

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Chimique



Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème:

**Réalisation d'une serre pour le séchage des boues résiduaires :
Simulation et expérimentation**

Etudié par:

M. Ahmed Raouf CHIKH
M. Aniss LAMRAOUI

Dirigé par:

Pr F. SOUABI
Mme F. MEZIANI
M. S. IGOUD

Composition du jury :

Présidente : **Mme A. MEFTI, Maître de Conférences A (ENP)**

Examinatrices : **Mme S. BOUTRIA, Maître Assistante A (ENP)**
Mme S. HADDOUM, Maître Assistante A (ENP)

Encadreurs : **Mme F. SOUABI, Professeur (ENP)**
Mme F. MEZIANI, Maître Assistante A (ENP)
M. S. IGOUD, Chargé de Recherche (UDES)

Invité : **M. A. CHOUIKH, Directeur Exploitation (ONA)**

Promotion Juin 2011

ENP. 10, Avenue Hassen Badi- El Harrach-Alger

Remerciements

Cette étude a été réalisée à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) de Bousmaïl et entre dans le cadre des activités de recherche du Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles du Département de Génie Chimique.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements :

A Monsieur IGOUD, Chargé de Recherche à l'UDES pour nous avoir accueillis dans son équipe et guidés tout au long de cette étude et pour ses précieux conseils et recommandations.

A madame SOUABI, Professeur à l'Ecole Nationale polytechnique et Mme MEZIANI, Chargée de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique pour nous avoir confié ce sujet ainsi que pour leurs encouragements, conseils précieux, motivation et leur implication pour que ce travail se déroule dans les meilleures conditions possibles.

A Madame MEFTI, Présidente du jury et Mesdames BOUTRIA et HADDOUM, examinatrices, qui ont accepté de juger ce travail.

A Tous les enseignants du Département de Génie Chimique, pour leur disponibilité, leur gentillesse, et la qualité de leur enseignement.

A tous le personnel de l'UDES pour leur aide, leur gentillesse ainsi qu'à leur disponibilité.

Je dédie ce travail

A la mémoire de mon père ;

A Ma Merveilleuse Mère, à qui je dois ce
que je suis aujourd'hui ;

A mes frère Mounir et Fouzi ;

A mes sœurs Lilia et Sakina ;

Ma Profonde Sympathie va à toute personne
ayant contribué, de près ou de loin, à la
réalisation de ce modeste travail.

ANISS

Dédicace

À mes parents pour leurs encouragement et soutien

À mes frères et ma sœur

À mes amis

Raouf

ملخص:

العنوان: إجراء مسببة للاحتباس الحراري لتجفيف الطين : المحاكاة والتجريب
الهدف من هذا العمل هو دراسة التجفيف الشمسي لحمأة محطات الصرف الصحي، وذلك باستخدام جهاز الاحتباس مفتوح للتبادل الطبيعي ومقارنة النتائج مع تلك المحصل عليها خلال التجفيف في جهاز مفتوح للهواء لتقدير فعالية جهاز الاحتباس. وقد وضعت دراسة لمختلف معادلات توازن الطاقة المشاركة في التجفيف الشمسي للحمأة و نموذج عددي لمحاكاة مع التجفيف الفعلي.
النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النموذج العددي والتجربة مشجعة جدا وسوف يستفاد منها كثيرا في الأعمال اللاحقة.

الكلمات الرئيسية : الحمأة، مياه الصرف الصحي، التجفيف الشمسي، نقل الطاقة الحرارية، نمذجة

Résumé :

Titre : réalisation d'une serre pour le séchage des boues résiduares : simulation et expérimentation.

L'objectif de ce travail est d'étudier le séchage solaire des boues résiduares des stations d'épuration, en utilisant une serre pilote ouverte à la convection naturelle et de comparer les résultats avec ceux obtenus à partir d'un bac ouvert à l'air libre pour estimer l'efficacité de la serre.

Une étude sur les différentes équations de bilan énergétique impliquées dans le séchage solaire des boues a permis d'élaborer un modèle numérique pour simuler le séchage réel sur site.

Les résultats obtenus à partir de la simulation et de l'expérimentation sont très encourageants et gagneraient beaucoup si le travail est poursuivi.

Mots clés : Eaux usées – Boue résiduaire – Séchage solaire – Transfert thermique – Modélisation

Summary:

Title: making greenhouse for the solar drying sludge: experimentation and simulation

The objective of this work is to study the solar drying of sewage sludge for the treatment plants, using an opened pilot greenhouse to natural convection and compare the results with those obtained from the opened device to estimate the greenhouse efficiency.

A study of the energy balance equations obtained for the solar drying of sludge has developed a numerical model to simulate the actual drying on site.

The results obtained from simulation and experiments are very encouraging and would benefit greatly if the work is continued.

Keywords: wastewater – solar Drying – Sewage sludge – Thermal Transfer – Modeling.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Origine des boues d'épuration.

I.1. Généralité	5
I.2. La conséquence de l'assainissement des eaux usées	6
I.3. Désignation des différentes stations d'épuration	6
I.4. Station d'épuration	6
I.5. Les procédés d'épuration intensifs.....	8
I.5.1. Les prétraitements	8
I.5.1.1. Le dégrillage.....	8
I.5.1.2. Le dessablage et le déshuilage-dégraissage	8
I.5.2. Les traitements primaires	8
I.5.3. Les traitements secondaires	9
I.5.3.1. Traitement physico-chimique.....	9
I.5.3.2. Les traitements biologiques	9
I.5.4. Les traitements tertiaires.....	11
I.6. Les procédés biologiques extensifs	11
I.6.1. Le lagunage naturel	12
I.6.2. Le lagunage aéré.....	12
I.7. La mesure des performances de l'épuration	13
I.8. Traitement des boues.....	15
I.8.1. Epaissement.....	15
I.8.1.1. Epaissement statique ou par décantation	16
I.8.1.2. Epaissement dynamique	16
I.8.2. La stabilisation des boues	17
I.8.3. Conditionnement des boues.....	19
I.8.4. Déshydratation par centrifugation	20
I.8.5. La filtration	20
I.8.5.1. Filtres à bandes presseuses	20
I.8.5.2. Filtre presse	21

I.8.6. Lits de séchage	21
I.8.6.1. Lits de séchage non plantés	21
I.8.6.2. Lits de séchage plantés de roseaux	21
I.8.7. Séchage thermique	22
I.8.8. Oxydation thermique	22
I.8.9. Séchage solaire	22
I.8.10. La méthanisation	22
I.9. Valorisation énergétique	22
I.9.1. Incinération	22
I.9.2. Oxydation par voie humide (OVH)	22
I.9.3. Gazéification	23
I.10. Valorisation agricole des boues	23
Références bibliographiques	24

Chapitre II : Notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre.

II.1. Les formes d'eau dans les boues d'épuration	27
II.2. L'activité de l'eau dans la boue	28
II.3. L'isotherme de sorption	28
II.3.1. Les modèles des isothermes de sorption	29
II.3.2. Chaleur isostérique de désorption	30
II.4. Evolution du séchage d'un produit humide	30
II.4.1. Caractérisation de la boue	30
II.4.1.1. Matières sèches (Ms)	30
II.4.1.2. Siccité (Si)	30
II.4.2. Etablissement des courbes de séchage	30
II.4.3. Modélisation des phases de séchage	32
II.4.3.1. Période à vitesse constante	32
II.4.3.2. Période à flux décroissant	33
II.4.3.2.1. Mode de transport de l'eau	33
II.5. Courbe caractéristique de séchage	34
II.5.1. Obtention de la courbe de séchage	34
II.5.1.2. Calcul de la vitesse de séchage	34

II.5.1.3. Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage :	35
II.6. Procédés de séchage sous serre	36
II.7. Différents procédés de séchage solaire	36
II.8. Géométrie et dimensionnement des serres	37
II.8.1. Serre ouverte	37
II.8.2. Serre fermée	38
II.9. Alimentation de la serre	38
II.10. Ventilation et désodorisation	39
II.11. Retournement et fermentation des boues	39
II.11.1. Cochon électrique	39
II.11.2 Robot scarificateur (degrémont	40
II.11.3. Procédé Soliamix (Vélia)	40
II.12. Synthèse des principales techniques du marché	41
Référence Bibliographique.....	42

Chapitre III : Bilan énergétique et formulation d'un modèle numérique.

III.1. Introduction	45
III.2. Démarche globale de modélisation	45
III.3. Analyse physique du modèle	47
III.3.1. Représentation des composants de la serre.....	47
III.3.1.1. Géométrie globale de la serre	47
III.3.1.2. Représentation de la couverture	47
III.3.1.3. Représentation de l'air intérieur	47
III.3.1.4. Représentation de la boue	48
III.3.1.5. Représentation du plancher	48
III.3.2. Environnement extérieur	48
III.4. Ecriture des bilans thermiques et massiques	48
III.4.1. Convention de notation des flux	49
III.4.2. Bilans énergétiques	50
III.4.2.1. Bilan sur la couverture	50
III.4.2.2. Bilan sur l'air.....	50
III.4.2.3. Bilan thermique de la boue	50

III.4.2.4. Bilans massiques.....	51
III.4.3. Expression des flux énergétiques.....	51
III.4.3.1. Flux radiatifs solaires.....	51
III.4.3.2. Flux net absorbé par la couverture.....	52
III.4.3.3. Flux net absorbé par la boue.....	52
III.4.3.4. Flux radiatifs Infrarouges.....	52
III.4.3.5. Flux convectifs.....	53
III.4.3.5.1. Echange convectif milieu extérieur – couverture.....	54
III.4.3.5.2. Echange convectif au sein du modèle.....	54
III.4.3.6. Transfert de masse.....	55
III.4.3.7. Inertie thermique.....	56
III.5. Formulation du système d'équation du modèle.....	57
III.6. Résolution du système d'équations.....	57
III.6.1 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle.....	57
Référence Bibliographique.....	59

Chapitre IV : Matériels et méthodes.

IV.1. Dispositif expérimental.....	62
IV.1.1. Le Bac.....	62
IV.1.2. Montage de la couverture.....	63
IV.1.2.1. Montage des côtés latéraux.....	63
IV.1.2.2. Montage de la toiture.....	64
IV.1.2.3. Mise en place des thermocouples.....	64
IV.2. Conduite des expérimentations.....	65
IV.2.1. Le FLUKE.....	65
IV.2.1.1. Mise en marche de l'appareil.....	66
IV.2.1.2. Configuration du canal.....	66
IV.2.2. Les thermocouples.....	67
IV.2.3. Mesure de l'humidité relative de l'air Hr.....	69
IV.2.4. Mesure de la teneur en eau de la boue.....	72
IV.2.4.1. Matériels.....	72
IV.2.4.2. Mode opératoire.....	72

IV.2.5. Mesure de l'humidité de l'air extérieure	72
IV.2.5.1. Fonctionnement de l'hygrographe OSK 7157.....	72
Référence Bibliographique	75

Chapitre V: Presentation de la station d'épuration de Tipaza.

V.1.Introduction	76
V.2.Les traitements subits à la station de TIPAZA.....	76
V.2.1.Traitement des eaux	77
V.2.2.Traitement des boues.....	80
Référence bibliographique	81

Chapitre VI : Analyse des résultats expérimentaux et comparaison avec le modèle numérique.

Introduction	83
VI.1. Résultats expérimentaux et validation du modèle	83
VI.2. L'analyse énergétique de la serre expérimentale	85
VI.2.2. Evolution type de la température de la couverture: vérification de l'hypothèse de l'uniformité de la température	86
VI.3. Confrontation des résultats expérimentaux	87
VI.4. Isotherme de désorption :.....	87
VI.5. 1^{ère} expérimentation : Boue biologique de 0,5% de siccité.....	88
VI.5.1. Cinétique de séchage	89
VI.5.2. Courbes de Krischer	90
V.5.3. Courbe caractéristique de séchage.....	91
VI.6. 2^{ème} expérimentation : Boue épaisse de siccité 5%.....	92
VI.6.1. L'évolution de la siccité :	92
VI.6.2. Cinétique de séchage	93
VI.6.3. Courbes de Krischer	94
VI.6.4. Courbe caractéristique de séchage	95
VI.7. Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue biologique.....	97
VI.8. Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue épaisse ...	97
VI.9. Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation	98
VI.10. Vérification des résultats obtenus	100

VI.10.1. Boue épaisse	100
VI.9.1. Boue épaisse	101
VI.10.2. Boues biologiques	102
VI.11. Conclusion	104
Référence Bibliographique	105
Conclusion générale	107
Annexe I : Propriété Physico-chimique des différents éléments de la serre :.....	110
Annexe II : Modèle numérique : les paramètres d'entrées et le code source	111
Annexe III corrélation climatiques	117
Annexe IV : Cinétique de disparition de l'eau dans la boue :.....	125
Annexe V : Perspectives	128

Liste des figures

Figure I-1: étapes de traitement d'une station d'épuration	7
Figure I-2: traitement biologique sur lit bactérien	10
Figure I-3: traitement biologique sur disques	10
Figure I-4: schéma simplifié d'un procédé à boues activées.....	11
Figure I-5: schéma de fonctionnement d'un lagunage naturel	12
Figure I-6: Epaisseur statique conique	16
Figure I-7: épaisseur par flottation.....	16
Figure I-8: schéma d'une centrifugeuse à boue	17
Figure I-9: Compostage des boues.....	18
Figure I-10: filtre à bandes presseuses	20
Figure I-11: schéma d'un filtre presse.....	21
Figure II 1: les phases de séchage de la boue.....	31
Figure II.2. Exemple de serre ouverte	37
Figure II.3 Exemple de serre fermée - Extraction en pignon.....	38
Figure II.5 Cochon électrique "Elektrischer Schwein"	39
Figure II.6 Rouleau scarificateur du système IST	40
Figure II.7 Système de retournement du procédé Soliamix	41
Figure III.1 : différents phénomènes physiques pour un séchage solaire	46
Figure III.2. : Schéma des flux solaires absorbés	51
Figure IV.1: bac servant au séchage en serre ouverte	62
Figure IV.2: plaques en verre pour la couverture latérale.....	63
Figure IV.3: Serre ouverte sans la toiture.....	64
Figure IV.4: montage final de la serre et des thermocouples.....	64
Figure IV.5: mise en place d'un thermocouple.....	65
Figure IV.6: système d'acquisition de données pour la température (FLUKE).....	65
Figure IV.7: boutons de commande du FLUKE	66
Figure IV.8: configuration du FLUKE avec les thermocouples (sur Pc).....	67
Figure IV.9: composition et fonctionnement d'un thermocouple	68
Figure IV.10 : Thermocouple de type K	69
Figure IV.11: branchement des thermocouples avec le FLUKE	69
Figure IV.12: principe de fonctionnement du psychromètre.....	70
Figure IV.13: Obtention de l'humidité relative par psychromètre	71

Figure IV.14: exemple de lecture sur l'abaque des humidités relatives	71
Figure IV.15: hygrographe pour la mesure de l'humidité extérieure	73
Figure IV.16: préparation de l'hygrographe à la mise en marche	73
Figure V.1: Schéma descriptif de la station d'épuration de Tipaza	76
Figure V.2:dégrillage grossier au niveau du prétraitement	77
Figure V.3: déssableur-déshuileur de la station de Tipaza	78
Figure V.4: bassin d'aération biologique de la station de Tipaza	79
Figure V.5:décanteur secondaire (clarificateur) en aval du traitement biologique.....	79
Figure V.6: épaissement des boues	80
Figure V.7: déshydratation mécanique par filtre à bandes utilisant un polymère	81
Figure VI.1 : Réparation des thermocouples sur la couverture :Tc1 face externe et Tc2 face interne	86
Figure VI.1 : Comparaison des différentes températures de la couverture intérieure et extérieure.....	86
Figure VI.2: isotherme de sorption pour boue épaissie	88
Figure VI.3: évolution de la siccité pour une boue biologique sous serre et témoin en fonction du temps	89
Figure VI.4: évolution de la teneur en eau sur base sèche en fonction du temps pour une boue biologique.....	89
Figure VI.5 : courbe de Krischer pour une boue biologique sous serre	90
Figure VI.6 : courbe de Krischer pour une boue biologique témoin.....	91
Figure VI.7 : courbe caractéristique de séchage pour une boue biologique témoin	91
Figure VI.8: courbe caractéristique pour une boue biologique sous serre.....	92
Figure VI.9 : évolution de la siccité en fonction du temps pour une boue épaissie	92
Figure VI.10 : évolution de la teneur en eau sur base sèche de la boue épaissie en fonction du temps	93
Figure VI.11 : Courbe de krischer pour une boue épaissie sous serre.....	94
Figure VI.12: courbe de Krischer pour une boue épaissie témoin	95
Figure VI.13 : courbe caractéristique de séchage pour une boue épaissie sous serre.....	95
Figure VI.14 : courbe caractéristique de séchage pour une boue épaissie témoin.....	96
Figure VI.15 : comparaison entre la température de la boue biologique sous serre et a l'air libre.....	96
Figure VI.16 : comparaison entre la température de la boue épaissie sous serre et a l'air libre.....	97
Figure VI.17 : évolution des températures simulé et expérimentale pour la boue	98

Figure VI.18 : évolution des températures simulé et expérimentale pour l'air intérieur	99
Figure VI.19 : évolution des températures simulé et expérimentale pour la couverture	100
Figure VI.19 : évolution de la teneur en eau simulée et expérimentale pour une boue biologique	100

Liste des tableaux :

Tableau I-1: indicateurs de performance de l'épuration.....	13
Tableau I-2: Evolution de la composition des boues au cours du traitement.....	14
Tableau I-3: Etats physiques des boues.....	15
Tableau I-4: conditionnement des boues par ajout de réactifs minéraux.....	19
Tableau I-5: les effets du conditionnement aux poly électrolytes	19
Tableau II.1: les formes d'eau dans une boue selon Vesilind et Martel.....	27
Tableau II.2:les formes d'eau dans une boue selon Smollen	27
Tableau II.3 définition des modèles des isothermes de sorption et leur de validité.	29
Tableau II.4: Les périodes de séchage d'un produit humide	32
Tableau II.5:Synthèse des données techniques sur les principaux procédés des constructeurs	32
Tableau III.1. Récapitulatif de la notation des flux.....	49
Tableau IV.1 : caractéristiques techniques du bac	62
Tableau V.1: caractéristique de l'eau de l'ouvrage d'arrivée	77
Tableau VI.1 Relevé expérimentaux des données climatique (intérieur et extérieur) de la serre	84
Tableau VI.2 Valeurs de coefficients de transmission suivant différentes conditions opératoires	85
Tableau VI-3 : caractéristiques physique des boues utilisées lors des expérimentations ...	87
Tableau VI.4 : Paramètres du modèle d'Oswin et EQM.....	88
Tableau VI.5 : Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue biologique sous serre	91
Tableau VI.6 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue biologique témoin	91
Tableau VI.7. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue biologique témoin	92
Tableau VI.7. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue biologique sous serre	93
Tableau VI.8 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue épaissie sous serre.....	95
Tableau VI.9 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue épaissie témoin	96
Tableau VI.10. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue épaissie sous serre	96

Tableau VI.11. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue épaissie témoin	97
Tableau VI.12 : masses finales obtenus a la fin du séchage des boues épaissies pour la serre et le bac témoin	102
Tableau VI.12 : masses finales obtenus a la fin du séchage des boues épaissies pour la serre et le bac témoin	103

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Symboles	Définition	Unité
$A1, A2, A3$	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	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
C_{BET}	constante BET	(-)
C_c	capacité thermique surfacique de la couverture	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$
C_G	constante de Guggenheim	(-)
CDL	correction de la longitude	(h)
CDT	correction du temps	(h)
Cp_b	capacité thermique massique de la boue	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$
Cp_e	capacité thermique massique de l'eau	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$
Cp	capacité thermique massique de l'air	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$
$Cp_{anhydre}$	capacité thermique massique de la boue	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1})$
D	coefficient de diffusion	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
E	énergie	(W)
$E-H$	équivalent habitant	(-)
$E.Q.M.$	erreur quadratique moyenne	(-)
$f(X_r)$	vitesse de séchage réduite	(-)
Hr	humidité relative de l'air	(%)
Hr_e	humidité relative de l'air extérieure	(%)
Hr_i	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	(°)
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 intérieur	(W/ m ² /K)
J	flux de matière	(kg.m ⁻¹ .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	(°)
LON	longitude en degré décimaux	(°)
L_v	chaleur latente de vaporisation d'eau	(J/kg)
m_b	masse de la boue	(kg)
M_s	masse sèche	(kg)
m_i	masse initiale	(kg)
m_e	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 Prandtl	(-)

Re	nombre de Reynolds	(-)
Rg	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_{aemax}	température de l'air extérieur maximale	(°C)
T_{aemin}	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 une hauteur z	(m/s)
V	volume d'air de la serre	(m ³)
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)
$\frac{dX}{dt}$	vitesse de séchage	(kg eau /kg ms*h)
$\left(\frac{dX}{dt}\right)_1$	vitesse de séchage à phase constante	(kg eau /kg ms*h)

Lettres Grecques

ε_b	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)

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

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 20^{ème} siècle [1]. 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.

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 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 procédés existants se distinguent 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.

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).

Introduction générale

Ce travail s'inscrit donc dans une optique de dimensionnement et de conception du séchage solaire sous serre des boues.

Les objectifs de cette étude sont de quatre ordres :

- dégager les processus mis en jeu, et analyser via une approche thermodynamique les éléments et conditions clefs 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.
- introduction des énergies renouvelables.

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 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 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.

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.

Référence Bibliographique

[1] **Wikipedia** – Assainissement. Disponible sur
<<http://fr.wikipedia.org/wiki/Assainissement>> (consulté le 19/06/2011)

CHAPITRE I :

Origine des boues d'épuration

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

I.1 Généralité

Les rejets domestiques constituent des sources de pollution portant gravement atteinte à la qualité de l'environnement, lui causant souvent des préjudices irréparables.

Les rejets industriels et urbains sont devenus un facteur de pollution qu'il faut prendre en considération pour l'équilibre de l'écosystème. Il est alors devenu impératif de lutter contre cette pollution, de prendre des mesures très sévères, en instaurant des lois répressives contre les rejets non traités, afin de protéger notre environnement (la santé de l'homme, la faune et la flore, etc...). [9]

La quasi-totalité des procédés d'épuration des eaux usées urbaines, qu'ils soient biologiques ou physico-chimiques, conduisent à la production des boues.

Les boues constituent des déchets volumineux puisqu'elles contiennent généralement entre 95 et 99% d'eau et sont génératrice de nuisances.

La forte augmentation de la production de boues d'épuration urbaine posera un problème quant à la question de leur élimination

Ces boues doivent trouver une destination en continu, au même titre que les eaux débarassées de leur pollution.

Un blocage même momentané du processus, qu'il intervienne au niveau de la filière de traitement des boues ou au niveau de leur évacuation, peut rapidement avoir des conséquences néfastes sur l'environnement.

Le problème de l'élimination des boues va donc se poser de façon cruciale dans un proche avenir d'autant que la réglementation oblige les collectivités à éliminer les boues qu'elles produisent avec notamment l'interdiction de mise en décharge.

Dans cette optique, une nette augmentation du recyclage des boues en agriculture devrait être observée car ces boues ont une composition qui permet de couvrir plus au moins les besoins des végétaux en azote, phosphore etc. Elles peuvent également contribuer avec leurs composés organiques au maintien du stock humide des sols.

Cette pratique se traduit en revanche par un risque sanitaire qui demande à être correctement évalué et maîtrisé aussi bien sur le plan biologique (bactéries, virus, parasites...etc.) que du point de vue chimique (métaux lourds).

La lutte contre le problème des boues s'avère difficile pour des raisons multiples

- Raréfaction des terrains disponibles pour l'épandage ou le dépôt.
- Nécessités et exigences de l'environnement.
- Hygiène publique [12].

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

I.2. La conséquence de l'assainissement des eaux usées :

Le traitement des eaux usées en station d'épuration produit une eau épurée, rejetée dans le milieu naturel, et un condensat désigné sous le terme de "boues" ou "boues résiduelles".

Les boues dites primaires : elles résultent de la simple décantation des matières en suspension contenues dans les eaux usées brutes. Elles ne sont pas stabilisées.

Les boues physico-chimiques : elles sont produites dans les stations physico-chimiques. Les flocculant minéraux ajoutés participent pour une part importante à la quantité de boues produites.

Les boues secondaires : elles sont formées à partir de la charge polluante dissoute utilisée par les cultures bactériennes libres ou fixées en présence d'oxygène (aération de surface ou insufflation d'air).

Dans le cas où des boues primaires et des boues secondaires coexistent, il se forme des **boues "mixtes"** fraîches qui subiront un traitement de stabilisation biologique. Dans le cas où il n'existe pas de décantation primaire (boues activées en aération prolongée, la stabilisation aérobie se fait par séjour prolongé dans les ouvrages épuratoires).

Les lagunes produisent des "**boues de lagunage**". Les boues s'accumulent peu à peu au fond des bassins qui sont curés annuellement, ou tous les deux ans, dans la première zone d'accumulation des dépôts, et une fois tous les cinq ou dix ans pour les autres bassins.

I.3. Désignation des différentes stations d'épuration :

Dans le langage courant, l'appellation des stations d'épuration est basée sur la spécificité dominante ou l'originalité des procédés épuratoires mis en œuvre, on distingue :

- Les stations primaires ;
- Les stations physico-chimiques ;
- Les stations à boues activées ;
- Les stations à lits bactériens ;
- Les stations de Lagunage ;

I.4. Rôle d'une Station d'épuration :

La fonction d'une station d'épuration est de traiter les substances contenues dans les eaux usées afin de pouvoir rejeter dans le milieu naturel une eau épurée. Ce traitement s'accompagne de la formation d'un sédiment résiduel, les boues d'épuration.

Une station d'épuration est installée généralement à l'extrémité d'un réseau de collecte, sur l'émissaire principal, juste en amont de la sortie des eaux vers le milieu naturel. Elle rassemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées. Chaque dispositif est conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux.

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

La succession des dispositifs est bien entendu calculée en fonction de la nature des eaux usées recueillies sur le réseau et des types de pollutions à traiter [1].

Les différentes filières de traitement dans une station d'épuration sont représentées sur la figure (I-1) suivante :

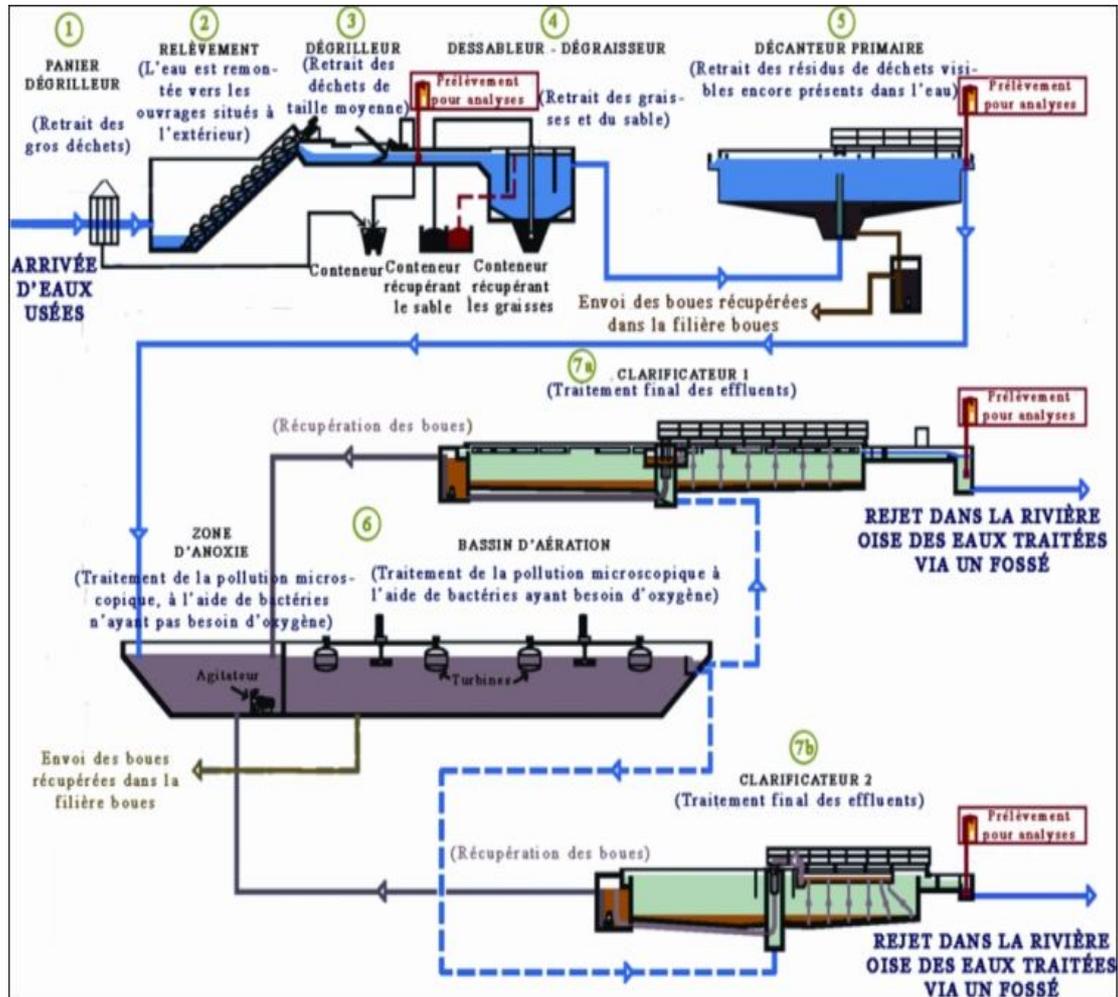


Figure I-1: étapes de traitement dans une station d'épuration [5]

La quantité d'eau polluée traitée aux stations d'épuration peut varier selon la taille de l'installation, elle peut traiter quelques équivalents habitants jusqu'à des milliers d'équivalents habitants (EH).

L'équivalent habitant est une unité de charge polluante représentant la charge organique biodégradable ayant une demande biochimique d'oxygène en cinq jours (DBO5) de 60 grammes par jour [2].

Le **DBO5** définit la demande biochimique en oxygène : c'est la quantité de dioxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières organiques biodégradable, dissoutes ou en suspension dans l'eau. Il s'agit donc d'une consommation potentielle d'oxygène par voie biologique. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

matières organiques biodégradables d'une eau (toute matière organique biodégradable polluante va entraîner une consommation d'oxygène).

La DBO est mesurée au bout de 5 jours (DBO₅), à 20°C (température favorable à l'activité des micro-organismes consommateurs d'O₂) et à l'obscurité (afin d'éviter toute photosynthèse parasite).

Deux échantillons sont nécessaires : le premier sert à la mesure de la concentration initiale en O₂, le second à la mesure de la concentration résiduaire en O₂ au bout de cinq jours. La DBO₅ est la différence entre ces deux concentrations. Les mesures seront effectuées sur un même volume et le second échantillon sera conservé cinq jours à l'obscurité et à 20°C. [3]

I.5. Les procédés d'épuration intensifs :

I.5.1 Les prétraitements :

Les dispositifs de prétraitement sont présents dans toutes les stations d'épuration, quels que soient les procédés mis en œuvre à l'aval.

Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou particuliers les plus grossiers, susceptibles de gêner les traitements ultérieurs ou d'endommager les équipements : déchets volumineux (dégrillage), sables (dessablage) et corps gras (dégraissage – déshuilage).

I.5.1.1. Le dégrillage : ce procédé se fait en 2 étapes :

- **Pré-dégrillage** : ce système consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les éléments les plus grossiers. Après nettoyage des grilles par des moyens mécaniques, manuels ou automatiques, les déchets sont évacués avec les ordures ménagères. La vitesse moyenne de passage entre les barreaux est comprise entre 0,6 et 1m/s.

- **Dégrillage fin** : ce procédé appelé aussi tamisage, utilise des grilles de plus faible espacement, il peut parfois compléter cette phase du prétraitement.

I.5.1.2. Le dessablage et le déshuilage-dégraissage :

Ces opérations consistent ensuite à faire passer l'eau dans des bassins où la réduction de vitesse d'écoulement fait se déposer les sables et flotter les graisses. L'injection des microbulles d'air permet d'accélérer la flottation des graisses. Les sables sont récupérés par pompage alors que les graisses sont raclées en surface.

On enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 μ ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40 % des graisses totales).

I.5.2. Les traitements primaires

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute et des matières en suspension.

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

Ce traitement consiste en une simple décantation qui permet de supprimer la majeure partie des matières en suspension. Ces matières sont responsables du trouble dans les eaux usées.

