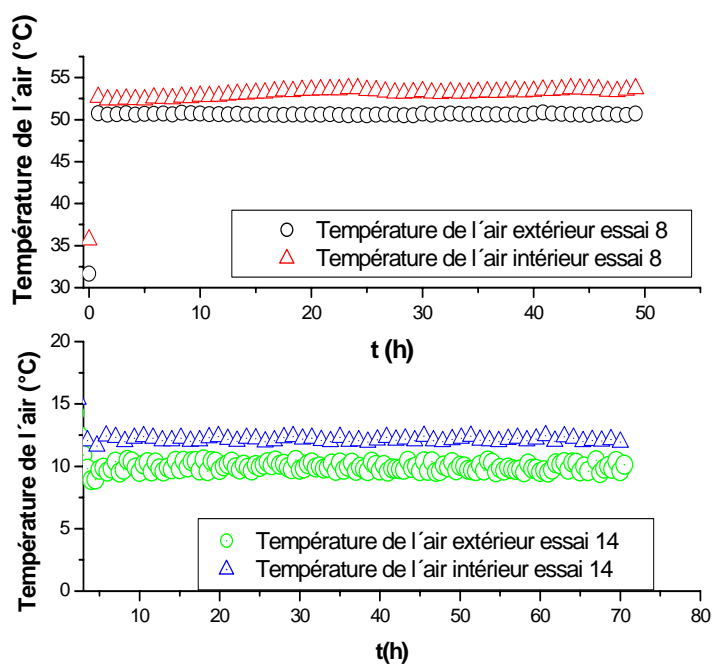


Figure V.20 Evolution type de la température de l'air intérieur avec rayonnement pour deux essais différents : essai 8 ($T_{ae}= 50,5^{\circ}\text{C}$, $Hre=63,6\%$ $U_i=1,7\text{m/s}$, $Rg=728\text{ W/m}^2$); essai 14 ($T_{ae}= 10,4^{\circ}\text{C}$, $Hre=90,9\%$ $U_i=1,7\text{m/s}$, $Rg=315\text{ W/m}^2$).

Pour l'ensemble des essais à radiation solaire non nulle, l'écart entre la température de l'air intérieur et extérieur est de l'ordre de 3°C (Figure V.20). Ceci résulte de l'effet de serre qui conjugue deux phénomènes, l'un radiatif, l'autre convectif. En revanche pour les essais à radiation nulle, l'évolution des températures de l'air intérieur et extérieur est quasiment la même (Figure V.19).

V.3.2.3 Evolution type de l'humidité relative de l'air

Les problèmes de régulation à haut taux d'humidité, mentionnés ci-dessus, font apparaître des fluctuations au niveau de la mesure de ce paramètre. Ainsi l'humidité relative intérieure suit la même évolution que celle de l'extérieure en présence ou non des lampes. La Figure V.21 présente l'évolution type des humidités relatives de l'air intérieur et extérieur lors des essais.

Du fait que les vitesses d'air intérieures sont relativement importantes, le renouvellement d'air dans la serre est également important, ce qui tend à homogénéiser l'humidité relative intérieure et extérieure. Le fait que ces deux humidités relatives suivent le même type d'évolution semble donc être normal.

L'augmentation globale d'humidité constatée aussi bien dans l'air intérieur qu'extérieur en début d'essai pourrait être due à l'évaporation de l'eau contenue dans les boues, que l'enceinte ne parviendrait pas à compenser assez rapidement, ou sinon à des fluctuations liées au fonctionnement du générateur de vapeur. Dans tous les cas, plus on renouvelle vite l'air dans la serre et moins on aura de différence entre air intérieur et air extérieur, ce qui peut masquer ou atténuer l'influence du rayonnement sur le réchauffement de l'air intérieur.

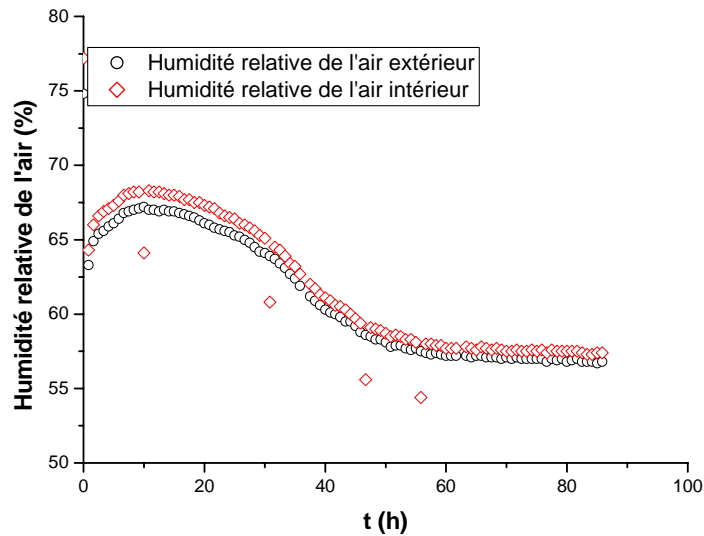


Figure V.21 Evolution type de la température de l'air intérieur avec ou sans rayonnement. Essai 3 ($T_{ae}= 30,0^{\circ}\text{C}$, $H_{re}=61,3\%$, $U_i=1,6\text{m/s}$, $R_g=0\text{W/m}^2$).

Plusieurs auteurs (Diamante 1993, Yaldyz et al., 2001, Midilli et al., 2003) confrontés à cette fluctuation de l'humidité relative, ont adapté la simplification de l'équation

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \text{ à une forme plus simple, } X_r = \frac{X}{X_i}.$$

L'explication réside tout simplement dans le fait que la teneur en eau en équilibre X_e est déterminée expérimentalement dans des conditions constantes d'humidité relative et de température, alors que l'humidité relative peut fluctuer énormément sur un système réel de séchage. Par ailleurs, la valeur X_e exprimant la teneur limite à laquelle on tend en fin de séchage, sa valeur est ainsi négligeable devant les autres teneurs en eau.

Cette dernière relation simplifiée de X_r sera celle utilisée dans nos prochaines simulations.

V.3.3 Cinétique du séchage

V.3.3.1 Evolution type de vitesse de séchage

Pour rappel, les courbes de vitesse de séchage sont calculées à partir des données expérimentales. La procédure utilisée pour les courbes de vitesse de séchage est la même

qu'au paragraphe V 2.2.1. Les figures (Figure V.22 et Figure V.23) présentent un exemple de courbes de vitesse de séchage types obtenues pour des essais effectués respectivement sans ou avec rayonnement.

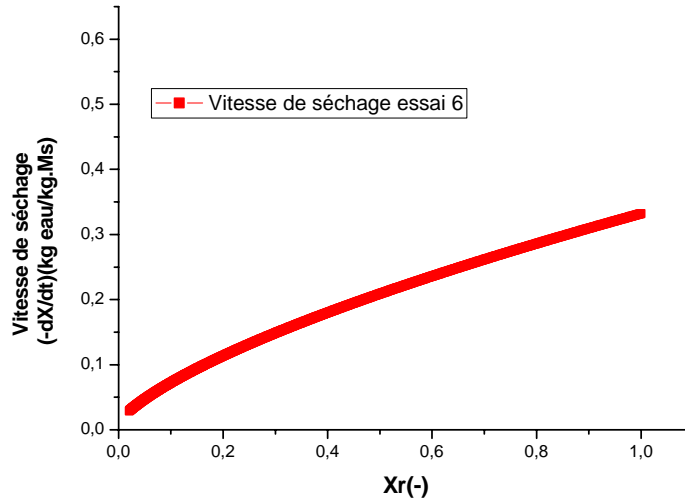


Figure V.22 Evolution type de vitesse de séchage pour un essai à rayonnement nul. Essai 6
($T_{ae}= 29,7^{\circ}\text{C}$, $Hre=46,4\%$, $U_i=1,8\text{m/s}$, $Rg= 0\text{ W/m}^2$).

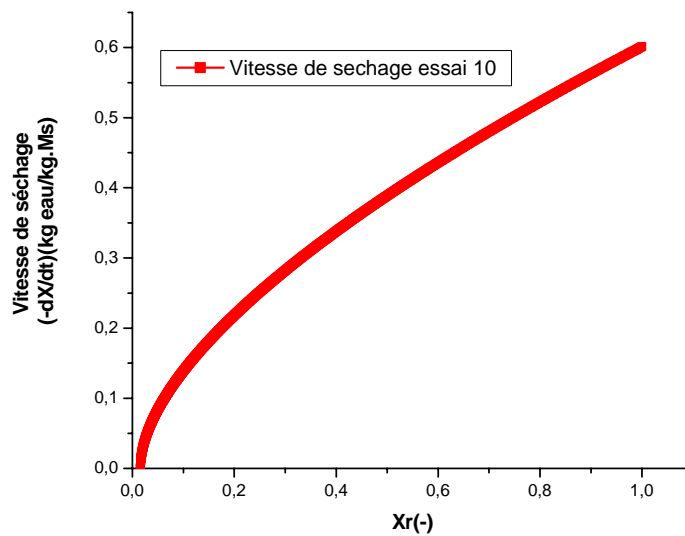


Figure V.23 Evolution type de vitesse de séchage pour un essai avec rayonnement. Essai 10
($T_{ae}= 49,5^{\circ}\text{C}$, $Hre=50,0\%$, $U_i=1,3\text{m/s}$, $Rg= 315\text{ W/m}^2$).

On note comme au paragraphe précédent, l'absence des phases de mise en température, et de séchage à allure constante (phase1). Seule la phase à allure décroissante est présente.

L'allure et la concavité des courbes correspond à une courbe de type D dans la classification de Sherwood (1936). Cette forme est caractéristique d'un séchage majoritairement contrôlé par les transferts extra granulaires.

V.3.3.2 Courbe caractéristique

Le même principe de détermination de la courbe caractéristique vu au paragraphe précédent a été utilisé sur 9 essais expérimentaux. L'idée est, comme au paragraphe précédent de prendre arbitrairement parmi les essais réalisés un lot d'essai pour déterminer la courbe caractéristique. Les autres essais permettront de valider cette dernière. Pour rappel la méthode d'identification d'une courbe caractéristique de séchage consiste pour l'ensemble des conditions expérimentales maintenues constantes pendant toute la durée de l'expérience à représenter les cinétiques de séchage sous la forme :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) / \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = f(X_r)$$

Où la vitesse à phase constante $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ est calculée comme précédemment au point

$$X_r = 1$$

X_r est la teneur en eau réduite définie du fait des fluctuations de l'humidité relative par

la relation
$$X_r = \frac{X}{X_i}$$

et $f(X_r)$ est la fonction décrivant l'évolution de la vitesse de séchage réduite en fonction de X_r .

La Figure V.24 présente quelques cinétiques de la boue en coordonnées réduites. On note ici également une faible dispersion autour d'une courbe moyenne dite courbe caractéristique. Le Tableau V.7 Paramètres A_1, A_2, A_3 avec la limite de confiance de chaque paramètre. présente les valeurs A_1, A_2, A_3 de la courbe caractéristique déterminées avec leur limite de confiance à 95% .

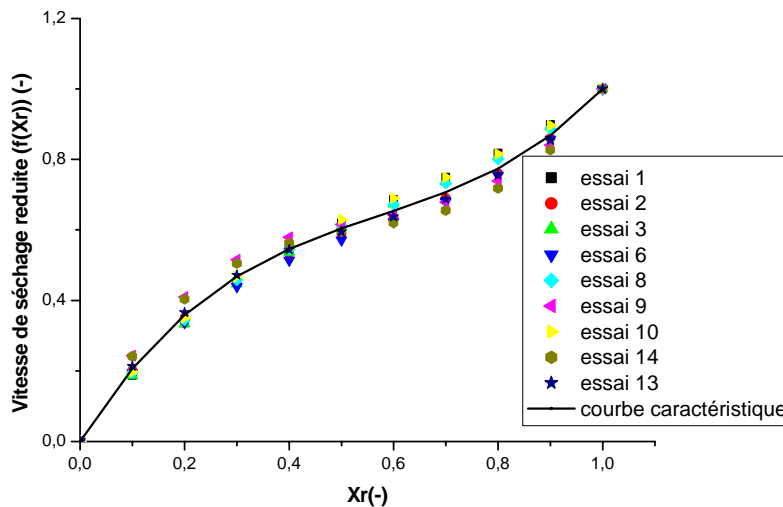


Figure V.24 Courbe caractéristique des différentes conditions examinées

Tableau V.7 Paramètres A_1, A_2, A_3 avec la limite de confiance de chaque paramètre.

Valeur des paramètres		LC a 95%
A_1	2,37	0,670
A_2	-3,30	1,30
A_3	1,92	0,660

Si on compare les valeurs des paramètres A_1, A_2, A_3 trouvés avec les modèles I et II, on peut constater que ceux-ci présentent des valeurs très proches, ce qui permettrait de supposer que l'on pourrait utiliser la même courbe caractéristique.

V.3.3.3 Calcul de la première phase

La phase à vitesse constante n'est pas toujours identifiable comme nous l'avons vu au niveau de nos essais expérimentaux. Toutefois la vitesse constante peut être déterminée en utilisant l'analogie des transferts de chaleur et de masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée. Pendant cette phase, souvent isenthalpique, l'eau est évacuée à flux constant et la boue atteint une température d'équilibre donnée par la température humide (T_h ou T_h' selon la présence ou non du rayonnement solaire). En considérant l'inertie

thermique de la boue nulle pendant cette phase, la phase à vitesse constante est ainsi calculée à partir du bilan thermique de la boue.

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = \frac{S_b}{MsLv} \left[Rg a_b \tau_c + h_{cb}(T_{ai} - T_b) - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) \right]$$

Équation V-7

Avec $T_b = T_h$ quand le rayonnement solaire nul et $T_b = T_h'$ quand le rayonnement solaire est non nul.

1.1.2 Calcul du coefficient de convection air intérieur – boue

En utilisant l'équation ci dessus le coefficient de transfert de chaleur peut être calculé à partir de la valeur à vitesse constante $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$. Le coefficient de convection de chaque essai est déterminé à partir de ses conditions opératoires (température, humidité et vitesse de l'air). L'Équation V-8 présente ainsi la formulation du coefficient de convection au niveau de la boue.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } Rg = 0 \rightarrow h_{cb} = \frac{\frac{MsLv}{S_b} \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_h^4 - T_c^4)}{(T_{ai} - T_h)} \\ \text{si } Rg \neq 0 \rightarrow h_{cb} = \frac{Rg a_b \tau_c - \frac{MsLv}{S_b} \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_h'^4 - T_c^4)}{(T_h' - T_{ai})} \end{array} \right.$$

Équation V-8

En convection forcée le coefficient de transfert de chaleur est souvent relié aux conditions opératoires par l'intermédiaire de lois de puissance portant sur des nombres adimensionnels (Équation III-15).

$$Nu = a (Re)^m (Pr)^n$$

La longueur caractéristique qui intervient dans le nombre de Reynolds (Re) et de Nusselt (Nu) est la longueur du support de la boue. Les relations utilisées pour calculer les différentes grandeurs qui interviennent dans les nombres adimensionnels se trouvent à l'annexe I.

Conformément à l'analogie des transferts de chaleur par convection sur une surface plane (Sacadura, 1978), les relations adimensionnelles suivantes ont pu être ajustées sur les résultats expérimentaux avec un écart moyen de 0,104:

$$Nu = 0,049 (Re)^{0,8} (Pr)^{1/3}$$

Équation V-9

L'ajustement a été effectué par une méthode linéaire sur les points expérimentaux (transfert de chaleur) après passage au logarithme du nombre de Nusselt. L'exposant m qui affecte le Reynolds et l'exposant n qui affecte le Prandtl ont été imposés conformément à la corrélation de Sacadura (1978).

La Figure V.25 permet de comparer les résultats expérimentaux et la corrélation décrite ci-dessus. On constate une dispersion des valeurs expérimentales autour de celles obtenues par la corrélation.

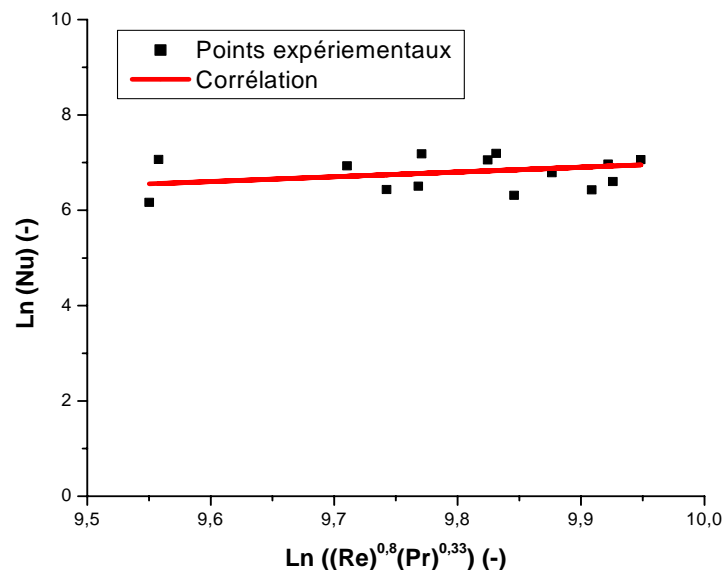


Figure V.25 Logarithme du nombre de Nusselt en fonction du logarithme $Re^{0,8} Pr^{0,33}$ obtenu d'après l'expérience

La Figure V.26 permet de comparer la relation établie dans ce travail avec la relation de Sacadura (1978), issue de la littérature. Les valeurs expérimentales des nombres de Reynolds et de Prandtl ont été utilisées pour tracer cette figure. On constate que les valeurs expérimentales sont supérieures à celles obtenues par la relations proposée par Sacadura (1978). Les corrélations déterminées dans ce travail, comme toutes les autres, doivent être considérées comme caractéristiques du dispositif expérimental du laboratoire.

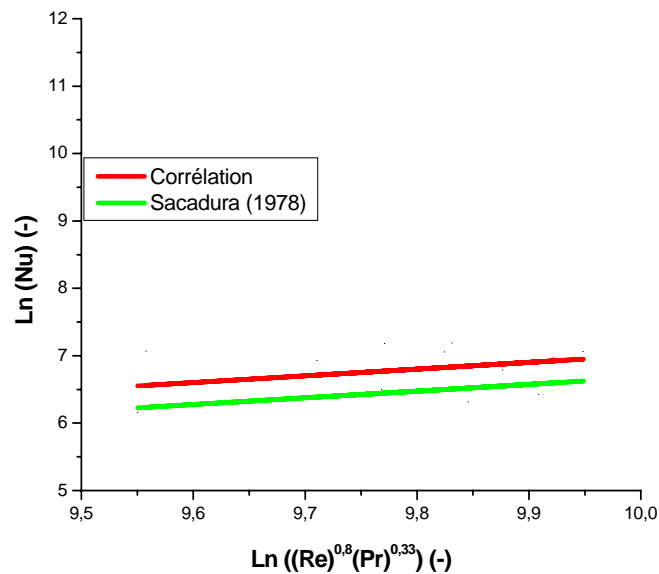


Figure V.26 Comparaison de la relation $Nu = f(Re, Pr)$ établie expérimentalement avec une loi adimensionnelle proposée dans la littérature.

V.3.4 Confrontation des résultats expérimentaux et simulés

Plusieurs essais ont été réalisés, à l'aide du dispositif expérimental, afin de confronter les résultats théoriques et expérimentaux.

V.3.4.1 Valeurs des paramètres physiques entrés dans le code

Pour rappel, les données des paramètres fixes restent valables pour tous les essais. Les conditions de séchage réellement « vues » au niveau expérimental (la température sèche (T_{ae}), l'humidité relative (H_{re}), la vitesse de l'air, le rayonnement solaire mesurés à l'extérieur de la serre, la courbe caractéristique et les conditions initiales de chaque élément) sont entrées

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE

dans le code qui calcule les paramètres secondaires (les grandeurs caractéristiques de l'air, les coefficients de convection, la vitesse à phase constante).

La simulation du séchage d'un essai se fait uniquement en mettant dans le code les conditions opératoires et les conditions initiales de l'essai ainsi que le temps de simulation vus au niveau expérimental.

