

M.C.H. 81156

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA  
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR  
Département de Génie des procédés



*Mémoire de fin d'études*  
*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat*

*Spécialité: Génie des Procédés*  
*Option : Génie Chimique*

Présenté par :

- Maatallah Karima
- Terea Rokaya

## Thème

**Etude et réalisation d'un séchoir solaire  
destiné pour le séchage des boues des  
stations d'épurations urbaines**

Soutenu publiquement devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Membre de jury
Beba Addelhafid	M.C.	Président
Bouhekima Bachir	Pr.	Examineur
Boughali Slimane	M.A.C.C.	Examineur
Mennouche Djamel	M.A.	Rapporteur
Boubekri A. Ghani	M.A.C.C.	Co. Rapporteur

Année universitaire : 2007/2008

# Remerciement

**Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui nous a offert le courage, la patience et la volonté, pour effectuer ce modeste travail.**

**Nous remercions notre encadreur M.DJAMEL MENNOUCHE et M. BOUBECRI A. GHANI qui nous a aidé et dirigé et orienté vers le succès.**

**Nous adressons également nos remerciements au technicien du laboratoire M. HOUTI AHMED, et le travailleur M.MOHAMED SAIDATE qui nous a aidé dans ce travail.**

**Notre remerciements s'adressent aussi à M. BABI YUCEF pour son aide et conseil. Nous remercions également les membres de jury, tous les enseignants sans exception, et les étudiants du département GENIE DES PROCEDES.**

**Merci également à toutes les personnes qui ont contribué de Prés ou de loin à la réalisation de ce travail.**

**Enfin, merci à tous nos proches**

## Résumé

Dans le souci de contribuer à la protection de l'environnement et à valorisation des déchets issus des S.T.E.P, nous avons mené cette étude expérimentale qui consiste à la conception d'un séchoir solaire simple de type serre.

Les tests des conditions de fonctionnement du séchoir réalisés ont été faits par les moyens de suivi adéquats des différents paramètres physiques tel que le temps de séjour des boues dans le séchoir, les températures, l'humidité relative de l'air ainsi que la teneur en eau du produit.

L'efficacité de ce séchoir est prouvée après l'analyse des résultats expérimentaux qui montre l'augmentation de la température dans le séchoir et l'homogénéité du séchage des boues à cause de la distribution homogène de l'air asséchant.

**Mots clés :** les boues, séchoir solaire, séchage.

## ملخص

في إطار حماية البيئة وتثمين الفضلات الناتجة من محطات تصفية المياه المستعملة، كانت هذه الدراسة التجريبية التي تتضمن تركيب نموذج لمجفف شمسي بسيط، واختبار شروط عمله بواسطة دراسة العوامل الفيزيائية التالية: زمن بقاء الوحل داخل المجفف، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية للهواء المجفف بالإضافة إلى نسبة الماء في الوحل.

إن فعالية المجفف تم التحقق منها من خلال تحليل نتائج التجربة التي برهنت على ارتفاع مهم لدرجة الحرارة داخل المجفف، وتجانس معتبر في طريقة تجفيف الوحل.

الكلمات الدالة: الوحل - مجفف شمسي - التجفيف.