À la fin de ce traitement, la décantation a permis de supprimer environ 60% des matières en suspension, 30% de DBO et 30% de DCO. Les matières supprimées forment au fond du décanteur un lit de boues appelé « boues primaires ». [7]

La demande chimique en oxygène (DCO) est la consommation en oxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau. Elle permet d'évaluer la charge polluante des eaux usées.

I.5.3. Les traitements secondaires :

I.5.3.1. Traitement physico-chimique:

Les traitements physico-chimiques permettent d'agglomérer les particules présentes dans les eaux usées par adjonction d'agents coagulants et flocculants (sels de fer ou d'alumine, chaux...). Les amas de particules ainsi formés, ou "flocs", peuvent être séparés de l'eau par décantation ou par flottation.

Le traitement physico-chimique passe par trois étapes principales :

- a) Une coagulation qui se réalise essentiellement par ajout de sels de fer ou d'aluminium.
- b) Une flocculation par ajout de polymère organique (macromolécule à longue chaîne)
- c) Une décantation ou une flottation.

L'addition de sels de fer ou d'aluminium va occasionner la formation d'un précipité d'hydroxyde [$\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$] et une chute d'alcalinité.

Les taux de réactif à mettre en œuvre sont déterminés par des essais de flocculation. L'ajustement du pH par ajout d'acide ou de base est parfois nécessaire pour obtenir le pH optimal de coagulation-flocculation des réactifs employés :

- Al^{3+} : 6,0 à 7,4
- Fe^{3+} : 5 à 8,5

Ces traitements permettent d'enlever jusqu'à 90 % des matières en suspension. La pollution dissoute n'est que très partiellement traitée.

I.5.3.2. Les traitements biologiques

Les traitements biologiques sont indispensables pour extraire des eaux usées les polluants dissous, essentiellement les matières organiques biodégradables.

Ils utilisent l'action de micro-organismes capables de transformer ces matières.

Deux types de procédés sont utilisés :

i. Le traitement sur support fixe :

a) **Le lit bactérien** : Ce système consiste à faire passer l'eau à traiter à travers un matériau poreux servant de support aux micro-organismes (bactéries) ; l'oxygène est apporté aux bactéries aérobies de façon naturelle ou par ventilation forcée.

La figure (I-2) suivante représente le traitement biologique des eaux usées sur un lit bactérien avant clarification :

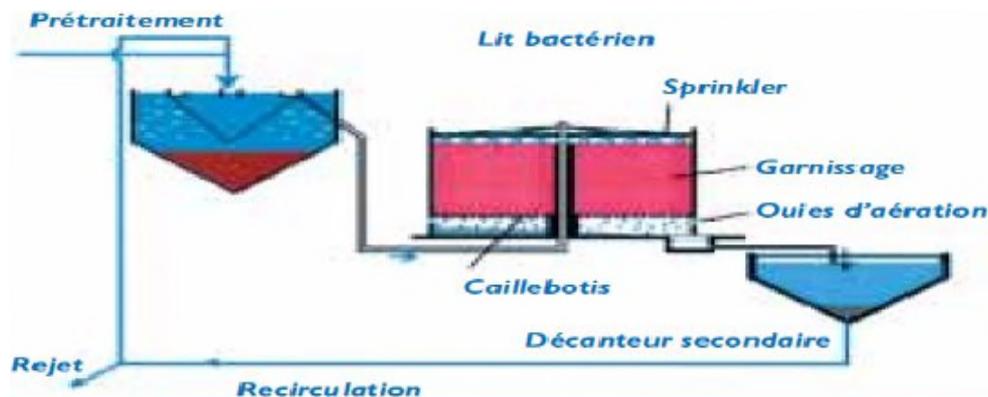


Figure I-2: traitement biologique sur lit bactérien [7]

b) Disques biologiques :

Les disques biologiques sont des disques tournants, semi immergés, les micro-organismes se développent et forment un film biologique épuratoire à la surface des disques, leurs rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée.

Sur la figure (I-3) ci-après, est représenté le traitement biologique des boues sur disque :

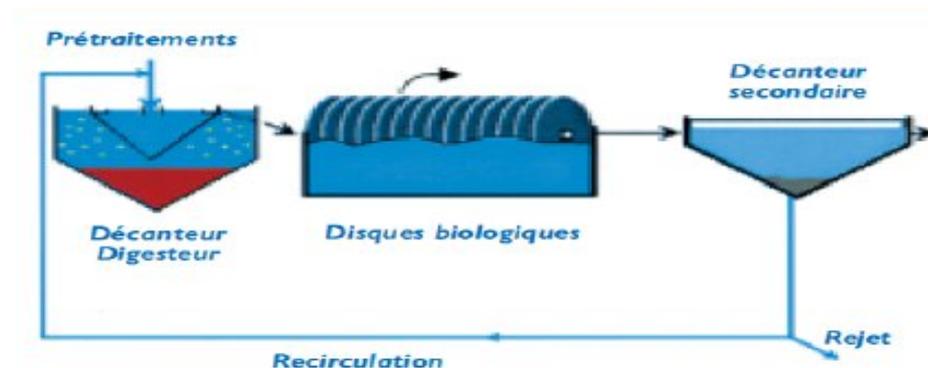


Figure I-3: traitement biologique sur disques [7]

ii. Les traitements sur support libre : les boues activées :

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

Dans ces procédés, les bactéries se développent dans des bassins alimentés d'une part en eaux usées à traiter et d'autre part en oxygène par des apports d'air. Les bactéries, en suspension dans l'eau des bassins, sont donc en contact permanent avec les matières polluantes dont elles se nourrissent et avec l'oxygène nécessaire à leur assimilation.

Les principes de fonctionnement diffèrent suivant que l'objectif est de traiter le carbone ou le carbone et l'azote et/ou le phosphore : en pratique, il s'agit de permettre la sélection des espèces de bactéries capables soit de transformer le carbone en CO_2 , soit de transformer l'azote en nitrates puis les nitrates en gaz (N_2), soit de stocker le phosphore. Dans tous les cas, la séparation de l'eau traitée et de la masse des bactéries (que l'on appelle « boues ») se fait dans un ouvrage spécifique appelé "clarificateur".

Pour conserver un stock constant et suffisant de bactéries dans le bassin de boues activées, une grande partie des boues extraites du clarificateur est renvoyée dans le bassin. Une petite partie de ces boues, correspondant à l'augmentation du stock pendant une période donnée, est évacuée du circuit des bassins d'aération et est dirigée vers les unités de traitement des boues : cette fraction des boues constitue les « boues en excès ».

Sur la figure (I-4) ci-dessous, est représenté le traitement par boue activée dans des bassins d'aération :

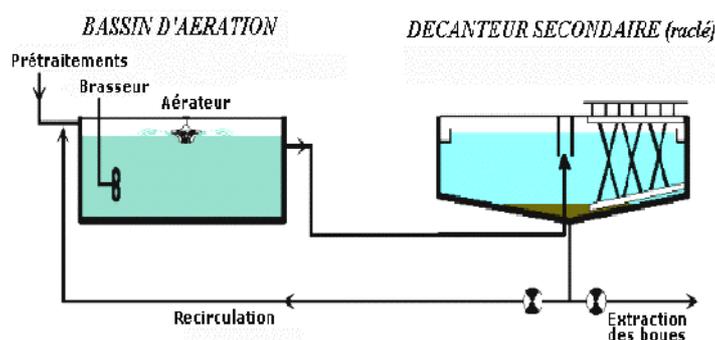


Figure I-4: schéma simplifié d'un procédé à boues activées [6]

I.5.4. Les traitements tertiaires :

Après les traitements secondaires, l'eau est soit rejetée dans le milieu naturel, soit subit un traitement supplémentaire en vue d'une réutilisation pour éliminer les micros organismes qui peuvent constituer un problème sanitaire.

Il existe plusieurs traitements, notamment :

- La chloration** : la chloration est la technique la plus utilisée pour la désinfection des eaux, Elle s'opère par injection (Cl_2 gazeux ou hypochlorite de sodium NaOCl) ou de bioxyde de chlore ClO_2 sur une eau préalablement épurée et clarifiée.
- L'ozonation** : L'ozone O_3 , oxydant puissant, est un désinfectant particulièrement efficace qui permet d'éliminer les bactéries, certains virus protozoaires et les traces de médicaments dans les eaux épurées. Il est généré in situ par décharge électrique sur de l'oxygène pur ou contenu dans l'air.

- c) **Le rayonnement ultraviolet** : Les ultraviolets sont de plus en plus utilisés pour la désinfection des eaux usées urbaines et industrielles notamment dans les zones côtières. Leur pouvoir bactéricide, virucide et germicide les rendent particulièrement efficaces et attractifs d'autant plus qu'ils n'entraînent pas l'apparition de sous-produits de désinfection toxique pour le milieu naturel contribuant à la sauvegarde des zones aquatiques sensibles.

Ce procédé nécessite de mettre en amont un système de filtration pour éliminer la MES

I.6. Les procédés de traitement extensifs :

Le lagunage consiste à établir un écoulement lent par gravité des eaux usées dans plusieurs bassins de rétention peu profonds en éliminant le risque d'infiltration dans les eaux souterraines.

I.6.1. Le lagunage naturel :

Le lagunage naturel est une technique d'épuration des eaux basée sur la dés-eutrophisation.

L'eutrophisation est la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, lié en général à un apport excessif de substances nutritives, qui augmentent la production d'algues et d'espèces aquatiques.

Il s'inspire des systèmes naturels d'épuration et filtration par des microorganismes, des algues et des plantes aquatiques. Parfois, on fait aussi ruisseler l'eau au travers des racines de plantations d'arbres, éventuellement des saules traités en taillis coupés en courte rotation.

L'eau usée subit d'abord des prétraitements qui consistent en dégrillage, déshuilage et dessablage. qui, comme leur noms l'indiquent, sont chargés d'éliminer les particules solides et les graisses.

Les premiers bassins sont des bassins à micro-organismes, où est dégradée la matière organique (MO) contenue dans les eaux usées. L'eau transite ensuite dans des bassins moins profonds, à macrophytes (iris, roseaux, joncs...). Ceux-ci absorbent les éléments minéraux issus de la dégradation de la matière organique pour leur croissance.

Cette technique présente la caractéristique de nécessiter une surface importante, entre 15 et 20 m² pour un volume de 50 m³ d'eau. Le temps de séjour doit être élevé (minimum 30 jours, voire plus). Les boues se concentrant sur le fond, interviennent dans la biologie du système et ne doivent être évacuées qu'après quelques 5 à 10 années.

La figure (I-5) suivante représente le principe d'épuration des eaux usées en utilisant des lagunes :

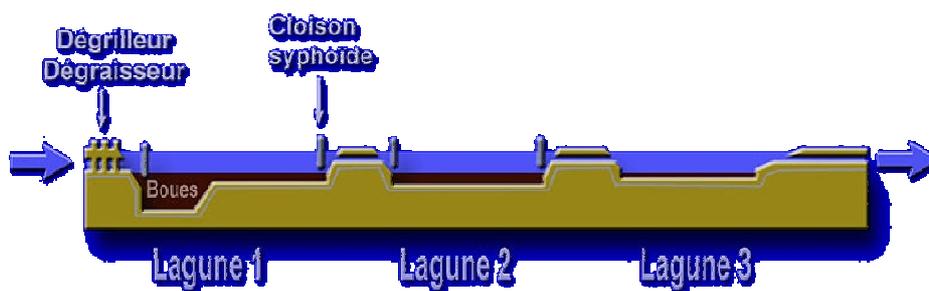


Figure I-5: schéma de fonctionnement d'un lagunage naturel [1]

I.6.2. Le lagunage aéré :

L'oxygénation est, dans le cas du lagunage aéré, apportée mécaniquement par un aérateur de surface ou une insufflation d'air. Ce principe ne se différencie des boues activées que par l'absence de système de recyclage des boues ou d'extraction des boues en continu. La consommation en énergie des deux filières est, à capacité équivalente, comparable (1,8 à 2kW/kg DBO 5 éliminée).

Le lagunage est en fort développement en raison de sa rusticité et de ses performances d'épuration honorables.

Les lagunes présentent l'inconvénient d'occuper des surfaces très importantes et d'avoir des performances très variables en fonction des conditions climatiques. Elles conviennent moins bien aux communes plus petite en raison de surfaces de bassin très importantes dans ce cas (emprise au sol : 15 m²/habitant).

Elles ont l'avantage d'être rustiques et peu coûteuses en fonctionnement, et de s'intégrer assez harmonieusement dans le paysage.

I.7. La mesure des performances de l'épuration :

Pour comparer les teneurs en polluants des eaux usées et des eaux épurées, on utilise plusieurs indicateurs :

Sur le tableau (I-1) suivant sont représentées les différentes propriétés indicatrices de la performance de l'épuration :

Les boues contiennent notamment de l'azote, du carbone et du phosphore. Ces éléments peuvent nuire à l'environnement, particulièrement au milieu aquatique, lorsqu'ils sont rejetés en grande quantité (eutrophisation, ...). La forme principale à éliminer est la pollution carbonée. Cette matière organique peut être décantée ou biodégradée par l'action de microorganismes vivants.

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

Tableau I-1: indicateurs de performance de l'épuration [6]

Propriété	Unité de concentration
• Les matières en suspension (MES) : matières minérales ou organiques non dissoutes	mg/l
• Les matières organiques présentes sous forme particulaire et dissoute. On les mesure indirectement par :	
- la demande biochimique en oxygène (DBO)	mg O ₂ /l
- la demande chimique en oxygène (DCO)	mg O ₂ /l
- l'azote et le phosphore	mg N/l ou mg P/l
• les contaminants biologiques : bactéries, virus, parasites	nombre/ml ou npp ou nppuc (nombre le plus probable d'unités cytopathiques)

Les variations sur la composition des boues sont représentées sur le tableau (I-2) suivant :

On trouve dans les boues urbaines :

1. **des éléments fertilisants** : les boues sont riches en matières organiques (phosphore, azote).
2. **des éléments indésirables** :
 - a. des éléments traces métalliques : Certains de ces éléments occupent une place essentielle à faibles concentrations dans l'organisme (Oligo-éléments), mais deviennent généralement toxiques au-delà d'un certain seuil.
 - b. Des micro-organismes pathogènes : virus, bactéries, protozoaires, vers parasites, et les champignons. Ils sont notamment présents dans les matières fécales rejetées dans les réseaux d'eaux usées et donc inévitablement présents dans les boues brutes.
 - c. Des micropolluants organiques : les substances les plus fréquemment considérées sont HPA (Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques) et les PCB (Polychlorobiphényles) car ils sont particulièrement persistants. Les composés suivants entrent aussi dans cette catégorie : pesticides, résidus de médicaments, phtalates, nitrates ...

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

Tableau I-2: Evolution de la composition des boues au cours du traitement. [6]

Composants % /MS	Décantation primaire	Biologique	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>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 (g.L⁻¹)</i>	30-90	5-10	6-8	60-120	20-60

Des nombreux traitements sont mis en place pour limiter le volume produit, les odeurs et la nocivité des boues. Actuellement trois filières sont utilisées pour évacuer les boues, selon que l'on privilégie un mode de gestion basé sur l'élimination ou le recyclage.

Les trois filières de traitement sont la mise en décharge (25%), l'incinération (15%) et enfin l'épandage agricole (60%) après séchage.

Les boues d'épuration ne seront plus épandues à terme sous forme liquide, mais après traitement mécanique et thermique, sous forme de compost ou de granulés.

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.

Le tableau (I-3) suivant représente les différents états des boues en fonction de leur siccité :

Tableau I-3: Etats physiques des boues. [12]

Siccité	Etat
2 – 5 %	Liquide
5 – 12 %	Liquide épaissi
12 – 25 %	Pâteuse
30 – 50 %	Solide avec retrait
≥90 %	Solide sans retrait

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.

I.8. Traitement des boues :

Les boues sont constituées de 90% d'eau, elles sont très fermentescibles et dégagent rapidement des odeurs désagréables. L'objectif du traitement des boues est de réduire ce volume, diminuer la nuisance des odeurs et éliminer les bactéries et parasites présents.

Ce traitement passe par trois étapes : Epaississement, stabilisation et déshydratation poussée.

La première pour diminuer la teneur en eau, la seconde pour réduire le pouvoir fermentescible et la dernière pour la mise en stockage et valorisation.

I.8.1. Epaississement :

Le premier stade du traitement des boues consiste à éliminer un maximum d'eau dans une étape d'épaississement, cette étapes est indispensable pour diminuer la taille des ouvrages des traitements en aval et améliorer leur fonctionnement, il existe deux sortes d'épaississement : statique et dynamique.

I.8.1.1. Epaississement statique ou par décantation :

Ce procédé consiste à laisser décanter naturellement la boue par un ouvrage cylindro-conique, les performances dépendent essentiellement des types de boues et peuvent donner un résultat de 60% d'élimination d'eau pour les boues secondaires et jusqu'à 87% pour les boues primaires.

Sur la figure (I-6) suivante, est représenté l'épaississeur statique conique :



Figure I-6: Epaisseur statique conique [13]

I.8.1.2. Epaisseur dynamique :

a. Epaisseur par flottation

Le principe de l'épaisseur par flottation 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.

La figure (I-7) ci-dessous représente l'épaisseur dynamique par flottation :



Figure I-7: épaisseur par flottation [13]

b. Epaisseur 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 par des réactifs minéraux ou des poly électrolytes, est épandue sur un champ horizontal de grille fine raclée en permanence par des lames en caoutchouc.

Ce procédé présente plusieurs avantages :

- Soutirage direct de boues en excès peu concentrées depuis la recirculation en boues

- urbaines;
- Réduction de deux à trois fois du volume de stockage des boues avant leur reprise en agriculture;
- Réduction dans les mêmes proportions du coût de transport des boues.

c. L'épaississement par centrifugation :

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. La centrifugation consiste en une décantation accélérée par force centrifuge.

La figure (I-8) suivante représente le schéma d'une centrifugeuse à boue pour l'épaississement :

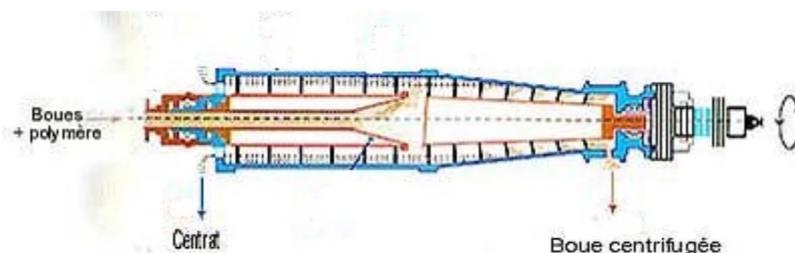


Figure I-8: schéma d'une centrifugeuse à boue [6]

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.

I.8.2. La stabilisation des boues :

Les traitements de stabilisation utilisés sont de type biologique, chimique ou thermique. Ils s'appliquent aux boues mixtes fraîches, aux boues secondaires ou à l'ensemble des boues.

La stabilisation des boues peut être divisée en trois genres :

a) La stabilisation biologique :

La stabilisation biologique réduit la teneur des boues en matières fermentescibles. Elle se fait soit par voie aérobie (en présence d'oxygène) dans les bassins d'aération ou dans des bassins de stabilisation aérobie, soit par voie anaérobie (absence d'oxygène) dans des digesteurs avec production d'un biogaz riche en méthane. Dans le premier cas, on obtient des boues « aérobies » ou « stabilisées aérobies », dans le second cas des boues « digérées », encore appelées « anaérobies » ou « stabilisées anaérobies ».

b) Le compostage :

Le compostage constitue un procédé particulier de stabilisation biologique aérobie. Il se réalise de préférence sur des boues déjà déshydratées de façon à économiser l'approvisionnement en support de compostage, les boues n'étant pas auto-compostables.

La figure (I-9) ci-dessous représente la stabilisation des boues par compostage :



Figure I-9: Compostage des boues [13]

Les boues compostées ont un aspect de « terreau » et présentent une structure solide ; elles sont stables. On constate actuellement un fort regain d'intérêt pour cette technique en raison des nouvelles données réglementaires et économiques concernant la gestion des déchets.

c) La stabilisation chimique :

Ce processus bloque simplement l'activité biologique, et donc l'évolution de la boue, par adjonction d'une quantité importante de chaux (10 à 50 % de la matière sèche, en général 30 %) élevant le pH au delà de 12.

Le chaulage suppose généralement une déshydratation préalable des boues, sauf dans le cas du filtre-presse où un lait de chaux est mélangé aux boues liquides. Les boues chaulées obtenues sont de structure pâteuse ou solide. [4]

I.8.3. Conditionnement 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. Il est donc nécessaire de procéder à la floculation de celles-ci pour en casser la stabilité colloïdale et pour augmenter la taille des particules par des procédés chimiques (ajout de réactifs minéraux ou de polymère de synthèse) ou physiques (thermique).

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

a) Conditionnement par ajout de réactifs minéraux :

Ce procédé est adapté à la déshydratation sur filtre presse ; on utilise le plus souvent les sels de fer sur les boues organique et l'ion Fe^{3+} est de loin le plus efficace. On introduit ensuite de la chaux pour améliorer la filtrabilité.

Les avantages des deux composés sont représentés sur le tableau (I-4) suivant :

Tableau I-4: conditionnement des boues par ajout de réactifs minéraux

Les sels de fer	La chaux
<ul style="list-style-type: none">• Action coagulante : charge opposée à celles des particules organiques.• Action floculante : formation d'un complexe hydraté qui joue le rôle d'un polymère minérale.	<ul style="list-style-type: none">• Précipitation de sels de Ca favorable à la filtration.• Apport d'une charge minérale dense.• $pH > 10$, pH correct pour floculation.

b) Conditionnement aux poly électrolytes :

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

Les effets du conditionnement aux poly électrolytes sont présentés sur le tableau (I-5) suivant :

Tableau I-5: les effets du conditionnement aux poly électrolytes

Effets du conditionnement aux poly électrolytes	<ul style="list-style-type: none">➤ une floculation très marquée par la formation de ponts entre particules grâce aux longues chaînes ramifiées➤ une forte diminution de la résistance spécifique de la boue floculée avec une augmentation de l'hydrophilie particulaire et du coefficient de compressibilité.
--	--

Remarque :

Plusieurs types de poly électrolytes sont disponibles. Il faut donc faire des tests de floculation afin de déterminer lequel des produits est le mieux adapté à la boue.

Les poly électrolytes cationique sont souvent les plus efficaces pour les boues organiques et les poly électrolytes anionique pour les boues d'eau potable.

I.8.4. Déshydratation par centrifugation :

La déshydratation par centrifugation est une technique de séparation de l'eau de la boue utilisée sur des boues flocculées aux polymères de synthèse.

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. L'alimentation peut être centrale ou tangentielle. La circulation de la suspension et de la boue déshydratée peut s'effectuer à cocourant ou à contre-courant. On obtient ainsi une siccité de l'ordre de 19 - 23 % (boues biologiques).

I.8.5. La 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.

I.8.5.1. Filtres à bandes presseuses :

Le processus de filtration comporte toujours les étapes suivantes:

- floculation avec des poly électrolytes dans des flocculateurs à faible temps de séjour.
- drainage de la boue flocculée.
- pressage de la boue drainée: la boue est emprisonnée entre deux toiles filtrantes qui forment un coin et la comprime progressivement.

Sur la figure (I-2) ci-après, est représenté le schéma d'un filtre à bandes presseuses :

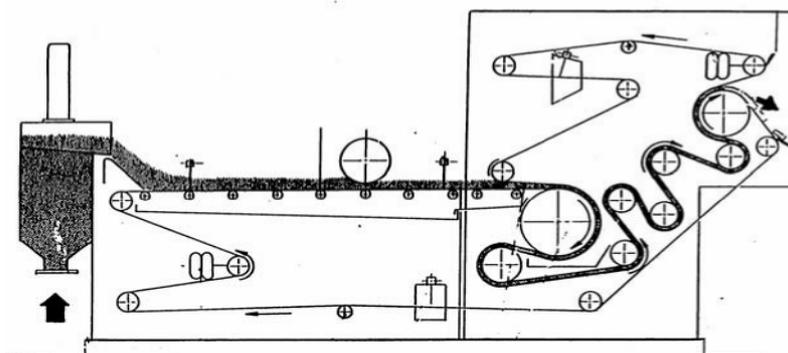


Figure I-3: filtre à bandes presseuses [6]

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).

I.8.5.2. Filtre presse :

En présence de pression (de 5 à 15 bars) et d'une chambre étanche, le filtre presse permet de filtrer la boue, les boues sous pression passent par une série de toiles filtrantes (comme des tamis) retenant ainsi les sédiments, on obtient une siccité de 25 à 30%.

La figure (I-4) suivante représente le schéma d'un filtre presse pour la filtration des boues :

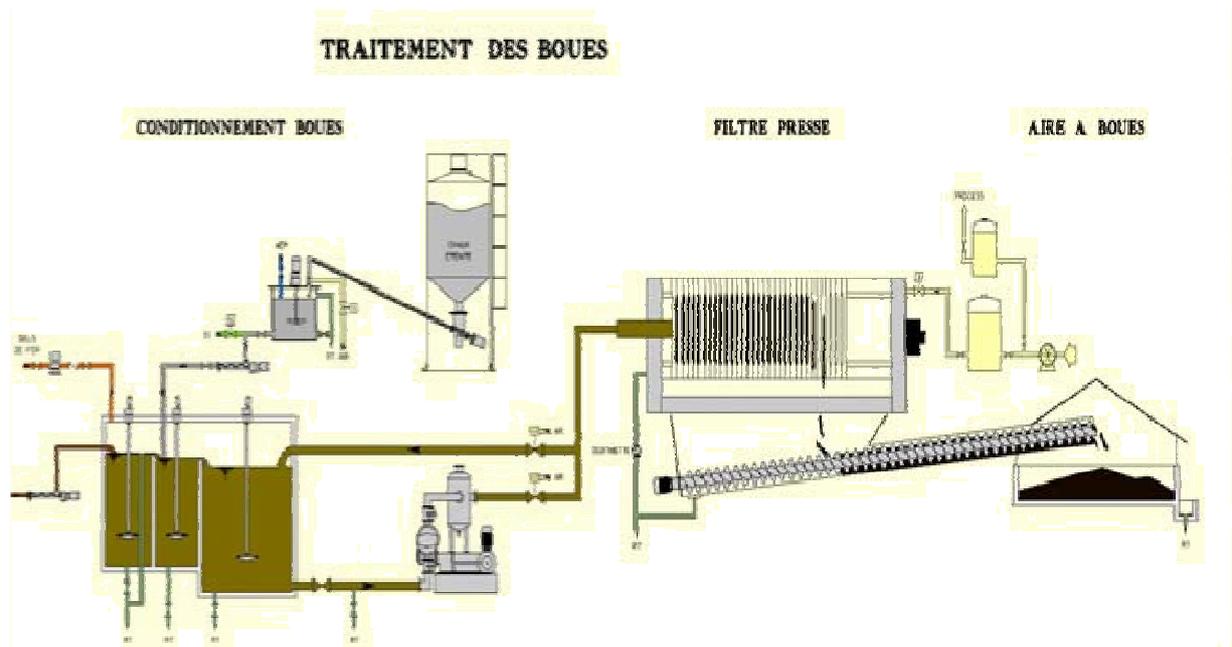


Figure I-11: schéma d'un filtre presse [6]

I.8.6. Lits de séchage :

I.8.6.1. Lits de séchage à sable :

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 en moyenne de trois semaines suivant les conditions météorologiques.

I.8.6.2. Lits de séchage plantés de roseaux :

Cette technique se pratique aussi à l'air libre sur des boues liquides et combine drainage et évapotranspiration. En effet les roseaux de types phragmites plantés 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. On obtient une siccité de l'ordre de 20 à 30% au bout de 10 ans suivant les conditions météorologiques [6].

I.8.7.Séchage thermique :

Il se pratique sur des boues déjà déshydratées mécaniquement pour des raisons de coût, on obtient une siccité de 90-95%. On peut mettre la boue obtenue sous forme de granulés.

I.8.8.Oxydation thermique :

Elle permet la dégradation de la matière organique par la chaleur après que la boue soit complètement minéralisée et que les germes pathogènes soient réduits.

Il existe deux grands principes d'oxydation : en phase gazeuse (incinération) et en phase liquide (oxydation par voie humide).

I.8.9.Séchage solaire :

Ce procédé se pratique sous serre fermée ou ouverte et constitue une alternative très intéressante sur le plan économique et également écologique pour réduire à un minimum la masse des boues d'épuration et la dépendance au marché de l'élimination et pour pouvoir stocker les boues à bas prix [8].

I.8.10.La méthanisation :

La digestion anaérobie dégrade la matière organique contenue dans les boues pour produire du biogaz, gaz principalement composé de méthane, source d'énergie propre et valorisable. Ce procédé permet aussi de stabilisation des boues et les rendre moins odorantes.

I.9. Valorisation énergétique :

I.9.1.Incinération :

A 800-900°C en atmosphère oxydante, l'incinération des boues permet une oxydation complète de la matière organique. Plusieurs méthodes sont envisageables :

I.9.1.1.Incinération dans un four spécifique

Cette solution est adoptée par des stations qui produisent de grandes quantités de boue.

I.9.1.2. Co-incinération avec ordures ménagères

La capacité thermique du four doit être telle qu'elle permet l'introduction de boues, une boue de teneur en matières sèches supérieure à 60% possède un pouvoir calorifique inférieur proche des ordures et fait office de combustible.

I.9.2. Oxydation par voie humide (OVH) :

En présence d'air ou d'oxygène pur, sous pression (4000 à 13000 kPa) et en milieu humide, les boues épaissies (3 à 4% MS) sont éliminées par oxydation à chaud (220- 230°C). 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 résiduaires ne nécessitant aucun traitement complexe avant rejet. [11]

I.9.3. 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). [6]

I.10. Valorisation agricole des boues :

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.

Références bibliographiques :

[1] : France nature et environnement FNE

Fiche technique « boue de step » de l'organisation, avril 2009.

[2] : Actu-environnement

Equivalent-habitant, disponible sur « http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/equivalent-habitant_eh.php4 ». (Consulté le 22-03-2011)

[3] : Lycée J. Moulin

Demande biochimique en oxygène Mai 2000.

Disponible sur http://pedagogie.ac-montpellier.fr:8080/disciplines/svt/spip/oldsvt/St_Martial/accueil.htm, consulté le (22-03-2011)

[4]: Gérard Grosclaude

Épuration des eaux résiduaires page 185, janvier 1999.

[5] : ADEME : agence de développement et de maitrise de l'énergie.

Fiche technique assainissement : organisation et fonctionnement d'une station d'épuration
Novembre 2003.

[6] : Amadou, H ;

Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaines. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg I, (2007).

[7] : Mlle. GHERBI Ghofrane ;

Etude des possibilités de réutilisation des eaux et des boues d'épuration dans l'agriculture, Ecole nationale polytechnique Alger 2010.

[8] : thermo-système

Séchage solaire des boues d'épuration <<http://www.thermo-system.com/fr/produits/sechage-solaire-des-boues-depuration/contexte/>>, (consulté le 30 mai 2011).

[9] : EZZIANE CHERIFI

Traitement des eaux de rejets, (http://bu.univ-chlef.dz/doc_num.php?explnum_id=11,) (consultée le 15 mai 2011).

Chapitre I : Origines des boues d'épuration

[10] : STEREAU

Stereau choisit la thermolyse pour traiter les boues d'épuration, St Quentin-en-Yvelines, le 6 décembre 2001.

[11] : Vivendi Environnement

L'oxydation par voie humide, juin 2002.

(http://www.waternunc.com/fr/dosboues_VE01_082002.htm), (consulté le 02 mai 2011)

[12] : Gestion des boues des stations d'épuration urbaines

Office nationale de l'assainissement Mai 2008

[13] : wikipédia

Boues d'épuration, disponible sur

« http://fr.wikipedia.org/wiki/Boues_d%27%C3%A9puration#mw-head, » (consulté le 03 mars 2011)

CHAPITRE II :

Notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

Le séchage est un procédé qui sépare un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Cette opération est endothermique et nécessite l'apport d'énergie thermique.

Le séchage implique deux types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux transferts. [9]

II.1. Les différents types d'eau dans les boues d'épuration :

Dans les boues d'épuration, nous trouvons plusieurs types d'eaux classées de différentes façons selon les auteurs ou les méthodes utilisées. Mais d'un point de vue thermodynamique, il existe deux sortes d'eaux : l'eau libre et l'eau liée.