Les simulations qui sont présentées sont représentatives des résultats obtenus pour les autres tests.

V.3.4.2 **Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue**

L'évolution des températures simulée et expérimentale de la boue présente un écart de température dans une première partie, et une bonne concordance dans une deuxième comme le montre les figures qui suivent:

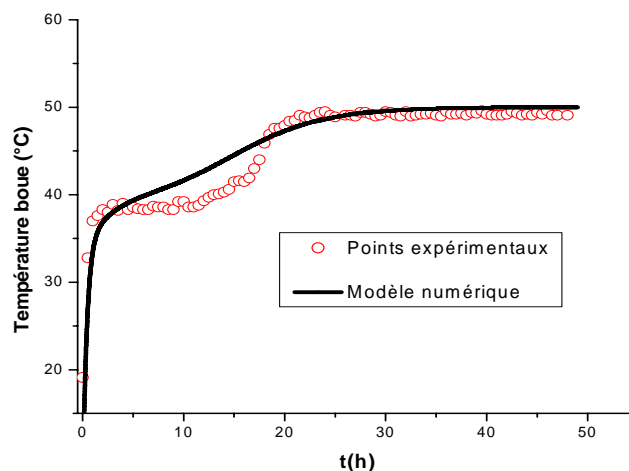


Figure V.27 Comparaison des températures simulée et expérimentale de la boue pour l'essai 2
($T_{ae}=49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)

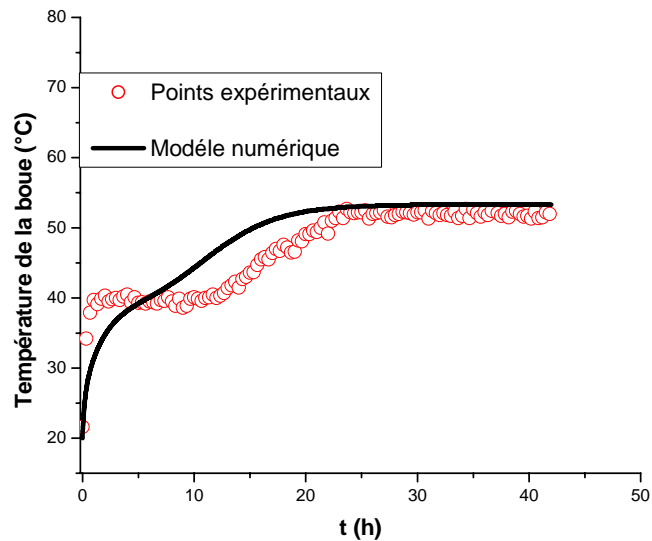


Figure V.28 Comparaison des températures simulée et expérimentale de la boue pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

L'écart semble être observé pour la plupart des essais durant la première phase de séchage (marqué par la présence d'un plateau de température constante).

Cet écart pourrait provenir :

- de l'absence de la première phase à vitesse constante, observée lors de l'ajustement des essais expérimentaux (pour l'obtention des courbes caractéristiques) ;
- d'une estimation trop grossière du paramètre de transfert de chaleur au niveau de la boue ;
- de la possibilité qu'une fine couche sèche se soit formée, au début du séchage, à la périphérie de la boue, ralentissant les transferts de masse et diminuant la chaleur concédée à l'évaporation.

L'influence de cette dernière couche n'est actuellement pas prise en compte par la formulation macroscopique entrée dans le code numérique. L'existence de cette couche sèche échappe donc à la formulation macroscopique (Rémond et al., 2005).

3.1.1 Confrontation des résultats au niveau de la température de la couverture.

On remarque sur les figures (Figure V.29 et Figure V.30) que les températures de couverture simulées tardent à s'équilibrer avec son environnement contrairement à celles mesurées. Toutefois, la température de couverture simulée est très proche de celle mesurée (écart moyen $< 0,5^{\circ}\text{C}$) durant l'ensemble du séchage.

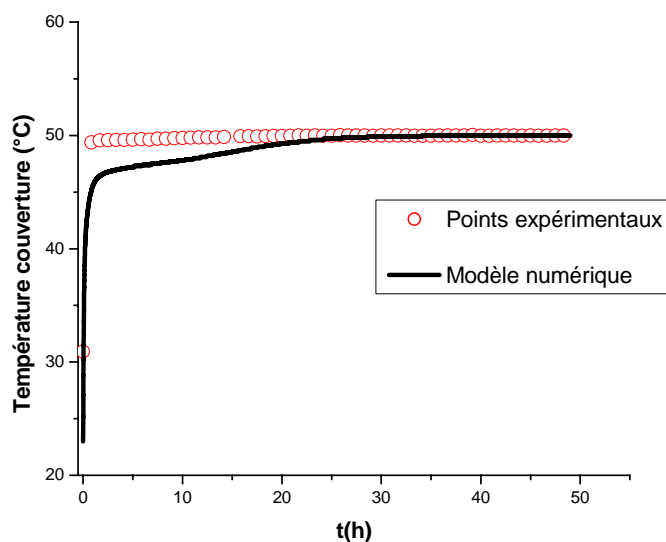


Figure V.29 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)

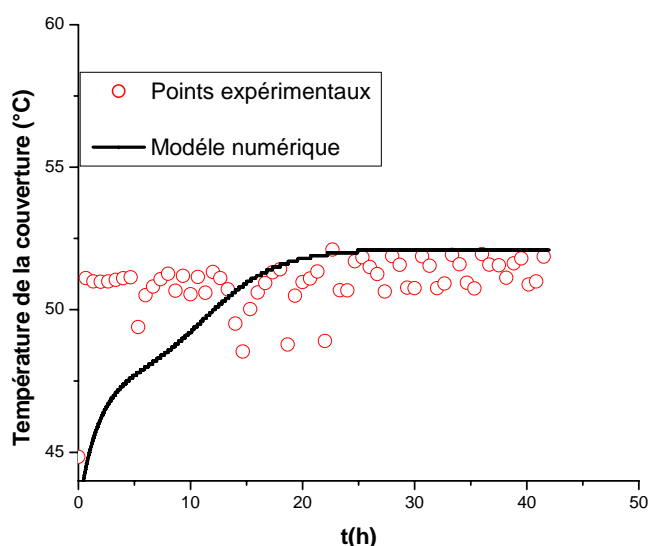


Figure V.30 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

L'écart observé peut être dû au fait que dans le calcul numérique, l'inertie thermique de la couverture a été prise en compte alors qu'à partir des données expérimentales nous avons montré que l'inertie thermique de la couverture est négligeable étant donné que la couverture atteint son équilibre très rapidement avec son environnement. L'absence de la première phase à vitesse constante observée lors de l'ajustement des essais expérimentaux peut être également une des origines de cet écart par couplage des transferts de chaleur plus précisément par convection entre la boue et l'air intérieur et entre l'air intérieur et la couverture.

L'origine de cet écart peut également provenir soit d'une erreur dans l'estimation des paramètres de transfert de chaleur au niveau de la couverture (coefficient de convection couverture - air extérieur, couverture - air intérieur tous issus de la bibliographie).

En présence du rayonnement, la température de la couverture n'est plus homogène ce qui nous éloigne de l'hypothèse des transferts mono dimensionnels du code (Rémond, 2004)

V.3.4.3 Confrontation des résultats au niveau de la température de l'air intérieur

La température de l'air intérieur étant en couplage avec la température de la boue et celle de la couverture à travers le phénomène de convection, il est tout à fait attendu que cette température présente également un écart de température dans la première phase de séchage et une bonne concordance par la suite (Figure V.31 et Figure V.32)

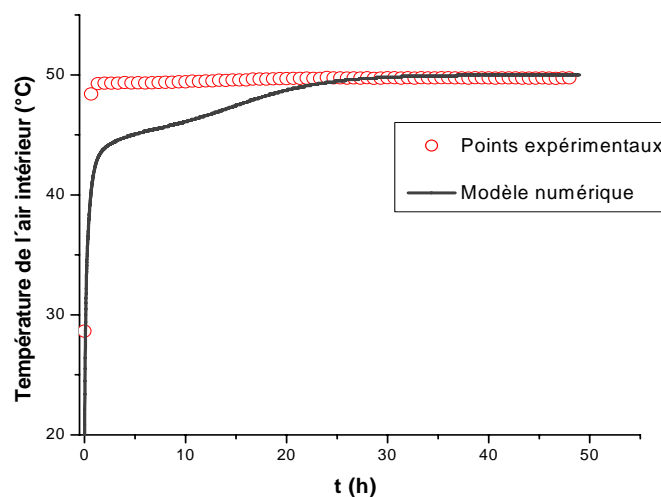


Figure V.31 Évolution des températures simulée et expérimentale de l'air intérieur pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)

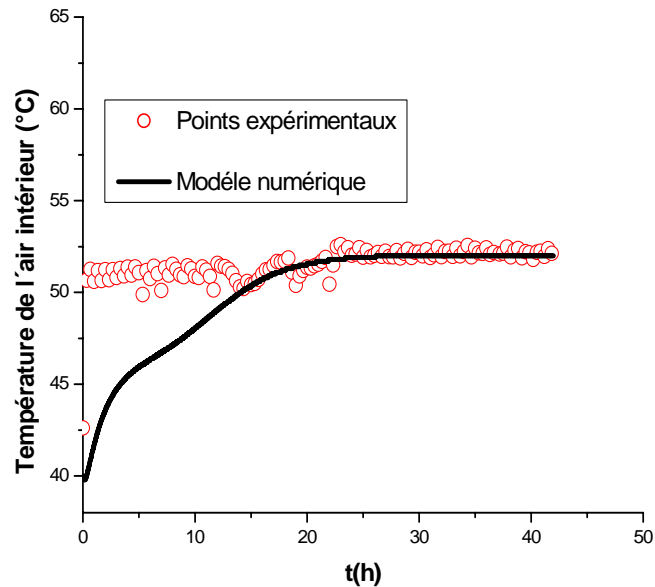


Figure V.32 Évolution des températures simulées et expérimentales de l'air intérieur pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

On remarque sur les figures que le décalage entre les températures simulées et expérimentales (température de la boue, de l'air intérieur et de la couverture) se passe dans le même intervalle de temps qui correspond à la période à phase constante du séchage.

Les différences qui subsistent peuvent avoir d'autres origines venant de l'estimation des températures humides dans le code. En effet l'humidité relative de l'air est maintenue constante lors des simulations (prise également à la moyenne de celles de l'expérimentation) alors qu'elle fluctue lors des expérimentations d'où l'influence négative sur les calculs des températures humides.

V.3.4.4 Confrontation des résultats au niveau de la teneur en eau

L'évolution de la teneur en eau en base sèche de la boue varie selon les conditions appliquées, le temps de séchage, et la masse initiale. Malgré ces paramètres d'influence, l'évolution de la teneur en eau en base sèche de la boue simulée est très proche de celle mesurée Figure V.33 et Figure V.34).

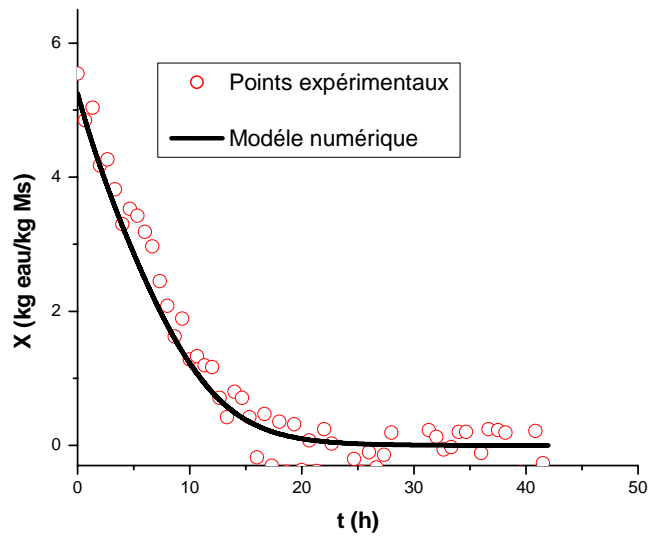


Figure V.33 Évolution des teneurs simulées et expérimentales pour l'essai 10 ($T_{ae}=49,5^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=50,0\%$; $U_i=1,3\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

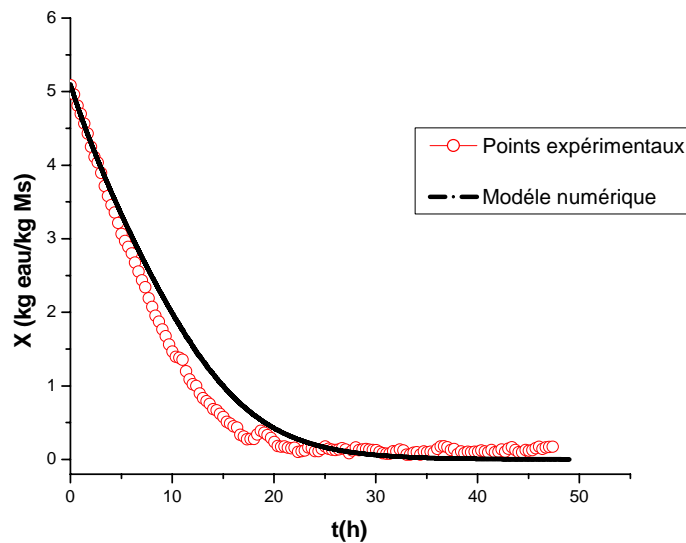


Figure V.34 Évolution des températures simulée et expérimentale de la couverture pour l'essai 2 ($T_{ae}=49,2^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39\%$; $U_i=1,42\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)

L'écart observé entre la théorie et l'expérience sur la teneur, provient vraisemblablement de l'utilisation de la vitesse de séchage réduite (courbe caractéristique) utilisée dans le code numérique et qui représente la courbe moyenne des essais considérés.

Les différences qui subsistent peuvent également provenir de l'hypothèse de homogénéité de la teneur en eau de la boue alors qu'un gradient d'humidité existe sur les échantillons mesurés, ce qui nous éloigne de l'hypothèse des transferts mono dimensionnels du code (problème déjà évoqué au niveau de l'évolution de la température de la couverture).

La comparaison des différentes variables (la température de la boue, de l'air intérieur, de la couverture ainsi que la teneur en eau) théoriques et mesurées s'est ainsi avérée globalement satisfaisante. Il a cependant seulement été constaté que la simulation s'écarte du comportement observé pendant la première phase de séchage de la boue.

V.3.5 Validation du modèle

Comme dans le cas du modèle I, le modèle II peut aussi être validé en comparant les résultats de ses prévisions avec les résultats d'expériences, autres que celles qui ont servis à l'identification de la courbe caractéristique et du coefficient de convection. Les figures (Figure V.35 et Figure V.36) montrent aussi un accord satisfaisant entre les résultats simulés et les mesures expérimentales

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE

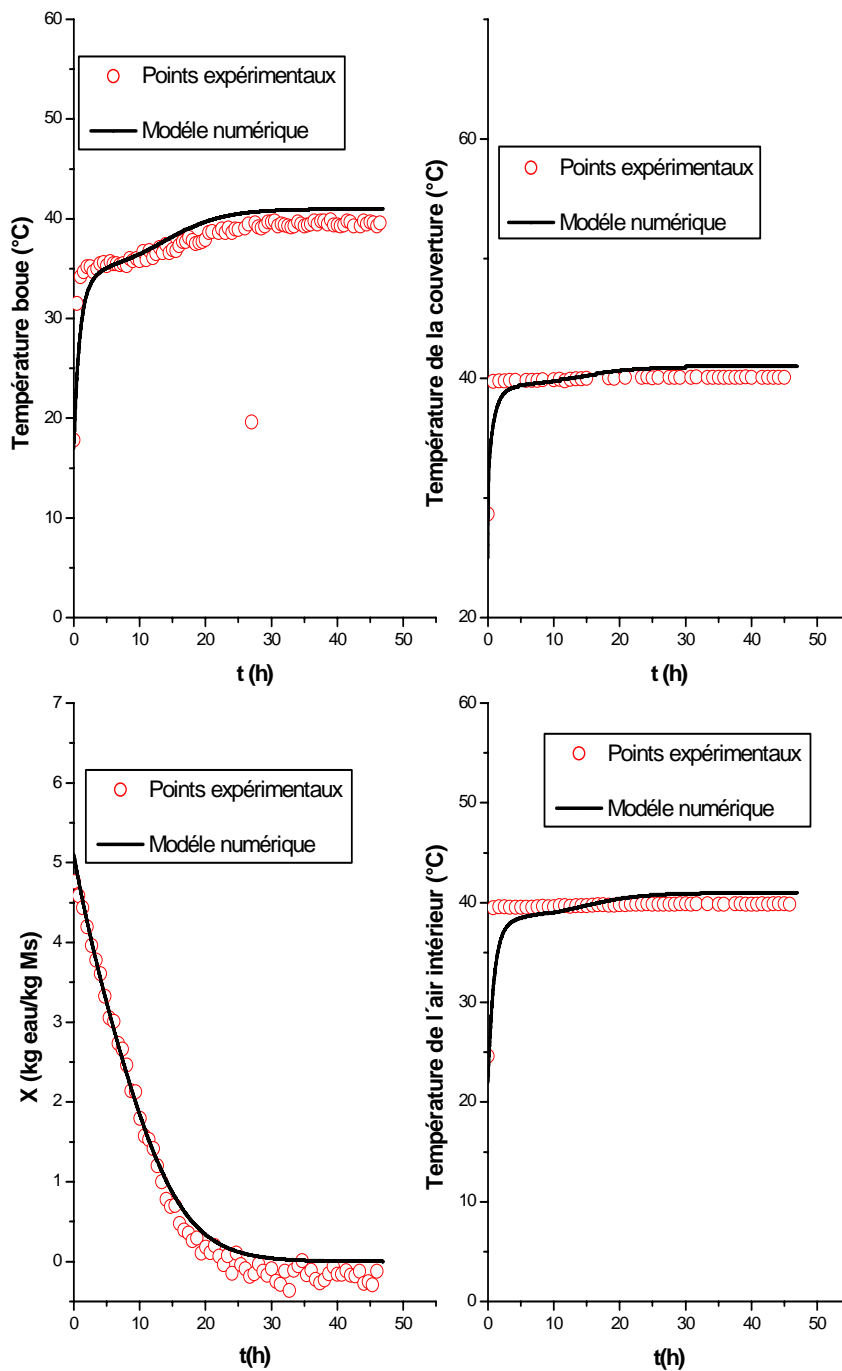


Figure V.35 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 16 ($T_{ae}=40,7^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=39,2\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=0\text{ W/m}^2$)

Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU MODELE

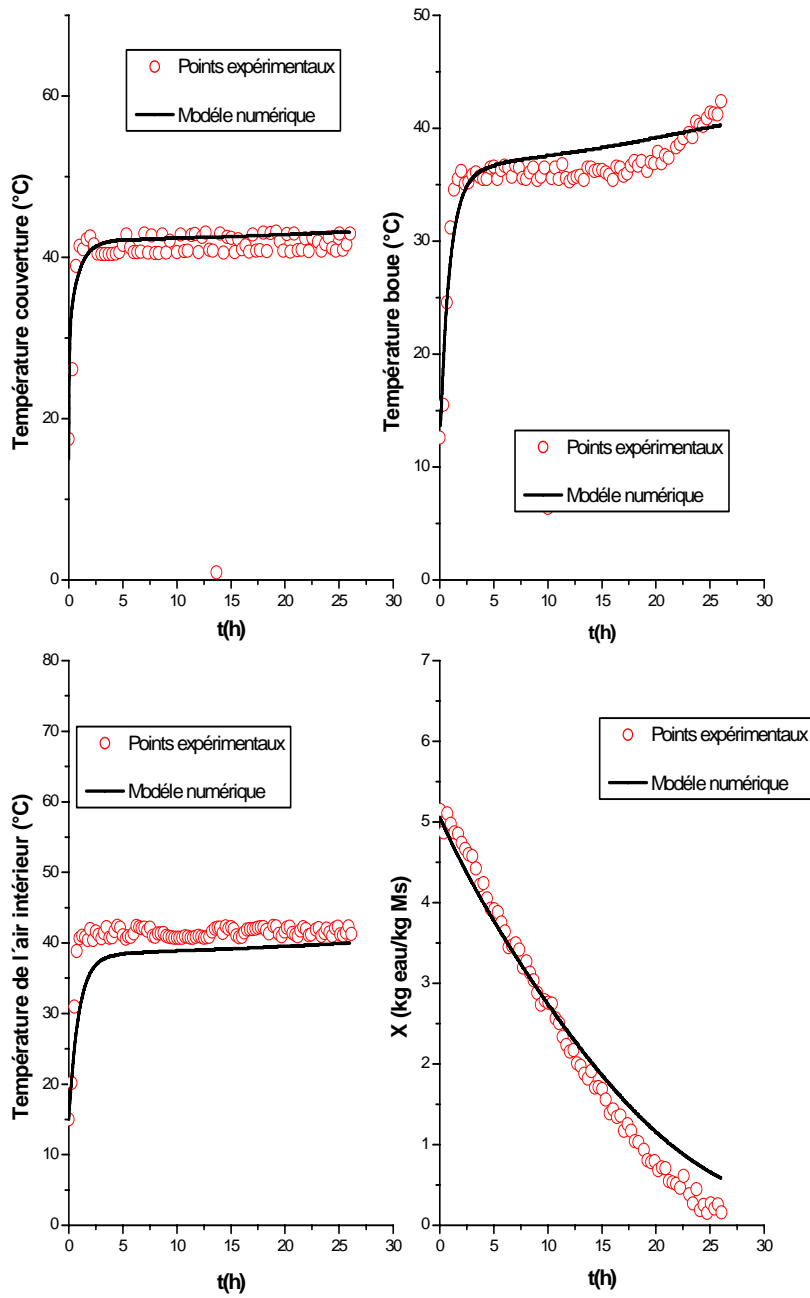


Figure V.36 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 15 ($T_{ae}=38,8^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=64,2\%$; $U_i=1,4\text{m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

V.4 Conclusion d'ensemble sur la partie expérimentale

Les simulations du code ont été confrontées aux mesures obtenues par le dispositif décrit dans la partie IV. Une vérification graduelle des différents modules du modèle (modèle I puis modèle II) a été effectuée. Les conditions de séchage réelles au cours de chacun des essais des modèles ont été entrées dans le code de simulation.