## NOTATIONS

Symbols	Désignations	Unités
$\lambda_c$	conductivité thermique	W/(m.K)
T	température	K
S	surface	m <sup>2</sup>
$h_c$	coefficient de convection thermique	W/(m <sup>2</sup> .K)
$\rho_f$	masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\mu_f$	viscosité cinématique	kg/(m.s)
$\Phi$	flux de chaleur	W
$\Phi$	Puissance transmise	W
X	teneur en eau du produit à base sèche	kg eau / kg (MS)
$X_r$	teneur en eau du produit à base humide	kg eau / kg (Mh)
$X_f$	teneur en eau finale	kg eau / kg (MS)
$M_s$	masse sèche du produit	kg
$M_h$	masse humide du produit	kg
-dx/dt	vitesse de séchage du produit	kg eau / (kg (MS).s)
V	vitesse de l'air	m/s
$H_r$	humidité relative	%
$H_a$	humidité absolue	kg eau / kg (as)
$H_r$	humidité relative	kg eau / kg (as)
$\sigma$	constante de Stephan-Boltzman	Wm <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
$\epsilon_1$	facteur d'émission de la surface grise	
$q_r$	quantité d'énergie rayonnée	W
Q	quantité de chaleur nécessaire dans le séchoir	W
$cp_s$	Chaleur spécifique du produit solide	KJ/kg. °c
$cp_l$	Chaleur spécifique de l'eau	KJ/kg. °c
$cp_v$	Chaleur spécifique de la vapeur d'eau	KJ/kg. °c
$\lambda_{vap}$	Enthalpie de vaporisation	KJ/kg
$X_e$	teneur en eau du produit à l'entrée	kg eau / kg (MS)
$X_s$	teneur en eau du produit à la sortie	kg eau / kg (MS)
G	Débit massique	Kg/s
$H_E$	humidité de l'air à l'entrée	kg eau / kg (as)
$H_S$	humidités de l'air à sortie	kg eau / kg (as)
$M_v$	débit de l'eau évaporée	Kg/s
$\epsilon$	porosité volumique	
C	compacité	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
A	surface d'échange	m <sup>2</sup>
$A_w$	activité de l'eau	
J	flux massique surfacique	Kg / (m <sup>2</sup> .s)
$C_m$	fraction massique	
$D_f$	coefficient de diffusion	m <sup>2</sup> /s
$k_f$	perméabilité intrinsèque	m <sup>2</sup>

# SOMMAIRE

Introduction .....	Page 01
--------------------	------------

## PARTIE THEORIQUE

### Chapitre I : Notion générale de séchage

I-1 Généralités .....	04
I-2- Humidité absolue .....	04
I-3 Humidité relative .....	04
I-4 Grandeurs caractéristiques des gaz humides .....	04
I-4-1 Humidité absolue .....	04
I-4-2 Humidité relative .....	05
I-5 Point de rosée .....	05
I-6 Température du bulbe humide .....	05
I-7 Caractéristique d'un solide poreux .....	06
I-7-1 Porosité volumique d'un produit .....	06
I-7-2 Compacité d'un produit .....	07
I-8 Cinétique de séchage .....	08
I-8-1 Etablissement des courbes de séchage .....	08
I-8-2 Période de mise en température (région a) .....	08
I-8-3 Période à allure constante (région b) .....	09
I-8-4 Période de ralentissement (région c) .....	09
I-9 Transfert de chaleur .....	10
I-9-1 Transfert par conduction .....	10
I-9-2 Transfert par convection .....	10
I-9-3 Transfert par rayonnement .....	11
I-10 Transfert de masse .....	12

### Chapitre II : Traitement des boues

II-1 Introduction .....	15
II-2 Définitions et origine des boues .....	15
II-3 Nature et origine de l'eau usée .....	15
II-4 Traitement des boues .....	16
II-4-1 Types des boues .....	16
II-4-2 États physiques d'une boue .....	18
II-4-3 Filières de traitement des boues d'épuration .....	18
II-5 Destination finale des boues .....	21
II-5-1 Incinération des boues .....	21

II-5-2 Épandage agricole des boues .....	21
II-5-3 La mise en décharge .....	21
II-6 Exemple de station d'épuration .....	22
II-7 Circuit des boues dans station de Touggourt .....	26
II-8 Problèmes et propositions .....	27

### **Chapitre III : Séchage thermique des boues**

III-1 Introduction .....	29
III-2 Différentes techniques de séchage des boues .....	29
III-2-1 Lits de séchage .....	29
III-2-2 Séchage thermique .....	31
III-2-3 Le séchage thermique des boues .....	32
III-2-4 Séchage solaire des boues .....	34
III-3 Conception de séchoir solaire sous serre des boues .....	42
III-3-1 Transfert thermique dans le séchoir .....	43
III-3-2 bilan thermique .....	43
III-3-3 Bilans massiques .....	43

## **PARTIE EXPERIMENTALE**

### **Chapitre IV : Conception de séchoir solaire**

IV-1 Fiche technique de séchoir .....	46
IV-2 Matériaux utilisés .....	48
IV-3 Etapes de conception du séchoir .....	48
IV-4 Essais de fonctionnement du séchoir .....	58
IV-4-1 Appareillage de mesures .....	58
IV-4-2 Détermination de la masse sèche de produit (la boue) .....	59
IV-4-3 Résultats expérimentaux .....	59
<b>Conclusions</b> .....	73
<b>Références</b> .....	75
<b>Annexes</b>	

## Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Volume de contrôle microscopique	6
2	Volume de contrôle macroscopique	7
3	Périodes du séchage	8
4	Relation entre le type de boues et la teneur en eau	30
5	Lits de séchage plantés de roseaux	31
6	Le séchoir rotatif	32
7	Le séchoir pneumatique dit séchoir flash	32
8	Le séchoir rotatif	33
9	Le séchoir à palettes	33
10	Schéma de principe du séchage solaire	35
11	Séchage solaire sous serre de boue	38
12	Schéma de fonctionnement de serre	38
13	Cochon électrique	40
14	Rouleau scarificateur du système IST	41
15	Système de retournement du procédé Soliamix	41
16	Schéma de séchoir solaire sous serre	47
17	Etape 1	49
18	Etape 2	50
19a	Etape 4	51
19b	Etape 4	51
19c	Etape 4	52
20a	Etape 5	52
20b	Etape 5	52
21	Etape 6	53
22a	Etape 7	53
22b	Etape 7	53
23a	Etape 8	54
23b	Etape 8	54
24a	Etape 9	54
24b	Etape 9	54
24c	Etape 9	55
25a	Etape 10	55
25b	Etape 10	55
26a	Etape 11	56
26b	Etape 11	56
27a	Etape finale	57
27b	Etape finale	57
28	Variation de la teneur en eau pour les boues en fonction de temps	60
29	Variation de la teneur en eau pour le 1 <sup>er</sup> jour	60

30	Variation de la teneur en eau pour le 2 <sup>ème</sup> jour	61
31	Variation de la teneur en eau pour le 3 <sup>ème</sup> jour	61
32	Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 1 <sup>er</sup> jour	62
33	Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 2 <sup>ème</sup> jour	62
34	Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 3 <sup>ème</sup> jour	63
35	Variation de la température en fonction de temps pour le 1 <sup>er</sup> jour	65
36	Variation de la température en fonction de temps pour le 2 <sup>ème</sup> jour	66
37	Variation de la température en fonction de temps pour le 3 <sup>ème</sup> jour	67
38	Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour 1 <sup>er</sup> jour	68
39	Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour 2 <sup>ème</sup> jour	69
40	Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour 3 <sup>ème</sup> jour	69
41	Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 1 <sup>er</sup> jour	70
42	Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 2 <sup>ème</sup> jour	71
43	Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 3 <sup>ème</sup> jour	71

### Liste des Photos

N°	Titre	Page
1	Bassins d'aération	22
2	Dégrillage	23
3	Dessablage	23
4	Déshuilage	24
5	Décanteurs	24
6	Bassins de chloration	25
7	Epaississeur	25
8	Lits de séchage	26

# **Introduction**

### Introduction

Les boues résiduelles sont les rejets solides suites à un traitement biologique ou physico-chimique d'eaux usées (urbain et industriel). La qualité des boues ainsi obtenues dépend des caractéristiques des boues à traiter (physique -chimique- biologique), un traitement physique (décantation –séchage...etc.) et biologique (digestion des boues) est un étape indispensable à fin d'une part, réduire le volume et d'autre part, éliminé pathogène pour protégé les écosystème des métropoles du point du rejet.

Le séchage des boues obtenues suite avant leur rejet dans la nature devra être effectué selon un procédé thermique naturel ou autre ,Notre travail dans cette étape est réalisé est réalisé un prototype de séchoir solaire simple qui va joué le rôle d'un lit de séchage .

Dans le soucis de contribuer à la diminution de prix de revient de station d'épuration (S.T.E.P). Nous avons menais cette modeste de travail expérimental qui consiste à la réalisation d'un séchoir solaire destinée pour les petites station travaillions à force charge.

Le principe de fonctionnement de l'appareil est la génération une chaleur par l'intermédiaire à capteur solaire (effet de serre), cette chaleur à piégé constitue un microclimat favorable pour évaporé l'eau contenue dans l'échantillon.

L'évolution de l'humidité en fonction de temps permettra d'optimiser le temps utile pour un séchage conversible des boues et pour éviter le danger une fois rejeté dans la nature.

Pour ce ci nous avons présenté ce mémoire selon le cheminement suivant :

**-Chapitre I:** nous avons développé la notion de séchage en général ainsi qu'une étude théorique sur le phénomène de séchage à été présentée.