Suivant un test dilatométrique, le tableau (II.1) suivant présente les formes d'eaux dans les boues selon Vesilind et Martel (1989) :

Tableau II.2: les formes d'eau dans une boue selon Vesilind et Martel [10]

Eaux	Définition
Libre	Eliminé par simple effet de la gravité
Interstitielle	est enfermée dans les floccs ou dans des structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des floccs ou des cellules
vicinale	retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique
d'hydratation	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, le tableau (II.3) représente les formes d'eaux dans les boues selon Smollen :

Tableau II.4:les formes d'eau dans une boue selon Smollen [10]

Eaux	Définition
Libre	Eliminée par déshydratation mécaniquement
immobilisée	Eliminée par séchage à vitesse constante
Liée	Subsiste après séchage.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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. [10]

II.2. L'activité de l'eau dans la boue :

L'eau libre présente dans un matériau se comporte comme une 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 est définie comme le rapport de la pression partielle de l'eau dans le mélange sur la pression à saturation de l'eau pure à la même température : [10]

$$a = \frac{P_p}{P_{sat,T}} \quad (II-1)$$

Avec

P_p : représente la pression partielle de l'eau dans le mélange.

$P_{sat,T}$: représente la pression de saturation de l'eau pure à une température donnée.

L'humidité relative peut être un substitut à l'activité pour l'air humide d'où le terme « humidité relative d'équilibre ».

II.3. L'isotherme 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. 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.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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 [11].

II.3.1. Les modèles des isothermes de sorption :

Il existe des modèles empiriques ou théoriques, l'inconvénient c'est qu'ils ne sont pas applicables dans toute la gamme des humidités relatives, le tableau (II.5) suivant reprend les principaux modèles utilisés :

Tableau II.6 : définition des modèles des isothermes de sorption et leur domaine de validité. [11]

Modèle	$X_{eq} = f(H_r)$	Domaine de H_r	Conditions d'utilisation
Langmuir	$X_{eq} = \frac{knHr}{1+Hr}$	Faible H_r	Adsorption monocouche
BET	$X_{eq} = \left(\frac{X_m H_r}{(1-H_r).(1+(C_{BET}-1)).H_r} \right)$	$H_r < 0.5$	Adsorption multicouches
GAB	$X_{eq} = \left(\frac{X_m C_G K H_r}{(1-KH_r).(1+(C_G-1)).K.H_r} \right)$	$0.1 < H_r < 0.9$	Amélioration de BET (facteur k)
Chung-Pfost	$X_{eq} = \frac{1}{n} (\ln k - \ln(-H_r))$	$0.2 < H_r < 0.9$	Equations empiriques ou semi-empiriques
Halsey	$X_{eq} = \left(-\frac{k}{\ln H_r} \right)^{1/n}$	$0.1 < H_r < 0.8$	
Harkins-Jura	$X_{eq} = \left(-\frac{n}{\ln(H_r)-k} \right)^{\frac{1}{2}}$	$H_r > 0.8$	
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1-H_r)}{k} \right)^{\frac{1}{n}}$	$0.5 < H_r < 0.95$	
Kuhn	$X_{eq} = \frac{k}{\ln H_r} + n$	$H_r < 0.5$	
Oswin	$X_{eq} = k \left(\frac{H_r}{1-H_r} \right)^n$	$0.1 < H_r < 0.9$	
Smith	$X_{eq} = k - n \ln(1-H_r)$	$0.5 < H_r < 0.95$	

Avec :

X_m : est la teneur en eau de la monocouche.

k : facteur correctif qui tient compte des propriétés de sorption des multicouches.

C_{BET} : constante de BET

C_G : constante de Guggenheim.

X_{eq} : la teneur en eau finale d'équilibre du produit.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

Hr : humidité relative de l'air.

n : coefficient déterminé expérimentalement.

II.3.2. Chaleur isostérique de désorption :

La chaleur isostérique de désorption peut être calculée à partir de la relation de Clausius-Clapeyron, 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 une teneur en eau d'équilibre fixée. [12]

La chaleur isostérique nette de désorption représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat, c'est-à-dire la chaleur supplémentaire à la vaporisation de l'eau pure qu'il faudrait fournir au produit pour le déshydrater. Le calcul de q_{st} se fait en exploitant les isothermes de sorption obtenues à différentes températures.

$$q_{st} = -R \frac{d \ln \frac{Hr}{100}}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (\text{II-2})$$

La chaleur isostérique de désorption Q_s se calcul comme suit :

$$Q_s = q_{st} + L_v \quad (\text{II-3})$$

Avec :

- q_{st} : chaleur isostérique nette de désorption (J.mol⁻¹)
- R : constante des gaz parfaits (J.mol⁻¹.K⁻¹)
- Hr : humidité relative (%)
- T : température de l'air (K)
- L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau. (J.mol⁻¹)

II.4. Evolution du séchage d'un produit humide :

II.4.1. Caractérisation de la boue :

II.4.1.1. 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.4.1.2. Siccité (Si) :

La siccité est le pourcentage de matière sèche. En effet, une boue avec une siccité de 10 % correspond à 90 % d'eau. [14]

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

II.4.2. Etablissement des courbes de séchage :

Les courbes de séchage désignent, soit les variations de la teneur en eau moyenne $X = \frac{m - M_s}{M_s}$ de la boue en fonction du temps soit celle donnant la vitesse de séchage $(-\frac{dX}{dt})$ en fonction du temps t ou même la courbe proposée par Kirchner $(-\frac{dX}{dt})$ en fonction de X (Figure II-1), soit enfin une forme réduite de ces paramètres et visant à donner une représentation unique pour différentes conditions de séchage.

Avec : m : la masse de l'échantillon (g)
 M_s : masse de la matière sèche (g)
 X : la teneur en eau sur base sèche de la boue. (Kg d'eau/Kg de M_s)

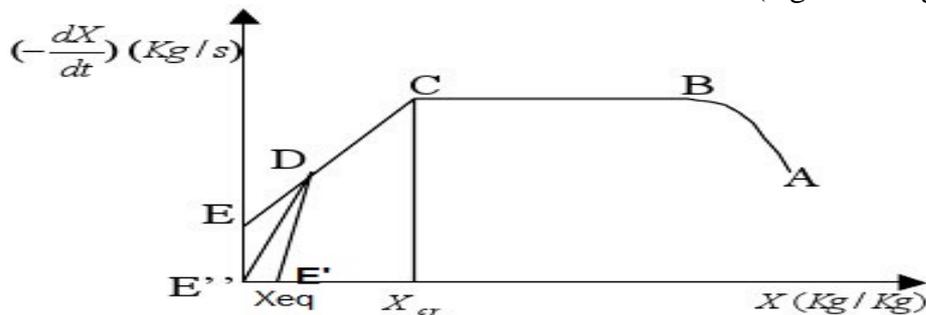


Figure II-2: les phases de séchage de la boue [10]

Le tableau (II.4) suivant définit les différentes périodes par lesquelles passe la boue au cours du séchage et les phénomènes physiques qui y sont associés.

Tableau II.7: Les périodes de séchage d'un produit humide [10]

Périodes	définition
Mise en température (A-B)	Période courte par rapport au temps de séchage total, T_{boue} augmente jusqu'à atteindre la $T_{\text{air asséchant}}$, les transferts de masse et de chaleur atteignent des valeurs d'équilibre.
Période à vitesse constante (B-C)	L'eau évacuée à flux constant, isenthalpique (la chaleur convective est utilisée intégralement pour l'évaporation), l'eau éliminée est libre et se trouve à la surface de la boue en film continue et provient de l'intérieur du solide. $T_{\text{surface}} = T_{\text{air}}$. la vitesse de séchage dépend des conditions extérieures.
Périodes de ralentissement	<p>Receding front model : le front de vaporisation se déplace à l'intérieur du matériau.</p> <p>Wetted-surface model : la vaporisation se déroule à la surface et cette surface est partiellement sèche.</p>

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

- **Receiving front model** : cette période commence lorsque toute l'eau libre est éliminée, le front de séchage migre vers l'intérieur du matériau et la vitesse de séchage est contrôlée par les résistances aux transferts de chaleur et de matières du matériau et ces résistances augmentent au fur et à mesure que le front de séchage migre vers l'intérieur (zone C-D).

Une fois qu'il n'existe plus que de l'eau liée la seconde partie du séchage commence (D-E') le séchage se termine lorsque la boue atteint la teneur d'eau d'équilibre dans les conditions opératoires et cette teneur ne dépend que de la température et de l'humidité de l'agent séchant.

Remarque : Si le matériau est non hygroscopique, cette seconde période n'existe pas, la première zone de décroissance continue jusqu'au terme de séchage (D-E).

- **Wetted-surface model** : l'apparition de zones sèche à la surface du matériau est responsable de la chute du flux de séchage. Le rapport du flux à la fraction de surface mouillée est constant et cette période continue jusqu'à assèchement complet de la surface externe (zone C-D). La vitesse est moindre dans la seconde zone et ce à cause du transfert de l'eau à l'intérieur du matériau. La fin du séchage est caractérisée par une teneur en eau nulle (D-E'') ou à X_{eq} pour les matériaux hygroscopiques (zone D-E') [10].

II.4.3. Modélisation des phases de séchage :

On décrit les mécanismes de transferts de matière et de chaleur en considérant deux étapes de séchage différentes : celle à vitesse constante et celle à vitesse décroissante.

II.4.3.1. Période à vitesse constante :

La nature et la structure du matériau n'interviennent pas car les résistances au transfert se situent exclusivement sur la couche limite à la surface du matériau humide.

Les quantités de chaleur et de matière peuvent être exprimées comme suit :

$$M_s \left(-\frac{dX}{dt}\right) = K S (P_{sat} - P_v) \quad (II-3)$$

$$Q = h S (T_a - T_s) \quad (II-4)$$

On peut lier la quantité de chaleur à celle de matière par la chaleur latente de vaporisation :

$$Q = M_s \left(-\frac{dX}{dt}\right) L_v \quad (II-5)$$

Si: $a_{eau} = 1 \Rightarrow T_{interface} = T_{humide}$ et $P = P_{sat}$

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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 :

$$Ms \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = KS (P_{\text{sat}}(T_h) - P_v) \quad (\text{II-6})$$

La température de la surface du produit sera supérieure à celle de la température humide si une autre source d'énergie intervient telle que l'énergie solaire.

Remarque :

L'augmentation du flux d'après l'équation (II.6) peut être provoquée par :

- Augmentation de la température humide
- Augmentation du coefficient de transfert.
- Une diminution de la teneur en humidité de l'air de séchage.

Les coefficients de transfert de chaleur et de matière peuvent être déterminés à partir de la mesure du flux pendant cette période contrôlée par les résistances extra granulaires. 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.4.3.2. Période à flux décroissant :

II.4.3.2.1. Mode de transport de l'eau :

La structure du matériau détermine la manière dont le transfert de l'eau s'effectue (liquide ou vapeur) par le biais de la diffusion et de la capillarité,

Dans les milieux capillaires ou capillo-poreux ($r_p > 0.1$ à $1\mu\text{m}$), le transfert du liquide se fait par capillarité. Le transfert du liquide obéit à la loi de Darcy, le mouvement s'effectue dans le sens des pressions négatives croissantes donc vers les zones où le liquide est en tension. Ce transfert est décrit par l'équation suivante :

$$J = -\rho \frac{k}{\mu} \Delta P_1 \quad (\text{II-7})$$

Où :

J : le flux de matière	($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
k : la perméabilité	(m^2)
μ : la viscosité dynamique	($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ρ : masse volumique	(kg/m^3)
P_1 est la pression du liquide	(Pa).

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.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

Cette zone de séchage à flux décroissant peut être modélisée par des lois comportementales simples. Le modèle suivant 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. Ce modèle prend en compte la cinétique de séchage de différents types de produits séchés dans diverses configurations :

$$\left(-\frac{dX}{dT}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 (T, Hr, Ui) = \left(\frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}}\right)^\beta \quad (\text{II-8})$$

II.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.5.1. Obtention de la courbe de séchage :

Elle représente la variation de la teneur en eau de la boue en fonction du temps, elle représente donc la vitesse de séchage.

II.5.1.2. 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 selon que la vitesse de séchage est en fonction du temps ou de la teneur en eau sur base sèche.

II.5.1.3. Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage :

Il est important de connaître la courbe de séchage car à partir de la teneur en eau initiale et d'équilibre on pourra décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelles conditions de l'air.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

La démarche consiste à déterminer la vitesse de séchage à un instant t $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$ rapportée à la vitesse de séchage de la 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 . la teneur en eau d'équilibre X_{eq} est obtenue à partir de l'isotherme de sorption.

Les cinétiques de séchage sont représentées sous la forme :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 f(X_r) \quad (\text{II-9})$$

X_r est la teneur en eau d'équilibre définie par :

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (\text{II-10})$$

$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ 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 obéir aux conditions suivantes :

$$f(X_r) = 0 \text{ pour } X_r = 0 ; 0 \leq f(X_r) \leq 1 \text{ pour } 0 \leq X_r \leq 1.$$

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 : [13]

$$f(X_r) = A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3 \quad (\text{II-11})$$

A_1 , A_2 et A_3 sont des paramètres à déterminer expérimentalement.

II.6. Procédés de séchage sous serre

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 vantelles (le taux d'évaporation étant augmenté par l'effet de serre): l'ouverture des côtés favorisant les échanges d'air, donc

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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 résiduairees 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.

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. [8]

II.7. 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, permet 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 V.h^{-1} minimum, où V représente le volume de la serre) 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 afin de 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.[4]

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

II.8. 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 deux types de serre dont le choix dépend des conditions d'installation et des garanties demandées:

II.8.1. 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 [3].

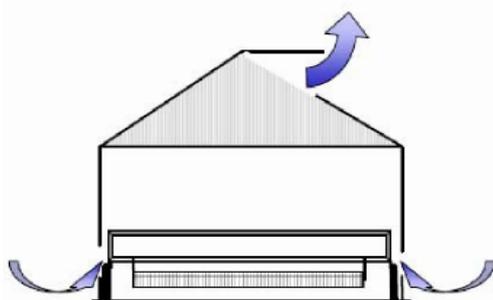


Figure II.2. Exemple de serre ouverte[3]

II.8.2. Serre fermée

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". C'est-à-dire dans le cas d'un pays à climat froid.

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

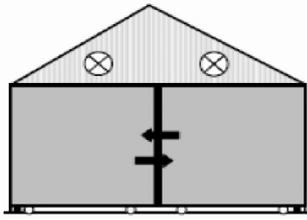


Figure II.3 Exemple de serre fermée - Extraction en pignon [3]

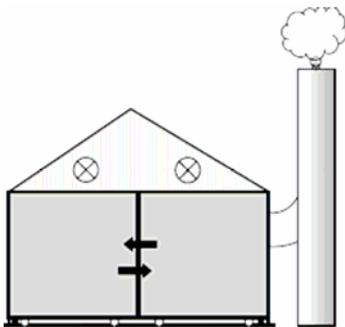


Figure II.4 Exemple de serre fermée - Extraction par cheminée [3]

II.9. 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. [3]

Le remplissage et la vidange des serres se font 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.

II.10. 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 [3].

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

II.11. 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 présentés ci-dessous.

II.11.1. Cochon électrique

Ce système qui est un séchage solaire simple utilise un robot mobile et partiellement automatisé (voir photo ci-dessous). Ce séchage nécessite des investissements relativement faibles. Une bêche de retournement automatique «cochon électrique» est utilisé 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 d'un courant d'air intensif sur la boue. [4]

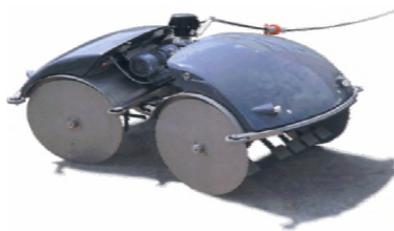


Figure II.5 Cochon électrique “Elektrischer Schwein [4]

II.11.2 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 pas nécessité de circuler dans le hall avec un appareil de chargement. Les halls sont également couverts de feuilles plastiques

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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.

Le rouleau scarificateur (Figure II.6) à un diamètre de 1 mètre et une emprise de 3 mètres comprenant un système d'arrêt d'urgence en cas de contact [3].



Figure II.6 Rouleau scarificateur du système IST [4]

II.11.3. Procédé Soliamix (Vélia)

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 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 qui garantit une homogénéisation optimale de l'ambiance de la serre ;
- une ventilation forcée permettant l'extraction de l'air humide [5].



Figure II.7 Système de retournement du procédé Soliamix [4]

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

II.12. 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 :

- ***Héliantis*** : procédé IST proposé par Degrémont
- ***Solia*** : procédé Soliamix proposé par Veolia
- ***Ecodyer*** : procédé Cochon électrique proposé par Thermo-system
- ***KULT SRT*** : procédé Cochon électrique proposé par Huber technology

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

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

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

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

Référence Bibliographique :

[1] 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).

[2] 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).

[3] Amadou, H.,

Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaines [**en ligne**]. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg I, (2007), 248 p. disponible sur <http://scd-theses.u-strasbg.fr/view/name/AMADOU,_Haoua.html> (consulté le 31/01/2011)

[4] 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).

[5] Cornice, R.,

« Conditionnement et traitement des boues des stations d'épuration des eau 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.

[6] Gross, T. S. C.,

« Thermal drying of sewage sludge » J. IWEM, 7, 255-261 (1993)

[7] Degremont – Boues – Filières traitement [**en ligne**] disponible sur <<http://www.degremont.fr/fr/savoir-faire/technologies/traitement-des-boues/filieres-traitement>> (consulté le 17-03-2011).

[8] Unité de séchage de boue – SoliaTM [**en ligne**] disponible sur <<http://www.directindustry.fr/prod/veolia-water-sti/unites-de-sechage-des-boues-25260-461408.html>>. (Consulté le 17-03-2011).

[9] Wikipédia – séchage [**en ligne**] disponible sur <fr.wikipedia.org/wiki/Séchage> (consulté le 17/03/2011).

Chapitre II : notions générales sur le séchage et les différents procédés de séchage sous serre

[10] : Thomas Ryan

Solutions, mesures physiques, l'activité de l'eau, Croissy Beaubourg, janvier 2003.

<[Http://www.mesures.com/archives/038_041_SOL.pdf](http://www.mesures.com/archives/038_041_SOL.pdf)> (consulté le 10 mars 2011).

[11] : Yves Jannot

Isotherme de sorption : Modèles et détermination, juillet 2008.

'[Http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf](http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf)' ; (consulté le 10 mars 2011).

[12] : S. Akkad¹, A. Idlimam¹, A. Lamharrar¹, M. Essaber, M. Kouhila¹ et J. Costa

Evaluation des isothermes de désorption et de la chaleur isostérique de deux plantes aromatiques et médicinales par la méthode gravimétrique statique en vue de leur séchage, Alger 2008.

[13] : A. Khouya et A. Draoui

Détermination des courbes caractéristiques de séchage de trois espèces de bois, Maroc, Mars 2009

[14] : J.M. MOULLARD

Qualité et siccité dans un procédé de déshydratation des boues résiduaires, université de technologie Compiègne juin 2004.

CHAPITRE III :

Bilan énergétique et formulation d'un modèle numérique

III.1. Introduction

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 de prendre mieux en compte les processus mis en jeu. L'intégration des connaissances acquises sous forme d'un modèle global de séchage solaires de boues résiduelles urbaines a pour but de permettre, pour une configuration de système donnée, de prévoir l'évolution de la vitesse de séchage nécessaire à l'obtention d'une siccité souhaitée. Le modèle recherché devra par ailleurs permettre de comparer différents modes de conduite du procédé et donc œuvrer à une gestion plus optimale de ce moyen de séchage.

III.2. Démarche globale de modélisation

Le séchage solaire des boues repose sur la mise en contact, sous une serre, d'une boue étalée sur une dalle béton.

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 résiduelles urbaines. Certains ont étudié la caractérisation de l'aptitude de boues résiduelles à la déshydratation dans le cas particulier d'un séchage sous atmosphère immobile et confinée, où les phénomènes de convection et rayonnement sont limités. [1]

D'autres étudient 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 support (la dalle) chauffé au moyen de réseaux de tubes enterrés véhiculant de l'eau chaude. Le travail a consisté également à établir une commande de température et d'humidité relative pour le séchoir. [2]

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

Dans ce domaine, plusieurs modèles énergétiques de serre ont été également publiés, dont celui de Comary et Nicolas, 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.[3]

Monteil 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.[4]

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).

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 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 III.1) représente schématiquement l'ensemble des éléments à prendre en compte et les différents processus mis en jeu. [5]

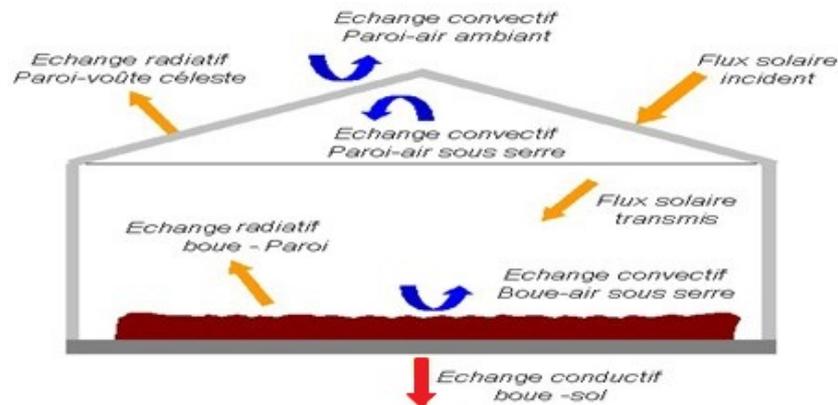


Figure III.1 : différents phénomènes physiques pour un séchage solaire [5]

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 a 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 rayonnement solaire global) ;
- 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 qu'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.

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).

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 [6].

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. 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 hauteur (30 à 40 cm), compatibles avec la taille des retourneurs [6]. 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 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.3.2. 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, mesurées à une distance supposée constante de la paroi, sont des facteurs qui interviennent dans l'échange convectif avec la face externe de la couverture.
- le rayonnement solaire global parvenant au sol, sur une unité de surface horizontale.

III.4. Ecriture des bilans thermiques et massiques [5] :

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 :

$$\Delta E = W + Q \quad (\text{III-1})$$

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

$$\frac{dE}{dt} = P_{méca} + P_{cal} \quad (\text{III-2})$$

III.4.1. 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 :

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

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

$IndE$: indice correspondant à l'élément émetteur

$IndR$: indice correspondant à l'élément récepteur

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 III.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

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

III.4.2. Bilans énergétiques :

III.4.2.1. Bilan sur la couverture :

$$\varphi_{Rc} + \varphi_{Ivc} + \varphi_{Ibc} + \varphi_{Caic} - \varphi_{Ccae} = \varphi_{ic} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

φ_{Rc} : Flux net de rayonnement solaire reçu par la couverture

φ_{Ivc} : Flux de rayonnement infra rouge reçu par la couverture

φ_{Ibc} : Flux de rayonnement infra rouge émis par la boue

φ_{Caic} : Flux convectif de l'air intérieur vers la couverture

φ_{Ccae} : Flux convectif de couverture vers l'air extérieur

φ_{ic} : Flux d'accumulation d'inertie thermique de la couverture

III.4.2.2. Bilan sur l'air :

$$\varphi_{Cbai} - \varphi_{Caic} - E_{aiae} = \varphi_{iai} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

φ_{Cbai} : Flux convectif de la boue vers l'air intérieur

φ_{Caic} : Flux convectif de l'air intérieur vers la couverture

E_{aiae} : Flux d'énergie de l'air intérieur vers l'air extérieur

φ_{iai} : Flux d'accumulation d'inertie thermique de l'air intérieur

III.4.2.3. Bilan thermique de la boue

$$\varphi_{Rb} + \varphi_{Icb} - \varphi_{Cbai} - \dot{m}L_v = \varphi_{ib} \quad (\text{III-5})$$

Avec :

φ_{Rb} : Flux net de rayonnement solaire reçu par la boue

φ_{Icb} : Flux de rayonnement infra rouge reçu par la boue

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

L_v : Chaleur latente de vaporisation de l'eau

III.4.2.4. Bilans massiques

$$\dot{m} = M_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) \quad (\text{III-6})$$

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.4.3. Expression des flux énergétiques

III.4.3.1. 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. [12].

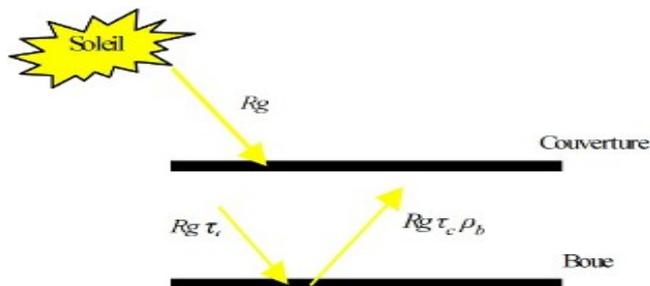
En admettant comme suffisante l'hypothèse que, la couverture se comporte globalement comme une paroi horizontale de même surface que la surface du sol de la serre, la détermination des différents bilans nets du flux solaire absorbé par chaque élément est effectuée en utilisant des coefficients globaux 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. [6]

Figure III.2. : Schéma des flux solaires absorbés



III.4.3.2. Flux net absorbé par la couverture

$$\varphi_{Rc} = Rg a_c(1 + \tau_c \rho_b) \quad (\text{III-7})$$

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 boue	[-]

III.4.3.3. Flux net absorbé par la boue :[7]

$$\varphi_{Rb} = Rg \tau_c a_b \quad (\text{III-8})$$

Avec :

a _b :	Coefficient d'absorption de la boue
------------------	-------------------------------------

III.4.3.4. 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, la voûte céleste est également incluse comme source de rayonnement.

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 [12].

➤ 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 reçu par la couverture du milieu extérieur s'écrit :

$$\varphi_{Icv} = \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) \quad (\text{III-9})$$

Avec :

σ	: Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
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 [13] :

$$T_v = (T_{ae} - 6) \frac{N}{8} + 0.0552 T_{ae}^{1.5} \left(1 - \frac{N}{8}\right) \quad (\text{III-10})$$

Avec : T_{ae} = température de l'air extérieur [°K]
 N = Nébulosité du ciel [-]

Dans le cas de notre étude, nous considérons un ciel clair ($N=0$)

➤ 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 : $\varphi_{Icb} = -\varphi_{Ibc}$

Le flux d'énergie échangé entre la surface de la boue et celle de la couverture est donné par la relation [12] :

$$\varphi_{Ibc} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) \quad (\text{III-11})$$

Avec : ε_b : Emissivité de la boue (-)
 T_b : Température de la boue (K)
 T_c : Température de la couverture (K)

III.4.3.5. 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 champ 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 [8] :

$$\varphi_{Csf} = h S (T_s - T_f) \quad \text{(III-12)}$$

Avec :

h :	coefficient de convection	[W.m ⁻² .°C ⁻¹]
S :	surface d'échange	[m ²]
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;
- de la nature du fluide ;
- de la surface du solide.

III.4.3.5.1. Echange convectif milieu extérieur – couverture :

Cet échange traduit l'effet du vent sur la surface extérieur de la couverture. Le coefficient de convection est donné par l'équation de McAdams [9]

$$h_e = 5.67 + 3.86 U_v \quad \text{(III-13)}$$

Avec :

U_v :	Vitesse du vent	[m.s ⁻¹]
---------	-----------------	----------------------

III.4.3.5.2 Echange convectif au sein du modèle :

La convection naturelle est un phénomène de la mécanique des fluides, qui se produit lorsqu'une zone change de température et qu'elle se déplace alors verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède. Le changement de température d'un fluide influe en effet sur sa masse volumique, qui se trouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant. De tels déplacement s'appellent des mouvements de convection.[11]

$$Nu = \frac{h L}{\lambda} \quad \text{(III-14)}$$

Le nombre de Nusselt qui caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi est relié aux conditions opératoires par l'intermédiaire de lois de puissance portant sur des nombres adimensionnels. En convection naturelle, le nombre de Nusselt est donné par l'expression :[10]

$$Nu = A(Gr.Pr)^B \quad \text{(III-15)}$$

Nombre de Grashof : $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_c^3 \rho^2}{\mu^2}$

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{v C_p \rho}{\lambda}$

Avec :

g :	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
β :	Coefficient de dilatation volumique de l'air	[°C ⁻¹]
ΔT :	écart de température boue-air	[°C]
ρ :	Masse volumique de l'air	[kg.m ⁻³]
μ :	Viscosité dynamique de l'air	[Pa.s]
L_c :	Longueur caractéristique	[m]
v :	Viscosité cinématique de l'air	[m.s ⁻²]
λ :	Conductivité thermique de l'air	[W.m ⁻¹ .°C ⁻¹]
C_p :	Chaleur massique de l'air	[J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]

Les relations utilisées pour calculer les différentes grandeurs (β , ρ , λ , C_p ,...) qui interviennent dans les nombres adimensionnels sont répertoriées 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, les expressions du coefficient de convection suivante pour une plaque plane dans l'air [8] :

- Dans le cas d'un flux descendant

$$Nu = 0.27(Gr.Pr)^{1/4} \tag{III-16}$$

Valable si $10^7 < Gr.Pr < 10^{11}$

- Dans le cas d'un flux ascendant :

$$Nu = 0.14(Gr.Pr)^{1/3} \tag{III-17}$$

Valable si $2 \cdot 10^7 < Gr.Pr < 3 \cdot 10^{11}$

III.4.3.6. 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 suivante :

$$M_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) = K \cdot S (P_{sat} - P_v) \tag{III-18}$$

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	[Pa]
K :	Coefficient de transfert massique	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]

Le coefficient de transfert K se déduit du coefficient d'échange convectif h par la relation de Lewis [12]:

$$K = \frac{h}{\rho C_p} \quad (\text{III-19})$$

III.4.3.7. Inertie thermique :

L'inertie thermique correspond à la variation de l'énergie interne contenue par un corps entre deux instants. Elle est définie par la relation différentielle suivante

$$\varphi_i = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{III-20})$$

On désigne usuellement le produit $\rho V C_p$ comme étant la capacité calorifique du corps exprimé en $[\text{J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$ et qui quantifie l'énergie totale que doit emmagasiner le corps pour augmenter sa température d'un degré.

L'échange de chaleur 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 :

$$E_{ai\text{ae}} = \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (\text{III-21})$$

Avec :

C_p : Chaleur massique de l'air sec	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
Q : Débit volumique de l'air	$(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
ρ : masse volumique de l'air	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

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

$$Q = R \cdot V \quad (\text{III-22})$$

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 [6].

Dans le cadre de notre étude, on ne prend pas en compte ce flux d'énergie, car on n'a pas placé d'extracteurs en raison de manque de moyen.

III.5. Formulation du système d'équation du modèle :

- **Bilan d'énergie sur la couverture :**

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = R_g a_c (1 + \tau_c \rho_b) + \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) + h_c (T_c - T_{ai}) - h_e (T_c - T_{ae}) \quad (\text{III-23})$$

- **Bilan d'énergie sur l'air :**

$$\rho V C_p \frac{dT_{ai}}{dt} = h_b S_b (T_b - T_{ai}) - h_c S_c (T_c - T_{ai}) - \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (\text{III-24})$$

- **Bilan d'énergie sur la boue :**

$$m_b C_p \frac{dT_b}{dt} = R_g S_b a_b \tau_c - \frac{\sigma S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_b S_b (T_{ai} - T_b) - \dot{m} L_v \quad (\text{III-25})$$

- **Bilan massique sur la boue :**

$$\dot{m} = M_s \left(-\frac{dX}{dt} \right) = K \cdot S (P_{sat} - P_v) \quad (\text{III-26})$$

III.6. Résolution du système d'équations :

La modélisation des boues en régimes dynamique permet de prendre en compte des données climatiques telles que le flux solaire global, la température et la géométrie de la serre, les conditions climatiques de la région ainsi que les conditions initiales des boues (températures, masse et siccité). 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 et la teneur en eau de la boue.

Ce système d'équation sera résolu par la méthode classique de Runge Kutta d'ordre 4 dans l'environnement de Matlab (voir Annexe II).

III.6.1 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

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 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 le temps de simulation.

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).

Référence Bibliographique :

[1] 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.

[2] Botramamy, P-A.,

Modélisation d'un séchoir-serre pour boue d'épandage. [en ligne] Thèse de doctorat, Université de Perpignan (2006). 245 p. disponible sur <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3265167> (consulté le 20/03/2011)

[3] 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).

[4] Monteil, C.,

Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles [en ligne] thèse de 3eme cycle Institut national polytechnique de Toulouse, (1985). 168pp. disponible sur < <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=8065967> > (consulté le 20/03/2011)

[5] Slim, R.,

Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boue de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur [en ligne]. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, (2007), 147 p. disponible sur < <http://www.agronomy-journal.org/=129> > (consulté le 25/02/2011).