Sur le plan qualitatif, la comparaison entre la théorie et l'expérience est souvent très bonne:

- l'évolution de la teneur en eau à base sèche de la boue selon le type de modèle, et les conditions de séchage est correctement décrit par la formulation ;
- l'observation et l'évolution des différentes températures au niveau expérimental a pu être parfaitement décrite à travers l'évaluation simulée des bilans thermiques au niveau de chaque composant de la serre.

Néanmoins, plusieurs phénomènes échappant à la formulation macroscopique et mono-dimensionnelle du code ont été évoqués pour expliquer certains écarts entre les simulations et le comportement observé:

- la formation d'une fine couche sèche à la périphérie de la boue ;
- une estimation trop grossière du paramètre de transfert de chaleur au niveau de la boue ;
- l'estimation des paramètres de transfert de chaleur au niveau de la couverture (coefficient de convection couverture – air extérieur, couverture-air intérieur) tous issus de la bibliographie ;
- l'intégration des aspects mécaniques des déformations dues aux phénomènes de retrait ;
- l'intervention d'une seconde dimension dans les transferts ou dans l'équilibre notamment la température de la couverture qui est hétérogène en présence du rayonnement.

Ainsi les aspects concluants, cités précédemment, vont permettre d'extrapoler le modèle sur un site réel de séchage sous serre. La méthode d'extrapolation fera l'objet du chapitre suivant.

V.5 Références

- Al Hodali, R., Numerical simulation of an agricultural foodstuffs drying unit using solar energy and adsorption process. PhD thesis. Bruxelles, Belgium: University of Bruxelles, (1997).
- Bassal, A., Etude de l'activité de l'eau dans les aliments au-dessus de 100°C, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, Massy (1993).
- Bongiovanni, J.-M., Traitement des boues résiduaire par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).
- Bordes, P., Serres, Technique de l'ingénieur C 4 145, (1993).
- Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. S., et Teller, E., "On a theory of the van der Waals adsorption of gases," J. Am. Chem. Soc., 62, 1723-1732, (1940).
- Charreau, A., et Cavaillé, R., Séchage : théorie et calculs, Technique de l'ingénieur J 2 480, (1991).
- Cormary, Y., et Christian, N., Thermique des serres, éditions Eyrolles paris, (1985).
- Diamante, L. M., & Munro, P. A., Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. Solar Energy, 51, 271–276 (1993).
- Krischer, O., et Kast, W., *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, Springer : Berlin (1978).
- Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. T., Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). Journal of Food Engineering, 61(2), 173–179 (2004).
- Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration, suivi de la texture par microtomographie à rayons X, thèses de doctorat, Faculté des sciences appliquées Université de Liège (2003).
- Midilli, A., Kucuk, H., Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy Energy Conversion and Management, 44, 1111–1122 (2003).
- Puiggali, J. R., *Drying*. dans : Encyclopaedia of food science, food technology and nutrition, Mc Rae, R, Robinson, R. K., et Sadler, M. J., éd. ; Academic Press : London; pp.1456-1480 (1993).
- Ratti, C., & Crapiste, G. H., A generalized drying curve for shrinking food materials. In A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying* 92 (pp. 864–873). New York: Elsevier (1992).
- Rémond, R., Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. Thèse de Docteur de l'ENGREF, Centre de Nancy, 219pp (2000).

Rémond, R., Mougel, E., and Perré, P., The existence of a thin dry layer during convective drying as possible explanation of the evolution of thickness, temperature and moisture content of Norway Spruce boards, *Drying Technology* (2005).

Sacadura, J.F., *Initiation aux transferts thermiques, technique et documentation*, paris (1978).

Sherwood, T. K., "The air drying of solids," *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 32, 150-168 (1936).

Vaxelaire, J., Mousques, P., Bongiovanni, J.M., and Puiggali, J.R., Desorption isotherms of domestic activated sludge *Environmental Technology*, vol. 21 pp 327-335 (2000).

Vaxelaire, J., Puiggali, J.R., Analysis of the drying of residual sludge: From the experiment to the simulation of a belt dryer *Drying technology*, 20(4&5),1009-1018 (2002).

Yaldýz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I., Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457– 465 (2001).

CHAPITRE VI
ETUDE SUR SITE REEL: CAS DE LA
STATION DE BRUMATH

La validation des prévisions du modèle sur des installations de serres à l'échelle réelle passe d'abord par une extrapolation du modèle. Elle nécessite un développement de l'outil numérique en utilisant de nouvelles fonctionnalités d'applications plus globales et plus approfondies. Dans cette perspective, une étude de performance climatique d'une serre de séchage solaire des boues de la station de Brumath en Alsace a été menée. Cette performance sera illustrée par une comparaison des paramètres climatiques extérieurs et intérieurs de la serre.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la validation des corrélations semi-empiriques des paramètres climatiques : rayonnement solaire, température, l'humidité relative de l'air et vitesse moyenne du vent. Ces corrélations ont été choisies dans la littérature. Elles interviennent dans une modélisation de séchage prenant en compte l'évolution des paramètres climatiques dans le temps.

La seconde partie présente l'évolution des paramètres climatiques intérieurs et extérieurs d'une serre de séchage sur la station de Brumath. Pour cela, une série de données expérimentales a été relevée.

Enfin dans la troisième partie du chapitre, quelques éléments clés sont donnés pour l'extrapolation du modèle à l'échelle réelle de séchage sous serre de boue.

VI.1 Validation des corrélations semi-empiriques des paramètres climatiques

Les données climatiques horaires que l'on doit introduire dans le modèle peuvent représenter une masse de données très importante surtout si celui-ci doit fonctionner en simulation sur plusieurs journées successives. Dans un premier temps notre objectif est de pouvoir rendre compte correctement des variations journalières de températures et humidité pour pouvoir alimenter et vérifier notre modèle de séchage à cette échelle de temps. Nous avons donc couplé à notre modèle un générateur de données climatiques qui permet de reconstituer au pas horaire une journée climatique « type ». Températures et humidités relatives de l'air extérieur sont reconstituées chacune au pas horaire par une loi d'évolution choisie dans la littérature. La vitesse moyenne journalière est donnée en fonction de la hauteur et de la nature du lieu. En fonction des coordonnées du lieu (latitude et longitude), et du jour

de l'année, on détermine heure par heure l'intensité du rayonnement solaire globale arrivant sur un plan horizontal en supposant une nébulosité constante sur la journée.

Pour dimensionner correctement un dispositif de séchage sous serre il conviendrait d'être capable de réaliser des simulations à l'échelle annuelle, afin d'intégrer les variations saisonnières de vitesse de séchage liées aux variables climatiques.

VI.1.1 Formulation mathématique des corrélations

VI.1.1.1 Corrélation de la température de l'air ambiant

L'équation Équation VI-1 donne l'évolution horaire de la température de l'air extérieur. Cette équation, résulte d'une étude statistique réalisée sur un échantillon de station climatique du réseau météorologique français (Choisnel, 1979).

$$T_{ae}(t) = T_{ae\min} + kt(t) \cdot (T_{ae\max} - T_{ae\min})$$

Équation VI-1

Avec T_{ae} : température à l'heure h en °C
 $T_{ae\min}$: température minimale journalière en °C
 $T_{ae\max}$: température maximale journalière en °C
 $kt(t)$ coefficient dépendant de l'heure et de la saison (Annexe VI)

Les températures journalières maximale et minimale sont des données locales fournies par une station météorologique.

VI.1.1.2 Corrélation de l'humidité relative de l'air

L'équation Équation VI-2 donne l'évolution de l'humidité relative extérieure obtenue dans les mêmes conditions que celle de la température de l'air ambiant.

$$Hr(t) = Hr_{\max} - kr(t) \cdot (Hr_{\max} - Hr_{\min})$$

Équation VI-2

- Avec
- $Hr(t)$: humidité relative à l'heure h en %
 - Hr_{\min} humidité relative minimale journalière en %
 - Hr_{\max} humidité relative maximale journalière en %
 - $kr(t)$ coefficient dépendant de l'heure et de la saison (Annexe VI)

Les humidités relatives journalières maximale et minimale sont des données locales fournies par une station météorologique.

VI.1.1.3 Corrélation de la vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent en un lieu donné dépend de la configuration du terrain environnant. De manière générale, la vitesse moyenne du vent mesurée en terrain dégagé à 10 mètres est recalculée pour une hauteur de 3 mètres, supposée significative pour la serre, selon la formule proposée par Grimsrud et Shermann :

$$U_z = U_{10} \cdot \beta \cdot (Z/10)^\alpha$$

Équation VI-3

où U_z = vitesse du vent mesurée à la hauteur z (m)

U_{10} = vitesse du vent moyen mesurée à 10 m en terrain dégagée (m/s) ;

α et β sont les coefficients, fonction du type de terrain environnant, extraits du tableau suivant :

Tableau VI.1 Coefficients α et β pour le calcul de la vitesse moyenne du vent

α	β	Type de terrain
0,15	1,00	Terrain dégagé, obstacles isolés
0,20	0,85	Zone rurale, bâtiments bas, arbres
0,25	0,67	Zone urbaine, industrielle ou forêt

Et dans l'hypothèse d'une incertitude sur la nature du terrain environnant, on retient l'expression ci-dessus, obtenue par interpolation entre les coefficients du Tableau VI.1 définis pour une zone rurale et ceux définis pour un terrain dégagé :

$$U_z = U_{10} \cdot 0,75$$

Équation VI-4

Cette corrélation ne peut être validée par nos mesures expérimentales par manque de certaines données notamment la vitesse du vent moyen mesurée à 10 m en terrain dégagée.

VI.1.1.4 Corrélation du rayonnement solaire

Le calcul du rayonnement solaire global qui arrive sur une surface horizontale met en œuvre, d'une part les formules exactes de mécanique céleste qui donnent pour un instant et en un lieu géographique donné, la position du soleil dans le ciel, et d'autre part des formules semi-empiriques qui traduisent les phénomènes d'extinction atmosphérique dus à la densité nuageuse et à l'état de limpidité de l'atmosphère.

On propose de calculer l'intensité solaire global, arrivant sur une surface horizontale à tout instant en utilisant la corrélation proposée par (Duffie et al., 1980 et Idliman, 1990):

$$R_g = a \cdot \text{SIN}(H)^b$$

Équation VI-5

Les paramètres a et b sont déterminés par ajustement sur les données expérimentales du lieu de mesure. L'ajustement peut être effectué en minimisant à l'aide du solveur d'Excel l'écart quadratique moyen entre les points expérimentaux et numériques.

H est la hauteur solaire donnée par la formule suivante:

$$\text{SIN}(H) = \text{SIN}(Delt) \cdot \text{SIN}(LAT) + \text{COS}(LAT) \cdot \text{COS}(Delt) \cdot \text{COS}(W)$$

Équation VI-6

Le développement de la déclinaison solaire *Delt* en degrés est fourni avec une précision de 12'' seconde d'arc

$$Delt = 0,302 - 22,93 \cos(w'd) - 0,299 \cos(2w'd) - 0,243 \cos(3w'd) \\ + 3,851 \sin(w'd) + 0,002 \sin(2w'd) - 0,055 \sin(3w'd)$$

Équation VI-7

Où $d =$ numéro du jour

$$W' = 2 * \pi / 366$$

L'angle horaire exprimé en degré est déterminé par la rotation régulière de la terre au tour de son axe; il est exprimé par la relation :

$$W = 15.(TU + CDT + CDL - 12)$$

Équation VI-8

Où $TU =$ temps universel en heure

$CDL =$ correction de la longitude en heure : $CDL = -LON.4/60$

La correction du temps en heure CDT , est exprimée par la relation:

$$CDT = (0,4197 \cos(w'd) - 3,2265 \cos(2w'd) - 0,0903 \cos(3w'd) - 7,3509 \sin(w'd) - 9,3912 \sin(2w'd) - 0,3361 \sin(3w'd)) / 60$$

Équation VI-9

VI.1.2 Données expérimentales

Les relevés expérimentaux ont été effectués sur la station d'épuration de Brumath disposant de deux serres de séchage de boue et d'une station météorologique (voir **CHAPITRE IV**). La station d'épuration de Brumath a une position géographique de $7,7^\circ$ de longitude et $48,73^\circ$ de latitude. Ces mesures sont prises sur une serre pendant deux journées types du mois de juillet, le 11 et 12.

Le Tableau VI.2 regroupe les données expérimentales de l'évolution au cours d'une journée, de l'intensité du rayonnement solaire, de la température et de l'humidité relative de l'air dans la serre et à l'extérieur.

*Modélisation du séchage solaire des boues résiduaires urbaines :
ETUDE SUR SITE REEL : CAS DE LA STATION DE BRUMATH*

Tableau VI.2 Relevés expérimentaux des données climatiques (intérieur et extérieur) d'une serre de la station d'épuration de Brumath.

Heures	Intensité du rayonnement solaire (W/m²)	Température extérieure (°C)	Humidité relative extérieure (%)	Température intérieure (°C)	Humidité relative intérieure (%)
0	0	21	24	23	60
2	0	19	28	21	63
4	0	18	29	21	67
6	110	18	22	23	52
8	410	21	15	32	26
10	850	27	7	38	22
12	950	30	2	39	16
14	1050	33	2	42	16
16	840	34	4	43	18
18	390	36	7	42	21
20	120	36	13	36	31
22	60	29	16	27	44
24	0	25	19	26	58
26	0	24	25	25	64
28	0	23	28	24	67
30	95	21	23	26	51
32	380	21	16	28	24
34	790	23	8	33	21
36	910	24	3	36	17
38	1200	28	3	38	17
40	980	29	4	39	18
42	750	32	8	37	22
44	410	28	14	35	32
46	140	26	16	30	45

VI.1.3 Vérification des corrélations semi-empiriques

VI.1.3.1 Température de l'air ambiant

Les valeurs obtenues de la formulation mathématique sont comparées à celles mesurées sur la station de Brumath (Figure VI.1). Un accord satisfaisant a été trouvé. La température de l'air ambiant simulée suit la même évolution que celle mesurée avec comme caractéristiques :

- minimum de température après le lever du soleil ;
- maximum de température entre 14 et 15 heures.

Les valeurs des températures T_{aemin} et T_{aemax} sont celles relevées sur site pendant les deux jours de campagne respectivement :

$$T_{aemin} = 18 \text{ et } 21^{\circ}\text{C} \quad \text{et} \quad T_{aemax} = 36 \text{ et } 32^{\circ}\text{C}$$

La valeurs de $kt(t)$ provient de la table reproduite en Annexe VI.

L'écart relatif moyen observé entre les valeurs simulées et mesurées est de l'ordre de 2,5 %.

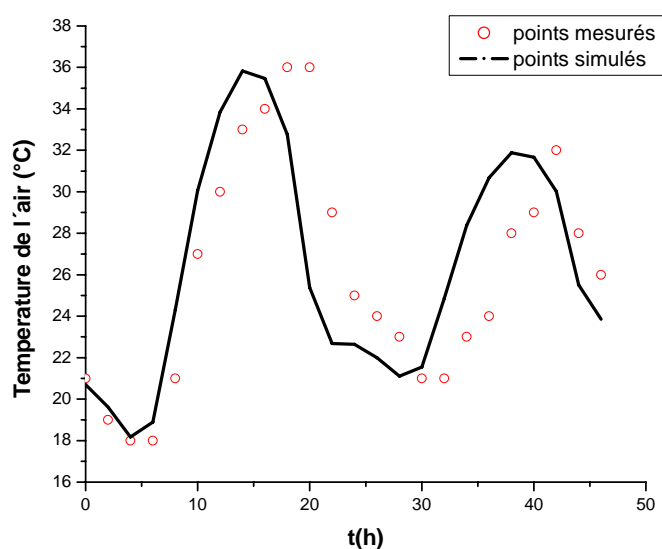


Figure VI.1 Evolution de la température (de l'air extérieur) simulée et mesurée

VI.1.3.2 L'humidité relative de l'air extérieur

La Figure VI.2 montre une bonne concordance des valeurs de l'humidité relative mesurée et simulée, avec un écart relatif moyen de 1,12%. L'évolution de l'humidité relative varie en sens inverse de la température. Elle est maximale au lever du soleil, après un plateau proche de la saturation, et minimale au moment où la température est maximale.

Les valeurs des humidités relatives Hr_{\min} et Hr_{\max} sont également celles relevées sur site pendant les deux jours de campagne respectivement :

$$Hr_{\min} = 2 \text{ et } 3 \% \quad \text{et} \quad Hr_{\max} = 29 \text{ et } 28 \%$$

La valeurs de $kr(t)$ provient de la table reproduite en Annexe VI.

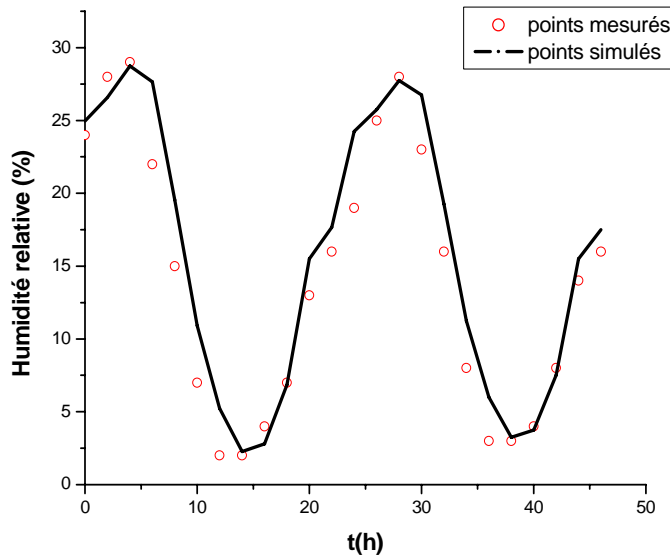


Figure VI.2 Evolution de l'humidité relative (de l'air extérieur) simulée et mesurée

VI.1.3.3 Rayonnement solaire

Les paramètres a et b sont ajustés à l'aide du solveur d'Excel, de manière à minimiser les écarts entre la relation théorique $Rg = f(H)$ et les résultats expérimentaux correspondants. Le Tableau VI.3 reprend les valeurs des paramètres a et b du modèle et l'erreur quadratique

moyenne
$$EQM = \frac{1}{N} \sum_1^N |Rg_{cal} - Rg_{exp}|^2$$
 relative à l'ajustement.