- Alors que dans le chapitre suivant (**chapitre II**) nous avons fait une présentation une étude théorique de traitement des boues en général.

**-Chapitre III:** nous avons fait une présentation d'étude de séchage des boues.

- A fin dans le quatrième chapitre (**chapitre IV**) une réalisation d'un séchoir solaire incliné simple dans lequel nous avons effectué des essais de séchage de boue, et les résultats sont ainsi présentés.

-Nous avons terminé ce travail par une conclusion qui englobe l'étude.

# **PARTIE THEORIQUE**

# **Chapitre I**

## Notion générale de séchage

**I-1 Généralité**

Le séchage consiste à chauffer un produit afin de faire évaporer l'eau qu'il contient (ou un autre solvant). On distingue le séchage par ébullition et par entraînement. On parle de séchage par ébullition quand le produit atteint la température d'ébullition de l'eau. Lors du séchage par entraînement le produit à sécher est mis en contact avec un courant d'air plus ou moins chaud. L'air chaud transmet une part de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers "l'agent séchant". [1]

**I-2- Humidité absolue**

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, où plus simplement humidité s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.[2]

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (1.1)$$

**I-3 Humidité relative**

L'humidité relative d'un solide appelée aussi titre en eau, ou bien teneur en eau à base humide s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (1.2)$$

**I-4 Grandeurs caractéristiques des gaz humide****I-4-1 Humidité absolue**

On appelle humidité absolue ou spécifique, ou teneur en humidité, ou plus simplement humidité d'un gaz, la masse d'humidité mélangée à un kilogramme de gaz sec. cette humidité que nous désignerons par  $H_a$  est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \frac{M_a}{M_s} \quad (1.3)$$

Si on considère  $P$  la pression totale du mélange de gaz et de vapeur, on peut écrire dans le cas de l'air humide :

$$H_u = \frac{18}{29} \left[ \frac{P}{P - P_v} \right] = 0,622 \left[ \frac{P}{P - P_v} \right] \quad (1.4)$$

#### **I-4-2 Humidité relative**

L'humidité relative ou degré hygrométrique est le rapport de la pression partielle de la vapeur dans le mélange, à sa pression de saturation dans le même mélange, pris à la même température:

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} \quad (1.5)$$

#### **I-5 Point de rosée**

C'est la température dans un mélange de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas. Commence à se condenser à pression constante, en gardant la même teneur en humidité.

#### **I-6 Température de bulbe humide**

L'évaporation d'un liquide est un phénomène endothermique. Si l'opération est réalisée adiabatiquement (c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur) sous l'action d'un courant de gaz non saturé en vapeur du liquide en cause, la chaleur nécessaire à l'opération ne peut provenir que du système lui-même.

Si la température initiale du liquide est supérieure à la température du gaz, la chaleur nécessaire à l'évaporation est fournie par le liquide dont la température s'abaisse. Mais on observe généralement que cette dernière température se stabilise à une valeur inférieure à celle du gaz; c'est le gaz qui cède alors au liquide en se refroidissant, une partie de chaleur sensible. Le liquide s'évapore et la vapeur formée se mélange au gaz.

A la diminution de chaleur sensible du gaz correspondant à son humidité et à un abaissement de température qui reste toujours supérieure à celle du liquide.

Nous supposons que la température (bulbe sec) et l'humidité initiales du gaz provoquant l'opération ne changent pas de façon appréciable. Après un certain temps, il s'établit un régime stationnaire, ce qui signifie que la température demeure constante en tous

les points du système, car il n'y a en ces points, ni accumulation ni diminution de chaleur, la chaleur sensible cédée par le gaz ne sert alors qu'à l'évaporation du liquide. Lorsque l'état stationnaire est atteint, la température du liquide en un point de sa surface libre est dite température de bulbe humide.

### I-7 Caractéristique d'un solide poreux

La caractéristique du solide est liée à la taille des pores ou des canaux poreux, cette taille va conférer au matériau des caractéristiques mécaniques et thermo physiques particulières. L'évolution de la teneur en eau des produits peut générer des déformations et/ou des retraits et donc une modification des structures poreuses qui rejaillira sur les caractéristiques de séchage par un ralentissement et même un blocage des transferts (croustage, mais aussi bouchage par entraînement de soluté).