[6] Amadou, H.,

Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaines [en ligne]. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg I, (2007), 248 p. disponible sur <http://scd-theses.u-strasbg.fr/view/name/AMADOU,_Haoua.html> (consulté le 31/01/2011)

[7] Çengel, Y-A.,

Heat and mass transfer, A practical approach, 3^{ème} édition, Ed Springer, (2000)

[8] KREITH, F.,

Transmission de la chaleur et thermodynamique, 2^{ème} édition, Ed Masson & Cie (Paris), (1967)

[9] McAdams, W.H.,

Heat Transmission, 3^{ème} édition, Ed McGraw-Hill New York, (1954)

[10] KREITH, F.,

The CRC HandBook of thermal engineering, 2^{ème} édition, Ed McGraw-Hill, 261-348 p (2000)

[11] **Wikipédia** Convection : convection naturelle [**en ligne**] disponible sur <http://fr.wikipedia.org/wiki/Convection#Convection_naturelle>. (Consulté le 15-04-2011)

[12] **Daguenet, M.,**

Les séchoirs solaires : théorie et pratique [**en ligne**].1^{er} Ed. Unesco 1985.Disponible sur :<<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001234/123413fb.pdf>> (consulté le 03/05/2011)

[13] **Mesmoudi, K., Soudani, A. et Serir, L.**

Modèle de bilan énergétique d'une serre agricole sans couvert végétal. Revue des énergies renouvelable [**en ligne**].2008, vol 11, n°1, pp. 3-6. Disponible sur <www.cder.dz/download/Art11-1_6.pdf > (consulté le 06/06/2011)

CHAPITRE IV :
Matériels et méthodes

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Dispositif expérimental :

La réalisation de la serre expérimentale [8] entre dans le cadre des projets de recherche menés par l'Equipe de Recherche « Epuraton et valorisation des eaux de rejet » de l'Unité de Développement des Equipements Solaires « UDES » de Bou-Ismaïl.

Deux principales parties composent la serre à savoir un bac en polystyrène et une couverture en verre.

IV.1.1. Le Bac:

Le bac est récupéré à partir d'un distillateur solaire à effet de serre. C'est un réservoir usiné à partir d'un moule et réalisé par un matériau composé de fibres de verre et de résine. Sa partie inférieure est thermiquement isolée par une couche de polystyrène. Il est monté sur un support métallique de 130 cm et présente les caractéristiques techniques suivantes [9] :

Tableau IV.1 : caractéristiques techniques du bac [9]

Absorbeur	couleur noir
Longueur	1.400 m
Largeur	1.205 m
Hauteur	10 cm
Surface totale	1.68 m ²
Surface absorbante	1.39 m ²
Epaisseur de l'isolant	40 mm
Conductivité thermique de l'isolant	0.042 W.m ⁻¹ .°C ⁻¹

Pour la conduite des expérimentations, deux bacs identiques sont utilisés. Le premier est transformé en serre. Le second constitue le témoin ; sans couverture, il est utilisé comme lit de séchage à l'air libre.

La figure (IV.1) suivante représente le bac utilisé pour la réalisation de la serre du séchage solaire :

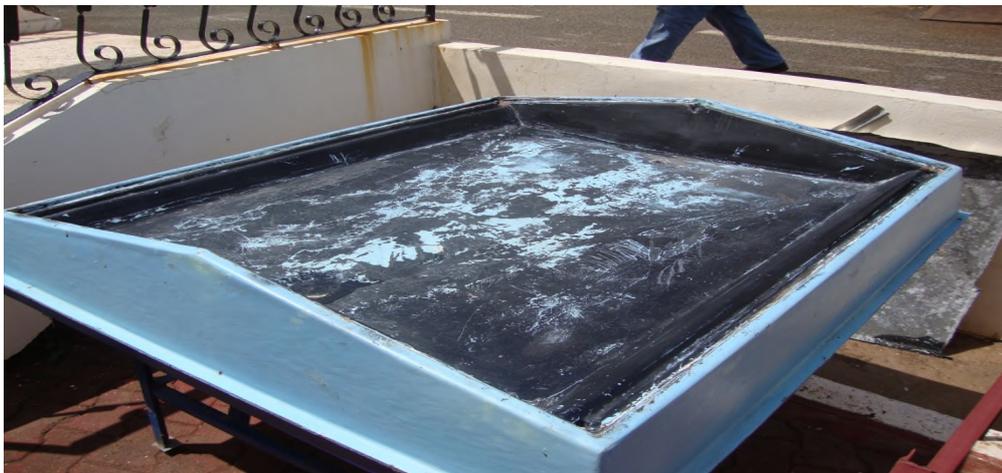


Figure IV.1: bac servant au séchage en serre ouverte

IV.1.2. Montage de la couverture :

La couverture est en verre de type « sodocalcique » d'une épaisseur de 5 mm et se divise en deux parties :

- la toiture composée de deux plaques,
- les côtés latéraux constitués par quatre plaques.

IV.1.2.1. Montage des côtés latéraux :

La hauteur des quatre côtés latéraux est de 30 cm. Deux côtés sont de forme rectangulaire avec une longueur de 130 cm. Deux ouvertures circulaires de douze centimètre de diamètre sont prévues au niveau de chaque côté pour assurer la ventilation de la serre par convection naturelle.

Les deux autres sont en forme de « V » inversé avec une profondeur de 10 cm qui permet d'épouser la forme du bac et d'assurer l'inclinaison de la toiture. Une ouverture rectangulaire de 5 cm sur 7 cm est prévue au niveau de chaque côté pour assurer la ventilation de la serre par convection naturelle.

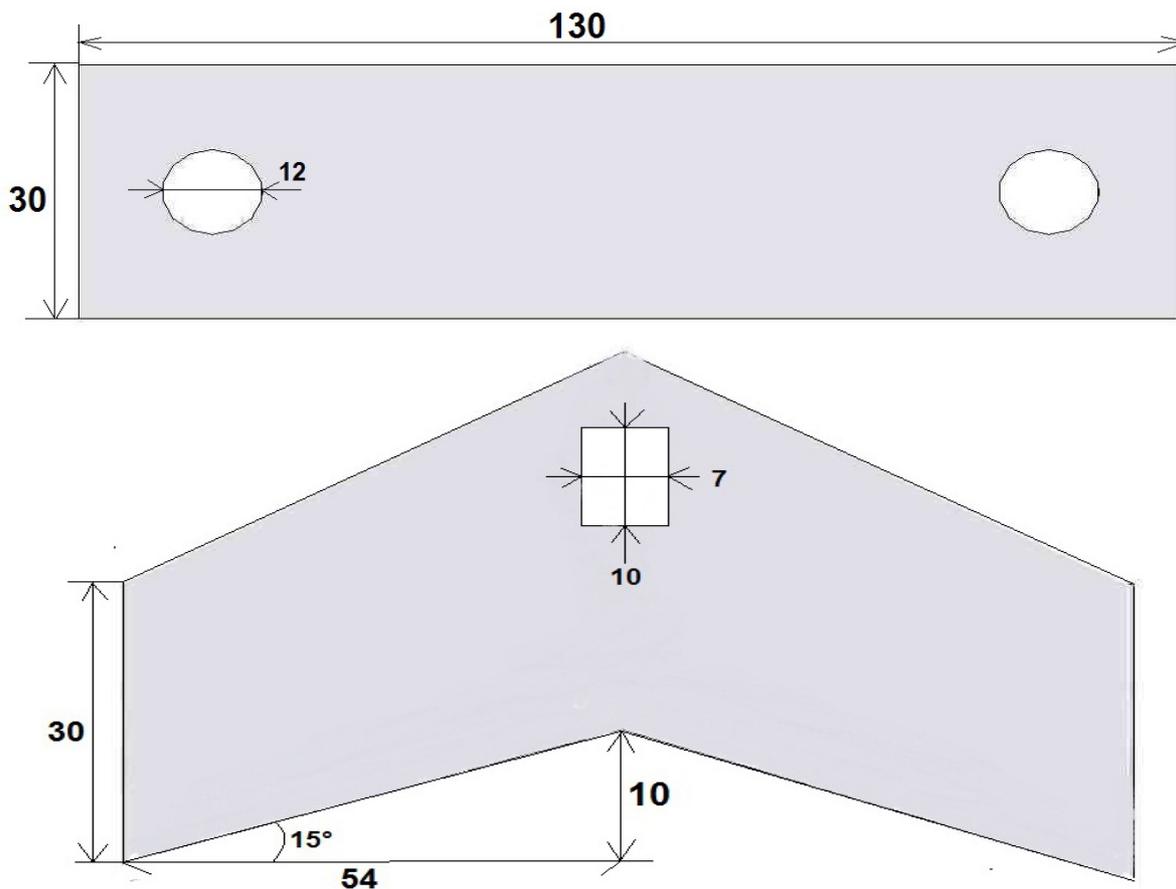


Figure IV.2: plaques en verre pour la couverture latérale

La figure (IV.3) suivante représente le bac et la pose du mur en verre nécessaire pour le séchage :



Figure IV.3: Serre ouverte sans la toiture

Pour consolider la structure en verre, une structure en aluminium est prévue afin de garantir la stabilité et l'appui de la toiture sur les murs latéraux, elle est composée de 4 tiges de 30 cm entre les plaques de verre latérales, 2 traverses de 130 cm.

IV.1.2.2.Montage de la toiture :

La mise en place de la structure en aluminium s'avère plus compliquée que prévu, c'est pour cela que nous avons placé la toiture directement sur le mur en verre avec de la pâte siliconée entre elles à l'intérieur et à l'extérieur pour les maintenir stables.

La figure (IV.4) suivante représente le montage final de la serre avec la toiture et les thermocouples :

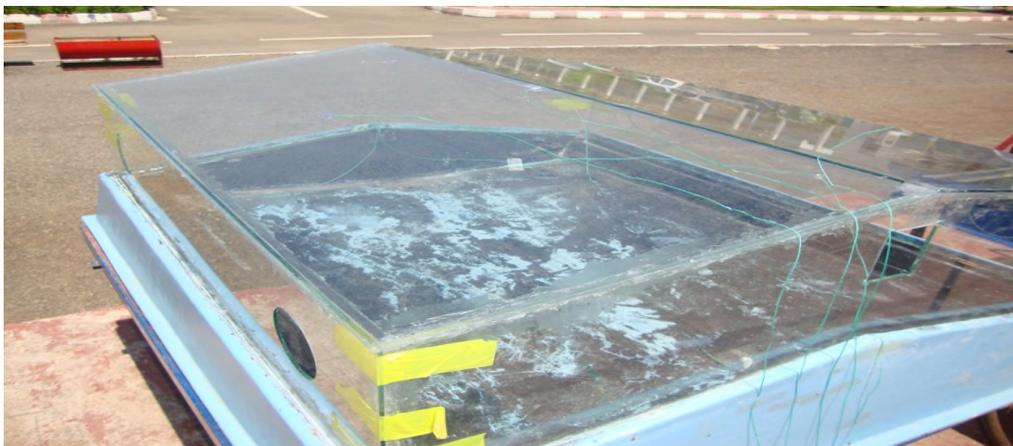


Figure IV.4: montage final de la serre et des thermocouples

IV.1.2.3.Mise en place des thermocouples :

Pour cette serre, nous avons placé 7 thermocouples, 3 sur le bac en contact avec la boue, 1 à l'extérieur, 1 pour l'air intérieure et 2 autres pour la toiture (du côté intérieur et extérieur).

La figure (IV.5) ci-dessous représente la manière dont les thermocouples doivent être posés sur la serre :

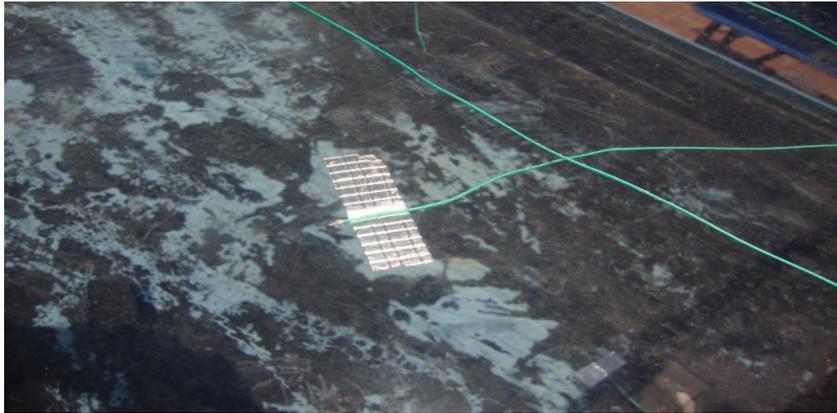


Figure IV.5: mise en place d'un thermocouple

IV.2. Conduite des expérimentations

Le séchage solaire des boues résiduelles sous serres s'intéresse surtout à la cinétique du séchage (la vitesse à laquelle évolue le séchage d'un produit) ainsi qu'à la teneur en eau initiale et finale du produit. Pour étudier ce type de processus, il faut déterminer les conditions dans lesquelles le séchage s'est déroulé. La mesure des paramètres physiques intervenant dans le séchage s'avère très important pour la définition du procédé car l'évolution de ces paramètres engendre systématiquement un changement dans le processus de séchage.

Les paramètres à mesurer dans le séchage solaire des boues sont les suivants :

La température (air intérieure et extérieur, boue, couverture), l'humidité (air intérieure et extérieure ainsi que celle de la boue), vitesse du vent et rayonnement.

La vitesse du vent est calculée en utilisant une corrélation (Voir Annexe III), le rayonnement est pris par la moyenne des mesures prises dans la journée, ces mesures nous sont fournies par la station météo installée au sein de la station.

La mesure de la température se fait par des thermocouples, l'acquisition des données se fait par un appareil nommé « le fluke ».

IV.2.1. Le FLUKE :

C'est un acquiesiteur de données qui fait transformer un signal en une lecture directe sur son écran. La version utilisée est la 2625A Hydra série 2.

La figure (IV.6) représente le système d'acquisition de données pour la température :



Figure IV.6: système d'acquisition de données pour la température (FLUKE)

Chapitre IV : Matériels et méthodes

C'est une unité d'acquisition capable de mesurer des tensions AC et DC, température par thermocouples et RTD, de résistance, et la fréquence. Il dispose de 21 canaux de mesure, 8 numériques lignes d'entrée / sortie, une entrée du totalisateur, et quatre lignes de sortie d'alarme. L'unité d'acquisition de données est facilement portée à la main et peut être alimentée en courant alternatif ou courant continu. L'utilisateur peut choisir communications avec un ordinateur hôte sur un port RS-232 (standard) ou IEEE-488 Interface d'ordinateur (2620A/05).

IV.2.1.1 Mise en marche de l'appareil :

La mise en marche de l'appareil se fait grâce au bouton vert « POWER » situé en bas de l'écran d'affichage.

Pour bien choisir le mode de mesure adéquat ainsi que les différents réglages, il est indispensable de connaître le rôle et la fonctionnalité de chaque bouton.

La figure (IV.7) suivante indique la position et le rôle de chaque commande sur le « fluke » :

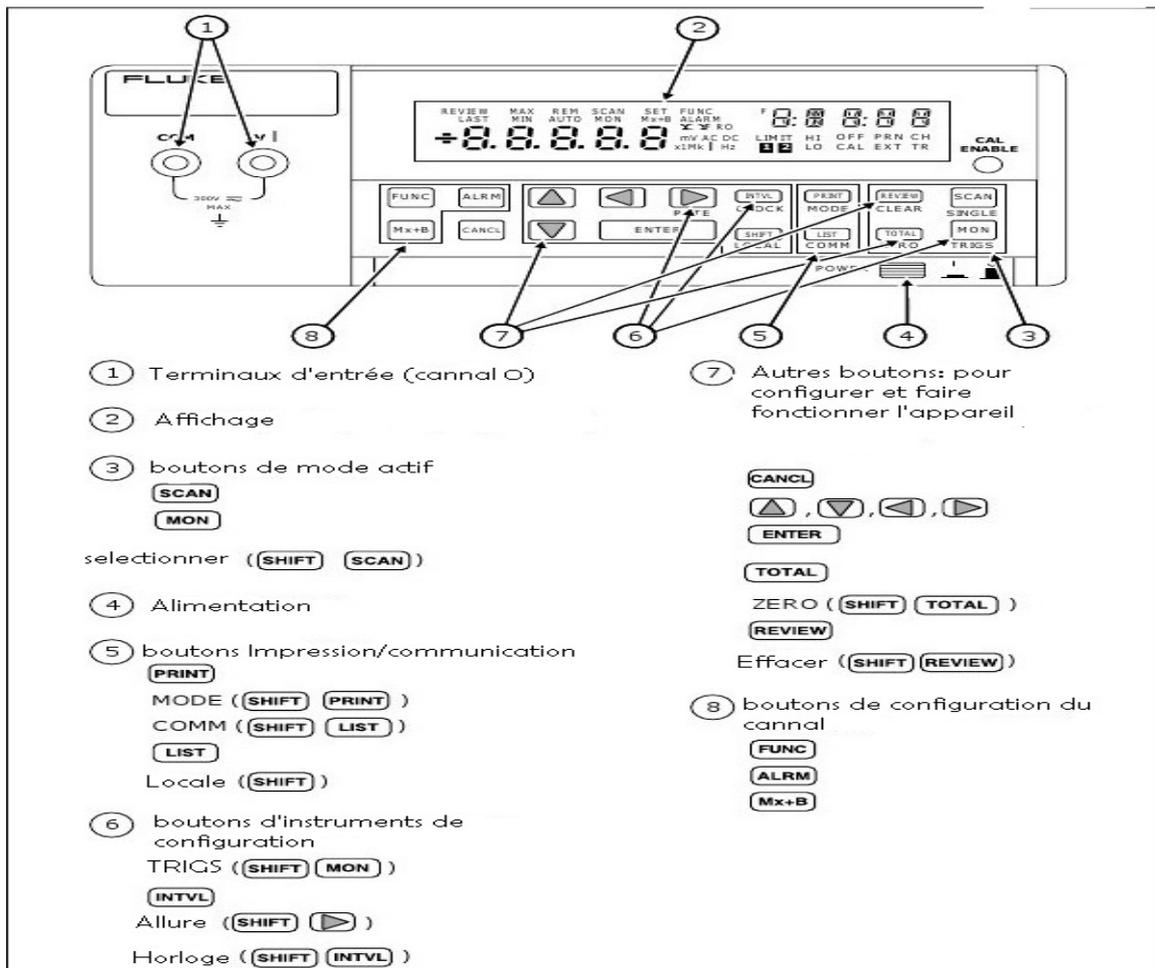


Figure IV.7: boutons de commande du FLUKE

IV.2.1.2. Configuration du canal :

Après avoir mis en marche l'appareil, il faut choisir et configurer les canaux à utiliser

Chapitre IV : Matériels et méthodes

pour les mesures.

Si on choisit par exemple le canal 2 à configurer (le choix se fait par les boutons haut et bas), on sélectionne ensuite le capteur « thermocouple » à l'aide du bouton « func » ; son type « k » ; et l'unité de la température « °C ».

Le choix se fait toujours à travers les boutons (haut/bas) et la validation du choix avec le bouton (entrer) [1].

Si on veut configurer tous les capteurs, on répète l'opération pour les capteurs.

On peut aussi changer l'affichage des données en multipliant la valeur lue par (MX+B), X étant la valeur mesurée.

Remarque :

La configuration précédente peut se faire directement sur l'ordinateur en utilisant logiciel « Fluke hydra logger »

La figure (IV.8) suivante représente la configuration du Fluke sur le Pc :

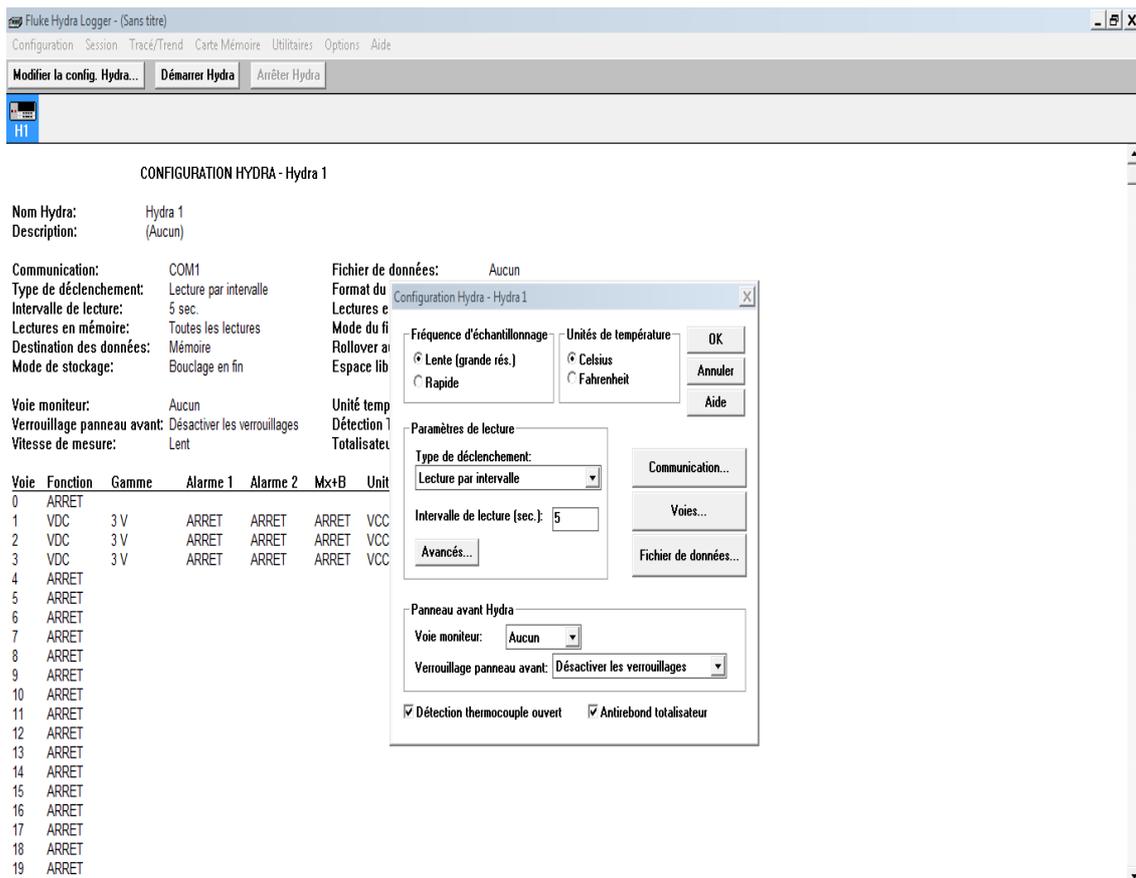


Figure IV.8: configuration du FLUKE avec les thermocouples (sur Pc)

IV.2.2 Les thermocouples :

Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de température. Ils sont bon marché et

Chapitre IV : Matériels et méthodes

permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur imprécision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La figure suivante représente le Principe de mesure du thermocouple :

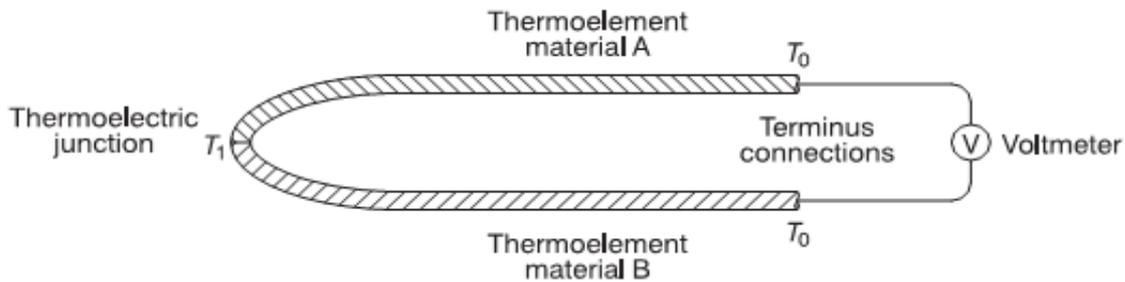


Figure IV.9: composition et fonctionnement d'un thermocouple

Le schéma ci-dessous présente le principe de la mesure de température par thermocouples. Les deux métaux a et b, de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T_1 et T_0 . Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions, $T_1 - T_0$. Les thermocouples ne mesurent pas une température, mais une différence de température. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. Il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température. La mesure passant par la détermination d'une différence de potentiel, sa précision dépend fortement du voltmètre utilisé. L'étalonnage d'un thermocouple consiste en la détermination de sa force électromotrice (fem) pour un nombre suffisant de températures connues de sorte qu'on obtient une courbe d'étalonnage. Le procédé nécessite un thermomètre de référence pour indiquer les températures sur une échelle standard, un moyen pour mesurer la force électromotrice du thermocouple et à un environnement contrôlé. Dans nos expériences, les thermocouples utilisés sont de type K Chromel/Alumel (5% Al, 95% Ni). [7]

La figure suivante représente un thermocouple de type K utilisé dans nos expériences :

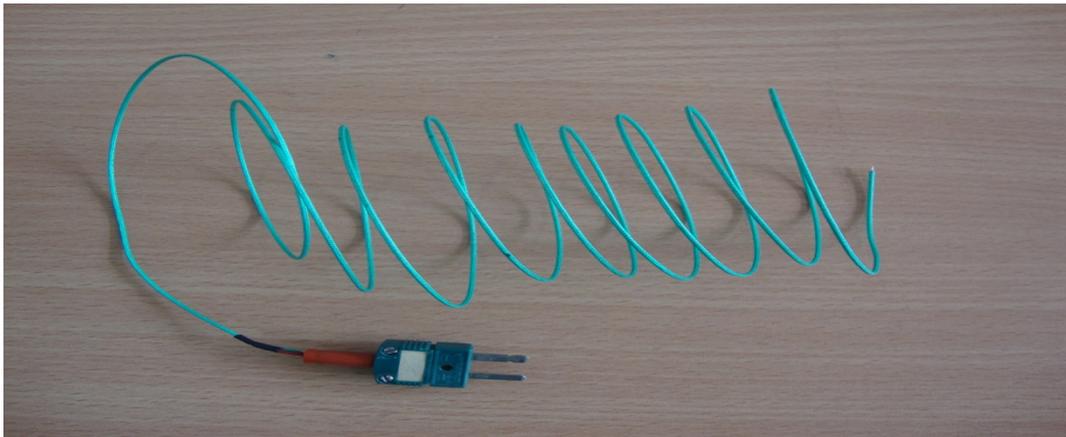


Figure IV.10 : Thermocouple de type K

Leurs plages de mesure sont très vastes (de -250°C à 1350°C) mais ils ne permettent pas une mesure à 0°C . Ils ont aussi la particularité d'être bon marché.

Les thermocouples sont reliés au fluke par le biais d'une carte sur laquelle sont insérés les deux terminaisons des thermocouples H (rouge) et L (vert).

La figure suivante représente le branchement des thermocouples avec l'acquisiteur de données :



Figure IV.11: branchement des thermocouples avec le FLUKE

La partie du thermocouple qui capte la température est située sur l'autre extrémité de ce dernier, il s'agit d'un fil qu'on met en contact avec le milieu à analyser (air, eau.).

IV.2.3. Mesure de l'humidité relative de l'air Hr :

La mesure de l'humidité relative se fait à l'aide du **psychromètre**. Ce système est constitué de deux thermomètres : un thermomètre ordinaire sec et un autre dont le bulbe est entouré d'un coton imbibé d'eau (mouillé). L'eau du réservoir dans laquelle trempe le coton est à la température de l'air ambiant.

La figure (IV.12) illustre le fonctionnement et la composition du psychromètre :

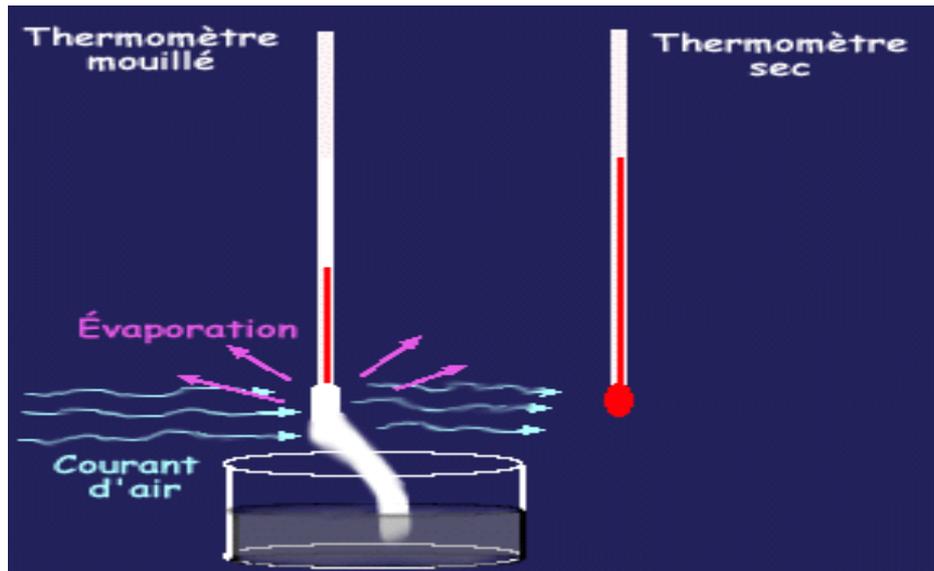


Figure IV.12: principe de fonctionnement du psychromètre

Un courant d'air passe autour des deux thermomètres, celui qui est sec indique la température de l'air et l'autre indique une température plus basse que celle du premier car il y a évaporation de l'eau du coton imbibé et cette évaporation entraîne un abaissement de la température. [2]

Remarque :

Si l'air est très sec, l'évaporation de l'eau contenue dans le coton sera importante et donc un abaissement de la température important.

Par contre si le coton est humide (autour de 100%), il n'y aura pas d'évaporation et le thermomètre deux indiquera la même température que celle de l'air.

Une fois les deux valeurs de température lues sur les deux thermomètres obtenues, on utilise la figure (IV.8) suivant pour calculer le pourcentage d'humidité relative de l'air. Il suffit de trouver le point de rencontre de la température du thermomètre mouillé avec celle du thermomètre sec.

La figure (IV.8) donne les valeurs des humidités relatives correspondantes aux températures des thermomètres sec et humide :

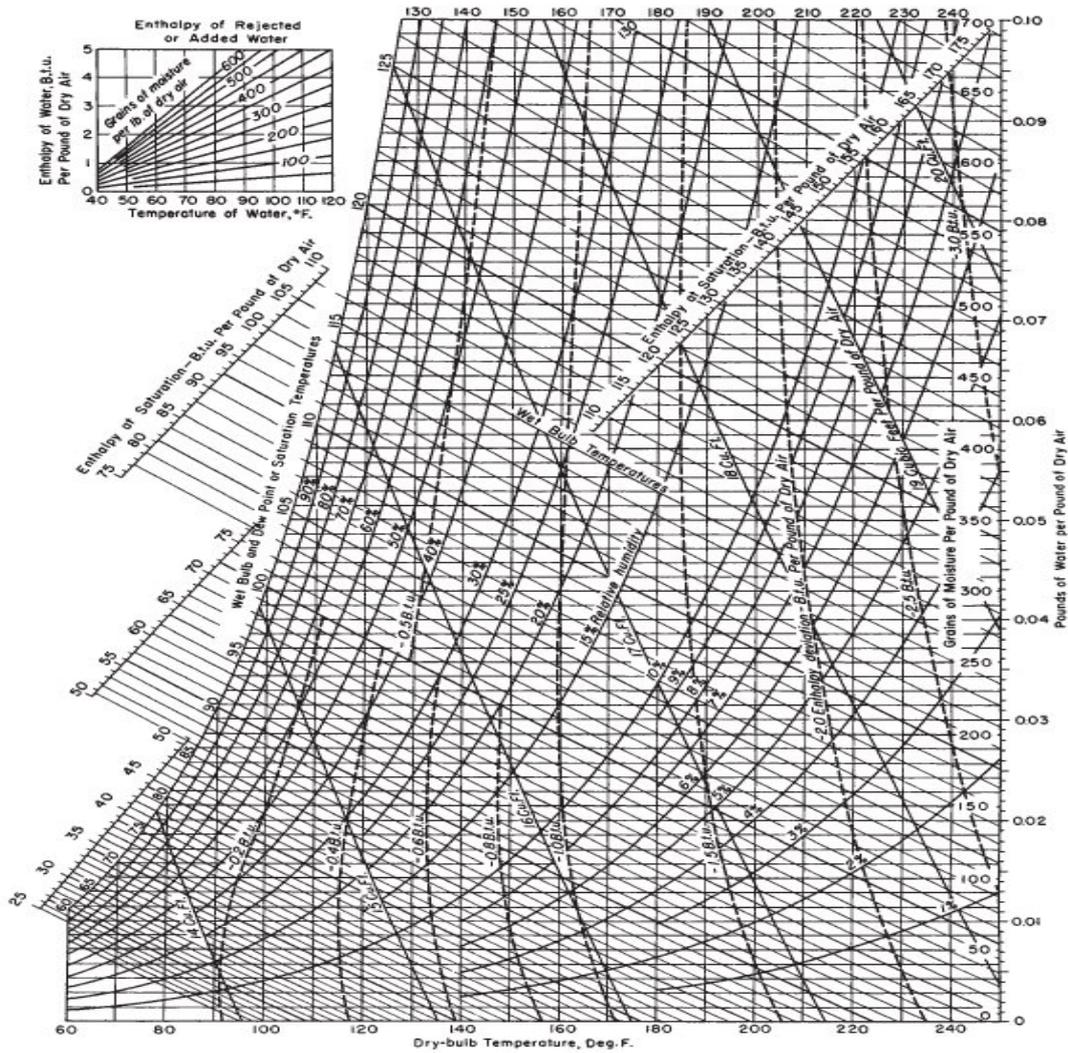


FIG. 12-3 Psychrometric chart—high temperatures. Barometric pressure, 29.92 inHg. To convert British thermal units per pound to joules per kilogram, multiply by 2326; to convert British thermal units per pound dry air-degree Fahrenheit to joules per kilogram-kelvin, multiply by 4186.8; and to convert cubic feet per pound to cubic meters per kilogram, multiply by 0.0624.