Tableau VI.3 Valeurs des paramètres a et b du modèle et leur EQM relatif à l'ajustement

a	b	EQM
1219	1,22	0,11

La Figure VI.3 représente les courbes d'ajustement du modèle et des données expérimentales. Les valeurs du modèle montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

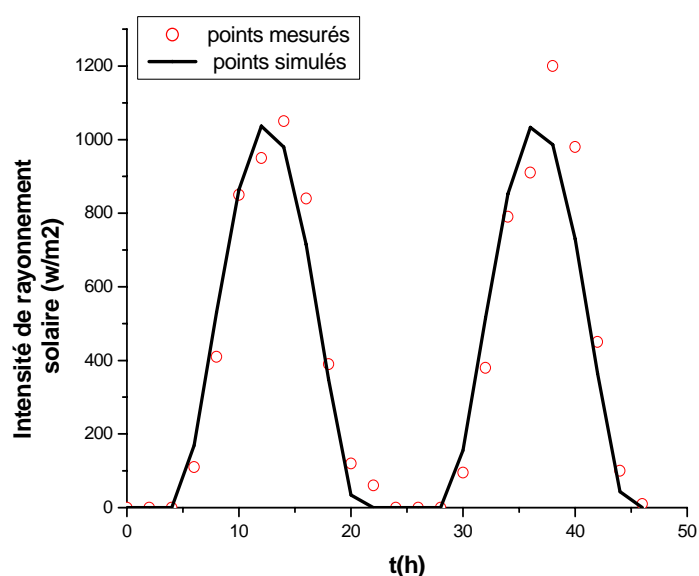


Figure VI.3 Evolution de l'intensité du rayonnement solaire simulée et mesurée

VI.2 Performances climatiques de la serre

La couverture est le principal vecteur des transferts énergétiques de la serre vers le milieu extérieur. Une bonne couverture doit en principe laisser pénétrer dans la serre le maximum de rayonnement solaire, et limiter au maximum les déperditions thermiques par rayonnement infrarouge long, mais aussi par convection et par conduction (cas des matériaux épais).

L'interaction des paramètres climatiques, intérieurs et extérieurs est étudiée individuellement.

VI.2.1 Interactions température de l'air intérieur - extérieur

La Figure VI.4 présente l'évolution des températures horaires de l'air intérieur et extérieur. On constate que la température de l'air intérieur est plus importante que celle de l'air extérieur. En effet l'augmentation de la température intérieure résulte de l'effet de serre qui conjugue deux phénomènes : l'un radiatif et l'autre convectif.

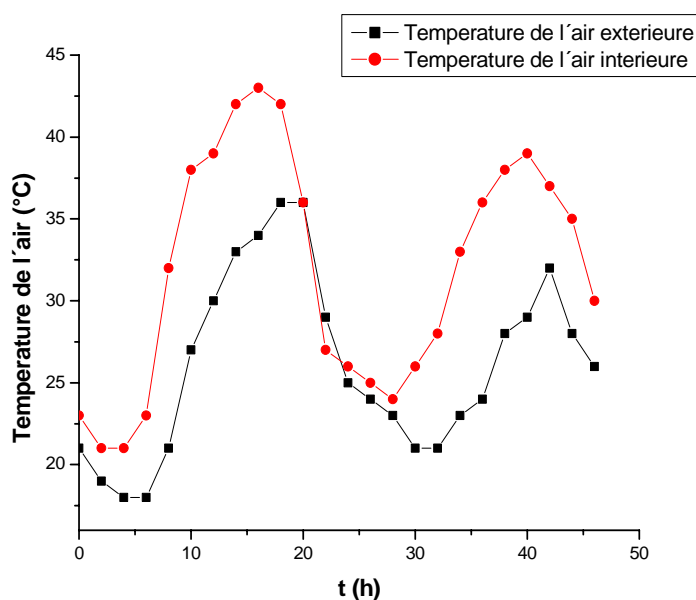


Figure VI.4 Evolution des températures de l'air extérieur et intérieur sur 2 jours.

VI.2.1.1 Effet radiatif

La paroi des serres est en principe :

- très perméable au rayonnement solaire [rayonnement visible et infrarouge (IR) court : 0,38 à 2,5 μ m] ;

- faiblement perméable au rayonnement IR long (2,5 à 50 μ m) émis par les corps terrestres, y compris l'atmosphère libre.

De jour, les corps abrités par la serre absorbent le rayonnement solaire, s'échauffent et émettent davantage d'énergie radiative, sous grande longueur d'onde. **De nuit**, le rayonnement IR long est seul présent et l'interposition, au-dessus de la boue, d'une paroi l'absorbant ou le réfléchissant réduit les déperditions radiatives nettes et, là encore, la température est plus élevée qu'en plein air.

L'effet radiatif de serre dépend donc essentiellement du comportement des matériaux de couverture à l'égard du rayonnement IR long.

VI.2.1.2 Effet convectif (ou effet « d'abri »)

Par suite de l'échauffement d'origine radiative, l'air devenant moins dense, tend à être remplacé par de l'air froid. L'étanchéité de la serre réduisant cette convection accroît l'effet « positif » de serre; mais elle peut, dans certains cas (rayonnement intense des nuits claires), provoquer une inversion de température (température intérieure plus basse). Cette inversion de température s'explique par l'insuffisance des échanges convectifs à compenser le refroidissement par rayonnement des éléments situés à l'intérieur de l'enceinte.

VI.2.2 Interactions de l'humidité relative de l'air intérieur - extérieur

On observe sur la Figure VI.5 que l'humidité relative intérieure est beaucoup plus importante que celle de l'air extérieur. En effet l'apport de chaleur par convection et par rayonnement engendre une élimination de vapeur d'eau de la boue et par conséquent un accroissement de l'humidité relative.

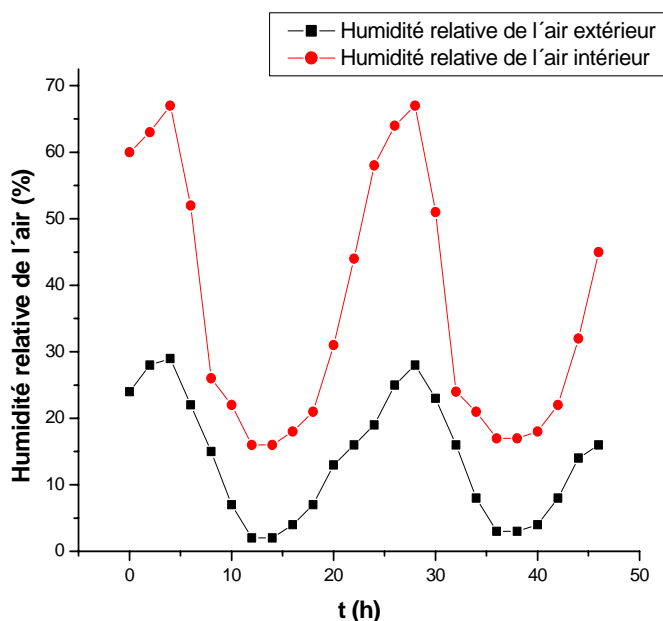


Figure VI.5 Evolution des humidités relatives de l'air extérieur et intérieur sur 2 jours.

VI.3 Quelques éléments d'extrapolation du modèle à une installation à l'échelle réelle

Le modèle numérique a été validé sous atmosphère immobile et confinée. Les résultats numériques étaient en accord satisfaisant avec les résultats expérimentaux. Toutefois simuler le séchage dans des conditions typiques des serres sur site nécessite un développement plus approfondi du modèle.

Ce développement se situe à deux niveaux d'analyses : d'une part au niveau du modèle physique pour améliorer et étendre ses capacités de représentation, d'autre part au niveau de l'outil numérique pour développer de nouvelles fonctionnalités d'application plus globales.

- En ce qui concerne les extensions du modèle physique, il faudrait envisager l'intégration d'une distribution spatiale de la température et de l'humidité de l'air intérieur. Cela revient à considérer un gradient de température suivant la longueur de la serre. En outre la prise en compte d'une ventilation contrôlée (par ouvrant ou extracteur) mériterait d'être développée. En effet la détermination du renouvellement de l'air de la serre permet une

bonne estimation des coefficients de convection entre l'air intérieur et la boue d'une part, l'air intérieur et la couverture d'autre part.

- En ce qui concerne le développement de nouvelles fonctionnalités du code numérique, il serait indispensable de développer une procédure de simulation sur une longue période. Cela suppose essentiellement de coupler au code un générateur de données climatiques.
- Enfin, le modèle développé dans son état actuel ne s'applique qu'au comportement d'une couche mince de boues (environ 2 à 3 cm). Il faudrait donc, pour simuler le comportement d'une installation réelle, intégrer une représentation du mode de renouvellement de la couche superficielle de boues, à adapter selon la technique de retournement/déplacement des boues utilisées.

La prise en compte des différents éléments de l'extrapolation dans le code devrait à terme permettre non seulement de simuler le séchage sur site mais aussi d'établir une carte énergétique globale de serre qui, suivant les conditions climatiques, permettra de mieux comprendre et contrôler les flux d'énergie.

Une optimisation des flux énergétiques et massiques (évaporation de l'eau) de la serre pourrait alors se traduire par une meilleure régulation du fonctionnement des ventilations dynamiques et une meilleure gestion du dispositif utilisé pour le retournement de la boue.

La valorisation du modèle final passera à travers le développement d'un logiciel dont la mise en œuvre permettra de décomposer et d'analyser de façon précise le cheminement de l'énergie à travers les divers éléments du système serre-boue. Avec une interface adaptée, un tel logiciel permettrait à la fois d'aborder avec plus de rigueur et de souplesse la problématique du dimensionnement des serres, tout en permettant d'évaluer et de comparer entre eux des scénarii de gestion des échanges entre air intérieur et air extérieur, ainsi que différentes modalités de retournement des boues.

VI.4 Références

Choisnel, E., Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, La météorologie, 11 103-133 (1977).

Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons Inc, New York (1980).

Idliman, A., Etude théorique d'un système de séchage des peaux de cuirs pour la région de Marrakech, constituée d'une serre agricole jouant le rôle d'un générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel. Thèse de troisième cycle, école nationale supérieure de Marrakech (1990).

Kittas, C., Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres, Thèse de 3^{ème} cycle Université de Perpignan (1980).

Klein, S.A., A design procedure for solar heating systems. PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison (1976).

CHAPITRE VII
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail contribue à améliorer les connaissances dans le domaine du séchage solaire des boues d'épuration. L'étude des différents mécanismes de transfert de chaleur et de masse régissant les dispositifs de séchage solaire sous serre, le développement et la validation d'un modèle numérique à échelle laboratoire furent les objectifs de cette thèse.

Dans le contexte européen de l'épuration des eaux usées, l'opération de séchage solaire sous serre est amenée à se développer dans un avenir proche. En effet, le problème de la gestion des boues au niveau européen va devenir crucial avec une production annuelle dépassant 15 millions de tonnes de matières sèches dès 2005. Le séchage des boues constitue une étape essentielle après la déshydratation, tant en amont de la valorisation agricole que de la valorisation thermique qui demeureront les deux principales filières d'élimination. Malgré l'intérêt évident du séchage solaire des boues, ce procédé est encore mal maîtrisé et l'empirisme domine.

Un acquit important de ce travail est la mise au point d'un modèle mathématique de séchage unidimensionnel pouvant faciliter l'étude diagnostic du fonctionnement des serres de séchage de boue. Ce modèle intègre à la fois les propriétés physiques de la boue et les différents transferts thermiques régissant le séchage. Une mise en équation assez simple des différents phénomènes complexes est effectuée. Nous obtenons ainsi trois équations de bilan d'énergie et une de transfert de matière couplées et non linéaires. Les spécificités de ce modèle concernent la finesse de l'analyse, notamment dans la représentation formelle des éléments de la serre, et la souplesse du modèle liée à la structuration et au choix de formules génériques pour le calcul de paramètres physiques mal connus ou sujets à estimations très diverses.

La caractérisation de la boue montre que le paramètre siccité est important car la capacité calorifique, ainsi que les isothermes de désorption sont liées à cette teneur en eau. Cette caractérisation montre aussi que l'origine de la boue ainsi que le type de traitement effectué en amont, éléments clés de la composition de la boue, joue un rôle important. Ainsi, l'on peut dégager pour une boue donnée des tendances et des valeurs caractéristiques. Un ordre de grandeur pour la capacité calorifique de la masse anhydre de la boue est donné et les valeurs de l'isotherme de désorption obtenus sur un domaine large de l'activité ont pu être ajustées par le modèle d'Oswin.

La validation du modèle développé est ensuite faite grâce au développement d'une méthodologie expérimentale menée en deux étapes allant du plus simple au plus complexe : le modèle I puis le modèle II.

Les données issues des expérimentations sont essentielles pour passer des courbes de vitesse de séchage, aux courbes caractéristiques de séchage. Les coefficients obtenus pour chaque courbe caractéristique issue de chacun des modèles sont semblables. Ceci indique que la courbe caractéristique peut être considérée comme indépendante des variables opératoires et une courbe unique suffit à la caractériser dans tous les cas. En ce qui concerne les courbes de vitesse de séchage, on note l'absence des deux phases de séchage seule la phase à vitesse décroissante a été déterminée.

Les résultats expérimentaux de l'étude du séchage ont ensuite été confrontés aux résultats théoriques pour affiner et valider les résultats prédits par la simulation numérique. Les comparaisons des résultats observés et mesurés se sont avérées souvent très satisfaisantes, tant au niveau des transferts couplés de chaleur et de masse qu'au niveau de l'évaluation des vitesses de séchage. Néanmoins, plusieurs phénomènes échappant à la formulation macroscopique et monodimensionnelle du code ont été évoqués pour expliquer certains écarts entre les simulations et les comportements observés. Il s'agit notamment de la formation d'une fine couche sèche périphérique dès le début du séchage qui a été fréquemment mise en avant pour expliquer le ralentissement des transferts de masse observés, ou encore l'absence de première phase de séchage, etc.

Afin de réaliser des simulations à l'échelle annuelle, nous avons finalement couplé au modèle un générateur de données climatiques (température, humidité relative de l'air vitesse moyenne du vent et intensité solaire globale) en choisissant dans la littérature des corrélations décrivant ces paramètres. Ce choix a été validé par confrontation des résultats issus des corrélations et de ceux mesurés sur la Station de Brumath. Ces comparaisons sont en parfait accord.

Les présents travaux de thèse constituent le premier acte d'un projet de recherche initié par le laboratoire « Systèmes Hydrauliques Urbains » visant à accroître le champ des connaissances dans le domaine du séchage solaire des boues.

Différentes perspectives peuvent être envisagées dans le prolongement de ces recherches dont les objectifs majeurs sont articulés autour de deux points :

- ***l'extrapolation du modèle à une installation à l'échelle réelle :***

Cette partie consistera à étendre les capacités de représentation du modèle physique à des dimensions plus importantes. Le développement d'une extension en simulation dynamique sera également nécessaire, ceci afin de tenir compte de la variabilité des conditions climatiques externes dans le temps, notamment à l'échelle annuelle. D'autre part, il conviendra d'intégrer dans le code certaines hypothèses négligées, comme les variations spatiales des températures. Un sujet délicat encore à aborder serait également de développer et d'intégrer dans le modèle la prise en compte de la gestion des ouvrants, du fonctionnement des ventilateurs et plus généralement de l'aérodynamique globale de la serre.

Il serait également intéressant de modéliser les cinétiques de séchage en tenant compte du retrait de la boue, ou des modifications de structure (liées également aux systèmes de retournement), lors du séchage. En effet, la prise en compte de cet aspect permettrait de coupler les transferts de matière et de chaleur avec les déformations mécaniques.

- ***la valorisation du modèle, qui passera à travers le développement d'un logiciel avec une interface adaptée :***

Un tel logiciel permettrait à la fois d'aborder avec plus de rigueur et de souplesse la problématique du dimensionnement des serres, tout en permettant d'évaluer et de comparer entre eux des scénarii de gestion des échanges entre air intérieur et air extérieur, ainsi que différentes modalités de retournement des boues. Le modèle actuel pourrait constituer le cœur du moteur de calcul, celui-ci devant être complété par différents modules pour intégrer les spécificités des différents procédés développés par les constructeurs. Une interface plus « conviviale » pourrait être envisagée et utilisée dans un rôle éducatif.

Un modèle complet permettant de simuler le séchage solaire des boues sur site est un élément clé pour contribuer à améliorer les méthodes de dimensionnement assez empiriques. Bien qu'encore à améliorer et à approfondir le modèle que nous proposons permet d'avancer vers cet objectif et de donner des éléments concrets pour les travaux à venir.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : PROPRIETES DE L’AIR HUMIDE	178
ANNEXE II : SIMULATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE	179
ANNEXE III: MODELE I : PARAMETRES, PROGRAMME ET RESULTATS	181
ANNEXE IV: MODELE II : PARAMETRES, PROGRAMME ET RESULTATS	189
ANNEXE V: INFLUENCE DES VARIABLES OPERATOIRES SUR LE SECHAGE : CAS DU MODELE II	201
Influence de la température de l’air	202
Influence de l’humidité relative de l’air	203
Influence de la vitesse superficielle de l’air	204
Influence du rayonnement solaire	206
Comparaison des variables opératoires	207
ANNEXE VI: VALEURS DES COEFFICIENTS NECESSAIRES A LA RECONSTITUTION DES TEMPERATURES ET HUMIDITES DE L’AIR AMBIANT	210
ANNEXE VII: RETRAIT DE LA BOUE LORS DU SECHAGE	213
ANNEXE VII: IMAGES DU PILOTE EXPERIMENTAL MODELE II	217

Annexe I : Propriétés de l'air humide**Pression de vapeur saturante (Pa)**

$$P_{VS} = 288,68 \left(1,098 + \frac{T}{100} \right)^{8,02} \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Humidité absolue (kg eau/kg air sec)

$$H_{as} = \frac{6,622 \cdot P_{VS}}{P - P_{VS}}$$

Humidité relative (%)

$$Hr = \frac{P_v}{P_{VS}}$$

Masse volumique (kg/m³)

$$\rho = \frac{353}{T + 273} \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Chaleur latente (J/kg)

$$L_v = 4185,5 \cdot (597 - 0,56T) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Conductivité thermique de l'air (W/m⁻¹.°C)

$$\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0242 \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

viscosité dynamique de l'air (m².s⁻¹)

$$\mu = 10^{-5} (0,0046T + 1,7176) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Référence

Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., *Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels*, Technique et Documentation - Lavoisier : Paris (1995).

Annexe II : Simulation du rayonnement solaire

Il existe différents types de simulateurs solaires se distinguant les uns des autres par la distribution de leur puissance spectrale et leur géométrie d'éclairement. Le type de la lampe détermine la distribution de la puissance spectrale, bien que les filtres optiques puissent entraîner une modification du spectre. L'optique des faisceaux détermine quant à elle l'efficacité et la géométrie d'éclairement.

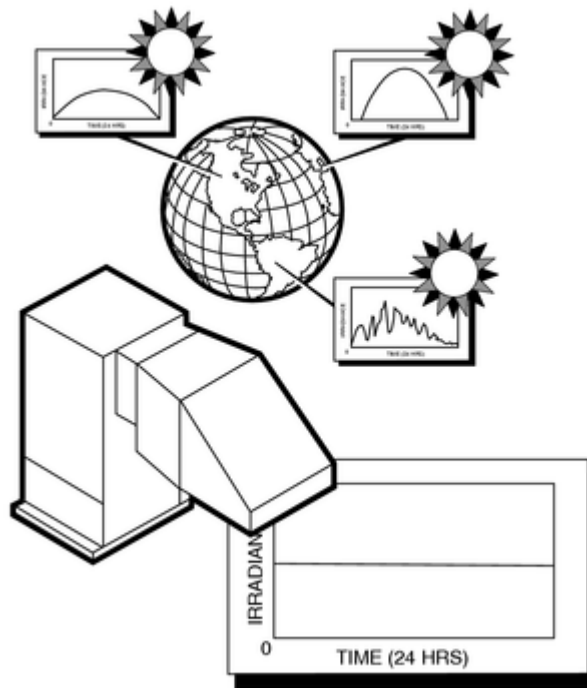


Figure.II.1 Les simulateurs permettent de simuler différentes conditions solaires à toute heure de la journée et dans n'importe quelles conditions météorologiques.