Il est nécessaire de bien connaître l'état du produit à sécher, au cours de séchage, pour infléchir les contraintes liées à l'environnement séchant et pour permettre au produit d'arriver au bout de l'opération tout en ayant gardé ses qualités.

#### I-7-1 Porosité volumique d'un produit

La porosité volumique  $\varepsilon$  (figure-1-) est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume apparent du produit}} \quad (\text{I.6})$$

Le rapport entre le volume intrinsèque du produit et le volume apparent du produit vaut donc  $1 - \varepsilon$

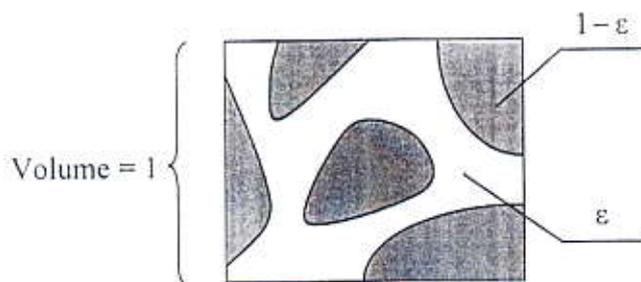


Figure 1: Volume de contrôle microscopique

La notion de porosité est aussi nécessaire au niveau du séchoir, en particulier pour des produits en amas (figure-2-). La définition est équivalente.

$$\epsilon = \frac{\text{volumes de l'amas} - \text{volumes du produit}}{\text{volume de l'amas}} \quad (I.7)$$

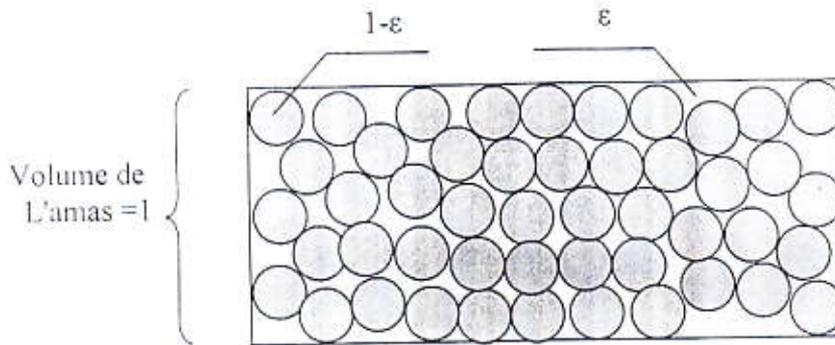


Figure 2 : Volume de contrôle macroscopique

### I-7-2 Compacité d'un produit

Les échanges convectifs, à toutes les échelles, demandent de quantifier la surface d'échange  $A$  contenue dans le volume  $V$  dans lequel on caractérise les transferts. Le rapport entre ces deux grandeurs constitue la compacité

$$C = \frac{A}{V} \quad (I.8)$$

A l'échelle du produit, la surface d'échange est la surface extérieure dite surface exposée. Pour des volumes classiques (bille de diamètre  $d$ , produit plat d'épaisseur) nous trouvons :

- Bille :  $C = \frac{6}{d}$
- produit plat (2 faces) :  $C = \frac{2}{e}$
- produit plat (1 face) :  $C = \frac{1}{e}$

Pour le cas d'un amas de produit, la porosité  $\epsilon$  de l'amas intervient soit :

- Amas de billes :  $C = \frac{6(1-\epsilon)}{d}$
- Amas de produits plats (2 faces) :  $C = \frac{2(1-\epsilon)}{e}$

**I-8 Cinétique de séchage**

**I-8-1 Etablissement des courbes de séchage**

Les courbes de séchage désignent, soit la variation de la teneur en eau moyenne  $\left( X = \frac{M_n - M_s}{M_s} \right)$  de la boue en fonction du temps, soit celle donnant la vitesse de séchage  $\left( -\frac{dx}{dt} \right)$  en fonction de temps (t).