Figure IV.13: Obtention de l'humidité relative par psychromètre [6]

La lecture sur l'abaque précédent est représentée sur la figure suivante (figure IV.14) :

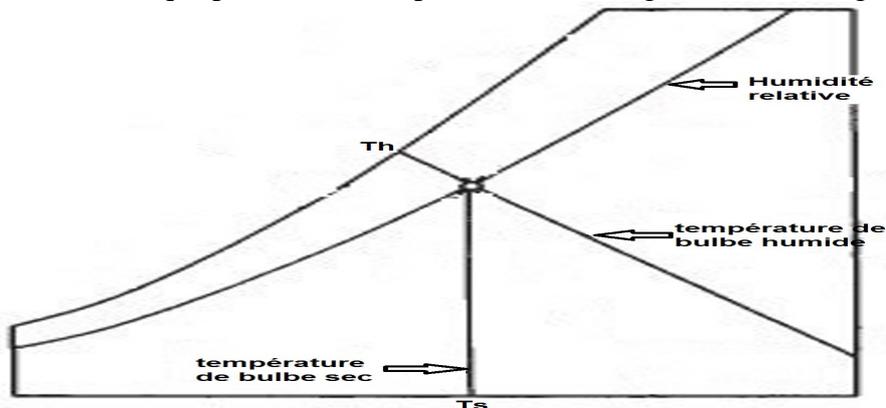


Figure IV.14: exemple de lecture sur l'abaque des humidités relatives [6]

Exemple :

Si la température de l'air (indiquée par le thermomètre 1) est de $24^{\circ}=75.2^{\circ}\text{F}$ et celle du thermomètre 2 est de $22^{\circ}=71.6$, l'humidité relative sera de 88%.

Remarque :

On utilisera dans nos expérimentations des thermocouples au lieu des thermomètres pour des raisons de disponibilité.

IV.2.4. Mesure de la teneur en eau de la boue :

Les boues sont constituées d'eau et de matières sèches. La siccité est le pourcentage massique de matière sèche. Ainsi, une boue avec une siccité de 10 % présente une humidité de 90 %.

L'humidité est évaluée par la quantité d'eau restant après un chauffage à 105°C pendant vingt quatre heures. Elle s'exprime généralement en pourcentage pondéral. À l'inverse, on parlera de la siccité [3].

C'est une donnée obligatoire à connaître pour toutes sortes de manipulations des boues lors du processus d'épuration des eaux usées, car la consistance de la boue est un état physique dépendant de l'humidité.

IV.2.4.1. Matériels :

- Etuve.
- Balance électronique.
- Becher.

IV.2.4.2. Mode opératoire :

La manipulation consiste à peser l'échantillon de boue à analyser pour avoir la masse brute (eau + matières sèches), cette masse sera notée M.

On fait passer cet échantillon dans une étuve à 105°C pendant 24 heures, on obtient de la matière sèche, on la pèse pour obtenir sa masse notée Ms.

La teneur en eau sur base sèche notée X est calculée de la manière suivante : [4]

$$X = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (\text{IV-1})$$

IV.2.5. Mesure de l'humidité de l'air extérieure :

La mesure de l'humidité de l'air extérieure est indispensable pour pouvoir obtenir l'isotherme de désorption du séchage à l'air libre. Pour cela on a utilisé l'hygrographe de type OSK 7157.

IV.2.5.1. Fonctionnement de l'hygrographe OSK 7157 :

L'hygrographe utilisé pour la mesure de l'humidité relative de l'air extérieur est représenté sur la figure suivante :



Figure IV.15: hygromètre pour la mesure de l'humidité extérieure

Préparation :

- Débloquer les deux crochets de fixation pour ouvrir le boîtier.
- Desserrer le contre-écrou et enlever le tambour d'horloge de l'axe.
- Remonter l'horloge à fond (environ 9 tours) avec la clé prévue à cet effet.
- Insérer le diagramme étroitement dans la rainure du tambour de l'horloge et fixer l'autre extrémité de l'horloge.
- Enlever l'attache du bras de plume et enlever la cartouche de la plume.
- Placer la barre de fixation/séparation de la plume près du tambour d'horloge, afin que le bec de plume soit en contact avec le diagramme.
- Ajuster la position de la plume sur l'échelle du temps.

La figure suivante présente la préparation de l'hygromètre pour la mesure de l'humidité :

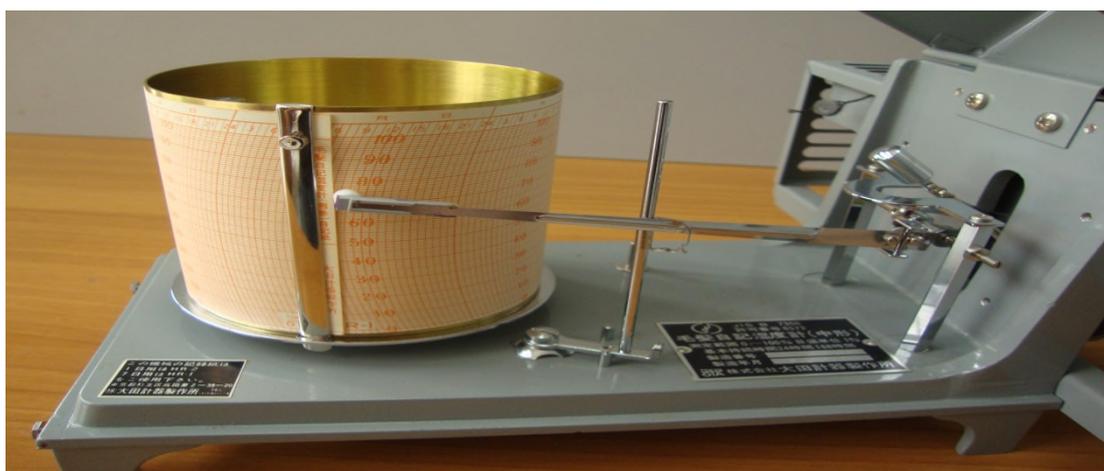


Figure IV.16: préparation de l'hygromètre à la mise en marche

Étalonnage de l'appareil :

- Mettre l'appareil en marche dans une ambiance saturée en humidité pendant une heure jusqu'à ce que l'appareil indique une seule valeur.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

- Ajuster cette valeur à l'aide de la clé prévue à cet effet jusqu'à la valeur 95 ou 96%.

L'hygrographe doit être mis dans un boîtier protecteur à l'abri du soleil en cas d'utilisation à l'extérieure comme c'est le cas dans nos expérimentations. Il est impossible de garantir la protection totale de cet appareil contre les rayonnements solaire et tous autre risque, étant donné que les expériences sont en continue même pendant la nuit On a donc opté pour utiliser une corrélation pour calculer l'humidité de l'air extérieure en utilisant les humidités minimales et maximales de la journée [10].

L'équation donnant l'évolution de l'humidité relative extérieure obtenue dans les mêmes conditions que celle de la température de l'air ambiant voir équation (AIII.2)

Il y a correspondance entre les humidités relatives calculées en utilisant la corrélation et les résultats obtenus en utilisant l'hygrographe (voir Figure AIII.2).

Référence Bibliographique

[1] : Fluke hydra manual

Hydra serie 2 Data acquisition unit, (consulté le 25 mai 2011).

[2] : ressources éducatives

Mesure de l'humidité relative

« http://galileo.cyberscol.qc.ca/intermet/eau/hum_rel_psychro.htm » (consulté le 05 juin 2011)

[3] : siccité des boues

Wikipédia, < <http://fr.wikipedia.org/wiki/Siccit%C3%A9>>, (consulté le 05 juin 2011)

[4] : Amadou, H ;

Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaines. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg I, (2007).

[6] : Charles G. Moyers, Ph D., P.E.,

Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying, The McGraw-Hill companies 1999.

[7]: Wikipedia – thermocouples. Disponible sur < fr.wikipedia.org/wiki/Thermocouple> (consulté le 2-06-2011).

[8] : S.IGOUD ; R. CHIKH ; L. LAMRAOUI et H. BENDJEBBAS

Etude et réalisation d'une serre pour l'étude de la stabilisation des boues résiduelles par énergie solaire. Rapport technique interne, UDES (2011).

[9] : B. ABBAD ; H. ABURIDEH ; Z. TIGRINE; Z. BELGROUN; N. BESSAS et A. NOUNIS

Le distillateur solaire à effet de serre. Rapport scientifique interne, UDES (2011).

[10] : Météo gratuite Bou Ismail – Prévision à 5 jours – Algérie – Tipaza [**en ligne**]. Disponible sur < <http://www.previmeteo.com/dz/2502939-meteo-bou-ismail.html>>

CHAPITRE V :

Présentation de la station d'épuration de TIPAZA

V.1.Introduction

Après la réalisation et la mise en service de la station d'épuration des eaux usées de Hadjout et suite à la réhabilitation de la STEP de Koléa, le projet de la station d'épuration de la ville de TIPAZA a été lancé dans le cadre d'un objectif globale et intégré aux autres infrastructures de la wilaya.

Ainsi, toutes les sources de pollution des eaux résiduaires de la wilaya de Tipaza, qu'elles soient dues à des activités économiques ou aux ménages, et avant la fin de cette décennie, seront traitées par au moins quatre stations d'épuration réparties selon les grands centres urbains, Hadjout, Koléa, Bousmail et Tipaza.

La station d'épuration de Tipaza se trouve entre Nadour et Chenoua. Elle a été certifiée selon la norme internationale ISO 14001 version 2004. Cette distinction demeure la première en son genre à l'échelle nationale et africaine dans le domaine de la gestion et de l'exploitation du système d'assainissement.

Elle à été mise en service en 2008 pour assurer l'épuration de la ville de Chenoua, Tipaza et Nador avec une capacité de 11200 m³/j pour 70000 eq/hab. Elle est de type boues activées à faible charge, son milieu récepteur est oued Nador.

La collecte des eaux usées vers la STEP est assurée par un réseau principale qui développe une longueur de 11150 mètres dont 8000 mètres gravitaire et sept station de relevage.

La figure suivante présente les différents ouvrages mis en place dans la STEP de TIPAZA :

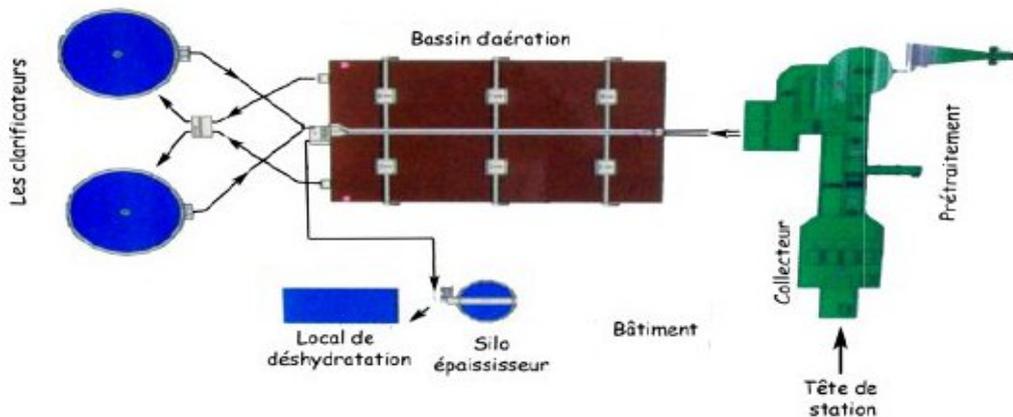


Figure V.1: Schéma descriptif de la station d'épuration de Tipaza [1]

V.2.Les traitements subits à la station de TIPAZA :

L'eau à traiter possède des caractéristiques spécifiques, le tableau suivant présente les différentes caractéristiques de l'eau traitée au niveau de la station de traitement de TIPAZA :

Tableau V.1: caractéristique de l'eau de l'ouvrage d'arrivée [1]

Volume journalier	11 200 m ³ /jour
Débit moyen 24h	467 m ³ /jour
Débit de pointe temps sec	803 m ³ /jour
DBO5 journalières	4200Kg/j soit 375 mg/1
MES journalières	4900 Kg/j soit 438 mg/1
pH	entre 6,5 et 8,5
Température	20°C

Le traitement au niveau de la station de TIPAZA peut se diviser en deux étapes :

V.2.1.Traitement des eaux :

Le traitement des eaux passe par les étapes suivantes :

a) Prétraitement :

Le prétraitement se compose des étapes suivantes :

➤ Dégrillage grossier :

Ce dégrillage est un compartiment d'entrée équipé d'un piège à cailloux et grille grossière du type de barreaux plat et nettoyage manuel, d'une largeur de 150 cm, inclinés à 70° et une distance entre barreaux de 5cm.

La figure suivante représente le dégrillage grossier au niveau du prétraitement de la station de Tipaza :



Figure V.2:dégrillage grossier au niveau du prétraitement [2]

➤ **Dégrillage fin :**

Ce système est en amont du déssableur-déshuileur est installée une grille fine avec un espacement de 20 mm et une inclinaison de 15°. Son nettoyage est mécanisé sur le canal d'amenée.

Les refus ou rejets du dégrilleur sont convoyés par un transporteur à bande vers un conteneur de stockage de 8 m³.

➤ **Dessablage-déshuilage :**

Ce système est prévu pour éviter la décantation des sables dans le bassin biologique et pour éliminer les huiles et graisses contenues dans l'eau brute, il est fait en béton armé et est installé en aval du dégrilleur fin. Cet ouvrage est prévu pour un débit 1167 m³/h. [1]

Le déssableur-déshuileur est représenté sur la figure suivante :



Figure 3: déssableur-déshuileur de la station de Tipaza [2]

Le mélange sable-eau obtenu est déchargé dans un classificateur de sable drainé vers un conteneur de stockage.

b) Traitement biologique :

➤ **Le bassin biologique :**

Le traitement biologique est de type « boue activée » à faible charge avec aération prolongée dans des bassins d'aération biologique.

Le bassin biologique dans la station de Tipaza est représenté par la figure suivante :



Figure V.4: bassin d'aération biologique de la station de Tipaza [2]

Le traitement biologique est effectué dans le compartiment aérobie à l'aide du processus aérobie par lequel les bactéries provoquent une oxydation directe des matières organiques des eaux usées à partir de l'oxygène dissous dans l'eau.

➤ **Décanteur secondaire :**

A l'intérieur de la station, il existe deux décanteurs secondaires, chaque décanteur est équipé d'un pont racleur tournant constitué d'une passerelle équipée de racleurs de fond et de racleurs de surface.

Les racleurs de fond ramènent les boues déposées au fond de l'ouvrage vers la poche centrale, ces dernières sont récupérées par gravité vers le poste de pompage des boues.

Les racleurs de surface récupèrent et dirigent les écumes flottantes vers la bêche de reprise. [1]

La clarification post-traitement est représentée sur la figure suivante :



Figure V.5: décanteur secondaire (clarificateur) en aval du traitement biologique [2]

c) pompes de recirculation des boues

Le poste de reprise des boues en aval des décanteurs dans la filière (boue) permet la recirculation des boues activées et le pompage des boues en excès vers l'épaississeur.

La recirculation est assurée par deux pompes de 200 m³/h chacune, dont une de réserve.

L'évacuation des boues en excès vers l'épaississeur est assurée par deux pompes immergées.

V.2.2. Traitement des boues :

a) L'épaississement :

Les boues en excès seront épaissies par gravité dans cet ouvrage, un mécanisme de rotation lent, augmente l'efficacité du processus d'épaississement et augmente le contenu des matières solides. [1]

L'épaississeur utilisé dans la station de Tipaza est représenté dans la figure ci-dessous :

L'épaississement est du type cylindrique à hauteur droite, le temps de séjour des boues est de trois jours et la siccité obtenue est de 3,5% (35kg/m³). La production de boues est de 130 m³/jour.



Figure V.6: épaisseur des boues [2]

b) Déshydratation par filtre à bandes :

Les boues épaissies sont déshydratées par filtres à bandes pour garantir une opération continue, même pendant les périodes de maintenance, deux filtres complètement indépendants sont installés en parallèle.

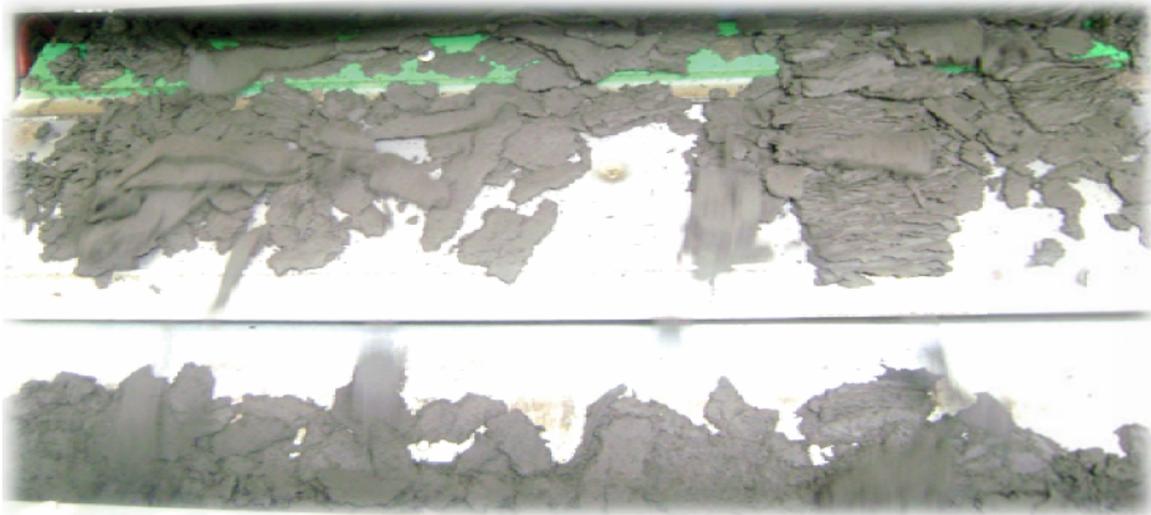


Figure V.7: déshydratation mécanique par filtre à bandes utilisant un polymère [2]

Chaque filtre est équipé de sa propre pompe à polymères et de sa propre pompe d'alimentation en boues

Un polymère est ajouté à la boue pour améliorer ses caractéristiques de déshydratation, il permet d'obtenir de plus hautes concentrations en matière sèche.

Le dosage moyen du polymère est normalement de 4 à 6 kg par tonne de boue sèche. [1]

Référence bibliographique

[1] : Manuel d'exploitation de la station d'épuration de Tipaza mars 2008

[2] : Mlle. GHERBI Ghofrane

Etude des possibilités de réutilisation des eaux et des boues d'épuration dans l'agriculture : Cas des effluents de la station de Tipaza, Ecole nationale polytechnique 2010.

CHAPITRE VI :
Analyses des résultats
expérimentaux et comparaison avec
le modèle numérique

Introduction

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.

Ce chapitre présente dans une première partie, l'analyse des résultats expérimentaux, obtenus sur le modèle réduit de serre présenté au chapitre précédent, Cette étape est réalisée à travers une comparaison des résultats expérimentaux à travers les différentes configurations de séchage (sous serre et à l'air libre). L'objectif recherché ici est de vérifier l'efficacité de la serre concernant l'évolution de la teneur en base sèche, ainsi que des températures respectives de la boue, de l'air intérieur et de la couverture.

Dans une seconde étape, on a validé les prédictions du modèle numérique a travers une comparaison entre les expérimentations et la simulation.

VI.1. Résultats expérimentaux et validation du modèle

Le modèle numérique 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.

La serre utilisée pour cette série d'expérimentations présente donc les dimensions suivantes : longueur 1,30 m, largeur 1,10 m et hauteur 0,65 m.

Les relevés expérimentaux ont été effectués à l'UDES disposant d'une station météorologique. Ces mesures sont prises sur une serre pendant une journée types du mois de juin, le 4.

Le Tableau VI.1 regroupe les données expérimentales de l'évolution au cours d'une journée, de l'intensité du rayonnement solaire, de la température dans la serre et à l'extérieur.

Chapitre VI : Analyses des résultats expérimentaux et comparaison avec le modèle numérique

Tableau VI.1 Relevé expérimentaux des données climatique (intérieur et extérieur) de la serre

Heures	Intensité du rayonnement solaire (W/m ²)	Température extérieure (°C)	Température du bac (°C)	Température intérieure (°C)	Température de la couverture (°C)
0	0	17.9	16.5	21.0	20.9
1	0	17.4	15.7	19.6	19.7
2	0	17.6	15.7	20.3	20.2
3	0	17.3	15.3	20.5	20.7
4	0	16.7	15	20.3	20.6
5	0	17.1	15.5	19.9	20.3
6	2.6	18.1	22.1	20.8	19.6
7	92.4	19.1	29.1	26.6	20.6
8	262.7	21.6	43.0	33.5	26.4
9	486.4	25.5	31.1	36.3	29.7
10	685.9	26.0	35.9	47.0	36.3
11	842.3	27.1	36.5	39.1	35.1
12	946.2	22.6	43.3	41.3	37.5
13	978.5	22.8	42.2	41.5	36.3
14	972.7	22.1	44.0	39.8	35.4
15	857.4	22.4	39.4	38.5	34.6
16	759.6	22.6	28.0	34.6	31.3
17	524,5	21.0	24.1	30.9	29.2
18	363,7	21.4	22.5	26.6	25.2
19	69,1	20.6	21.0	25.0	24.1
20	27,4	20.3	19.7	22.9	22.8
21	0	19.4	18.9	21.5	20.8
22	0	19.1	18.6	19.9	20.2
23	0	18.4	18.2	20.8	20.4

VI.2. L'analyse énergétique de la serre expérimentale

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.

Chapitre VI : Analyses des résultats expérimentaux et comparaison avec le modèle numérique

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. [1]

Le Tableau VI.2 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. Les autres caractéristiques (coefficient d'absorption solaire et coefficient d'émissivité) de la couverture correspondent aux propriétés classiques du verre. Leurs valeurs retenues font référence à des informations relevées dans la bibliographie [2]

D'une manière générale des caractéristiques radiatives 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 [3].

Tableau VI.2 Valeurs de coefficients de transmission suivant différentes conditions opératoires [1]

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

VI.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 thermocouples placées sur les faces externe et interne de la couverture lors des expérimentations de séchage (Figure VI.1) ont permis de vérifier l'hypothèse de l'uniformité de la température des deux faces de la couverture.

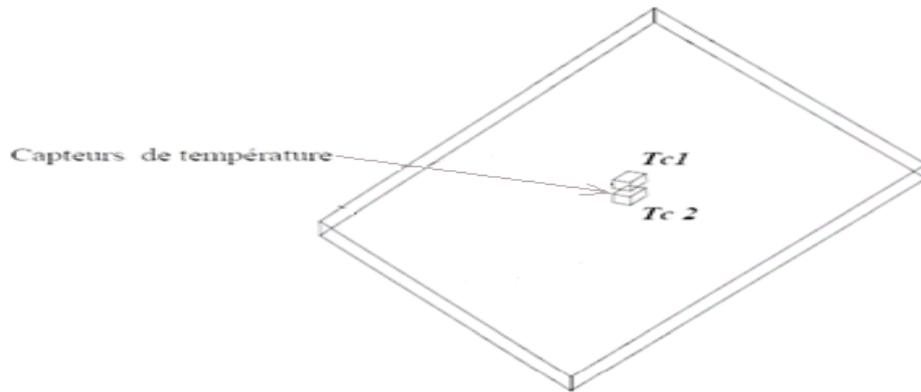


Figure VI.1 : Réparation des thermocouples sur la couverture :Tc1 face externe et Tc2 face interne

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 expérimentations, comme le laissait prévoir la théorie. La température de la couverture retenue est la moyenne des mesures obtenues par les différents thermocouples placés au niveau de la couverture de la serre.

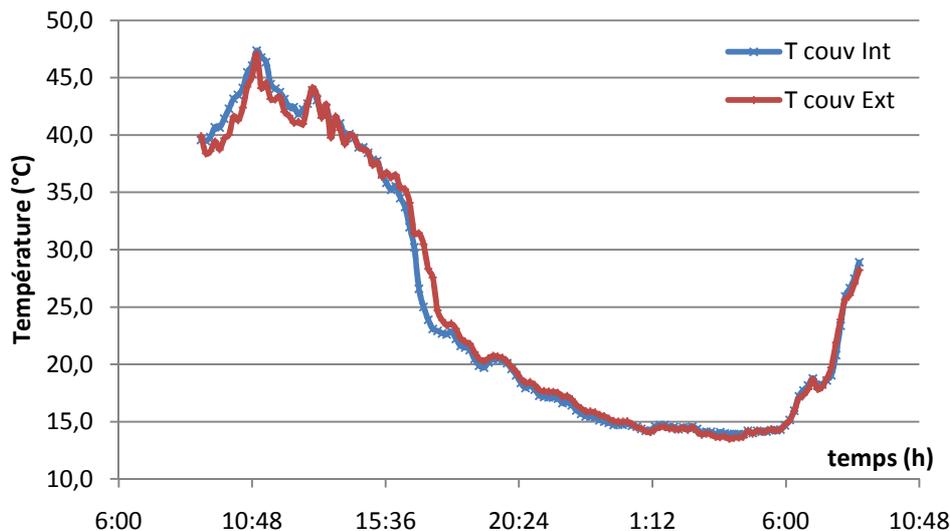


Figure VI.2 : Comparaison des différentes températures de la couverture intérieure et extérieure

VI.3. Confrontation des résultats expérimentaux

Plusieurs expérimentations ont été réalisées afin de confronter les résultats obtenus avec ou sans serre pour deux boues différentes.

On a effectué deux expérimentations, l'une avec une boue prélevé au niveau du bassin biologique de la station d'épuration de Tipaza et l'autre avec une boue épaissie provenant d'une

autre station d'épuration (STEP Hadjout).

La 1^{ère} expérimentation avec une boue biologique a débuté le 07/06/2011 à 12h00. pour la 2^{ème} expérimentation elle a débuté le 13/06/2011 à 10h00 avec une boue épaissie

Le tableau (VI.3) présente les caractéristiques physiques des différentes boues utilisées lors des expérimentations

Tableau VI-3 : caractéristiques physique des boues utilisées lors des expérimentations

	Masse volumique (g.mL ⁻¹)	Siccité (%)	Volume (L)
Boue biologique	1.001	0.50	30
Boue épaissie	1.05	4.50	15

VI.4. Isotherme de désorption :

La température considérée pour l'isotherme est la moyenne entre les différentes températures mesurées à l'intérieure de la serre au cours du temps de séchage (moyenne de 30°C).

Pour le tracé de l'isotherme de désorption, nous avons travaillé sur le modèle d'Oswin qui procure une large plage d'humidité relative (de 0,1 à 0,9). La relation d'Oswin est la suivante :

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

La première étape consiste à déterminer les paramètres de l'équation d'OSWIN (k et n) et ce grâce aux valeurs de l'humidité moyenne H_r et de la teneur en eau sur base sèche d'équilibre trouvée X_{eq} . Cette opération consiste à donner des valeurs arbitraires de n et k pour l'humidité relative moyenne H_r de tel sorte que la valeur de X_{eq} trouvé par l'équation se rapproche le plus à la valeur trouvée par l'expérience. Cela revient à calculer l'erreur quadratique moyenne EQM :

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_1^N |X_{eq}^{exp} - X_{eq}^{thé}|^2 \quad (VI-2)$$

Une fois les deux paramètres trouvés, on pourra tracer l'équation précédente en remplaçant l'humidité relative avec des valeurs allant de 0,1 à 0,9 et on obtient les teneurs d'équilibre correspondantes.

Dans nos expérimentations, on est arrivé à une teneur en équilibre sur base sèche de 1,05 kg d'eau/Kg de matières sèches pour une humidité relative moyenne de 66%.

Les paramètres de l'équation d'Oswin trouvés sont représentés sur le tableau (VI.4) suivant :

Tableau VI.4 : Paramètres du modèle d'Oswin et EQM

K	n	EQM
0,62	0,8	1,6 E-5

L'équation d'Oswin sera donc :

$$X_{eq} = 0.62 \left(\frac{Hr}{1 - Hr} \right)^{0.8} \quad (VI-3)$$

L'isotherme de désorption correspondante à l'équation précédente est représentée sur la figure suivante :

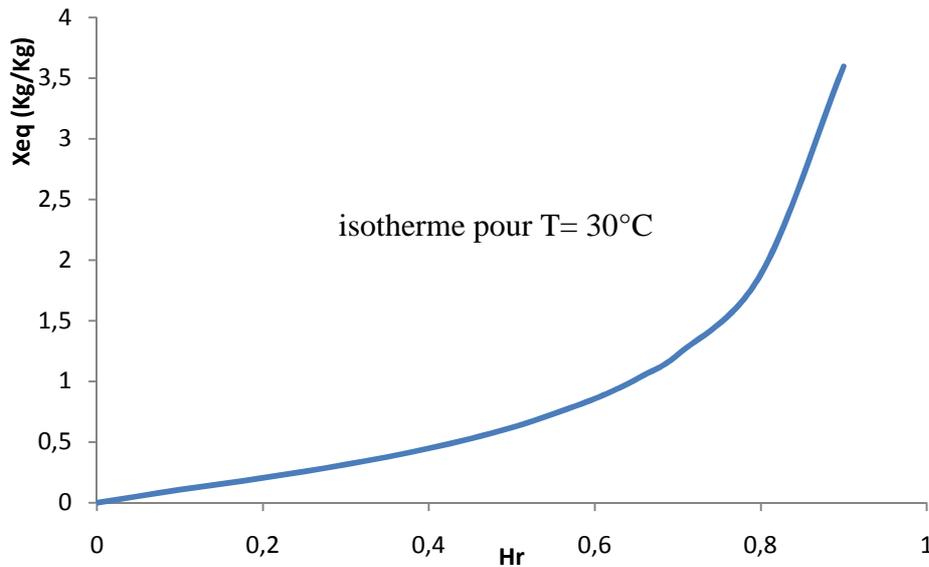


Figure VI.3: isotherme de sorption pour boue épaisse

VI.5. 1^{ère} expérimentation : Boue biologique de 0,5% de siccité

La boue biologique est une boue soutirée du bassin biologique, elle est caractérisée par sa faible valeur de siccité (autour de 0,5%), sa masse volumique approche donc celle de l'eau.

Le séchage d'une telle boue ressemble beaucoup à la cinétique de vaporisation de l'eau car cette boue n'est pas consistante pour pouvoir contenir une autre forme d'eau que celle qui est libre.