Comportement temporel de la sortie de simulateur

Bien que le niveau d'éclairement et le spectre terrestre varient en fonction des cycles quotidiens et annuels ainsi que des conditions atmosphériques imprévisibles, le Soleil est une source relativement constante. Les boîtiers d'alimentation des simulateurs sont extrêmement bien régulés contre les variations en ligne ou en charge et possèdent un mécanisme de filtrage interne permettant de réduire les bruits et ondulations à court terme. Même dans ces conditions, la sortie des simulateurs chute graduellement et le spectre se modifie légèrement à mesure que la lampe s'use. Les modifications de la température locale peuvent également affecter la sortie du simulateur dans une faible proportion. Des filtres sont installés à l'intérieur des appareils dans une zone d'intensité modérée du faisceau pour réduire la non correspondance des spectres solaire et ceux des simulateurs. Des filtres AM 1, AM 1,5 et AM 2 modifient également les parties visible et ultraviolet du spectre afin d'assurer une meilleure conformité aux spectres solaires standard.

Simulation avec lampes Métal Halide

Les simulateurs solaires, les lampes Métal Halide offrent une correspondance spectrale la plus proche du spectre solaire que l'on puisse obtenir à partir d'une source artificielle. La correspondance n'est pas exacte, mais meilleure que ne l'exigent de nombreuses applications. elles constituent des sources efficaces riches en sortie d'ultraviolet et visible. Tout comme dans le cas des lampes au Mercure, le spectre est dominé par de fortes fluctuations.

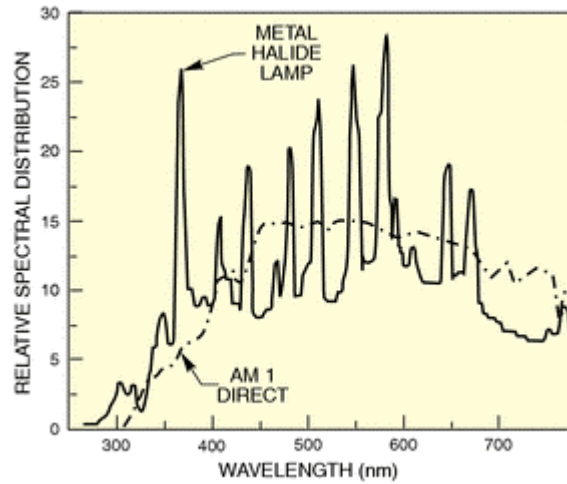


Fig. II.2 Sortie de lampe Métal Halide et spectre solaire AM 1 direct.

Annexe III: Modèle I : paramètres, programme et résultats

Modèle I : Paramètres du programme

Paramètres d'entrée fixes	<p>dimension du support de la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> longueur du support (L) largeur du support (l) <p>paramètres liés à la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> chaleur massique anhydre de la boue capacité calorifique massique de l'eau vitesse de séchage réduite <p>paramètres liés à l'air</p> <ul style="list-style-type: none"> capacité calorifique massique nombre de Prandtl 	<p>0,47 (m)</p> <p>0,40 (m)</p> <p>1182 (J/kg.°C)</p> <p>4180 (J/kg.°C)</p> <p>1008 (J/kg.°C)</p> <p>0,7 (-)</p>
Paramètres d'entrée évolutifs	<p>données climatiques</p> <ul style="list-style-type: none"> température de l'air extérieur humidité relative de l'air extérieur vitesse de l'air <p>données sur la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> masse initiale siccité initiale température initiale isotherme de désorption 	
Paramètres secondaires	<p>chaleur latente de vaporisation de l'eau</p> <p>grandeurs caractéristiques de l'air</p> <ul style="list-style-type: none"> conductivité thermique viscosité masse volumique, chaleur massique température humide <p>coefficients de convection</p> <ul style="list-style-type: none"> air intérieur / boue <p>données sur la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> teneur en base sèche initiale teneur en eau d'équilibré vitesse à phase constante 	

ANNEXES

<p>Relations utilisées</p>	<p><u>Nombre de Nusselt :</u> $Nu = 0,033 Re^{0,8} Pr^{1/3}$ <u>coefficient de convection</u> $Nu = h \frac{L}{\lambda}$ <u>capacité calorifique massique de la boue :</u> $Cp = \frac{1}{1+X} Cp_{anhydre} + \frac{X}{1+X} Cpe$ <u>chaleur latente de vaporisation d'eau :</u> $Lv = 4185,5 (597 - 0,56T_h)$ <u>isotherme de désorption :</u> $X_{eq} = k \left(\frac{Hr}{1-Hr} \right)^n$ avec k=0,11 et 0,09 ; n= 0,41 et 0,48 pour T=30 et 50°C respectivement. <u>vitesse de séchage réduite :</u> $f(Xr) = 2,39 Xr - 3,02 Xr^2 + 1,63 Xr^3$ <u>vitesse à phase constante :</u> $\left(-\frac{dX}{dt} \right)_1 = \frac{h S (Ta - T_h)}{Ms Lv(T_h)}$ </p>
-----------------------------------	---

Modèle I : Listing du programme sous matlab

```

global A
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Paramètres d'entrées fixes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%Dimension du support de la boue %%%%%%%%%%
L=0.47;
l= 0.40;
Sb=L*l;
%%%Paramètres relatifs à l'air %%%%%%%%%%
    %Chaleur massique de l'air
    Cp=1008;
    %Chaleur massique de l'eau
    Cpe=4180;
%%%Caractéristiques des boues%%%%%%%%%
    %Masse initiale
    mb0=1.585;
    %Siccité initiale
    Sicite1=0.148;
    %Masse sèche
    Ms=mb0*Sicite1;
    %teneur initiale;
    Xi=(mb0-Ms)/Ms;
    %température initiale de la boue
    Tb0=10.1;
%capacité anhydre
Cp_ anhydre=1182 ;
    %courbe caractéristique%%%%%%%%%B1*Xr + B2*Xr^2 + B3*Xr^3%%%%%%%%%
B1=2.39;
    B2= -3.02 ;
    B3= 1.63 ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Conditions opératoires de séchage%%%%%%%%%
%Température de l'air asséchant:

```

ANNEXES

Tae=46 ;

% humidité relative de l'air asséchant:

Hr=0.314,

% vitesse de l'air asséchant:

Ui=1,65 ;

Paramètres secondaires

% masse volumique de l'air à Tae

Rho= 353/(Tae+273);

% viscosité de l'air cinématique

nu=10⁻⁵*(0.0046*Tae+1.7176);

% conductivité thermique de l'air

lamb_air=7.57*10⁻⁵*Tae+0.0242;

% température humide de l'air

Th=(-0.4911*Tae+8.2385)*(Hr)² +(1.0248*Tae-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tae -2.5987);

% Chaleur latente de vaporisation d'eau

Lv=4185.5*(597-0.56*Th);

% isotherme de désorption

Xe=0.112*(Hr/(1-Hr))^{0.416}; % pour t=30

Xe=0.0938*(Hr/(1-Hr))^{0.484}; % pour t=50

% Coefficient de convection

h=lamb_air*0.036*(Ui*Rho*L/nu)^(0.8)*(0.7)^(1/3)/L;

% vitesse à phase constante

(-dX/dt)₁ = h*S*3600*(Tae-Th)/(4185.5*(597-0.56*Th)*ms);

Coefficient A

A(1,1)= h*S*3600;

A(1,2)=Ms;

A(1,3)=Xe;

A(1,4)=Tae;

A(1,5)= Cp_ anhydre;

A(1,6)=Xi;

A(1,7)=(4186.8*597);

A(1,8)=-4186.8*0.56*Th;

A(1,9)=Cpe;

ANNEXES

```

A(1,10)= B3*(-dX/dt)1;
A(1,11)= B2*(-dX/dt)1;
A(1,12)= B1*(-dX/dt)1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Conditions initiales %%%%%%%%%
x0=0;
z0=Tb0;
r0=Xi;
dr0=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Paramètres de résolution%%%%%%%%
x0=0;
xf=42; %HEURE
h=0.01; %HEURE
%%Résolution du système par Runge Kutta d'ordre 4%%
[x2,z2,r2,dr] = syskutta (x0,z0,r0,dr0,xf,h);
    Resultat{ Ui, Hr, Tae }.Ui=Ui;
        Resultat{ Ui, Hr, Tae }.Hr=Hr;
            Resultat{ Ui, Hr, Tae }.Tae=Tae;
                Resultat{ Ui, Hr, Tae }.t=x2;
                    Resultat{ Ui, Hr, Tae }.Tb=z2;
                        Resultat{ Ui, Hr, Tae }.X=r2;
                            Resultat{ Ui, Hr, Tae }.dX=-diff(r2)/h;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Equations bilan massique %%%%%%%%%
function [f1]=fsys1(x2,z2,r2,dr)
f1=-(A(1,10)*((r2-A(1,3))/(A(1,6)-A(1,3)))^3)+A(1,11)*((r2-A(1,3))/(A(1,6)-
A(1,3)))^2)+A(1,12)*((r2-A(1,3))/(A(1,6)-A(1,3))));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Equations au niveau de la boue%%%%%%%%
function [f2]=fsys2(x2,z2,r2,dr)
f2=(A(1,1)*(A(1,4)-z2)-(A(1,7)+A(1,8))*dr)*1/(A(1,2)*(A(1,5)+r2*A(1,9)));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function[x2,z2,r2,dr]=syskutta (x0,z0,r0,dr0,xf,h)
global A
x2=x0:h:xf;
z2(1)=z0;
r2(1)=r0;
dr(1)=dr0;

```

```

for n=1:floor((xf-x0)/h)
K41= fsys2(x2(n),z2(n),r2(n), dr(n));
K31= fsys1(x2(n),z2(n),r2(n), dr(n));
K32=fsys1(x2(n)+h/2,...
          z2(n),...
          r2(n)+K31*h/2,dr(n));
K42=fsys2(x2(n)+h/2,...
          z2(n)+K41*h/2,...
          r2(n),dr(n));
K33=fsys1(x2(n)+h/2,...
          z2(n),...
          r2(n)+K32*h/2,dr(n));
K43=fsys2(x2(n)+h/2,...
          z2(n)+K42*h/2,...
          r2(n),dr(n));
K34=fsys1(x2(n)+h,...
          z2(n),...
          r2(n)+K33*h,dr(n));
K44=fsys2(x2(n)+h,...
          z2(n)+K43*h,...
          r2(n),dr(n));
r2(n+1)=r2(n)+h*(K31+2*K32+2*K33+K34)/6;
z2(n+1)=z2(n)+h*(K41+2*K42+2*K43+K44)/6;
dr(n+1)=-A(1,2)*(r2(n+1)-r2(n))/h;
end

```

Modèle I : Résultats de simulation non présentés dans le texte

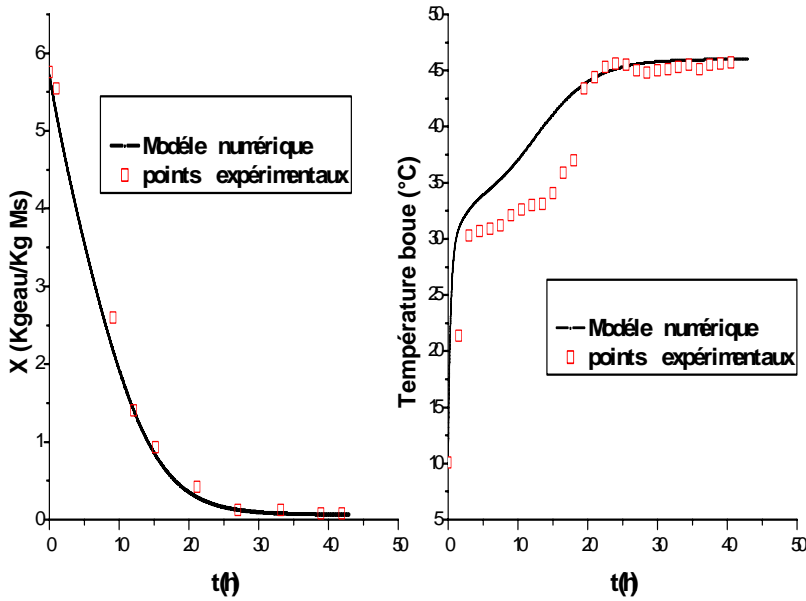


Figure III.1 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 8 ($T_a=44,55^\circ\text{C}$, $H_r=26,20\%$, $V=0$, 5m/s).

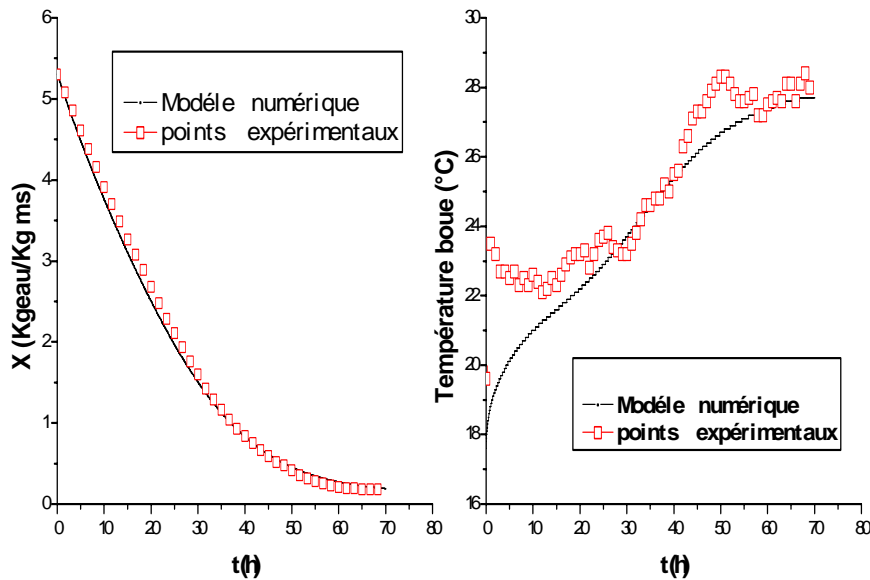


Figure.III.2 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales essai 5 ($T_a=48,64^\circ\text{C}$, $H_r=20,08\%$, $V=1,65\text{m/s}$).

Annexe IV: Modèle II : paramètres, programme et résultats

Modèle II : Paramètres du programme

Paramètres d'entrée fixes	dimension de la serre	
	<ul style="list-style-type: none"> • longueur • largeur • hauteur 	0,6 (m) 0,5 (m) 0,35 (m)
	paramètres liés à la couverture	
	<ul style="list-style-type: none"> • transmissivité infra rouge de la couverture • émissivité infra rouge de la couverture • coefficient de transmission solaire couverture • coefficient d'absorption solaire couverture 	0 (-) 0,9 (-) 0,7 (-) 0,2 (-)
	paramètres liés à la boue	
	<ul style="list-style-type: none"> • coefficient d'absorption solaire de la boue • coefficient de réflexion solaire de la boue • émissivité infrarouge de la boue • capacité calorifique massique anhydre de la boue • vitesse de séchage réduite 	0,8 (-) 0,2 (-) 0,9 (-) 1182 (J/kg.°C)
	dimension du support de la boue	
	<ul style="list-style-type: none"> • longueur du support (L) • largeur du support (l) 	0,47 (m) 0,40 (m)
	paramètres liés à l'air	
	<ul style="list-style-type: none"> • capacité calorifique massique • nombre de Prandtl 	1008 (J/kg.°C) 0,7 (-)
	autres paramètres	
	<ul style="list-style-type: none"> • constante de Stephan Boltzmann • capacité calorifique massique de l'eau 	$5,6710^{-8}$ (J/m ² K ⁻⁴) 4180 (J/kg.°C)
Paramètres d'entrée évolutifs	données climatiques	
	<ul style="list-style-type: none"> • température de l'air extérieur • humidité relative de l'air extérieur • vitesse de l'air intérieur • vitesse du vent • rayonnement solaire sur une surface horizontale 	
	données sur la boue	
	<ul style="list-style-type: none"> • masse initiale • siccité initiale • température initiale 	

Paramètres secondaires	<p>température apparente de rayonnement du ciel chaleur latente de l'eau les grandeurs caractéristique de l'air</p> <ul style="list-style-type: none"> • conductivité thermique, • viscosité cinématique, • masse volumique, • pression de vapeur à saturation <p>coefficients de convection</p> <ul style="list-style-type: none"> • couverture/air extérieur • couverture /air intérieur • air intérieur / boue <p>données sur la boue</p> <ul style="list-style-type: none"> • teneur en base sèche initiale • vitesse à phase constante
Relations utilisées	<p><u>Nombre de Nusselt pour le calcul de h boue – air intérieur</u> $Nu = 0,049 Re^{0,8} Pr^{1/3}$</p> <p><u>Nombre de Nusselt pour le calcul de h air intérieur – couverture intérieure</u> $Nu = 0,0336 Re^{0,8} Pr^{1/3}$</p> <p><u>coefficient de convection</u> $Nu = h \frac{L}{\lambda}$</p> <p><u>coefficient de convection couverture – air extérieur</u> $h_e = 5,67 + 3,86 U_v$</p> <p><u>capacité calorifique massique de la boue :</u> $Cp = \frac{1}{1+X} Cp_{anhydre} + \frac{X}{1+X} Cpe$</p> <p><u>chaleur latente de vaporisation d'eau :</u> $L_v = 4185,5 (597 - 0,56 T_h)$</p> <p><u>température apparente de rayonnement du ciel</u> $T_v = 0,0552 T_{ae}^{1,5}$</p> <p><u>vitesse de séchage réduite :</u> $f(Xr) = 2,37 Xr - 3,30 Xr^2 + 1,92 Xr^3$</p> <p><u>vitesse à phase constante :</u></p> $\left(-\frac{dX}{dt} \right)_1 = \frac{S_b}{Ms Lv} \left[Rg a_b \tau_c + h_{cb} (T_{ai} - T_h) - \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_h^4 - T_c^4) \right]$

Modèle II : Listing du programme

global A

```

%%%%%%%%%%Paramètres d'entrées fixes%%%%%%%%%%
%%%dimension et caractéristiques de la serre%%%%%%%%%%
Lc=0.610;
lc=0.51;
hc=0.35;
Sc=Lc*lc;
%chaleur surfacique de la couverture
cc=8000;
%température initiale de la couverture
Tc0=24.00;
%coefficient d'absorption solaire
ace=0.2;
%coefficient de transmission solaire
Tau_C=0.7;
%emissivité de la couverture
epsilon_C=0.90;
%Chaleur massique de l'air
Cp=1008;
%Chaleur massique de l'eau
Cpe=4180;
%constante de Boltzmann
sigma=5.67*10^(-8);
%Dimension du support boue
Ls=0.40;
ls=0.47*6;
Sb=Ls*ls;
% Caractéristiques des boues
%Masse initiale
mb0=2.03;
%siccité initiale;
Sicite1=0.163;
%teneur initiale;
Xi=(1-Sicite1)/Sicite1;
%Masse sèche
Ms=mb0*Sicite1;
%température initiale de la boue
Tb0=15;
%Caractéristique boue par rapport aux rayonnements
%coefficient d'absorption solaire
ab=0.8;
%coefficient de réflexion solaire
rb=1-ab;
%emissivité de la boue
epsilon_b=0.9;
%capacité anhydre
Cp_anhydre=1182 ;

```

ANNEXES

%courbe caractéristique%% $B1 * Xr + B2 * Xr^2 + B3 * Xr^3$ %%

B1=2.37;

B2= -3.30 ;

B3= 1.92 ;