Sur cette courbe figure on distingue trois régions:

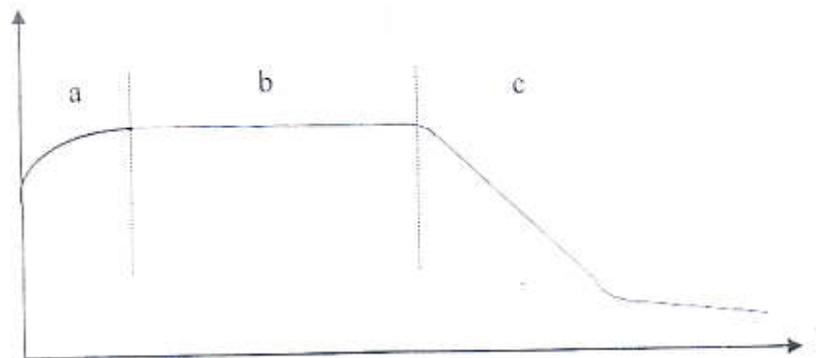


Figure 3: périodes du séchage

**I-8-2 Période de mise en température (région a)**

Quand un produit d'une température de surface  $T_s$  et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée,

le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période de mise en température est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est important.

### **I-8-3 Période à allure constante (région b)**

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface. L'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; l'activité de l'eau ( $A_w$ ) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit

### **I-8-4 Période de ralentissement (région c)**

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- **Disparition de l'eau libre en surface de produit :** ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.
- **L'épaisseur du produit:** si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.
- **La diffusivité de l'eau dans le produit :** elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- **La résistance mécanique des parois cellulaires intactes:** Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.
- **Le croutage:** Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et son disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés soluble qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

## I-9 Transfert de chaleur

Dans les transferts thermique on peut distinguer trois modes de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement, chacun de ces modes étant lui-même lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes).

### I-9-1 Transfert par conduction

La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement.

#### ▪ Loi de Fourier

$$\phi = -\lambda_c \cdot s \frac{dT}{dX} \quad (1.9)$$

$\Phi$  : flux de chaleur.

$\lambda_c$  : conductivités thermique.

### I-9-2 Transfert par convection

Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes :

- Conduction entre les particules de fluide qui se rencontrent ;
- Mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide.

Si ce mouvement n'est provoqué que par seules différences de températures (donc de densité), la convection est dite libre ou naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, etc...), la convection est dite forcée.

Le transfert par convection est régie par la loi de Newton qui stipule que le flux de chaleur transmis est proportionnel à l'écart entre la température  $T_1$  du corps solide qui reçoit ou transmet de la chaleur et la température  $T_2$  du liquide ou du gaz qui transmet ou reçoit cette chaleur. Le coefficient de proportionnalité de la loi Fourier est appelé coefficient de convection thermique est noté  $h_c$ .

Le flux calorifique (puissance) transmis par convection s'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :

$$\phi = h_c \cdot s \cdot (T_2 - T_1) \quad (I.10)$$

Avec :

$\Phi$  : puissance transmise en **W**.

$h_c$  : coefficient transmission thermique par convection, ou coefficient de convection thermique en **W/m<sup>2</sup>.K**.

$S$  : Surface d'échange considérée en **m<sup>2</sup>**.

$T_1$  : température la plus chaude (paroi ou fluide en **°C**).

$T_2$  : température la plus froide (paroi ou fluide en **°C**).

### I-9-3 Transfert par rayonnement [3]

Tous les corps émettent par leur surface de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques. Si cette énergie rayonnée rencontre un corps absorbant pour ses longueurs d'onde, elle se transforme en chaleur. La transmission de chaleur par rayonnement se produit même aux basses températures (il suffit que la température soit supérieure à 0 K) dès que deux corps à des températures différentes sont séparés par un milieu perméable. Ce transfert de chaleur qui ne nécessite aucun support matériel se produit même dans le vide.

L'énergie reçue par la surface du corps le plus froid se divise en trois parties : une fraction de l'énergie reçue est réfléchiée ; une autre fraction peut passer à travers le corps ; une troisième fraction enfin est absorbée par le corps et de ce fait élève sa température.

L'énergie rayonnée par unité de temps, par une surface  $S_1$  d'un corps noir est donnée d'après la loi de Stephan-Boltzman (en 1884) par :

$$q_r = \sigma S_1 T_1^4 \quad (I.11)$$

Où :

$Q_r$  : la quantité d'énergie rayonné en **W**.

$T_1$  : la température du corps en **K**.

$\sigma$ : constant de Stephan-Boltzman :  $\sigma = 5.66 \cdot 10^{-8}$  en  $J/s \cdot m^2 \cdot k^4$ .