La figure (VI.4) suivante représente l'évolution de la siccité pour une boue biologique sous serre et témoin en fonction du temps :

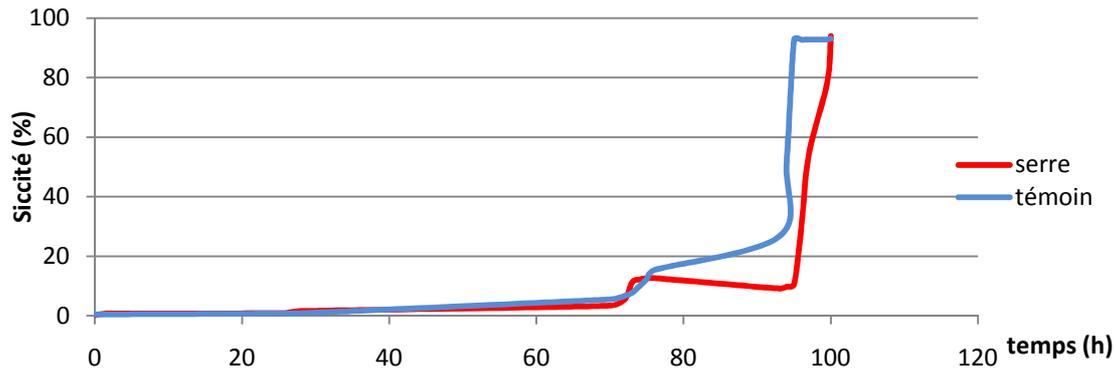


Figure VI.4: évolution de la siccité pour une boue biologique sous serre et témoin en fonction du temps

Les deux courbes présentent des similitudes quand à leurs évolutions en fonction du temps, la siccité ne varie pas beaucoup en fonction du temps et cela confirme que la présence de l'eau est majoritaire dans la composition de cette boue.

Une fois que toute l'eau en excès est évacuée, vient l'évaporation de l'eau qui se trouve entre les particules ce qui conduit à l'augmentation rapide de la siccité (de 20% à 95% en moins de 10 heures).

VI.5.1. Cinétique de séchage :

Les boues biologiques contiennent beaucoup d'eau, c'est pour cette raison que l'évolution de la teneur en eau sur base sèche se fait très rapidement en fonction du temps car l'eau éliminée est libre, l'énergie nécessaire à son élimination n'est pas très importante, à l'inverse de l'eau liée qui nécessite plus d'énergie pour son évacuation c'est pour cette raison qu'à la fin, l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps est faible.

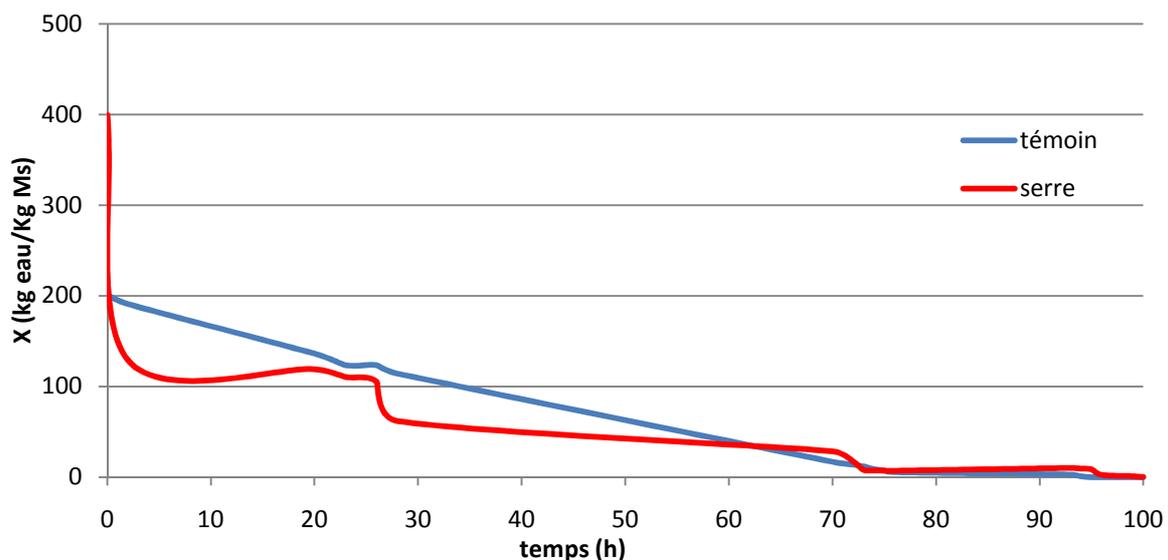


Figure VI.5: évolution de la teneur en eau sur base sèche en fonction du temps pour une boue biologique

Remarque :

La diminution de la teneur en eau sur base du bac témoin se fait d'une manière continue car à chaque instant l'eau s'évapore et cette vapeur est immédiatement entraînée avec le vent à l'inverse de la serre qui présente des fluctuations par rapport à une descente continue, cela s'explique par la mauvaise évacuation de l'air saturé vers l'extérieure de la serre.

Le point de départ de la teneur en eau pour les deux dispositifs doit être le même étant donné qu'on a utilisé la même boue biologique, l'écart entre ces deux valeurs s'explique par la mauvaise prise d'échantillon de la boue à l'intérieure de la serre.

Il ya à l'intérieure de la serre et dans le bac témoin un phénomène de décantation car la boue contient beaucoup d'eau. Cela rend la prise d'échantillon difficile car il faut à chaque fois bien mélanger la boue avant chaque prélèvement.

VI.5.2. Courbes de Krischer :

En raison du phénomène de décantation et de la distribution non uniforme de la boue sur le bac l'obtention de la courbe de Krischer pour ce genre de boue s'avère plus difficile que celle des boues épaissies, nous avons essayé de garder uniquement les valeurs de la teneur qui pouvait nous donner une allure convenable pour ce genre de courbe.

Les figures (VI.6) suivantes présentes l'évolution des vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau sur base sèche pour une boue biologique de siccité 0,5% pour la serre et le bac témoin :

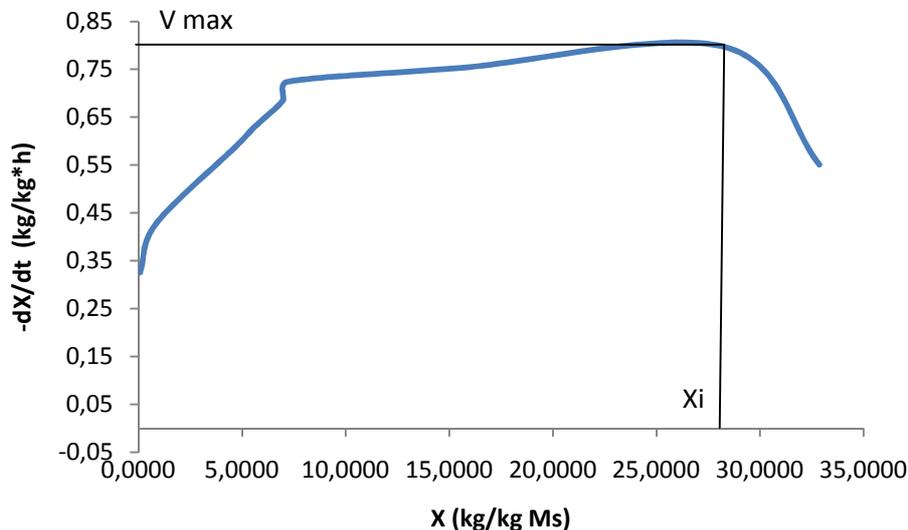


Figure VI.6 : courbe de Krischer pour une boue biologique sous serre

On peut distinguer sur cette courbe les trois phases de séchage :

- i. Zone de préchauffage.
- ii. Zone à vitesse constante.

iii. Zone de décroissement de la vitesse.

On peut extraire de cette courbe :

- Le teneur d'équilibre de la boue qui correspond à la teneur finale (vitesse nulle).
- La teneur critique (teneur à partir de laquelle commence la décroissance de la vitesse).
- La vitesse maximale atteinte lors du procédé de séchage (kg/kg*h).

Les paramètres de la courbe de krischer sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau VI.5 : Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue biologique sous serre

-dX/dt max (Kg eau/Kg*h)	X _{eq}	X _i
0,79	0.064	28,3

On atteint des valeurs de X_{eq} très faibles, cela revient au fait que la boue contient beaucoup d'eau et que la présence d'une quantité faible d'eau liée pousse le séchage à un degré très avancé.

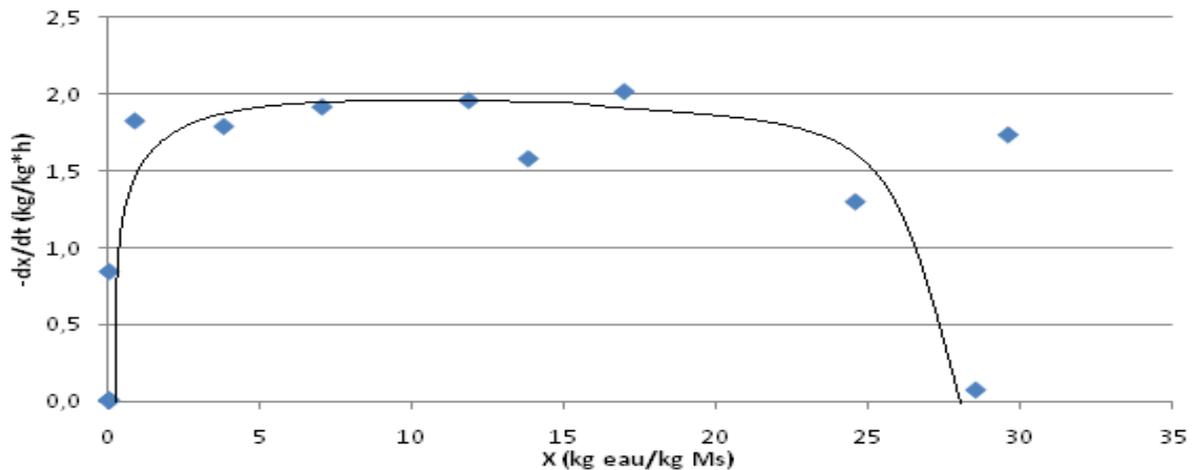


Figure VI.7 : courbe de Krischer pour une boue biologique témoin

Les paramètres de la courbe de krischer sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau VI.6 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue biologique témoin

-dX/dt max (Kg eau/Kg*h)	X _{eq}	X _i
2,01	0,074	16 ,98

V.5.3. Courbe caractéristique de séchage :

Nous allons utiliser le principe de la courbe caractéristique de séchage pour pouvoir décrire la cinétique de séchage dans n'importe quelles conditions de l'air. La

Chapitre VI : Analyses des résultats expérimentaux et comparaison avec le modèle numérique

détermination de la courbe caractéristique de séchage correspond à l'expression de la vitesse de séchage réduite en fonction de la teneur en eau réduite X_r :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 f(X_r) \quad (\text{VI-6})$$

X_r est défini de la manière suivante :

$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad (\text{VI-7})$$

X_{eq} : la teneur en eau finale de la boue.

$X_{cr}=X_i$: la teneur en eau initiale.

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

La courbe de séchage pour une boue biologique de siccité de 0,5% dans le bac témoin est donnée sur la figure (VI.8) suivante :

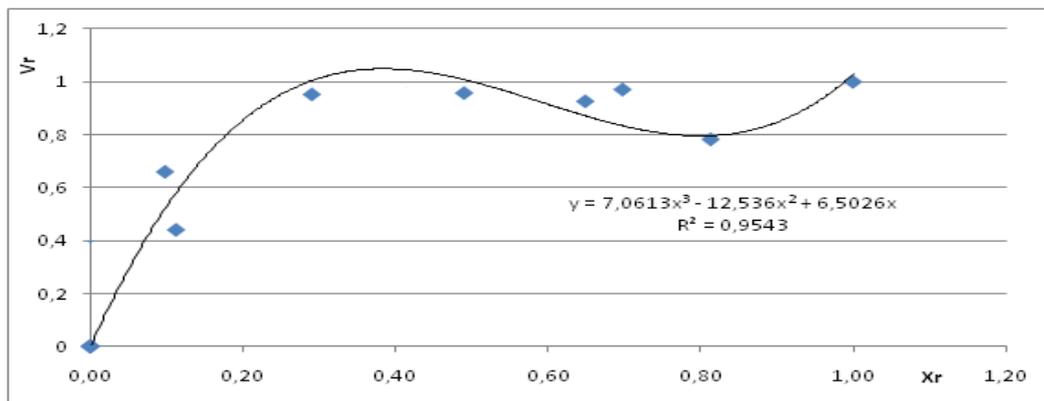


Figure VI.8 : courbe caractéristique de séchage pour une boue biologique témoin

Les valeurs des coefficients A_1 , A_2 et A_3 sont déterminés dans le tableau suivant :

Tableau VI.7. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue biologique témoin

Valeur des paramètres	
A_1	7,0613
A_2	-12,536
A_3	6,5026

Le polynôme obtenu pour ce type de boue est le suivant :

$$f(X_r) = 7,0613 X_r^3 - 12,536 X_r^2 + 6,5026 X_r \quad (\text{VI-4})$$

La courbe de séchage pour une boue biologique de siccité de 0,5% sous serre est donnée sur la figure suivante :

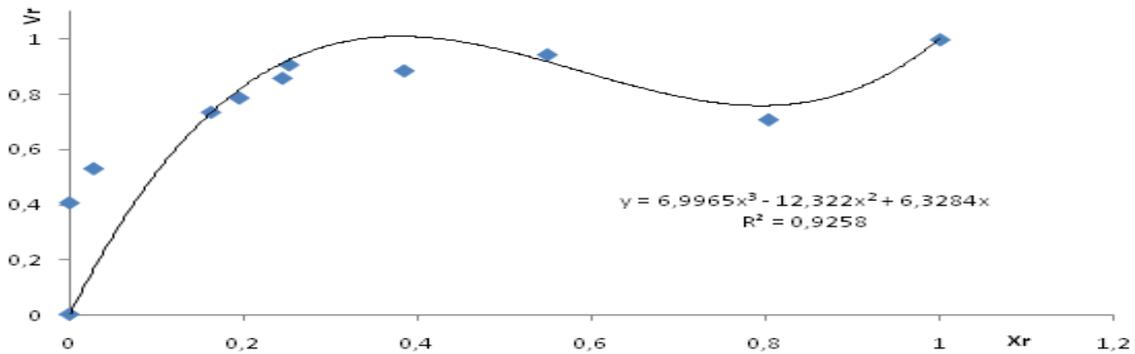


Figure VI.9: courbe caractéristique pour une boue biologique sous serre

Les valeurs des coefficients A_1 , A_2 et A_3 sont déterminés dans le tableau (VI.7) suivant :

Tableau VI.8 : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue biologique sous serre

Valeur des paramètres	
A_1	6,9965
A_2	-12,322
A_3	6,3284

Le polynôme obtenu pour ce type de boue est le suivant :

$$f(X_r) = 6,9965 X_r^3 - 12,322 X_r^2 + 6,3284 X_r \quad (\text{VI-5})$$

VI.6. 2^{ème} expérimentation : Boue épaissie de siccité 5%

VI.6.1. L'évolution de la siccité

La siccité représente la masse de matières sèches contenues dans un échantillon de boue rapportée à la masse totale de l'échantillon.

Au cours du processus de séchage il ya diminution de la quantité d'eau présente dans la boue à cause du phénomène d'évaporation, celui-ci entrainera une augmentation de la siccité du produit au cours du procédé de séchage.

La figure (VI.10) suivante représente l'évolution de la siccité de la boue en fonction du temps pour les boues épaissies de la serre et du bac témoin :

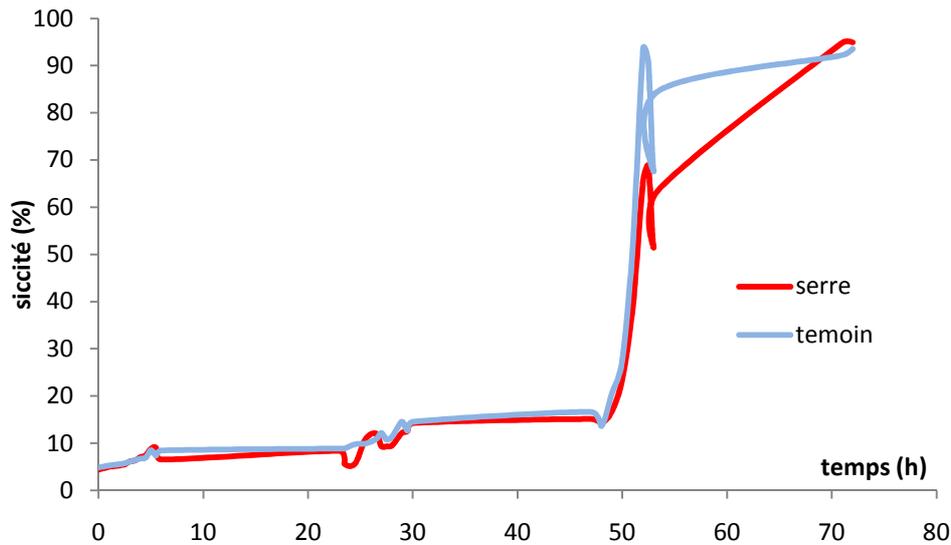


Figure VI.10 : évolution de la siccité en fonction du temps pour une boue épaisse

Les 2 courbes présentent une allure ascendante identique, les siccités obtenues sont à plus de 90% au cours du procédé de séchage de 72 heures.

En utilisant une serre, l'obtention de la siccité de 95% se fait plus rapidement que le bac témoin car il y aura plus d'évaporation qu'à l'air libre, cependant les performances du séchage sont pratiquement identiques, cela est due au manque de ventilation à l'intérieure de la serre qui doit assurer l'évacuation de l'air saturé.

VI.6.2. Cinétique de séchage :

A partir des données expérimentales, on obtient une courbe représentant la perte de masse en fonction du temps, l'acquisition de la masse se fait toutes les demi-heures.

La courbe de séchage est représentée par l'évolution de la teneur en eau sur base sèche en fonction du temps.

La figure suivante représente l'évolution de la teneur en eau sur base sèche pour une boue épaisse de siccité initiale de 5% sous serre et à l'air libre :

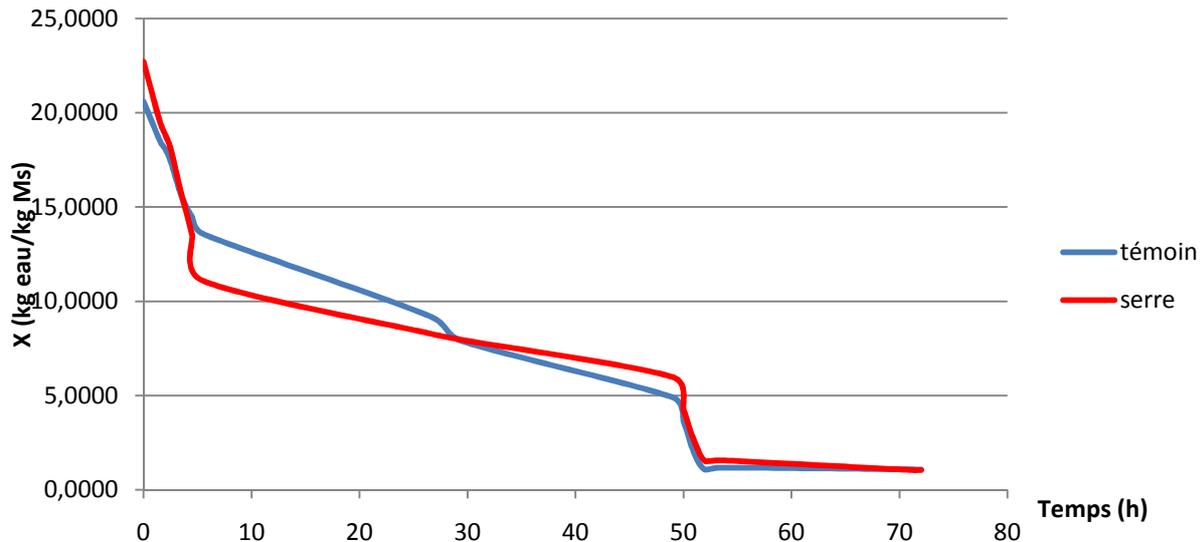


Figure VI.11 : évolution de la teneur en eau sur base sèche de la boue épaisse en fonction du temps

On remarque que les deux courbes présentent des similitudes vis-à-vis de leurs évolutions en fonction du temps. Cependant, il existe des points où il y a un changement brusque de la teneur, cela pourrait être dû à l'une des raisons suivantes :

- Possibilité de prise d'eau au cours de la nuit à cause de l'humidité et l'abaissement de la température.
- Mauvaise prise d'échantillon car à l'intérieur du bac, il existe des zones qui sèchent plus rapidement que d'autres et ce à cause de la structure du bac qui présente des zones plus profondes que d'autres.

Les deux courbes présentent une allure décroissante en fonction du temps, ceci est dû à la perte de la masse d'eau par évaporation ce qui entraîne une diminution de la teneur en eau sur base sèche de la boue jusqu'à atteindre une valeur minimale dite d'équilibre $X = 1,05$ pour les deux dispositifs.

VI.6.3. Courbes de Krischer :

La courbe de Krischer lie la vitesse de séchage du produit ($-dX/dt$) à la teneur en eau sur base sèche. L'intérêt de la courbe de Krischer est de mettre en évidence les différentes phases du séchage (mise en température, phase constante et la phase décroissante) et de tirer les X_{cr} et X_{eq} .

Les courbes de Krischer sont représentées sur les figures suivantes pour une boue épaisse des deux dispositifs (serre et le bac témoin) :

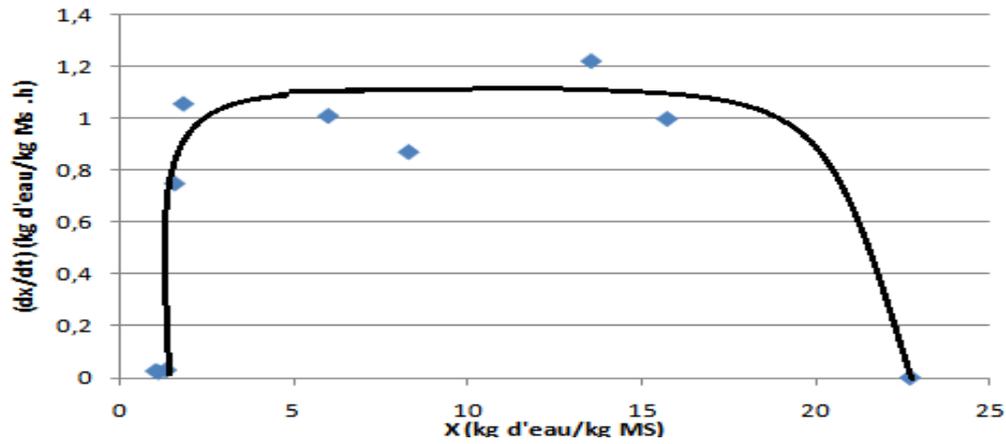


Figure VI.12 : Courbe de krischer pour une boue épaissie sous serre

Ces paramètres sont représentés sur le tableau (VI.9) suivant :

Tableau VI.9 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue épaissie sous serre

$-dX/dt$ max (Kg eau/Kg.h)	X_{eq}	X_i
1,8	1,05	18

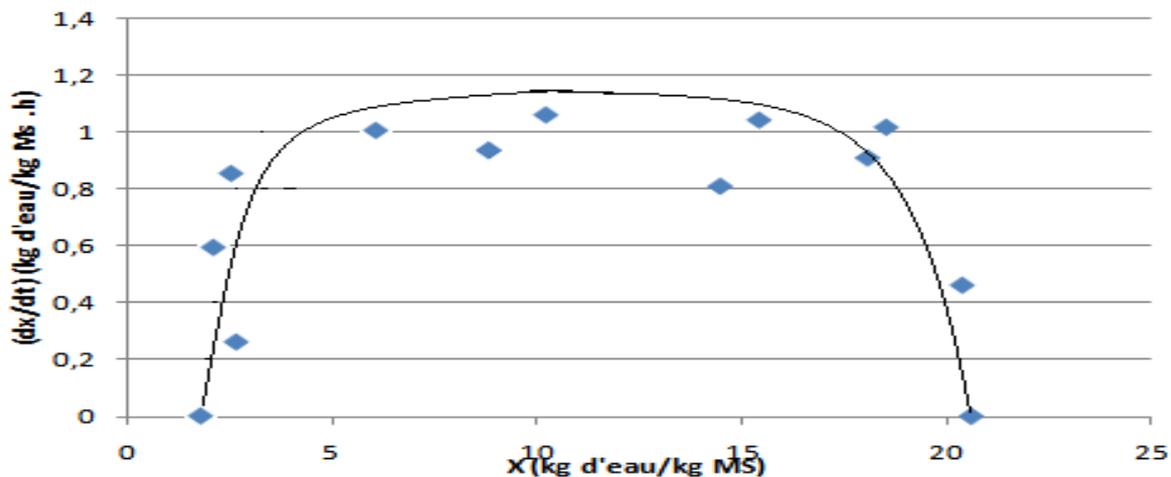


Figure VI.13: courbe de Krischer pour une boue épaissie témoin

Tableau VI.10 Teneur d'équilibre, critique et la vitesse maximale pour une boue épaissie témoin

$-dX/dt$ max (Kg eau/Kg.h)	X_{eq}	X_i
1,2	1,06	17,5

VI.6.4. Courbe caractéristique de séchage :

La figure suivante donne l'évolution des vitesses relatives en fonction de la teneur réduite sur une boue épaissie sous serre :

La figure suivante (Figure VI.14) représente la courbe caractéristique de séchage pour une boue épaisse sous serre.

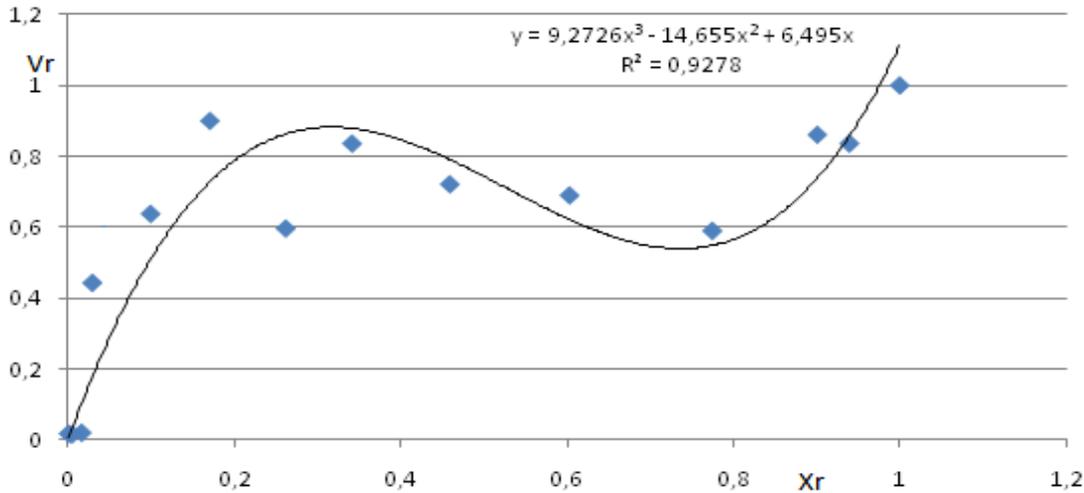


Figure VI.14 : courbe caractéristique de séchage pour une boue épaisse sous serre

Les valeurs des coefficients A_1 , A_2 et A_3 sont déterminés dans le tableau suivant :

Tableau VI.11. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue épaisse sous serre

Valeur des paramètres	
A_1	9,2726
A_2	-14,655
A_3	6,495

Donc le polynôme décrivant l'évolution de la vitesse réduite en fonction de la teneur réduite sous serre d'une boue de 5% de siccité est le suivant :

$$f(X_r) = 9,2726 X_r^3 - 14,655 X_r^2 + 6,495 X_r \quad \text{(VI-8)}$$

La figure suivante (Figure VI.15) représente la courbe caractéristique de séchage pour une boue épaisse à l'air libre.

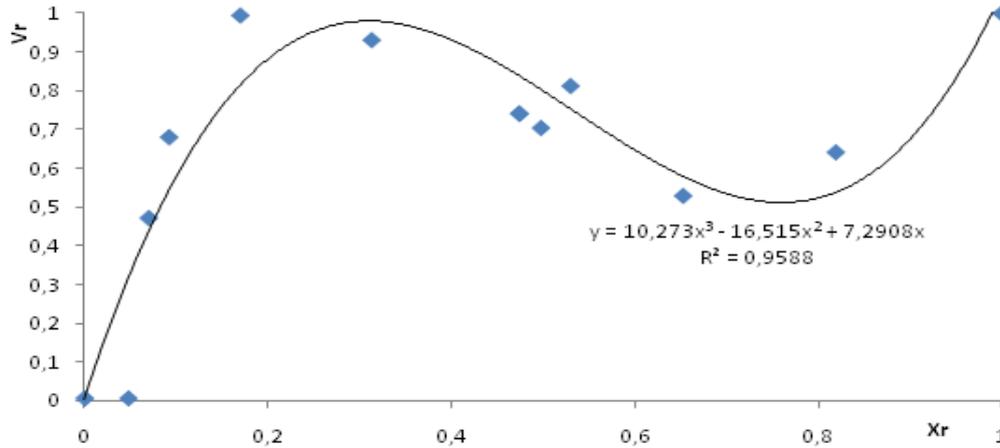


Figure VI.15 : courbe caractéristique de séchage pour une boue épaisse témoin

Les valeurs des coefficients A_1 , A_2 et A_3 sont déterminés dans le tableau suivant :

Tableau VI.12. : Valeurs des coefficients du polynôme caractéristique pour une boue épaisse témoin

Valeur des paramètres	
A_1	10,273
A_2	-16,515
A_3	7,2908

Donc le polynôme décrivant l'évolution de la vitesse réduite en fonction de la teneur réduite d'une boue à l'air libre de 5% de siccité est le suivant :

$$f(X_r) = 10,273 X_r^3 - 16,515 X_r^2 + 7,2908 X_r \quad (VI-9)$$

VI.7. Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue biologique

La figure (VI.16) représente la variation entre la mesure de la température au niveau de la boue biologique sous serre et a l'air libre

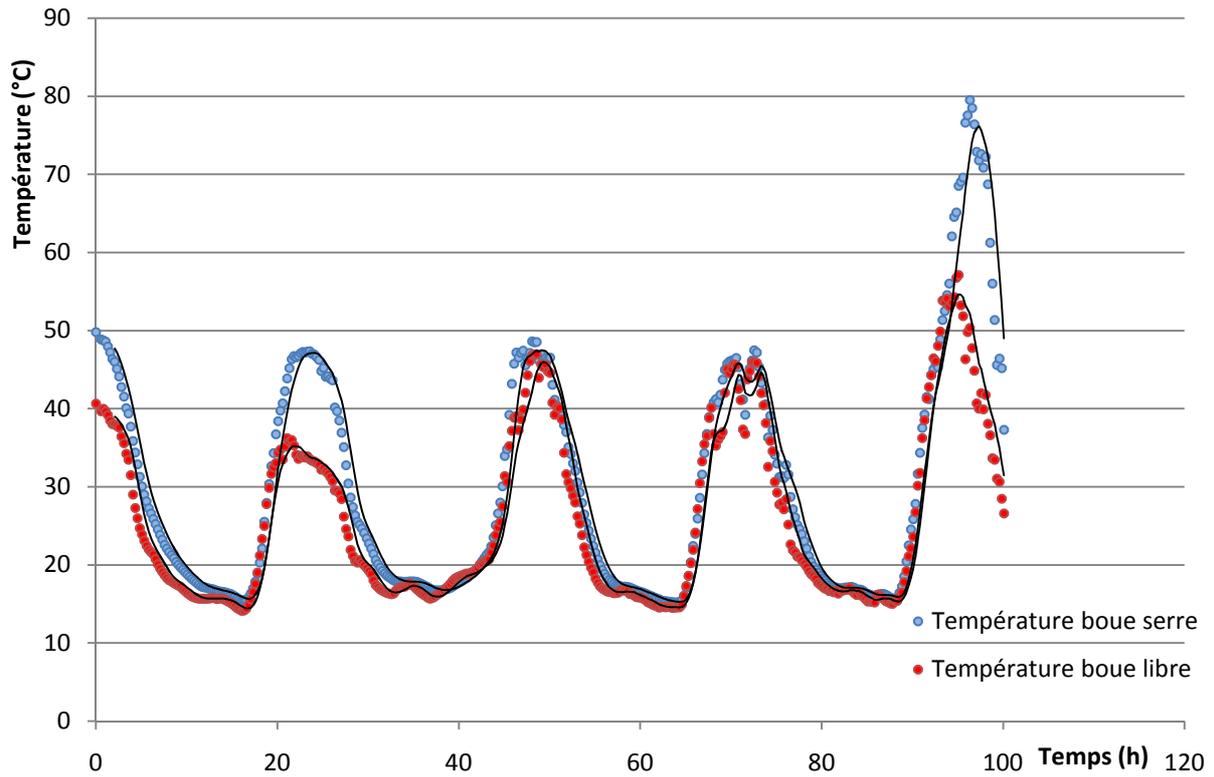


Figure VI.16 : comparaison entre la température de la boue biologique sous serre et a l'air libre

VI.8. Confrontation des résultats au niveau de la température de la boue épaissie

La figure (VI.17) représente la variation entre la mesure de la température au niveau de la boue épaissie sous serre et a l'air libre

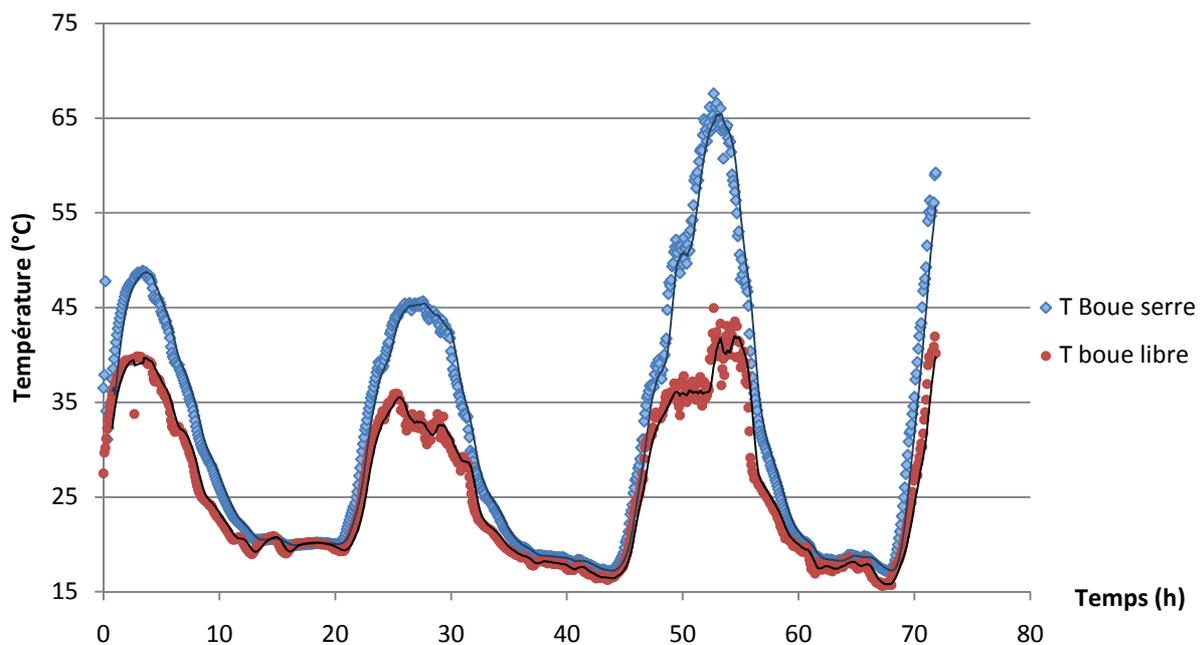


Figure VI.17 : comparaison entre la température de la boue épaissie sous serre et a l'air libre

On constate que la température de la boue sous serre est nettement supérieure à celle qui se trouve à l'air libre et ceci est d'autant plus normal à cause de l'effet de serre.