%%Conditions opératoires de séchage%%

%Température de l'air asséchant:

Tae= 49.68 ;

%humidité relative de l'air asséchant:

Hr=0.5534,

%vitesse de l'air asséchant:

Ui=1.43 ;

%vitesse de vent:

Uv =1.22 ;

%Rayonnement solaire global:

Rg=0 ;

%%Paramètres secondaires%%

%masse volumique de l'air à Tae

Rho= 353/(Tae+273);

%viscosité de l'air cinématique

nu=10⁻⁵*(0.0046*Tae+1.7176);

%conductivité thermique de l'air

lamb_air=7.57*10⁻⁵*Tae+0.0242;

% température humide de l'air

Th=(-0.4911*Tae+8.2385)*(Hr)^2 +(1.0248*Tae-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tae -2.5987);

%Chaleur latente de vaporisation d'eau

Lv=4185.5*(597-0.56*Th);

%Coefficient de convection air-boue

hb=lamb_air*0.049*(Ui*Rho*L/nu)^(0.8)*(0.7)^(1/3)/L;

%Coefficient de convection couverture-vent

hccv=5.67+3.86*Uv;

%Coefficient de convection couverture-vent

hc=lamb_air*0.0336*(Ui*Rho*L/nu)^(0.8)*(0.7)^(1/3)/L;

%vitesse à phase constante

(-dX/dt)1 = Sb*3600*(hb*(Tae-Th)+Rg*ab*Tau_C)/(4185.5*(597-0.56*Th)*Ms);

%%Coefficient A%%

A(1,1)=Rg*ace*Sc*(1+Tau_C*rb)*3600;

A(1,2)=Sc*sigma*epsilon_C*3600;

A(1,3)= 0.055*(Tae)^{1.5};

A(1,4)=Sc*sigma*3600/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1);

A(1,5)= hi*Sc*3600;

A(1,6)=hccv*3600*Sc;

A(1,7)=Sc*cc;

A(1,8)=Ms;

A(1,9)=Cpb_anhydre;

A(1,10)= Cpe;

A(1,11)=hb*Sb*3600;

A(1,12)=4186.8*597;

A(1,13)=4186.8*0.56;

ANNEXES

```

A(1,14)=Sb*sigma*3600/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1);
A(1,15)=Rho*Vc*Cp;
A(1,16)= B3*(-dX/dt)1;
A(1,17)= B2*(-dX/dt)1;
A(1,18)= B1*(-dX/dt)1;
A(2,2)=Xi;
A(2,3)=Tae;
A(2,4)=Rg*ab*Sb*Tau_C*3600;
A(2,5)=Rho*Q*Cp*3600;
%%%%%%%%%%Conditions initiales%%%%%%%%%%
x0=0;
y0=Tai0;
q0=Tc0;
z0=Tb0;
r0=Xi;
dr0=0;
%%%%%%%%%%paramètres de résolution%%%%%%%%%%
x0=0;
xf=42;
h=0.01;
%%%%%%%%%%
[x1,y1,q1,z1,r1,dr] = syskutta (x0,y0,q0,z0,r0,dr0,xf,h);

```

```

Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Ui=Ui;
    Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Hr=Hr;
        Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Tae=Tae;
            Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Rg=Rg;
                Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Uv=Uv;
                    Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.t=x1;
                        Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Tai=y1;
                            Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Tc=q1;
                                Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.Tb=z1;
                                    Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.X=r1;
Résultat{ Ui, Hr, Tae, Rg, Uv }.dX=-diff(r1)/h;

```

%%%%%%%%%% Equations au niveau de l'air %%%%%%%%%%

```
function [f1]=fsys1(x1,y1,q1,z1,r1,dr)
```

$$f1=(A(1,5)*(q1-y1)-A(1,11)*(y1-z1)+A(1,15)*(A(2,3)-y1))/A(1,15);$$

%%%%%%%%%% Equations au niveau de la boue %%%%%%%%%%

```
function [f2]=fsys2(x1,y1,q1,z1,r1,dr)
```

$$f2=(A(2,4)-A(1,11)*(z1-y1)-(A(1,12)-A(1,13)*z1)*dr+A(1,14)*((q1+273)^(4)-(z1+273)^(4)))/(A(1,8)*(A(1,9)+r1*A(1,10)));$$

%%%%%%%%%% Equations au niveau de la couverture %%%%%%%%%%

```
function [f3]=fsys3(x1,y1,q1,z1,r1,dr)
```

ANNEXES

$$f3=(A(1,1)+A(1,2)*((A(1,3)+273)^4-(q1+273)^4)-A(1,4)*((q1+273)^4-(z1+273)^4)+A(1,6)*(A(2,3)-q1)-A(1,5)*(q1-y1))/A(1,7);$$

Equations bilan massique

function [f4]=fsys4(x1,y1,q1,z1,r1,dr)

$$f4=-(A(1,16)*(r1/ A(2,2))^3+A(1,17)*(r1/A(2,2))^2+A(1,18)*(r1/ A(2,2)));$$

%résolution du système d'équation par la méthode de Runge-Kutta d'ordre4%

function[x1,y1,q1,z1,r1,dr]=syskutta (x0,y0,q0,z0,r0,dr0,xf,h)

x1=x0:h:xf;

y1(1)=y0;

q1(1)=q0;

z1(1)=z0;

r1(1)=r0;

dr(1)=dr0;

for n=1:floor((xf-x0)/h)

K11= fsys3(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K21= fsys1(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K31= fsys2(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K41= fsys4(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K12= fsys3(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n)+K11*h/2,z1(n),r1(n),dr(n));

K22= fsys1(x1(n)+h/2,y1(n)+K21*h/2,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K32= fsys2(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n)+K31*h/2, r1(n),dr(n));

K42= fsys4(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K41*h/2,dr(n));

K13= fsys3(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n)+K12*h/2,z1(n),r1(n),dr(n));

K23= fsys1(x1(n)+h/2,y1(n)+K22*h/2,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K33= fsys2(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n)+K32*h/2,r1(n),dr(n));

K43= fsys4(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K42*h/2,dr(n));

K14= fsys3(x1(n)+h,y1(n),q1(n)+K13*h,z1(n),r1(n),dr(n));

K24= fsys1(x1(n)+h,y1(n)+K23*h,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));

K34= fsys2(x1(n)+h,y1(n),q1(n),z1(n)+K33*h,r1(n),dr(n));

K44= fsys4(x1(n)+h,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K43*h,dr(n));

y1(n+1)=y1(n)+h*(K21+2*K22+2*K23+K24)/6;

q1(n+1)=q1(n)+h*(K11+2*K12+2*K13+K14)/6;

z1(n+1)=z1(n)+h*(K31+2*K32+2*K33+K34)/6;

r1(n+1)=r1(n)+h*(K41+2*K42+2*K43+K44)/6;

dr(n+1)=-A(1,8)*(r1(n+1)-r1(n))/h;

end

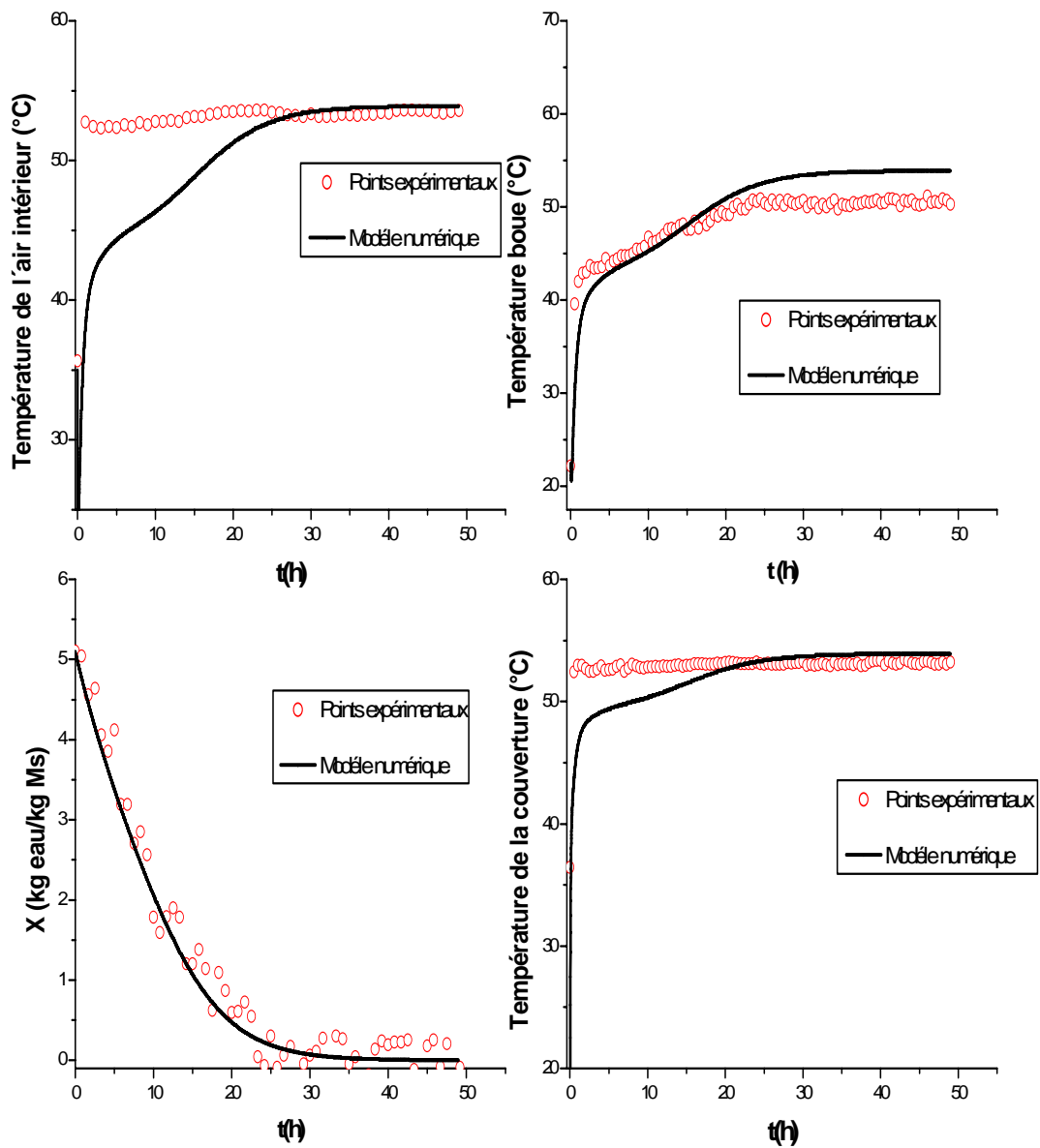
Modèle II : Résultats des simulations non présentés dans le texte

Figure IV. 1 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 8 ($T_{ae}=50,53^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=63,59\%$; $U_i=1,79\text{m/s}$; $R_g=728\text{ W/m}^2$)

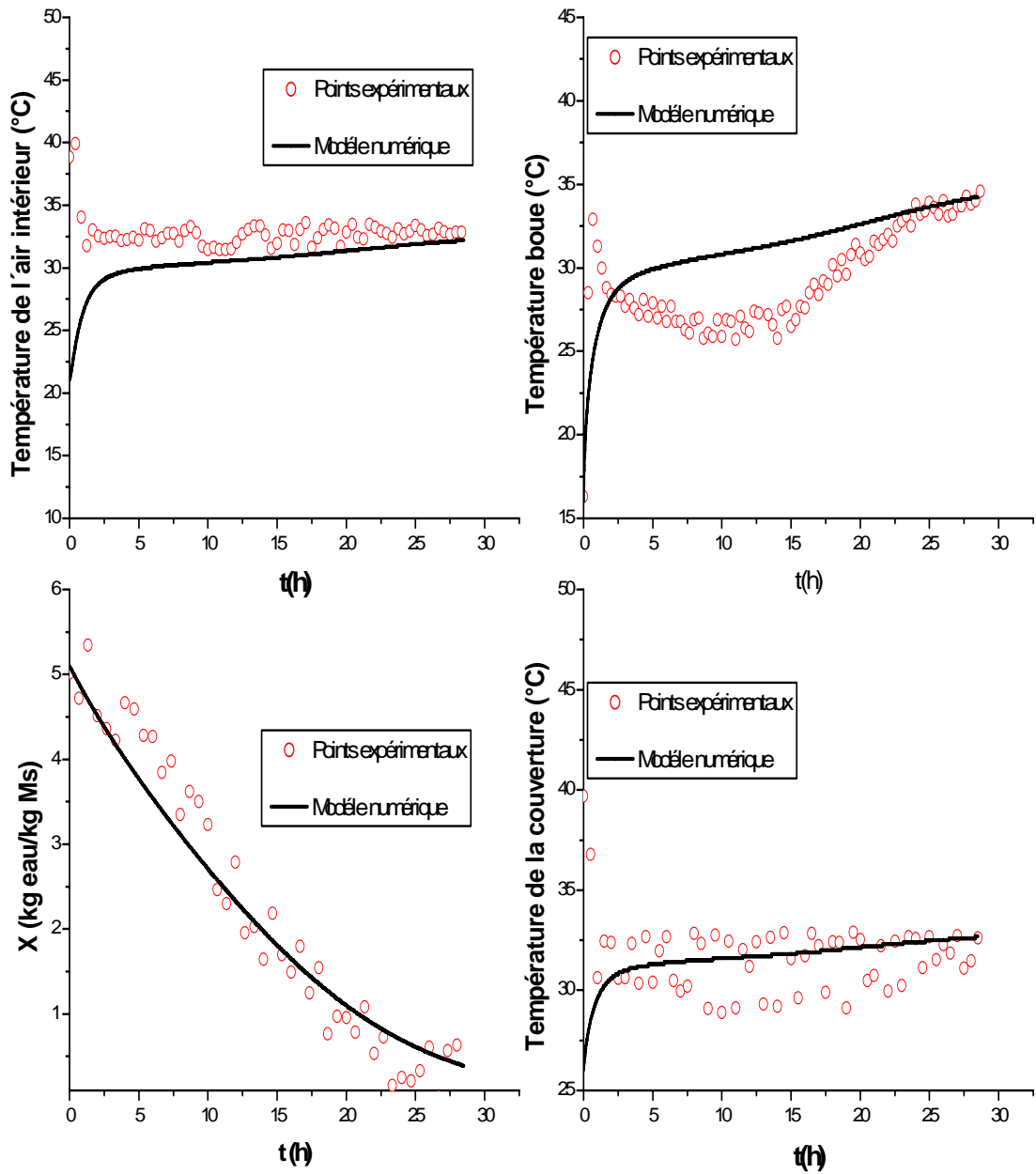


Figure IV. 2 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 12 ($T_{ae}=29,63^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=59,05\%$; $U_i=1,0\text{ m/s}$; $R_g=315\text{ W/m}^2$)

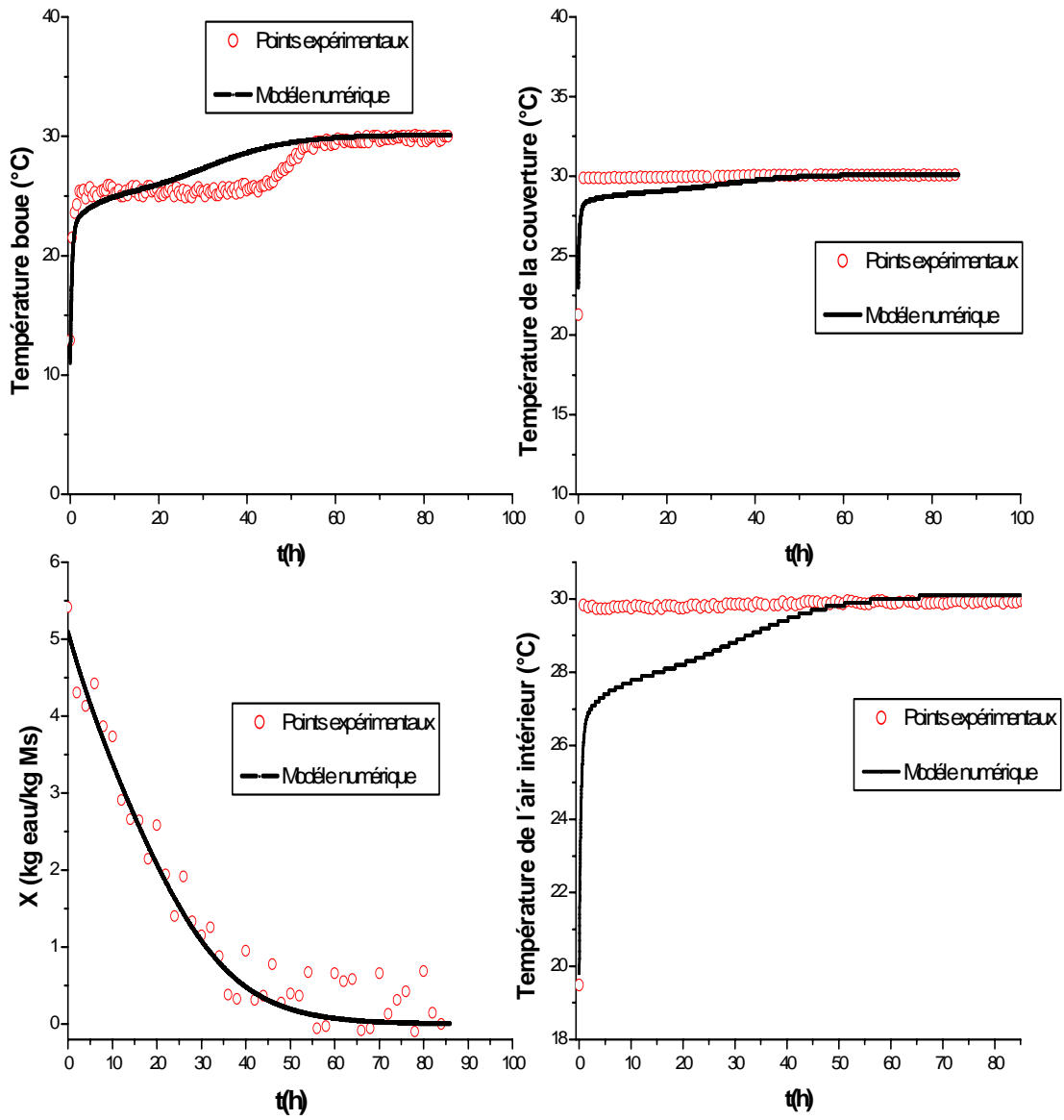


Figure IV. 3 Comparaison des valeurs simul\u00e9es et exp\u00e9rimentales de l'essai 3 ($T_{ae}=30,12^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=61,39\%$; $U_i=1,57\text{m/s}$; $R_g=0\text{W/m}^2$)

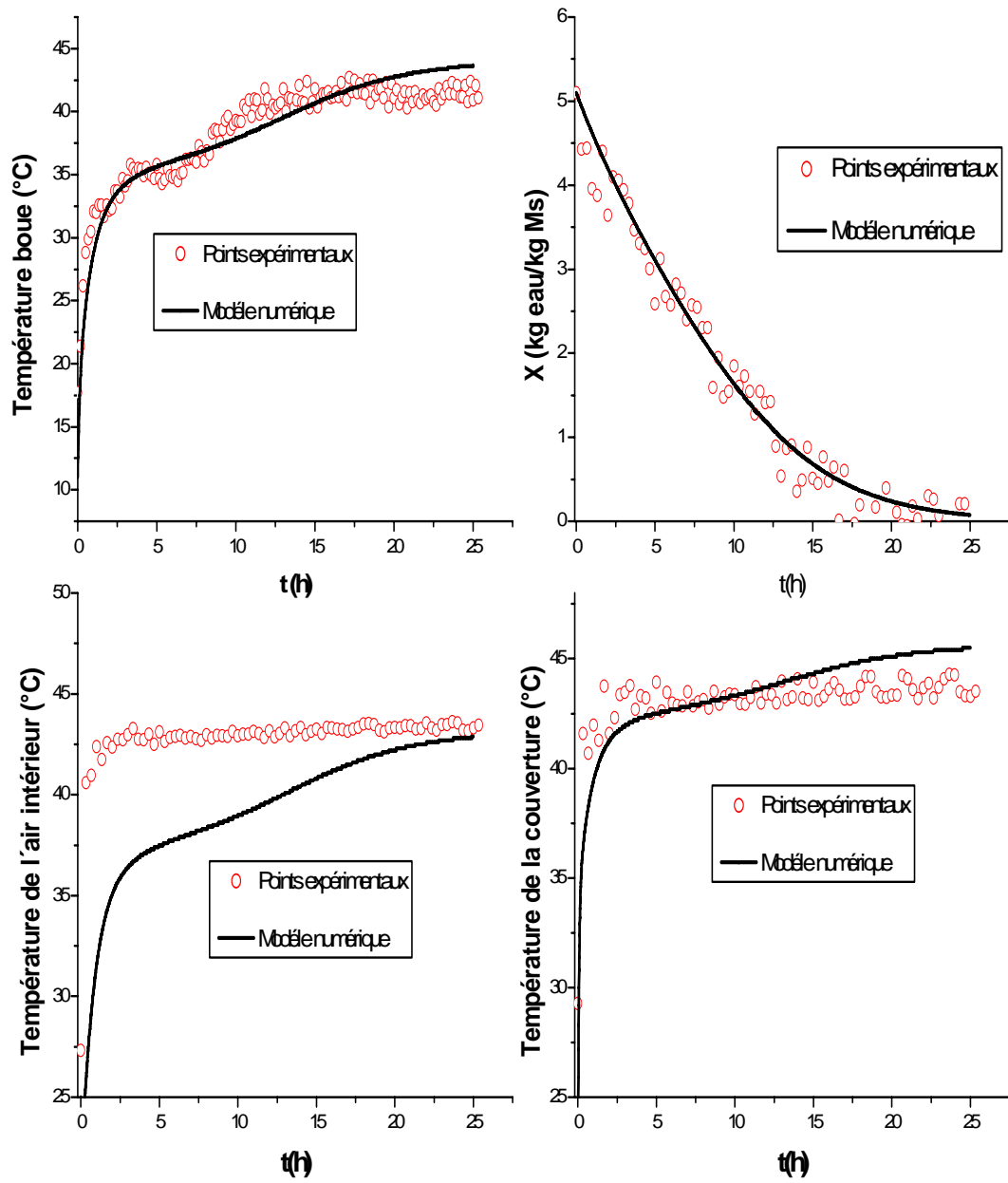


Figure IV. 4 Comparaison des valeurs simulées et expérimentales de l'essai 9 ($T_{ae}=39,0^{\circ}\text{C}$; $H_{re}=62,50\%$; $U_i=1,39\text{m/s}$; $R_g=728\text{ W/m}^2$)

ANNEXES

**Annexe V: Influence des variables opératoires sur le séchage : cas
du modèle II**

L'influence des variables opératoires sur le séchage

Influence de la température de l'air

Les Figures V.1 à V.2 présentent l'effet de la température sur la cinétique de séchage. On remarque sur ces courbes une forte sensibilité paramétrique de la température de l'air et le séchage se fait d'une façon presque uniforme.