VI.9. Comparaison des résultats expérimentaux avec la simulation

Pour rappel, les données d'entrée dans le programme se trouvent à l'annexe II. La durée de la simulation est de 8h avec un pas de 1 min.

La Figure (VI.18) représente la différence entre les valeurs expérimentales et simulés pour la température de la boue

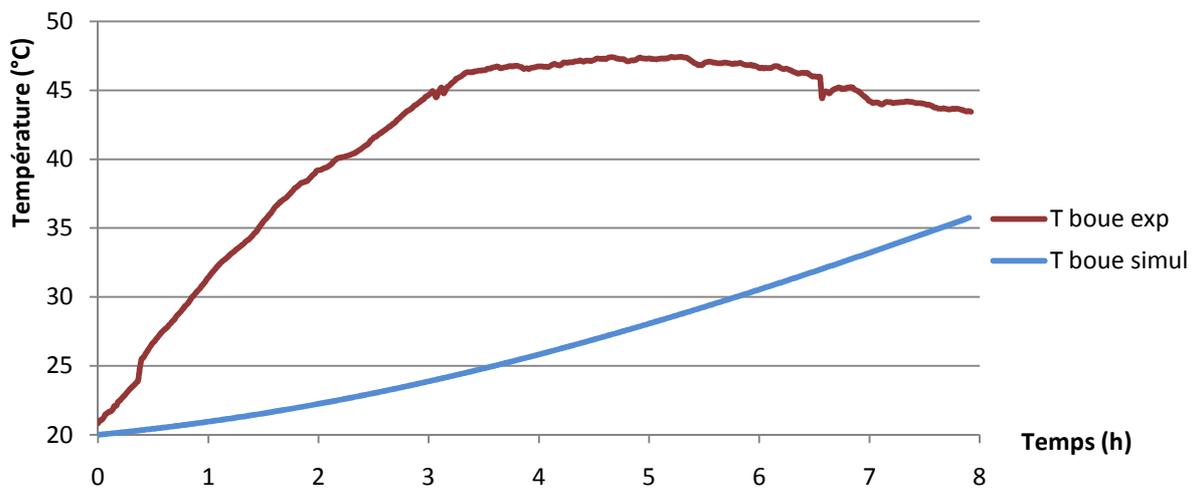


Figure VI.18 : évolution des températures simulé et expérimentale pour la boue

La figure (VI.19) représente la différence entre les valeurs expérimentales et simulé pour la température de l'air intérieur.

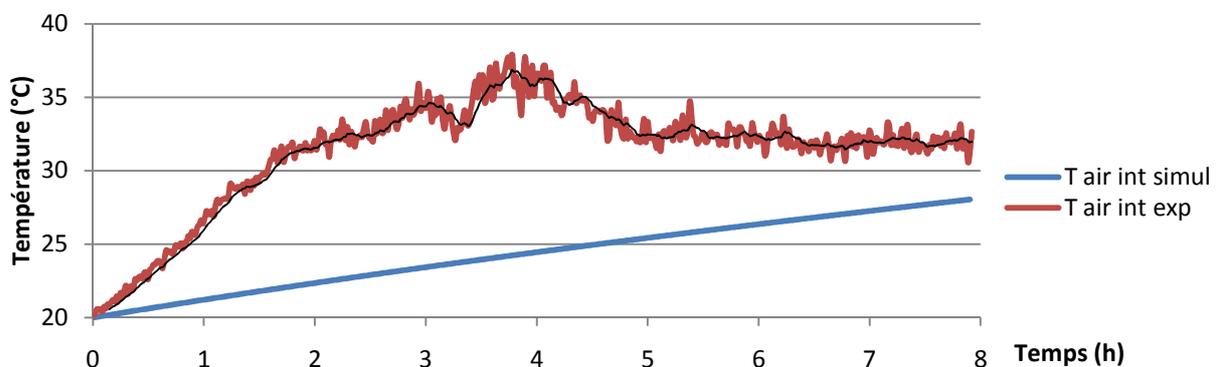


Figure VI.19 : évolution des températures de l'air intérieur simulé et

expérimentale.

La figure (VI.20) représente la différence entre les valeurs expérimentales et simulé pour la température de couverture.

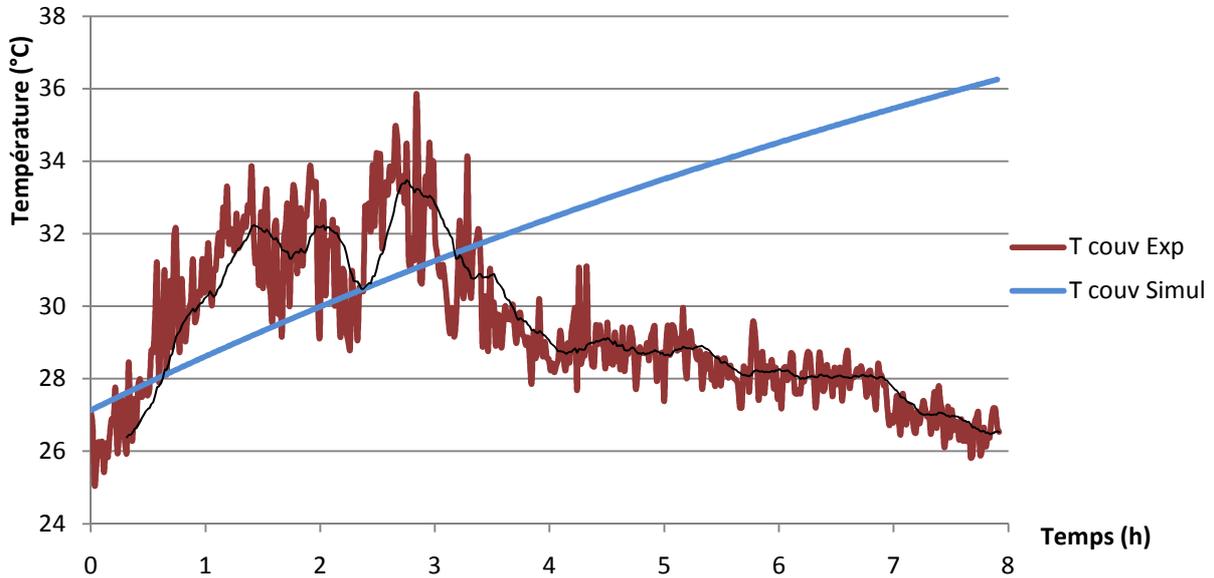


Figure VI.20 : évolution des températures simulée et expérimentale pour la couverture

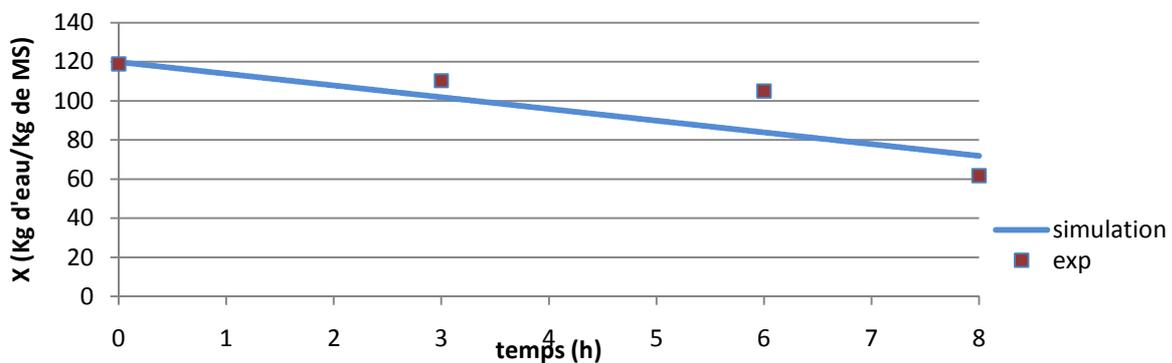


Figure VI.21 : évolution de la teneur en eau simulée et expérimentale pour une boue biologique

On constate que les valeurs expérimentales et simulé sont différentes et ceci est dû aux hypothèses du modèle numérique (III.2 §14), le fait que la température de l'air extérieur ainsi que l'humidité, le rayonnement global et la vitesse du vent restent constants.

On se propose de corriger le défaut du modèle en introduisant des corrélations liées à la température de l'air extérieur, l'humidité, le rayonnement global et la vitesse du vent (voir annexe III).

VI.10. Vérification des résultats obtenus :

A La fin des expérimentations, nous avons fait un bilan de masse sur la boue, ce bilan sert à confirmer la siccité calculée de départ et la quantité de boue récupérée après séchage solaire.

Ce bilan de masse consiste à peser :

- les boues restantes à l'intérieure de la serre après séchage.
- Les échantillons mis à l'étuve pendant 24h pour suivre la siccité.

VI.10.1. Boue épaissie:

Le tableau suivant reprend les masses des boues récupérées et pesées pour la serre et le bac témoin pour une boue épaissie :

Tableau VI.13 : masses finales obtenus a la fin du séchage des boues épaissies pour la serre et le bac témoin

	Serre	Bac témoin
Masse de la boue récupérée à la fin du séchage (g)	607,18	629,5
Masse des échantillons (g)	53,50	56,52
Masse totale (g)	660,68	686

Remarque : la masse finale récupérée dans la serre est considérée comme complètement sèche.

- **Serre :**

A l'intérieure de la serre, nous avons mis 15L de boue de masse volumique égale à 1,05 Kg/L ce qui correspond à une masse humide de 15,75 kg avec une siccité qui approche de 4,5%.

Calcul de la masse sèche présente dans la boue épaissie :

$$Siccité = \frac{M_s}{M_h} \Rightarrow M_s = S_i * M_h = 0,045 * 15750 = 708 \text{ g.}$$

Ce résultat s'approche beaucoup du résultat trouvé par pesée avec des pertes de 6,6% due aux pertes de masse due à la rugosité du bac et le maintien de la boue collée au bac.

- **Bac témoin :**

$\Delta m = |m_{calculée} - m_{pesée}| = 708 - 686 = 22 \text{ g.}$ Une légère perte évaluée à 3 % de masse due à la rugosité du bac

VI.10.2. Boues biologiques :

Le bilan de masse de la serre et sur le bac témoin est donné sur le tableau (VI.14) suivant :

Tableau VI.14 : masses finales obtenus a la fin du séchage des boues épaissies pour la serre et le bac témoin

	Serre	Bac témoin
Masse de la boue récupérée à la fin du séchage (g)	162,2	160,2
Masse des échantillons (g)	20,8	23,6
Masse totale (g)	183	183,8

La boue biologique comprend une siccité de 0,5% et les masses récupérées sur les bacs sont considérées comme sèches.

- **Serre :**

A l'intérieur de la serre, nous avons mis 30 l de boue de masse volumique égale à 1kg/l ce qui correspond à une masse humide de 30 kg avec une siccité qui approche de 0,5%.

Calcul de la masse sèche présente dans la boue épaissie :

$$\text{Siccité} = \frac{M_s}{M_h} \Rightarrow M_s = S_i * M_h = 0,005 * 30000 = 150 \text{ g.}$$

$\Delta m = |150-183| = 33\text{g}$, soit une différence de 22% le résultat obtenue est différent du résultat calculé et on ne peut l'attribuer à la rugosité du bac et le maintien de la boue collée au bac, cette différence est peut être du à l'une des erreurs suivantes :

- Une prise d'échantillon mal faite pour calculer la siccité de départ étant donnée le phénomène rapide de décantation.
- La supposition que la masse volumique est égale à celle de l'eau.
- Erreurs accidentelles dues à la lecture sur la balance.
- Prise d'une grande quantité d'échantillon pour n'utiliser d'une petite partie, ce qui reste été jeté.

- **Bac :**

$\Delta m = |150-183,8| = 33,8\text{g}$, on obtient pratiquement les mêmes pertes due aux raisons citées pour la serre.

VI.11. Conclusion :

L'utilisation de la serre nous a permis d'atteindre à l'intérieur (boue, air intérieur) des températures qui sont très élevées par rapport à l'air libre, ce qui laisse croire que l'efficacité du séchage sera plus importante que celle à l'air libre, néanmoins les résultats expérimentaux obtenus pour la serre se rapprochent de ceux du témoin, ce qui prouve qu'il faut considérer un autre paramètre important qui est la vitesse du vent, car sans ce dernier il n'y aura pas d'évacuation de la vapeur d'eau vers l'extérieur et ainsi la teneur en eau de la boue atteindra rapidement la valeur d'équilibre. Dans ce cas, la convection naturelle n'est plus suffisante pour avoir de bons résultats, il faut donc mettre en place un système d'extraction relié de préférence à un panneau solaire pour garder le principe du moindre coût.

La mise en place d'un système d'extraction d'air ainsi qu'un dispositif de retournement de boue nous permet d'augmenter l'épaisseur de boue à sécher et réduire le temps de séchage.

La comparaison entre les résultats simulés et expérimentaux nous a permis de constater l'utilité de l'outil numérique pour prévoir le comportement du système étudié au cours d'un laps de temps déterminé, cependant sa fiabilité reste limitée en raison de la complexité des phénomènes naturels intervenant lors du séchage (ensoleillement et vitesse du vent aléatoires) et la difficulté de formuler un modèle qui prend en compte tous les changements qui peuvent se produire en fonction du temps.

Référence Bibliographique :

[1] Amadou, H.,

Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbaines [**en ligne**]. Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur – Strasbourg I, (2007), 248 p. disponible sur <http://scd-theses.u-strasbg.fr/view/name/AMADOU,_Haoua.html> (consulté le 31/01/2011)

[2] Slim, R.,

Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boue de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur [**en ligne**]. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, (2007), 147 p. disponible sur <<http://www.agronomy-journal.org/=129>> (consulté le 25/02/2011).

[3] Monteil, C.,

Contribution informatique à l'analyse énergétique des serres agricoles [**en ligne**] thèse de 3eme cycle Institut national polytechnique de Toulouse, (1985). 168pp. disponible sur <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=8065967>> (consulté le 20/03/2011)

Conclusion générale

Ce travail a contribué à améliorer nos 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, la réalisation et le développement d'un modèle numérique furent les objectifs de ce mémoire de fin d'étude.

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 de l'Algérie va devenir crucial avec une production annuelle dépassant 350 000 m³ de boues en 2010. Le séchage des boues constitue une étape essentielle après la déshydratation, tant en amont de la valorisation agricole que de la valorisation thermique. Malgré l'intérêt évident du séchage solaire des boues, ce procédé est encore mal maîtrisé et l'empirisme domine.

Un acquit 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. 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 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 teneur en eau sur base sèche. Ainsi, l'on peut dégager pour une boue donnée des tendances et des valeurs caractéristiques. Les valeurs de l'isotherme de désorption obtenues sur un domaine large de l'activité ont pu être ajustées par le modèle d'Oswin.

Une étude comparative a été par la suite menée. Cette dernière a permis de conclure que les résultats simulés et ceux mesurés expérimentalement ne concordent pas. Cette différence pourrait être dû à plusieurs phénomènes échappant à la formulation macroscopique et monodimensionnelle du code, la complexité d'intégration des corrélations concernant les conditions climatiques au code source du programme, et aussi la création d'une fine couche sèche périphérique dès le début du séchage ce qui a eu pour conséquence le ralentissement des transferts de masse observés.

Annexes

Annexe I : Propriété Physico-chimique des différents éléments de la serre :

Masse volumique de l'air : [kg.m⁻³] [1]

$$\rho = 1.293 \left(\frac{273}{T} \right) \quad T \text{ en } K$$

Viscosité cinématique de l'air : [m².s⁻¹] [2]

$$\mu = -1.363 \cdot 10^{-14} T^3 + 1.009 \cdot 10^{-12} T^2 + 3.452 \cdot 10^{-8} T - 3.401 \cdot 10^{-6}$$

Chaleur spécifique de l'air : [J.kg⁻¹.°C⁻¹] [2]

$$Cp = 1.933 \cdot 10^{-10} T^4 - 7.999 \cdot 10^{-7} T^3 + 1.141 \cdot 10^{-3} T^2 - 4.489 \cdot 10^{-1} T + 1.0575 \cdot 10^3$$

Conductivité thermique de l'air: [W.m⁻¹.°C⁻¹] [2]

$$\lambda = 1.521 \cdot 10^{-11} T^3 - 4.857 \cdot 10^{-8} T^2 + 1.018 \cdot 10^{-4} T - 3.933 \cdot 10^{-4}$$

Chaleur latente pour l'eau : [J.kg⁻¹] [1]

$$L_v = 4185.5 (597 - 0.56 T) \quad T \text{ en } ^\circ C$$

Pression de vapeur saturante de l'air : [Pa] [1]

$$P_{vs} = 288.68 \left(1.098 + \frac{T}{100} \right)^{8.02} \quad T \text{ en } ^\circ C$$

Humidité absolue : [kg eau/kg air sec] [1]

$$Has = \frac{6.622 P_{vs}}{P - P_{vs}}$$

Humidité relative : [%] [1]

$$Hr = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

Coefficient de dilatation volumique de l'air : [K⁻¹] [2]

$$\beta = \frac{1}{T} \quad T \text{ en } K$$

Capacité calorifique massique de la boue [J.Kg⁻¹.°C⁻¹] [1]

$$Cp_b = \frac{1}{1+X} Cp_{anhydre} + \frac{X}{1+X} Cp_e$$

Référence bibliographique :

[1] Daguinet, M.,

Les séchoirs solaires : théorie et pratique **[en ligne]**.1^{er} Ed. Unesco 1985.Disponible sur :<
<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001234/123413fb.pdf>> (consulté le 03/05/2011)

[2]Wikipédia Air **[en ligne]** disponible sur <<http://fr.wikipedia.org/wiki/Air>>. (Consulté le 19-04-2011)

Annexe II : Modèle numérique : les paramètres d'entrées et le code source

Paramètres d'entrée fixes	dimension de la serre <ul style="list-style-type: none"> • longueur • largeur • hauteur 	1,30 (m) 1,10 (m) 0,65 (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 	0,8 (-) 0,2 (-) 0,9 (-) 1182 (J/kg.°C)
	paramètres liés à l'air <ul style="list-style-type: none"> • capacité calorifique massique autres paramètres <ul style="list-style-type: none"> • constante de Stephan Boltzmann • capacité calorifique massique de l'eau 	1008 (J/kg.°C) 5,67 10 ⁻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 du vent • rayonnement solaire sur une surface horizontale données sur la boue <ul style="list-style-type: none"> • masse initiale • siccité initiale 	
Paramètres secondaires	Température apparente de rayonnement du ciel et chaleur latente de l'eau <ul style="list-style-type: none"> • conductivité thermique • viscosité cinématique • masse volumique • pression de vapeur saturante Coefficient de convection <ul style="list-style-type: none"> • couverture/air intérieur • couverture/air extérieur • boue/air intérieur 	

Relations utilisées	Nombre de Nusselt pour le calcul de h boue/air intérieur :
	$Nu = 0.27(Gr.Pr)^{1/4}$
	Nombre de Nusselt pour le calcul de h couverture/air intérieur :
	$Nu = 0.14(Gr.Pr)^{1/3}$
	Coefficient de convection
	$h = Nu \frac{\lambda}{L}$
	coefficient de convection h couverture/air extérieur :
	$h_e = 5.67 + 3.86 U_v$
	Capacité calorifique massique de la boue
	$Cp_b = \frac{1}{1+X} Cp_{anhydre} + \frac{X}{1+X} Cp_e$
Chaleur latente de vaporisation de l'eau :	
$L_v = 4185.5 (597 - 0.56 T)$	
Température du Ciel :	
$T_v = 0.0552 T_{ae}^{1.5}$	
Vitesse de séchage réduite :	
$f(X_r) = 5.45 X_r - 9.930 X_r^2 + 5.48 X_r^3$	
Vitesse a phase constante :	
$\left(-\frac{dX}{dt} \right) = \frac{S_b}{Ms Lv} \left[R_g a_b \tau_c - \frac{\sigma}{\varepsilon_b + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_h^4 - T_c^4) + h_b (T_{ai} - T_h) \right]$	

Listing du programme

```

clear all;
clc;

global A
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Paramètres d'entrées fixes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%dimension et caractéristiques de la serre%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Lc=1.30;
lc=1.10;
hc=0.65;
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;
%débit d'air
Q=0;
%température de l'air inteérieur initial
Tai0=20;
%Chaleur massique de l'eau
Cpe=4186;
%constante de Boltzmann
sigma=5.6704*10^(-8);

```

```

%Dimension du support boue
Ls=1.28;
ls=1.08;
Sb=Ls*ls;
% Caractéristiques des boues
%Masse initiale
mb0=28;
%siccité initiale;
Sicitel=0.5;
%teneur initiale;
Xi=(1-Sicitel)/Sicitel;
%Masse sèche
Ms=mb0*Sicitel;
%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
Cpb_anhydre=1182 ;
%courbe caractéristique%%%B1*Xr + B2*Xr^2 + B3*Xr^3%%%
B1=5.45;
B2=-9.93 ;
B3=5.48 ;
%%%%%%%%%%Conditions opératoires de séchage%%%%%%%%
%Température de l'air asséchant:
Tae= 50.53 ;
%humidité relative de l'air asséchant:
Hr=0.6359;
%vitesse de vent:
Uv =1.22 ;
%Rayonnement solaire global:
Rg=728;
%%%%%%%%%%Paramètres secondaires%%%%%%%%%%
%température moyenne Tm1 entre boue et air int. %
Tm1=0.5*(Tb0+Tai0);
%température moyenne Tm1 entre couverture et air int. %
Tm2=0.5*(Tc0+Tai0);
%masse volumique de l'air à Tae,Tm1 et Tm2
Rho= 1.293*(273/(Tae+273));
Rho1= 1.293*(273/(Tm1+273));
Rho2= 1.293*(273/(Tm2+273));
%Chaleur massique de l'air à Tae,Tm1 et Tm2
Cp=1.933*10^-10*(Tae+273.15)^4-7.999*10^-7*(Tae+273.15)^3+1.141*10^-3*(Tae+273.15)^2-4.489*10^-1*(Tae+273.15)+1.0575*10^3;
Cp1=1.933*10^-10*(Tm1+273.15)^4-7.999*10^-7*(Tm1+273.15)^3+1.141*10^-3*(Tm1+273.15)^2-4.489*10^-1*(Tm1+273.15)+1.0575*10^3;
Cp2=1.933*10^-10*(Tm2+273.15)^4-7.999*10^-7*(Tm2+273.15)^3+1.141*10^-3*(Tm2+273.15)^2-4.489*10^-1*(Tm2+273.15)+1.0575*10^3;
%viscosité de l'air cinématique à Tae,Tm1 et Tm2
nu=(-1.3635*10^(-14)*(Tae+273.15)^3)+(1.0088*10^(-10)*(Tae+273.15)^2)+(3.4521*10^(-8)*(Tae+273.15))-3.4007*10^(-6);
nu1=(-1.3635*10^(-14)*(Tm1+273.15)^3)+(1.0088*10^(-10)*(Tm1+273.15)^2)+(3.4521*10^(-8)*(Tm1+273.15))-3.4007*10^(-6);
nu2=(-1.3635*10^(-14)*(Tm2+273.15)^3)+(1.0088*10^(-10)*(Tm2+273.15)^2)+(3.4521*10^(-8)*(Tm2+273.15))-3.4007*10^(-6);
%conductivité thermique de l'air à Tae,Tm1 et Tm2

```

```

lamb_air=1.5207*10^(-11)*(Tae+273.15)^3-4.857*10^(-
8)*(Tae+273.15)^2+1.0184*10^(-4)*(Tae+273.15)-3.9333*10^-4;
lamb_air1=1.5207*10^(-11)*(Tm1+273.15)^3-4.857*10^(-
8)*(Tm1+273.15)^2+1.0184*10^(-4)*(Tm1+273.15)-3.9333*10^-4;
lamb_air2=1.5207*10^(-11)*(Tm2+273.15)^3-4.857*10^(-
8)*(Tm2+273.15)^2+1.0184*10^(-4)*(Tm2+273.15)-3.9333*10^-4;
% 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);
%Nombre de Grashoff boue/air int. et couverture/air int. %
Gr1=(9.81*hc^3*Rho1^2*(Tai0-Tb0))/((Tai0+273)*nu1^2);
Gr2=(9.81*hc^3*Rho2^2*(Tc0-Tai0))/((Tai0+273)*nu2^2);
%Nombre de Prandtl boue/air int. et couverture/air int. %
Pr1=nu1*Cp1/lamb_air1;
Pr2=nu2*Cp2/lamb_air2;
%NOMBRE DE NUSSELT for boue_air int.
Nub=0.27*(Gr1*Pr1)^0.25;
%NOMBRE DE NUSSELT for couver_air int.
Nuc=0.54*(Gr2*Pr2)^0.25;
%Coefficient de convection air-boue
hb=Nub*lamb_air1/Ls;
%Coefficient de convection couverture-vent
hccv=5.67+3.86*Uv;
%Coefficient de convection air-couverture
hi=Nuc*lamb_air2/Lc;
%vitesse à phase constante
dX_dt=(Sb/(Lv*Ms))*(hb*3600)*(Tae-Th)+Rg*ab*Tau_C);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%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+273)^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*Sc*3600;
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;
A(1,14)=Sb*sigma*3600/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1);
A(1,15)=Rho*Sc*hc*Cp;
A(1,16)= B3*dX_dt;
A(1,17)= B2*dX_dt;
A(1,18)= B1*dX_dt;
A(1,19)=Xi;
A(1,20)=Tae;
A(1,21)=Rg*ab*Sb*Tau_C*3600;
A(1,22)=Rho*Q*Cp;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Conditions initiales%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0=0;
y0=Tai0;
q0=Tc0;
z0=Tb0;
r0=Xi;
dr0=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%paramètres de résolution%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0=0;

```



```

global A;
f2=(A(1,21)+A(1,11)*(y1-z1)-(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)
global A;
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(1,20)-q1)-A(1,5)*(q1-y1))/A(1,7);

%%%%%%%%%%%% Equations bilan massique %%%%%%%%%
function [f4]=fsys4(x1,y1,q1,z1,r1,dr)
global A;
f4=A(1,16)*(A(1,19)/r1)+A(1,17)*(A(1,19)/r1)+A(1,18)*(A(1,19)/r1);

%résolution du système d'équation par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4%
function[x1,y1,q1,z1,r1,dr]=syskutta(x0,y0,q0,z0,r0,dr0,xf,h)
global A;
x1=x0:h:xf;
y1(1)=y0;
q1(1)=q0;
z1(1)=z0;
r1(1)=r0;
dr(1)=dr0;

for n=1:1:floor((xf-x0)/h)
K1r= h*fsys4(x1(n), y1(n), q1(n), z1(n), r1(n), dr(n));
K1y= h*fsys1(x1(n), y1(n), q1(n), z1(n), r1(n), dr(n));
K1q= h*fsys3(x1(n), y1(n), q1(n), z1(n), r1(n), dr(n));
K1z= h*fsys2(x1(n), y1(n), q1(n), z1(n), r1(n), dr(n));

K2r= h*fsys4(x1(n), y1(n)+0.5*K1y, q1(n)+0.5*K1q, z1(n)+0.5*K1z, r1(n)+0.5*K1r, dr(n));
K2y= h*fsys1(x1(n), y1(n)+0.5*K1y, q1(n)+0.5*K1q, z1(n)+0.5*K1z, r1(n)+0.5*K1r, dr(n));
K2q= h*fsys3(x1(n), y1(n)+0.5*K1y, q1(n)+0.5*K1q, z1(n)+0.5*K1z, r1(n)+0.5*K1r, dr(n));
K2z= h*fsys2(x1(n), y1(n)+0.5*K1y, q1(n)+0.5*K1q, z1(n)+0.5*K1z, r1(n)+0.5*K1r, dr(n));

K3r= h*fsys4(x1(n), y1(n)+0.5*K2y, q1(n)+0.5*K2q, z1(n)+0.5*K2z, r1(n)+0.5*K2r, dr(n));
K3y= h*fsys1(x1(n), y1(n)+0.5*K2y, q1(n)+0.5*K2q, z1(n)+0.5*K2z, r1(n)+0.5*K2r, dr(n));
K3q= h*fsys3(x1(n), y1(n)+0.5*K2y, q1(n)+0.5*K2q, z1(n)+0.5*K2z, r1(n)+0.5*K2r, dr(n));
K3z= h*fsys2(x1(n), y1(n)+0.5*K2y, q1(n)+0.5*K2q, z1(n)+0.5*K2z, r1(n)+0.5*K2r, dr(n));

K4r= h*fsys4(x1(n), y1(n)+K3y, q1(n)+K3q, z1(n)+K3z, r1(n)+K3r, dr(n));
K4y= h*fsys1(x1(n), y1(n)+K3y, q1(n)+K3q, z1(n)+K3z, r1(n)+K3r, dr(n));
K4q= h*fsys3(x1(n), y1(n)+K3y, q1(n)+K3q, z1(n)+K3z, r1(n)+K3r, dr(n));
K4z= h*fsys2(x1(n), y1(n)+K3y, q1(n)+K3q, z1(n)+K3z, r1(n)+K3r, dr(n));

r1(n+1)=r1(n)+h*(K1r+2*K2r+2*K3r+K4r)/6;
y1(n+1)=y1(n)+h*(K1y+2*K2y+2*K3y+K4y)/6;
q1(n+1)=q1(n)+h*(K1q+2*K2q+2*K3q+K4q)/6;
z1(n+1)=z1(n)+h*(K1z+2*K2z+2*K3z+K4z)/6;
dr(n+1)=-A(1,8)*(r1(n+1)-r1(n))/h;
end

```

Annexe III corrélation climatiques

- **Corrélation de la température de l'air ambiant :**

L'équation (AIII-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 de l'UDES [1] (Choisnel, 1979).

$$T_{ae}(t) = T_{aemin} + kt(t)(T_{aemax} - T_{aemin}) \quad (\text{AIII-1})$$

Avec :

T_{ae} : Température a l'heure h en °C

T_{aemin} : Température minimale journalière en °C

T_{aemax} : Température maximale journalière en °C

kt : coefficient dépendant de l'heure et de la saison (voir tableau AIII.1)

Les températures maximales et minimales sont des données locales fournies par la station météorologique de l'UDES.