Pour les trois températures illustrés, on observe que la valeur de la vitesse initiale augmente avec la température. Cette augmentation est liée à l'augmentation du potentiel de transfert: lorsque la température augmente, la température humide augmente également ce qui a pour effet un accroissement de la valeur en humidité de l'air à l'interface.

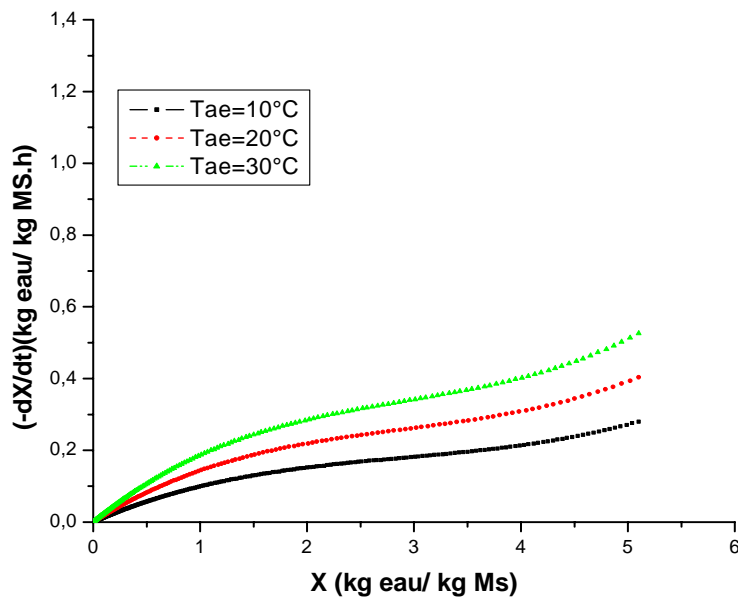


Figure V.0.1 Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : Hr= 30%, Ui=1m/s, Rg=0 W/m².

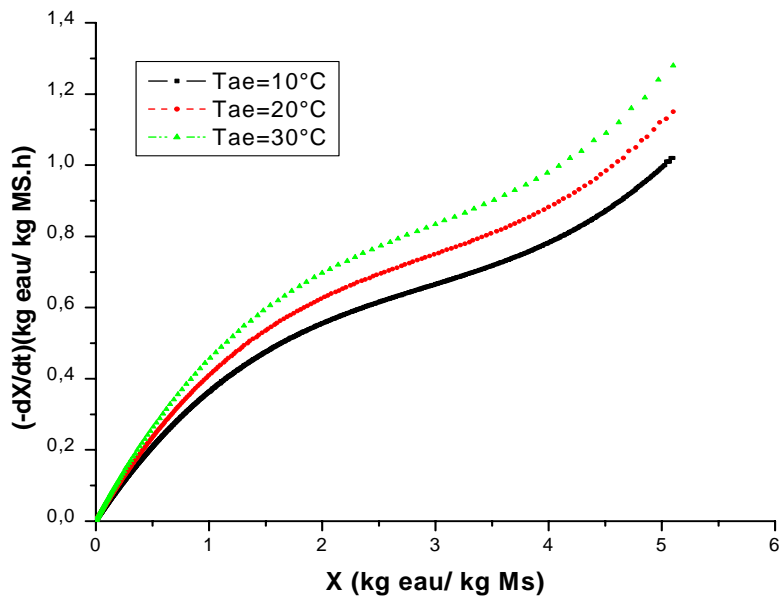


Figure V.0.2 Influence de la température de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : Hr= 30%, Ui=1m/s, Rg=200 W/m².

Influence de l'humidité relative de l'air

Illustré par les Figures V.3 à V.4, l'humidité relative de l'air de séchage influence très peu la cinétique. En effet, on constate un faible abaissement de la vitesse du séchage lorsque l'air est humidifié. la diminution de la vitesse avec des humidités croissantes, peuvent s'expliquer par l'influence de l'humidité sur le potentiel de transfert. En effet, une augmentation de la teneur en humidité a pour effet une augmentation de la température humide correspondante. Pour des humidités modérées, l'augmentation de l'humidité de l'air a pour effet la diminution du potentiel de transfert. Pour des humidités plus fortes, l'augmentation de l'humidité de l'air est compensée par l'augmentation de l'humidité à l'interface air-solide faisant suite à l'augmentation de la température humide. Les deux effets se compensent et le potentiel de transfert demeure le même.

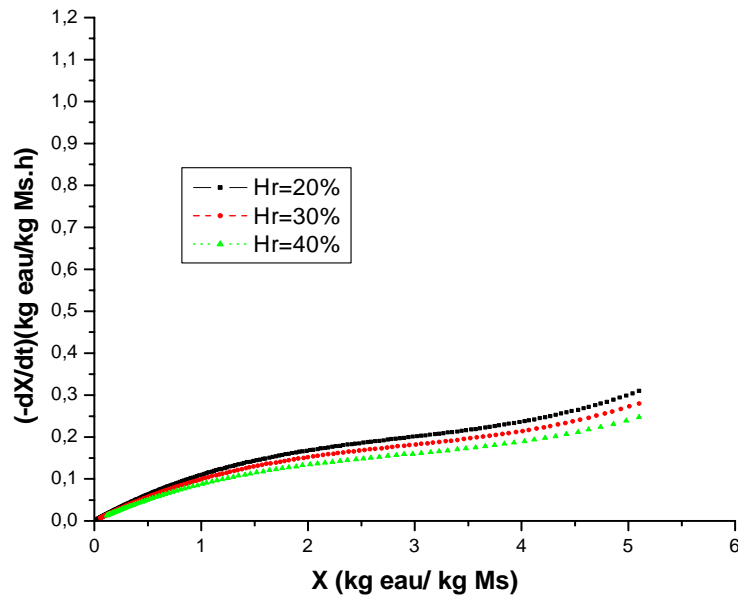


Figure V.0.3 Influence de l'humidité relative de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae}= 10^\circ\text{C}$, $U_i=1\text{m/s}$, $R_g=0 \text{ W/m}^2$.

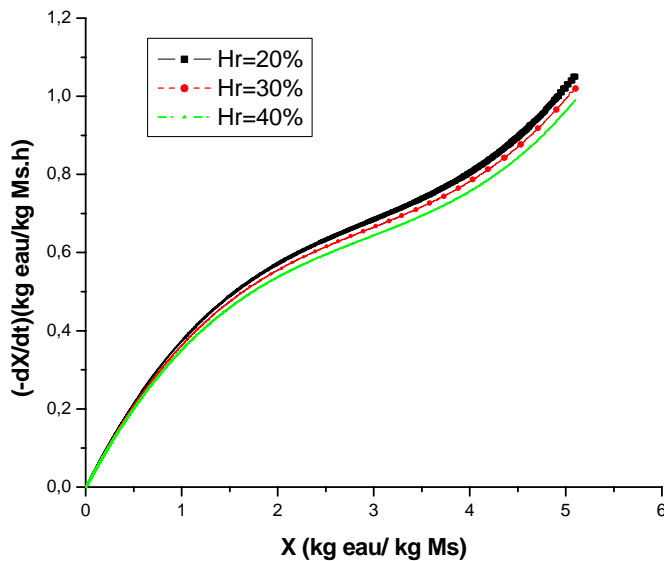


Figure V.0.4 Influence de l'humidité relative de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae}= 10^\circ\text{C}$, $U_i=1\text{m/s}$, $R_g=200 \text{ W/m}^2$.

Influence de la vitesse superficielle de l'air

On observe globalement une influence de la vitesse superficielle de l'air sur la vitesse de séchage illustré les Figures V.5 à V.6. Si on se situe au début de ces courbes, la vitesse de séchage initiale augmente nettement avec la vitesse superficielle de l'air. Cette augmentation est clairement la preuve de limitations extra granulaires. La vitesse de séchage est lié au coefficient de transfert de chaleur h qui augmente avec la vitesse superficielle de l'air. En

dessous du palier initial, les courbes de flux commencent à se rapprocher et l'influence de la vitesse superficielle de l'air devient moins nette. Sur les Figures V.5 et V.6, on observe un seuil, indiqué par la barre verticale, en dessous duquel les courbes se superposent. Le flux est alors indépendant de la vitesse superficielle de l'air. Le processus est entièrement contrôlé par des limitations diffusionnelles intragranulaires.

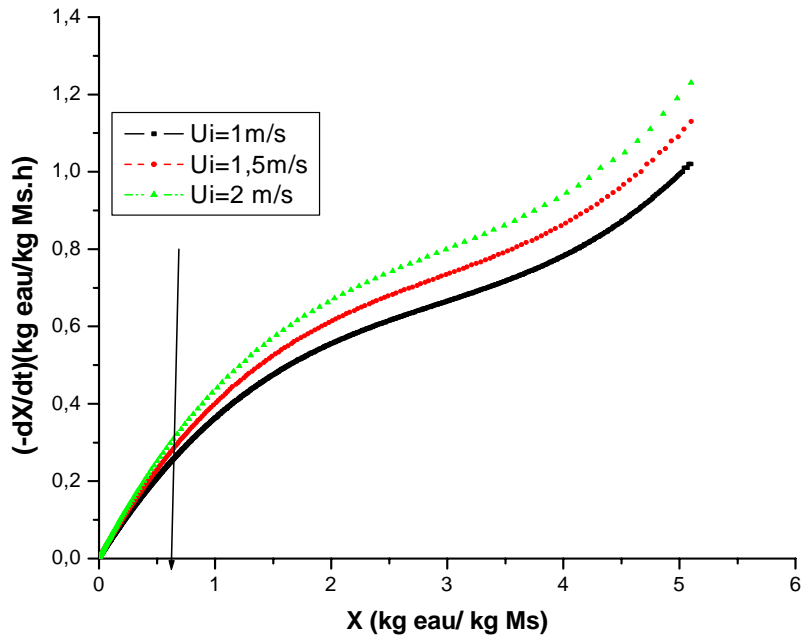


Figure V.0.5 Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae} = 10^\circ\text{C}$, $H_r = 30\%$, $U_i = 1 \text{ m/s}$, $R_g = 200 \text{ W/m}^2$.

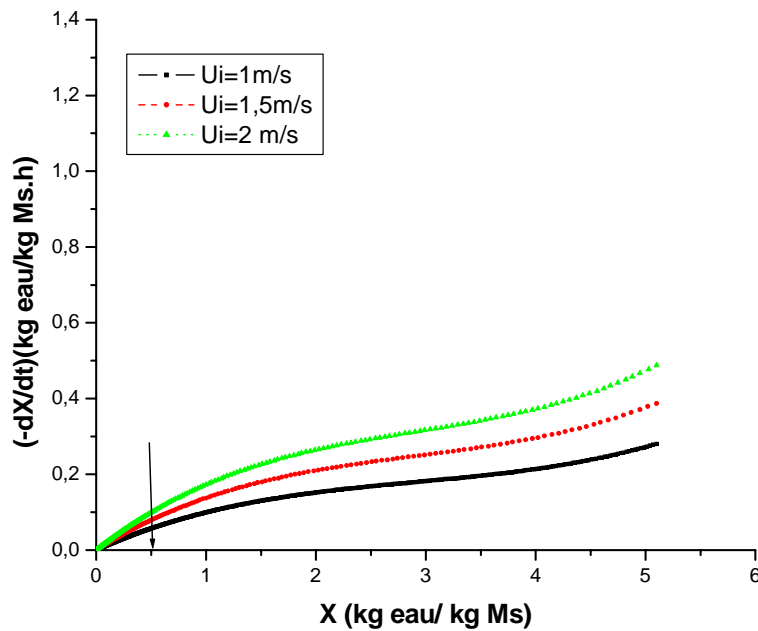


Figure V.0.6 Influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae} = 10^\circ\text{C}$, $H_r = 30\%$, $U_i = 1 \text{ m/s}$, $R_g = 0 \text{ W/m}^2$.

Influence du rayonnement solaire

Les figures V.7 et V.8 présentent une grande influence de l'intensité du rayonnement solaire sur la cinétique de séchage. En effet l'effet serre devient plus important pour une intensité de rayonnement plus importantes et provoque par conséquent l'évacuation de l'eau contenue dans la boue. Le rayonnement solaire possède une influence sur la vitesse du séchage depuis le départ du séchage jusque à la fin du séchage.

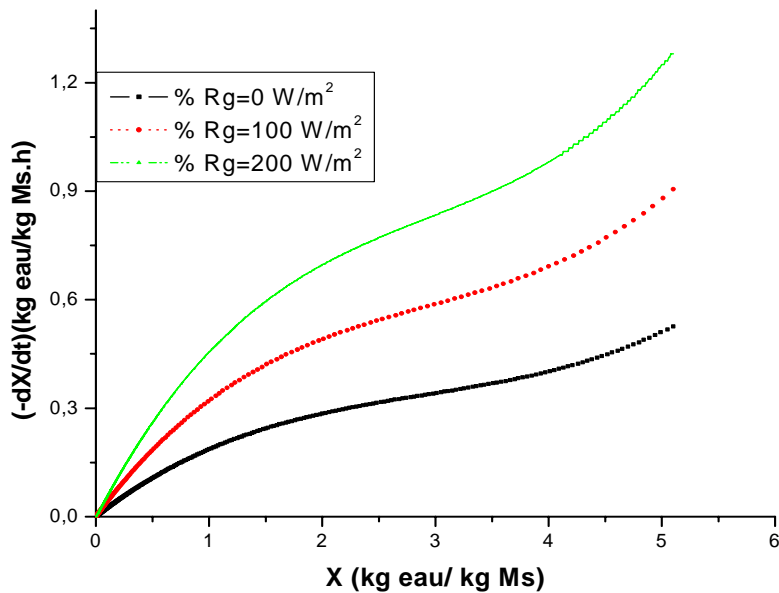


Figure V.0.7 Influence Rayonnement solaire sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae}= 30^\circ\text{C}$, $H_r= 30\%$, $U_i=1\text{m/s}$.

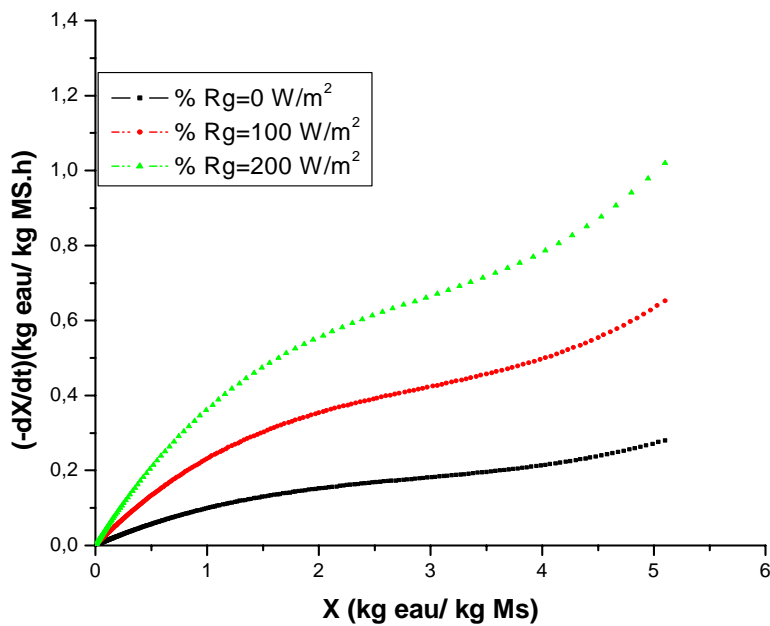


Figure V.0.8 Influence Rayonnement solaire sur la cinétique de séchage simulé à partir des paramètres suivants : $T_{ae}= 10^\circ\text{C}$, $H_r= 30\%$, $U_i=1\text{m/s}$.

Comparaison des variables opératoires

L'influence des quatre variables opératoires (rayonnement, température, vitesse superficielle et humidité relative de l'air) sur la vitesse de séchage peut être quantifiée en appliquant la méthode "One-Factor-At-A-Time" de la méthode "Screening Designs" (SD). Méthode largement décrites dans Saltelli et al., (2000) et Kleijnen (1995). Le "One-Factor-At-A-Time" est utilisé sur la vitesse initiale de séchage simulée et ces quatre variables opératoires. La méthode utilisée consiste à modifier alternativement les variables opératoires par -10 % et +10 % autour d'une valeur initiale donnée. La modification de chaque variable d'entrée par +10 % et -10 % produit deux valeurs de vitesse de séchage. De ces deux valeurs d'entrée, celle produisant la plus grande variation au niveau de la vitesse de séchage est retenue pour l'évaluation et par conséquent pour le calcul de son indice de sensibilité (IS).

Le pourcentage de variation (Favis-Mortlock, Smith, 1990) et l'indice de sensibilité (Jolicoeur, 2002) sont calculés en utilisant les formulations suivantes :

$$\% \text{ Variation} = \left| \frac{S_2 - S_1}{S_1} \right| \times 100$$

$$IS = \frac{\frac{S_2 - S_1}{S_{\text{moy}}}}{\frac{E_2 - E_1}{E_{\text{moy}}}}$$

Avec: *IS* Indice de sensibilité de la sortie du modèle

E_1 le paramètre d'entrée de base

E_2 la valeur testée (+10 % ou -10 %)

E_{moy} la moyenne entre E_1 et E_2

S_1, S_2 sont respectivement les sorties correspondant à E_1 et E_2

S_{moy} est la moyenne entre S_1 et S_2

L'indice de sensibilité permet d'avoir une base quantitative pour exprimer la sensibilité de la vitesse de séchage vis-à-vis des variables d'entrées. Un indice de sensibilité égal à 1 indique que le taux de variation du variable entraîne le même taux au niveau de la vitesse. Une valeur négative indique que le variable d'entrée et la vitesse de séchage varient en sens inverse. Plus grand est l'indice de sensibilité en valeur absolue, plus grand est l'impact qu'un variable pourra avoir sur la vitesse de séchage.

Afin d'appliquer la méthode "One-Factor-At-A-Time" des variables opératoires ont été choisis arbitrairement (tableau V.1)

Tableau V. 1 Paramètres climatiques d'entrée du modèle

Paramètres climatiques		
Rayonnement solaire (R_g)	(W/m)	100
Température de l'air extérieur (T_{ae})	(°C)	30
Humidité relative de l'air extérieur (H_{re}) (%)		0,60
Vitesse de vent (U_i)	(m/s)	1,5

ANNEXES

Le Tableau V.2 présente l'influence des variables opératoires qui ont été choisis en calculant les paramètres : variation et indice de sensibilité.

L'intensité du rayonnement solaire possède la plus grande influence sur la valeur de la vitesse à phase constante avec une variation moyenne produite d'environ 5,06% et un indice de sensibilité de 0,52. la température est le deuxième paramètre important, sa variation est de l'ordre de 3,99% et un indice de sensibilité de 0,38. La variation de la vitesse superficielle joue également un rôle important dans le calcul de la vitesse d'évaporation son indice de sensibilité est de 0,26. Avec un indice de sensibilité négative, une augmentation de l'humidité relative provoque une diminution de la vitesse d'évaporation. Ces résultats, déjà attendu viennent confirmer celui de plusieurs auteurs (Léonard, 2004; Belghit et al., 1997m).

Tableau V.2 valeurs des variations et indices de sensibilité

Rayonnement Solaire (W/m ²)	Température de l'air Extérieur (°C)	Humidité relative de l'air	Vitesse de l'air intérieur (m/s)	Vitesse à phase constante (kg eau/h)	Variation (%)	Indice de sensibilité (-)
90	30	0,6	1,5	0,72	5,06	0,52
100	30	0,6	1,5	0,75		
110	30	0,6	1,5	0,79		
100	27	0,6	1,5	0,72	3,99	0,38
100	30	0,6	1,5	0,75		
100	33	0,6	1,5	0,78		
100	30	0,54	1,5	0,81	2,50	-0,23
100	30	0,6	1,5	0,75		
100	30	0,66	1,5	0,69		
100	30	0,6	1,35	0,73	2,73	0,26
100	30	0,6	1,5	0,75		
100	30	0,6	1,65	0,77		

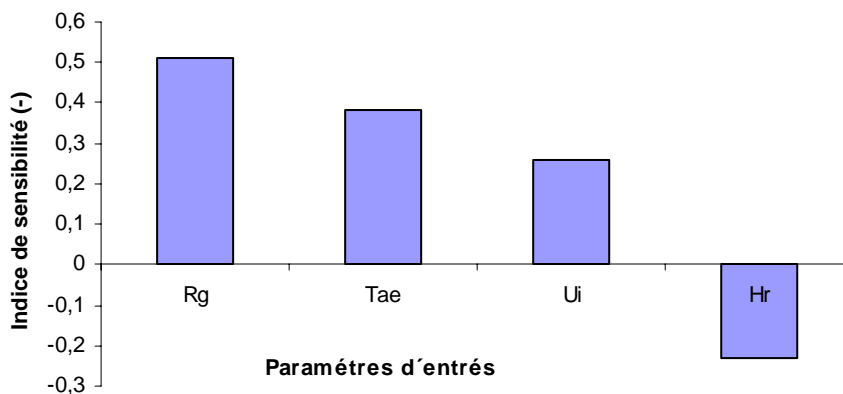


Figure V.0.9 Indice de sensibilité de la vitesse à phase constante par rapport aux entrées du modèle

La figure V.9 montre le taux de variation que chaque variable entraîne au niveau de la vitesse. Toutefois les résultats d'une analyse de sensibilité doivent être manipulés avec précaution. En effet, la sensibilité apparente d'un modèle à un paramètre donné dépend de l'importance, durant la période choisie, du processus que ce paramètre affecte, elle-même liée aux contraintes environnementales et, dans une moindre mesure, aux conditions initiales.

Références

Belghit, A., Belahmidi, M., Bennis, A., Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée *Rev Gen Therm* 36, 837-850, (1997)

Favis-Mortlock DT., Smith FR., A sensitivity analysis of EPIC. *In* Sharpley, Williams (Eds). EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator, 1. Model, (1990).

Jolicoeur. Screening designs sensitivity of a nitrate leaching model (ANIMO) using a one-at-a-time method. State University of New York at Binghamton, 14 p (2002).

Kleijnen, JPC., Sensitivity analysis and related analyses: a survey of statistical techniques. Netherlands: School of Management and Economics, Tilburg University, 24 p (1995).

Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par microtomographie à rayons x, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège (2002).

Saltelli, A., Tarantola, S., Compolongo, F., Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *Stat. Sci.* **15** (4), p. 377–395, (2000).

Annexe VI: Valeurs des coefficients nécessaires à la reconstitution des températures et humidités de l'air ambiant

Tableau. VI. 1 Coefficients $Kt(h)$ pour la reconstitution des températures horaires.

SAISONS				
Heure (TU)	Hiver Dec+Jan+Fev	Printemps Mars+ Avr+Mai	Ete Juin+Juil+Aou	Automne Sept+Oct+Nov
0	0,28	0,22	0,19	0,22
1	0,22	0,16	0,13	0,16
2	0,16	0,11	0,08	0,12
3	0,12	0,07	0,04	0,08
4	0,08	0,03	0,00	0,04
5	0,04	0,00	0,00	0,01
6	0,02	0,04	0,08	0,00
7	0,00	0,16	0,25	0,06
8	0,02	0,32	0,41	0,21
9	0,22	0,50	0,56	0,41
10	0,50	0,66	0,70	0,61
11	0,67	0,77	0,81	0,77
12	0,83	0,87	0,88	0,89
13	0,93	0,94	0,95	0,98
14	1,00	1,00	0,99	1,00
15	0,97	0,99	1,00	0,99
16	0,87	0,96	0,98	0,90
17	0,79	0,89	0,92	0,77
18	0,62	0,78	0,84	0,63
19	0,53	0,62	0,68	0,51
20	0,46	0,49	0,50	0,41
21	0,38	0,39	0,38	0,32
22	0,30	0,30	0,27	0,25
23	0,29	0,24	0,20	0,19

ANNEXES

Tableau. VI. 2 Coefficients $Kr(h)$ pour la reconstitution des humidités relatives horaires.

SAISONS				
Heure (TU)	Hiver Dec+Jan+Fev	Printemps Mars+ Avr+Mai	Ete Juin+Juil+Aout	Automne Sept+Oct+Nov
0	0,14	0,17	0,15	0,13
1	0,09	0,14	0,10	0,09
2	0,07	0,10	0,09	0,08
3	0,05	0,00	0,00	0,01
4	0,02	0,02	0,01	0,03
5	0,02	0,00	0,00	0,01
6	0,02	0,02	0,05	0,00
7	0,00	0,11	0,19	0,03
8	0,02	0,26	0,35	0,11
9	0,10	0,42	0,51	0,27
10	0,28	0,60	0,67	0,45
11	0,48	0,74	0,79	0,65
12	0,71	0,86	0,88	0,83
13	0,90	0,94	0,93	0,95
14	1,00	0,99	0,99	1,00
15	0,96	1,00	1,00	0,98
16	0,79	0,97	0,97	0,86
17	0,54	0,89	0,92	0,65
18	0,41	0,73	0,82	0,49
19	0,33	0,54	0,62	0,35
20	0,26	0,41	0,41	0,27
21	0,21	0,32	0,31	0,22
22	0,17	0,25	0,26	0,17
23	0,14	0,20	0,17	0,14

ANNEXES

Annexe VII: Retrait de la boue lors du séchage

Retrait de la boue lors du séchage

Lors d'une opération de séchage, certains matériaux se comportent comme des matériaux rigides alors que d'autres se contractent et subissent un retrait.

Pour la première catégorie, toute l'eau évacuée est remplacée par de l'air et le matériau final est poreux (brique, aérogel, argiles à faible teneur en eau,...). Pour la seconde catégorie, les éléments constituant l'édifice solide se resserrent sous l'influence de forces internes (xérogels, argiles à haute teneur en eau,...). Cette contraction est appelée retrait qui est défini comme le rapport entre le volume et le volume initial. Le retrait est qualifié de libre lorsque le matériau se contracte librement sous l'influence de conditions externes homogènes. Le retrait est dit idéal ou total lorsque la diminution de volume correspond exactement au volume d'eau évaporé : le matériau se comporte comme un milieu poreux saturé, c'est-à-dire qu'aucune porosité ne se développe, l'eau occupe tout les pores de la matrice solide. La contraction est alors caractérisée par une relation linéaire entre le retrait et la teneur en eau sur base sèche. La majorité des matrices solide demeure déformable, et s'arrête lorsque la matrice atteint un certain seuil de rigidité.

Brinker et Scherer (1990) décrivent en détail le mécanisme de retrait dans les gels, auxquels les boues peuvent être assimilées dans une certaine mesure. Les éléments principaux de cette description adaptés aux boues sont repris ici. Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine du retrait: réactions chimiques (réactions de condensation), forces osmotiques, forces répulsives (double couche électronique) ou forces capillaires. Dans le cas des boues, il semble que les forces capillaires soient les principales responsables du retrait. En effet, lors du séchage, on peut penser que le phénomène majeur qui se produit est un départ d'eau et que l'on peut négliger des réactions chimiques ou des forces osmotiques.



Figure annexe VII.1 Boue à teneur initiale



Figure annexe VII.2 Mise en évidence du retrait de la boue en fin de séchage

Référence

Brinker, C. J., et Scherer, G. W., *Sol-Gel Science. The physics and chemistry of sol-gel processing*, Academic Press, Inc. San Diego (1990).

ANNEXES

Annexe VII: Images du pilote expérimental modèle II

ANNEXES

Photographies du pilote expérimental

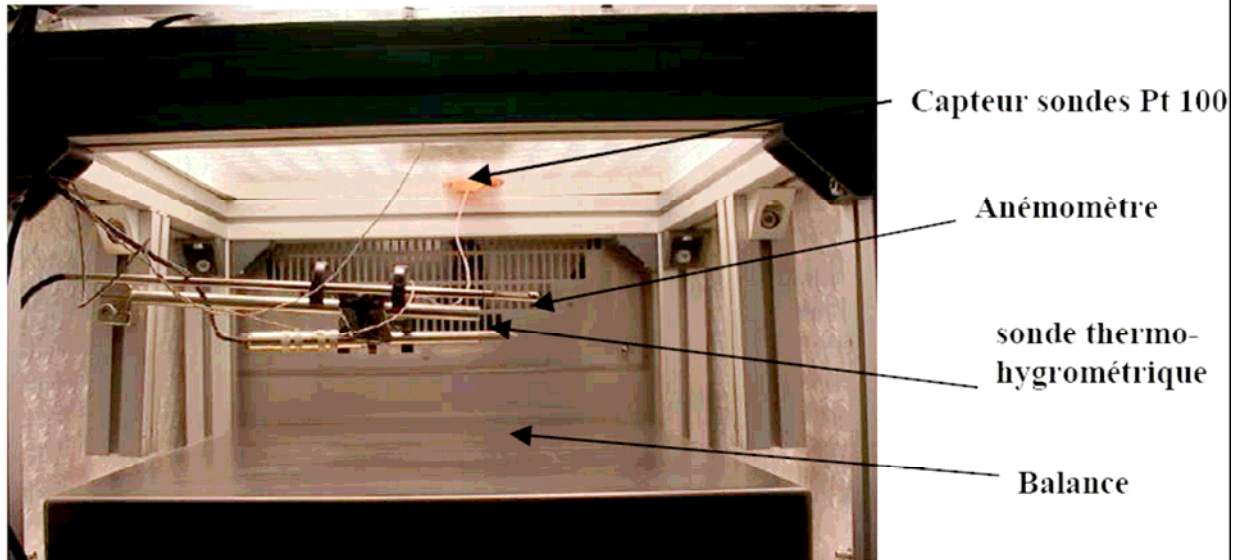


Figure VIII.1 Intérieur de la serre placée dans l'enceinte thermique avec positionnement des différents capteurs pour la mesure des paramètres intérieurs

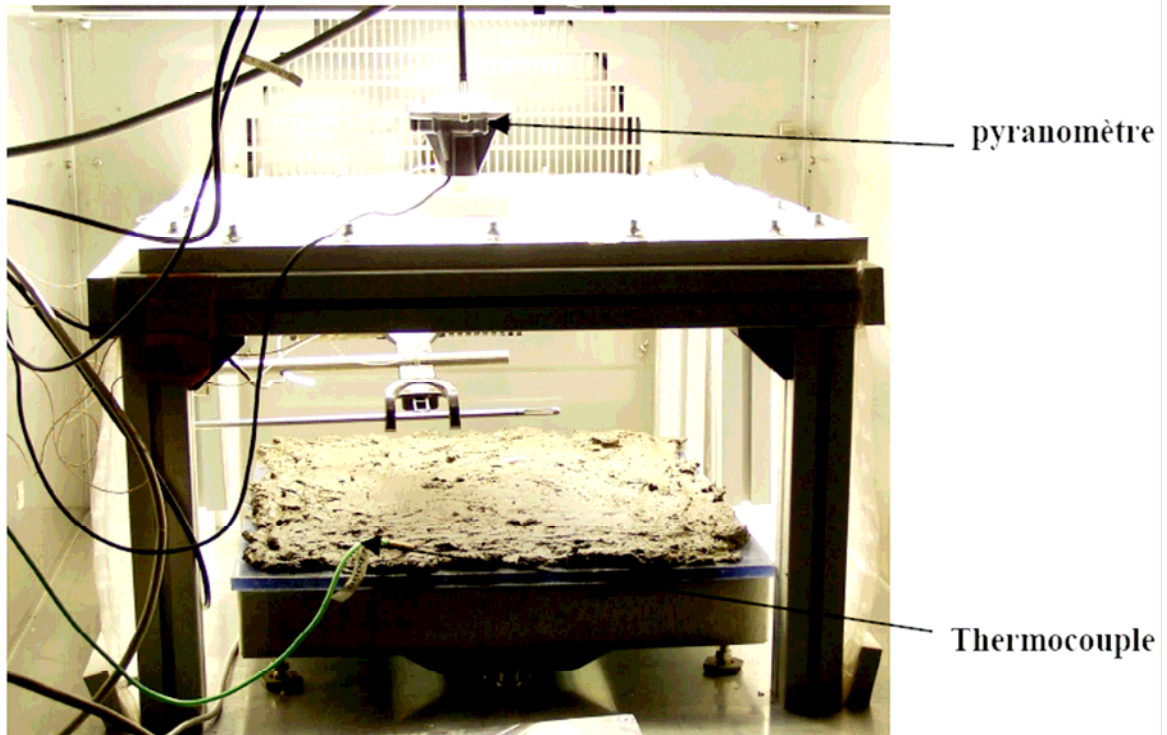


Figure VIII.2 Positionnement du pyranomètre et du thermocouple pour suivre la température de la boue

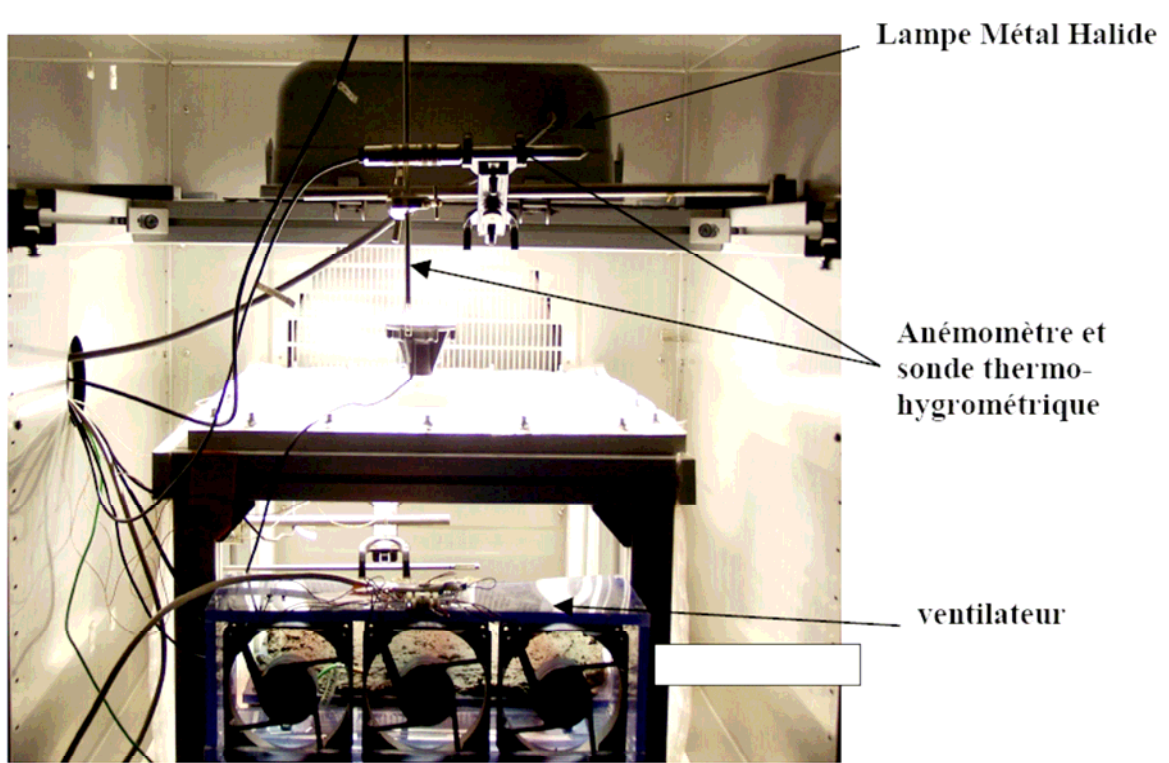


Figure VIII.3 Positionnement de la lampe métal halide, du ventilateur et des différents capteurs pour la mesure des paramètres extérieurs à la serre

N° 00152



HERAEUS VTRK 500




FICHE DE CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

<p><i>APPAREIL :</i> Caisson d'essais climatiques</p> <p><i>TYPE :</i> F/CH VTRK 500</p> <p><i>DIMENSIONS INTERNES :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : 0,88 M • Largeur : 0,75 M • Hauteur : 0,76 M <p><i>ENCOMBREMENT EXTERNE :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : 1,65 M • Largeur : 1,12 M • Hauteur : 1,98 M <p>Gradient montée température : 1 C/min</p> <p>Gradient descente température : 1 C/min</p>	<p><i>MARQUE :</i> HERAEUS</p> <p><i>VOLUME UTILE :</i> 500 dm³</p> <p><i>TEMPERATURE Mini :</i> + 10° C (sans dissip. interne)</p> <p><i>TEMPERATURE Maxi :</i> + 90° C (sans dissip. interne)</p> <p><i>H.R MINI :</i> 30 % à 10° C</p> <p><i>H.R MAXI :</i> 95 % à 90° C</p>
---	--

SOURCES ENERGETIQUES

Eau déminéralisée :	0,1 m ³ /H	P> : 1 bar circuit fermé
Tension :	230 Volts MONO +TERRE	
Puissance absorbée :	3,1 KVA	

OPTIONS

Programmation température 2 paliers, Sécurité température haute, Liaison analogique, Hublot de visibilité, Eclairage interne, 1 passage de câble dia. 50mm coté gauche cuve, 3 clayettes inox.



Figure VIII.4 Fiche technique de l'enceinte de location utilisée avec le modèle II

ANNEXES