- **Corrélation de l'humidité relative de l'air :**

L'équation (AIII-2) donne l'évolution de l'humidité relative extérieure obtenue dans les mêmes conditions que celle de la température de l'air ambiant

$$Hr(t) = Hr_{max} - kr(t)(Hr_{max} - Hr_{min}) \quad (\text{AIII-2})$$

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 (voir tableau AIII.2)

Tableau. AIII.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

Tableau. AIII. 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

• **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 [2]:

$$U_z = U_{10} \beta \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (\text{AIII-3})$$

Avec :

U_z : Vitesse du vent mesurée à la hauteur z [m]

U_{10} : vitesse du vent moyen mesurée a 10 m en terrain dégagée [m.s⁻¹]

α et β sont les coefficient, fonction du type de terrain environnant extrait du tableau suivant :

Tableau AIII.3 : Coefficient 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 AIII.3 définis pour une zone rurale et ceux définis pour un terrain dégagé :

$$U_z = U_{10} 0.75 \quad (\text{AIII-4})$$

- **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 [3].

On propose de calculer l'intensité solaire global, arrivant sur une surface horizontale a tout instant en utilisant la corrélation suivante [5] :

$$R_g = a \sin(H)^b \quad (\text{AIII-5})$$

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 [4].

H est la hauteur solaire donnée par la formule suivante:

$$\sin(H) = \sin(Delt) \cdot \sin(LAT) + \cos(LAT) \cdot \cos(Delt) \cdot \cos(W) \quad (\text{AIII-6})$$

Le développement de la déclinaison solaire Delt en degrés est fourni avec une précision de 12" seconde d'arc [4]:

$$\begin{aligned} \text{Delt} = & 0.302 - 22.93 \cos(w'd) - 0.299 \cos(2w'd) \\ & - 0.243 \cos(3w'd) + 3.851 \sin(w'd) \\ & + 0.002 \sin(2w'd) - 0.55 \sin(3w'd) \end{aligned} \quad (\text{AIII-7})$$

Avec :

d = numéro du jour

$$w' = \frac{2\pi}{366}$$

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 [4]:

$$w = 15. (TU + CDT + CDL - 12) \quad (\text{AIII-8})$$

Avec :

TU = temps universel en heure

$$CDL = \text{correction de la longitude en heure } CDL = -LON \cdot \frac{4}{60}$$

La correction du temps en heure CDT, est exprimée par la relation [4]:

$$\begin{aligned} CDT = & \frac{1}{60} (0.4197 \cos(w'd) - 3.2265 \cos(2w'd) \\ & - 0.0903 \cos(3w'd) - 7.3509 \sin(w'd) \\ & - 9.3912 \sin(2w'd) - 0.3361 \sin(3w'd)) \end{aligned} \quad (\text{AIII-8})$$

- **Vérification des corrélations semi-empiriques :**

- Température de l'air ambiant :

Les valeurs obtenues de la formulation mathématique sont comparées à celles mesurées sur la station de l'UDES (Figure AIII.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 (12/06/2011 et 13/06/2011) respectivement :

$$T_{aemin} = 16 \text{ et } 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad T_{aemax} = 29 \text{ et } 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

L'écart relatif moyen observé entre les valeurs simulées et mesurées est de l'ordre de 2,5 %

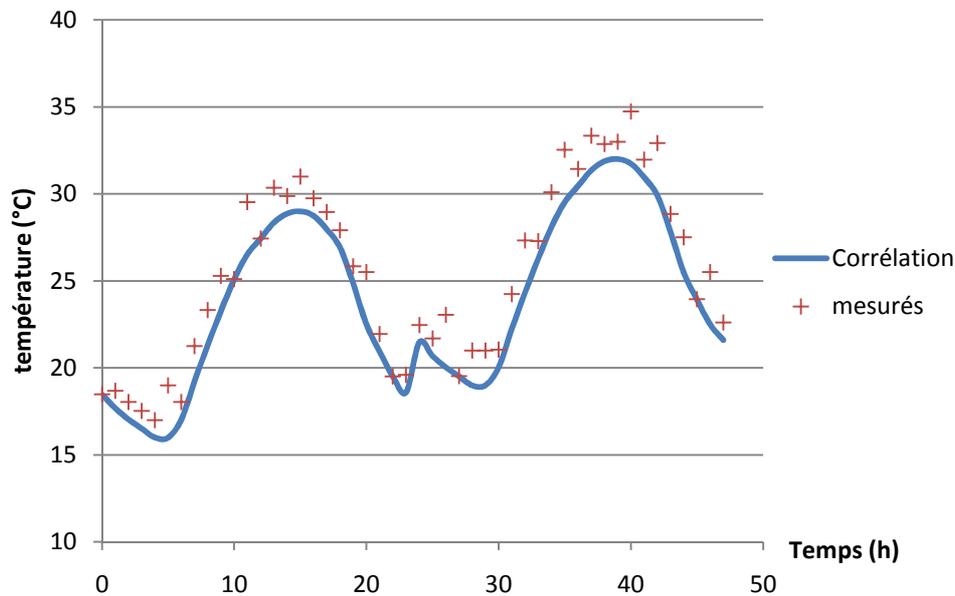


Figure AIII.1 : Evolution de la température de l'air extérieur (simulé et mesuré)

- l'humidité de l'air extérieur :

La figure (Figure AIII.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 :

$$Hr_{min} = 50 \% \text{ et } 54 \% \text{ et } Hr_{max} = 80\% \text{ et } 86 \%$$

Les valeurs de $kr(t)$ proviennent de la table (Tableau AIII.2)

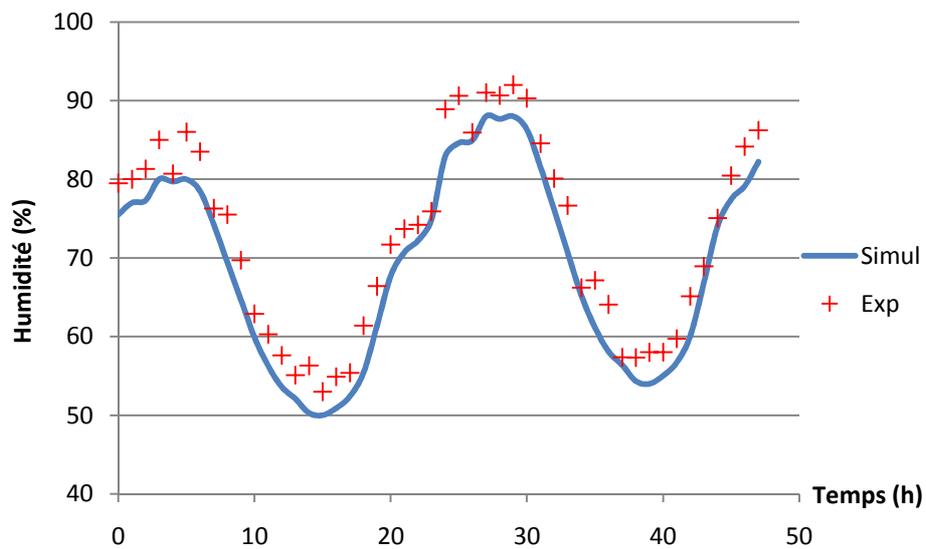


Figure AIII.2 : évolution de l'humidité (mesuré et simulé) de l'air extérieur

Référence Bibliographique :

[1] Choisnel, E., :

Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, La météorologie, 11 103-133 (1977)

[2] Kittas, C., :

Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres, **[en ligne]** Thèse de 3^{ème} cycle Université de Perpignan (1980), 168 p. Disponible sur < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192387900323> >. (Consulté le 05/05/2011)

[3] Daguinet, M.,

Les séchoirs solaires : théorie et pratique **[en ligne]**. 1^{er} Ed. Unesco 1985. Disponible sur : < <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001234/123413fb.pdf> > (consulté le 03/05/2011)

[4] Idliman, A.,

Etude théorique d'un système de séchage des peaux de cuirs pour la région de Marrakech, constitue d'une serre agricole jouant le rôle d'un générateur solaire d'air chaud et d'un séchoir conventionnel **[en ligne]**. Thèse de 3^{ème} cycle, école nationale supérieure de Marrakech, (1990), 253 p disponible sur < <http://www.scribd.com/doc/52960321/Paper-solar-drying-model> > (consulté le 01/06/2011).

[5] Duffie, J.A., Beckman ,W.A.,

Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons Inc, New York (1980).

Annexe IV : Cinétique de disparition de l'eau dans la boue :

Dans une boue humide l'eau à l'intérieure se présente sous 2 formes :

- L'eau libre.
- L'eau interstitielle.
- L'eau liée.

Dans le procédé de séchage, l'eau libre est la première à être évaporé étant donné qu'aucune force ne la retienne à la boue mais arrivé à un certain point, l'eau libre s'évapore complètement pour laisser dans la boue que de l'eau interstitielle et l'eau liée.

L'intérêt de cette expérience est de mettre en évidence l'eau libre présente dans un produit à sécher, et l'identification du point à partir de lequel l'eau liée commence à s'évaporer.

La courbe donnant la perte de masse en eau en fonction du temps est représentée sur la figure suivante :

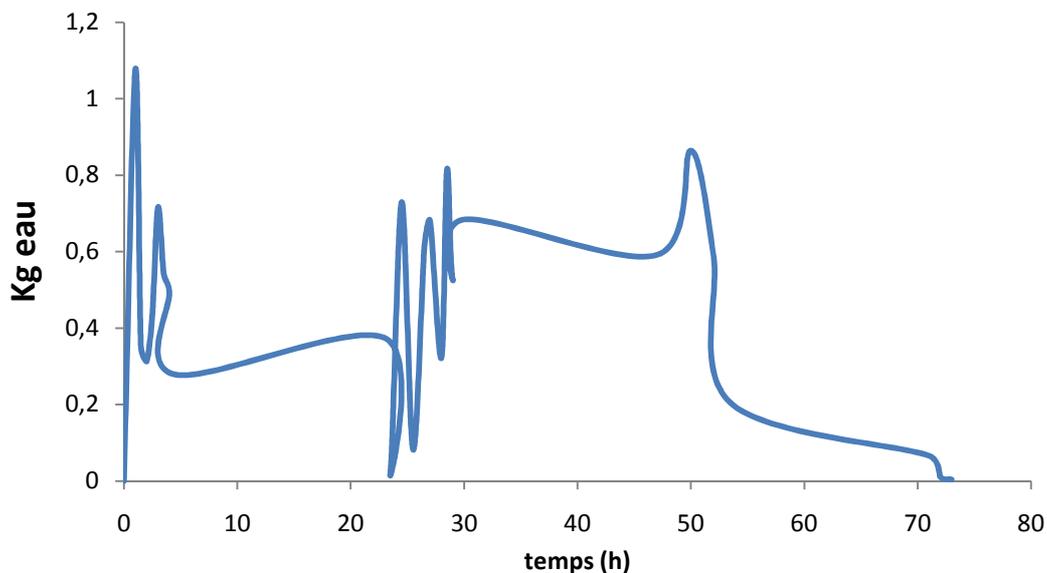


Figure 1: perte en masse d'eau sur une boue épaissie témoin

Cette courbe présente une variation irrégulière de la perte d'eau en fonction du temps pour le bac témoin, mais nous pouvons tout de même diviser ce graphique en trois zones distinctes :

Zone 1 : pour $t \in [0h ; 50h]$: où on observe des fluctuations de la perte d'eau autour d'une valeur moyenne estimée à 0,6 Kg/h.

Ces perturbations sont essentiellement dues aux raisons suivantes :

- Différences de température au cours de la journée mais aussi entre la journée et la nuit.
- Conditions climatiques variables : ciel clair ou nuageux qui joue sur l'intensité du rayonnement solaire.

- Absence ou présence de vent au cours du séchage : la présence du vent induit à une évacuation rapide de l'air saturé loin de l'échantillon à sécher et donc maintenir une vitesse de séchage constante par contre son absence de vent constitue un handicap sur le processus du séchage.

Zone 2 : pour $t \in [50h : 55h]$: La masse d'eau perdue décroît très rapidement en fonction du temps et cela est dû au fait que l'eau évaporée ne trouve plus sur une couche indépendante du produit mais à l'intérieure de celui-ci, ce qui rend son évaporation plus difficile.

Zone 3 : pour $t \in [55h : 72h]$: où la en eau continue à diminuer en fonction du temps ce qui signifie que l'élimination de l'eau devient de plus en plus difficile et que l'énergie apportée par le rayonnement solaire ne suffi pour éliminer la même quantité d'eau que dans le cas de la première zone.

Interprétations des résultats :

La première phase de séchage se déroule vitesse constante, cela est dû au fait que l'eau ne subit aucune force qui la relie à la boue \Leftrightarrow eau libre.

La deuxième phase se déroule à vitesse décroissante, cela s'explique par la non disponibilité de l'eau à la surface de la boue (eau se trouvant à l'intérieure de la boue) \Leftrightarrow eau interstitielle.

La troisième phase de séchage se déroule avec une continuité sur la diminution de la perte de masse en fonction du temps, cela est due au fait que l'eau présente à l'intérieure du produit nécessite une plus grande énergie pour la libérer car ils existent des forces qui la maintiennent à la boue \Leftrightarrow eau liée.

La présence de l'eau libre, interstitielle et liée en fonction de la siccité de la boue est représentée sur la figure suivante :

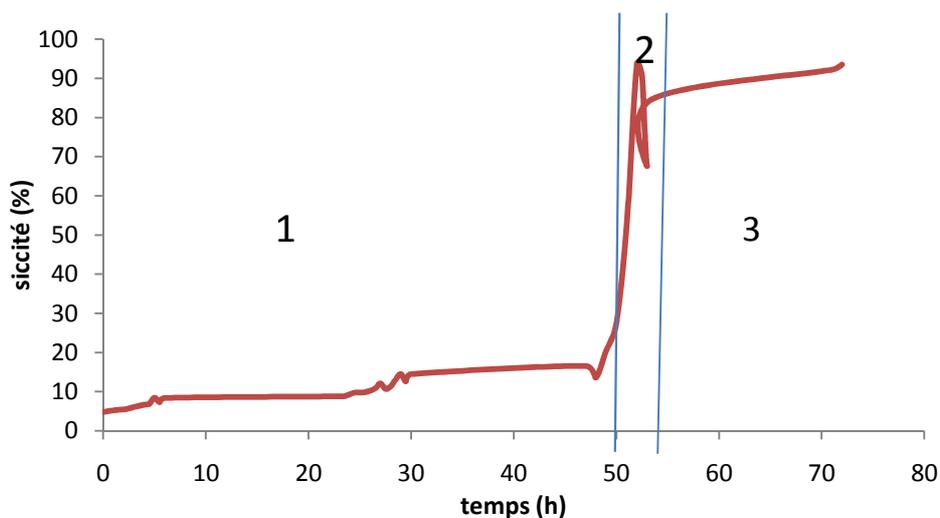


Figure 2: les types d'eaux en fonction de la siccité

Interprétation des résultats :

Zone 1 :

On remarque que la siccité n'augmente pas beaucoup en fonction du temps, cela est dû à l'élimination de l'eau présente à l'extérieure du produit, donc la masse sèche sera toujours aussi diluer dans l'eau ce qui entraine un très faible changement sur la siccité (de 5% à 25% en 50 heures de séchage).

Zone 2 :

L'augmentation de la siccité dans cette zone est très significative en raison de l'évaporation de l'eau interstitielle laissant accroître la masse sèche par rapport à la masse humide et donc l'augmentation de la siccité.

Zone 3 :

Dans cette zone, le changement de siccité n'est pas significatif en raison de la difficulté de l'évaporation de l'eau liée.

Remarque :

L'introduction d'un système de retournement des boues, permet d'augmenter le volume des boues introduites car ce système permet de casser la structure poreuse de la boue et donc libérer l'eau interstitielle à la surface ce qui impliquera une cinétique de séchage rapide.

Annexe V : Perspectives

Consommation électrique de la station de traitement des eaux de Tipaza :

Comme toute station de traitement, La STEP de Tipaza consomme de l'électricité en ces différents ouvrages, allant des stations de relevages jusqu'à le traitement final des boues qui consiste en la déshydratation.

Les dispositifs mis en place lors du traitement comportent plusieurs machines qui consomment de l'électricité à des puissances différentes. Les machines électriques qui composent la station ainsi que leurs consommations en énergie électrique sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 1: consommation d'électricité de la station de TIPAZA

Item	Tenant	Désignation	Nombre	Puissance (kW)
1	Transfo	TGBT	1	607
2	TGBT	MCC1 à MCC5	5	565
3	MCC1 MCC2	et Aérateurs de surface	6	450
4	MCC3	Pompe de relevage	3	48
5		Dégrilleur fin	1	2,2
6		Groupe tournant	1	3
7		Surpresseurs air lift	1	7,5
8		Surpresseurs air déshuilage	1	3
9		Classificateur de sable	1	1,5
10	MCC4	Décanteurs	2	1,84
11		Pompes de recirculation	2	18
12		Pompes d'évacuation	2	6
13	MCC5	Epaississeur	1	0,185
14		Compresseur	2	2,2
15		Pompe de lavage	2	8
16		Mélangeur de Polymère	1	0,12
17		Mélangeur vertical et horizontal	1	0,74
18		Pompe doseuse	2	1,26
19		Mono Pompe	2	6
20		Réacteur cylindrique	2	0,74
21		Filtre à bande	2	1,8
22		Bande transporteuse	2	3
23		Granulateur	1	1,5
24		Chaux vif	1	0,37
25		Pompe immerisibles	2	2,2
26		Chauffage	1	0,75
27		Vanne électrique	1	0,05
Consommation totale en électricité				1741,955

Expérimentation 1 :

La première expérience de séchage effectuée utilisait les boues prises dans les bassins biologiques de siccité d'environ 0,45%. C'est-à-dire que les étapes MCC4 et MCC5 ne seront plus nécessaires pour le traitement. Ces étapes consomment 54,755 KW.

L'introduction du séchage solaire des boues biologique nous a permis d'économiser environ 3,14% de la consommation globale de la station.

Expérimentation 2 :

La deuxième expérience a été effectuée sur des boues épaissies de siccité de 5%, ce séchage nous permet donc d'éviter l'étape MCC5 du traitement et donc d'économiser 28,915 KW de consommation électrique, ce qui signifie une diminution de près de 1,67% de la consommation électrique globale de la station.

Production de boues de la station de Tipaza :

La boue produite au niveau de la station de Tipaza est de type déshydratée (sortie de la déshydratation mécanique, avec une siccité d'environ 20%).

La variation de la production des boues déshydratées au cours de l'année 2010 de la station de Tipaza est représentée sur le graph suivant :

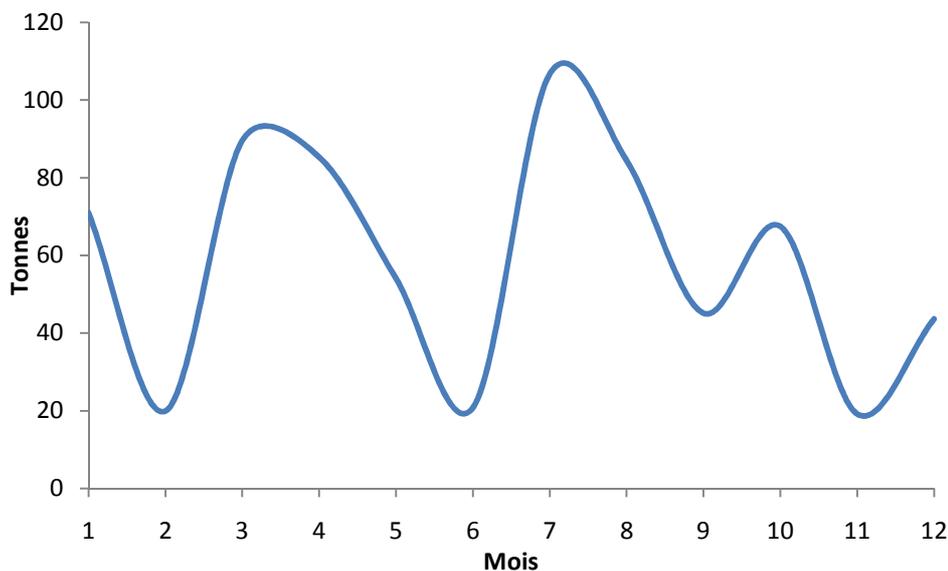


Figure 1: production de boue de la station de Tipaza 2010

La production annuelle de boues déshydratées de la station de Tipaza est de 707,2 tonnes avec une siccité de 20%.

La siccité est $Si = \frac{\text{Masse sèche}}{\text{Masse humide}}$ \Rightarrow Masse sèche = $Si * \text{Masse humide} = 0.20 * 707,2 = 141.44$ tonnes par an.

Calcul de la masse humide produite avec une siccité de 5% (sans passer par la déshydratation mécanique) :

$$\text{Masse humide} = \frac{\text{Masse sèche}}{Si} = \frac{141,44}{0,05} = 2828,8 \text{ tonnes de boue épaissies par an.}$$

Calcul de masse volumique de la boue de départ :

$$\text{La siccité de départ est de } 5\% = \frac{Ms}{M \text{ humide}} = \frac{Ms}{M_{\text{eau}} + Ms} \Rightarrow M_{\text{eau}} = Ms \left(\frac{1}{Si} - 1 \right).$$

Pour l'échantillon de départ, nous avons trouvé une masse sèche de 0,385g dans une masse humide de 7,7014g, donc la masse d'eau est de $M_{\text{eau}} = 0,385 \left(\frac{1}{0,05} - 1 \right) = 7,315\text{g}$.

Le volume d'eau correspondant est de 7,315 ml (masse volumique de l'eau est de 1Kg/L).

Le volume de la masse sèche de départ est négligeable par rapport à celle de l'eau. Donc la masse volumique de l'échantillon de départ est de 1,05 Kg/L.

Gain de volume dans le processus de séchage solaire des boues :

Le gain de volume au cours du séchage solaire des boues est obtenu au moyen de la siccité car :

- Une boue de 5% de siccité \Rightarrow 50g de matières sèches dans 1 L d'eau \Leftrightarrow 150g de matière sèches dans 3L d'eau \Leftrightarrow 100g de matières sèches dans 2 L d'eau.
- Une boue de 10% de siccité \Rightarrow 100g de matières sèches dans 1 L d'eau.
- Une boue de 15% de siccité \Rightarrow 150g de matières sèches dans 1 L d'eau.

Gain en volume = (volume initial / volume final) par rapport à une même masse de matière sèche.

Le passage d'une siccité de 5% à 10% pour une $Ms = 50\text{g}$ correspond à un gain en volume de 2. Et le passage de 5% à 15% de siccité pour la même masse correspond à un gain de 3 fois en volume.

La figure suivante représentant le gain en volume en fonction de la siccité est le suivant :

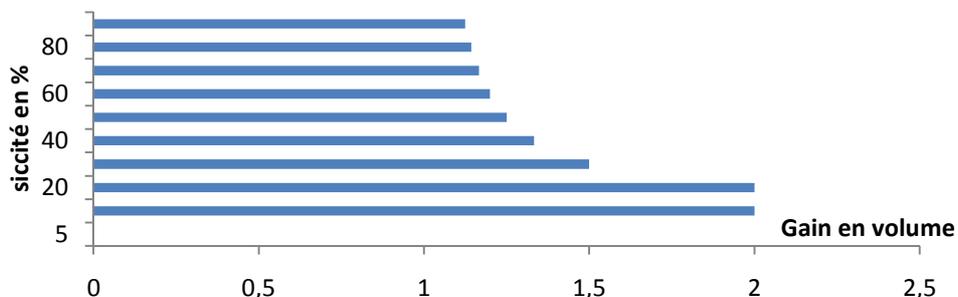


Figure 2: Le gain de Volume en fonction de la Siccité

On remarque qu'au début du séchage, le gain en volume est de 2, ce gain diminue progressivement en fonction de l'augmentation de la siccité car le volume sec prédominera au fur et à mesure du séchage et l'évaporation de l'eau ne sera plus aussi importante que ce qu'elle était au début de l'expérimentation.

Le gain de volume ne devient plus intéressant au delà de 70% de siccité car il descendra en dessous des 1,2 avec une énergie solaire plus importante pour libérer l'eau.

Calcul de la capacité d'évaporation de la boue :

Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons travaillé avec une serre de 1,43 m² et une épaisseur d'environ 1 cm.

La siccité de la boue est passée de 5% jusqu'à 95% ce qui correspond à un gain en volume de 19 fois $\Rightarrow 19 = V_{\text{initial}}/V_{\text{final}} \Rightarrow V_{\text{final}} = V_{\text{initial}}/19 = 15/19 = 0,8 \text{ L}$.

Ce résultat correspond à un volume d'eau évaporé de $15 - 0,8 = 14,2 \text{ L}$ d'eau par 1,43m² de serre.

La capacité d'évaporation de la boue est donc de 10L d'eau évaporée/m² de boue avec une épaisseur de 1cm au cours de la période de séchage de 72 heures, soit 100 L/m² en 1 mois $\Leftrightarrow 1,2 \text{ tonnes d'eau évaporée/m}^2 \cdot \text{an}$.

Calcul de la surface utile :

La surface utile se définit comme étant la surface nécessaire au séchage solaire d'une quantité donnée de boue.

La production maximale de boues est de 424 tonnes avec une siccité de 5% qui correspond au mois de juillet 2010. Le volume correspondant est de 403810 L de boues.

Le séchage d'une siccité de 5% jusqu'à 95% nous permet d'avoir un gain de volume de 19, ce qui correspond à un volume final de boue de 21253 L.

Le volume d'eau évaporée est de $V_{\text{eau}} = 403810 - 21253 = 382557 \text{ L}$. Ce volume nécessite une surface de serre d'environ 3825 m² qui correspond à six serres de 50m de longueur et de 12m de largeur.

Mise en place d'un plancher chauffant pour le séchage des boues par biogaz généré des digesteurs :

Les boues liquides sont envoyées dans un digesteur. Des bactéries transforment la boue en bio gaz – combustible composé de 60% de méthane et 40% de CO₂. Le bio gaz passe dans une chaudière. L'eau est alors réchauffée à 80°C puis passe par un échangeur pour être chauffée à 45°C. Le plancher est ainsi chauffé à basse température et permet de sécher les boues destinées à être utilisées dans l'agriculture comme engrais.

Le chauffage des digesteurs représente de 15 à 30 % de l'énergie produite.

Il ya Possibilité de fabriquer de l'électricité à partir du biogaz généré par les digesteurs pour diminuer la facture énergétique de la station d'épuration.

En se basant sur les données communiquées par les constructeurs sur le tableau (1), on constate les valeurs moyennes suivantes :

Tableau 2: quantité d'eau évaporée avec et sans plancher chauffant

	Séchage solaire naturel	Séchage avec plancher
Tonne d'eau évaporée/m ² *an (--)	De l'ordre de 0,8	De l'ordre de 1,8

(--) : Valeur moyenne retenue dans les projets de dimensionnement [1].

En utilisant le plancher chauffant, on peut augmenter le rendement de la serre de 125%.

Si un tel rendement est possible pour notre travail, la surface utile pour le séchage solaire des boues devient donc :

	Séchage solaire naturel	Séchage avec plancher
Capacité d'évaporation de la boue (L/mois)	100	225
Surface utile (m ²)	3825	1700
Nombre de serre de (50m*12m)	6	3

Production d'électricité par digestion anaérobies :

La station de Tipaza est de type boues activées à faible charge : La digestion de la boue biologique permet une production de méthane de 110m³/t de Ms introduite sachant que PCI du méthane est de 9,95 kWh/m³.

La production globale de MS de la station de Tipaza au cours de l'année 2010 est de 776 tonnes.

La production annuelle envisageable de méthane est de $P = 110 * 776 = 85360 \text{ m}^3/\text{an}$.

L'énergie totale disponible annuellement est :

$$E = P * \text{PCI (méthane)} = 85360 * 9,95 = 0,85 \text{ GWh/an.}$$

En considérant l'énergie valorisable est de l'ordre de 95%, on obtient : $E_v = 0,85 * 0,95 = 0,8075 \text{ GWh/an}$.

Energie nécessaire pour le chauffage du digesteur :

On suppose que le chauffage consomme 15% de l'énergie produite et le rendement de la chaudière est de 90%.

$$E_{cd} = (E_v * 0,15) / 0,9 = 0,1345 \text{ GWh/an. L'énergie restante sera donc de } E_r = E_v - E_{cd} = 0,673 \text{ GWh/an.}$$

La station fonctionne 8 heures tous les jours, soit 2920 heures par an. La consommation de la station par an sera donc de $E_g = 1687 * 3600 * 2920 = 17733$ GWh/an.

La production de biogaz fournira 0,0040% de la consommation totale de la station. (Économie sur le séchage comprise).

Si on utilise un réchaud-solaire à la place de la chaudière on économisera 15% d'énergie et la contribution globale de ce système par rapport à la consommation globale en électricité sera de 0,0045%.

Dimensionnement d'un extracteur d'air pour la serre réalisé :

Lors du déroulement de nos expériences, on a constaté que le séchage des boues était moins performant dans la serre par rapport aux boues qui se trouvaient à l'air libre et ceci est dû à la mauvaise circulation d'air à l'intérieur de la serre ce qui a entraîné une accumulation d'air saturé en eau (humidité élevée).

Le nombre de Richardson permet de déterminer le type de convection dominant (ou dans le cas échéant la présence d'une convection mixte). Il est défini comme étant le rapport du nombre de Grashof au carré du nombre de Reynolds.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (AIV-1)$$

Avec :

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (AIV-2)$$

U : Vitesse de l'air [m.s⁻¹]

D : diamètre caractéristique [m]

ν : Viscosité cinématique de l'air [m.s⁻²]

Une valeur de Ri comprise entre 0,1 et 1 indique une convection mixte. Dans le cas où $Ri \ll 0.1$, la convection forcée est prépondérante.

D'après notre expérience, on a pris la valeur maximum de l'écart entre la température de l'air et celle de la boue

Le détail de calcul est réalisé à l'aide du logiciel de calcul Maple© qui détermine le débit minimum à appliquer pour passer de la convection naturelle à la convection forcée.

$$Ri := \frac{Gr}{Re^2};$$

$$\frac{g \beta \Delta T L^3 \rho^2 \nu^2}{\mu^2 U^2 Da^2}$$

$$\rho := 1.293 \cdot \left(\frac{273}{T} \right);$$

$$\frac{352.989}{T}$$

$$v := -1.363 \cdot 10^{-14} \cdot T^3 + 1.009 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 + 3.452 \cdot 10^{-8} \cdot T - 3.401 \cdot 10^{-6};$$

$$-1.363000000 \cdot 10^{-14} T^3 + 1.009000000 \cdot 10^{-10} T^2 + 3.452000000 \cdot 10^{-8} T - 0.000003401000000$$

$$\mu := \rho \cdot v;$$

$$\frac{1}{T} (352.989 (-1.363000000 \cdot 10^{-14} T^3 + 1.009000000 \cdot 10^{-10} T^2 + 3.452000000 \cdot 10^{-8} T - 0.000003401000000))$$

$$\beta := \frac{1}{T};$$

$$\frac{1}{T}$$

$$L := 0.65;$$

$$0.65$$

$$g := 9.81;$$

$$9.81$$

$$Da := 0.07;$$

$$0.07$$

$$T := 30.7;$$

$$30.7$$

$$\Delta T := 16.31;$$

$$16.31$$

$$Ri$$

$$\frac{292.0979995}{U^2}$$

$$eqt := 0.1 = \frac{292.0979996}{U^2};$$

$$0.1 = \frac{292.0979996}{U^2}$$

$sln := solve(eqt, U);$

54.04609140, -54.04609140

$Umin := 54.0461;$

54.0461

$Qmin := \frac{Umin \cdot 3.14 \cdot Da^2}{4};$

0.2078883236

Donc il faut au minimum deux extracteur d'air avec un débit minimum de 0.11 m³/s.

Références bibliographiques :

[1] : C.Brison –J.M.Perret-J.P canler

Le séchage solaire des boues ; état actuel de l'art et retour d'expérience.

Cemagref, département technologique, Lyon.