Si le corps noir est entouré d'une enceinte dont la surface est également noire, la quantité de chaleur effective transmis par rayonnement est donnée par :

$$q_r = \sigma \cdot S_1 T_1^4 \quad (I.12)$$

Avec :

$T_2$  : la température superficielle de l'enceinte.

La quantité de chaleur effective transmise d'un corps gris à la température  $T_1$  à un corps noir à  $T_2$  entourant le 1<sup>er</sup> est :

$$q_r = \sigma \cdot S_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (I.13)$$

Où :

$\varepsilon_1$ : facteur d'émission de la surface grise.

Si aucun des deux corps n'est noir, la quantité d'énergie rayonnée par le corps 1 vers le corps 2 est :

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon_1 f_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (I.14)$$

Où :

$f_{1-2}$  : facteur de forme entre les corps 1 et 2.

## I-10 Transfert de masse

### a- Loi de Fick

La loi de Fick caractérise la diffusion moléculaire d'un fluide de masse volumique  $\rho_f$  dans un milieu, elle exprime un flux massique surfacique. Le paramètre pertinent du milieu est  $D_f$  le coefficient de diffusion moléculaire :

$$J_c = -\rho_f D_f \left( \frac{dC_m}{dX} \right) \quad (I.15)$$

### b- Loi de Darcy

La loi de Darcy caractérise la diffusion d'ensemble d'un fluide de masse volumique  $\rho_f$  et de viscosité dynamique  $\mu_f$  dans un milieu poreux, elle exprime un flux massique surfacique.

Le paramètre pertinent du milieu est dans ce cas la perméabilité intrinsèque :

$$J_v = -\rho_f \left( \frac{k_f}{\mu_f} \right) \cdot \left( \frac{dp}{dX} \right) \quad (\text{I.16})$$

## **Chapitre II**

# Traitement des boues

## II-1 Introduction

Le but du traitement des eaux usées est d'accélérer les processus naturels qui se produisent à ces eaux en l'espèce et la taille d'une petite cour. Une raison importante pour le développement des moyens de traiter ces eaux impact sur la santé publique et l'environnement.

L'épuration des eaux urbaines est un ensemble de techniques qui consistent à purifier l'eau domestique avant leur rejet dans le milieu naturel.

Les stations d'épuration d'eaux usées urbaines en Algérie sont constituées essentiellement de procédés biologiques d'épuration à « BOUES ACTIVEES » C'est un mode d'épuration par cultures libres pour le traitement secondaire des eaux résiduaires urbaines et industrielles [5], ils sont essentiellement employés pour l'élimination des composés carbonés, ils sont produit des boues de manière régulière qui oblige leur gestion sur le site de la station avant destination finale.

## II-2 Définitions et origine de boue

Les boues sont composées d'éléments recueillis a différents stades de l'épuration d'une eau usée : matières minérales en suspension, matières organiques non biodégradables et microorganisme, ces derniers résultant l'épuration biologique parmi les boues.

On distingue les boues urbaines et les boues industrielles .les premiers sont produites dans les stations d'épurations traitant les effluents dites \*urbaines\*, c'est- adire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles [6]. Alors que la qualité des eaux usée détermine la qualité de boue. Nous nous préoccupons uniquement **de boues urbaines**.

## II-3 Nature et origine de l'eau usée

Les eaux usées sont toutes les eaux chargées de différents éléments chargée de substance minérales et organiques sous une concentration anormal du fait qu'elles ont été utilisées pour le lavage ou les toilettes, qui sont de nature à polluer les milieux dans lesquelles elles seront déversées[7]. Elles sont considérées comme polluées et doivent être traitées.

Le premier critère de choix d'un procédé d'épuration est donné par la connaissance de la nature de la matière polluantes contenues dans les effluent. On distingue trois grandes catégories d'eaux usées :

Eau usée d'origine domestique\_ : est l'eau d'origine managers (cuisine, bain, lessive,....etc.) et l'eau de vanne.

Eau usée d'origine industrielle ; caractéristique de type industriel.

Eau usée d'origine agricole; les effluents agricoles reforment diverses substances d'origine agricole ou animal.

Eau usée de ruissellement; ce sont essentiellement les eaux de et de lavage des chassées [8].

## II-4 Traitement de boue

Les méthodes de traitements les plus couramment utilisées sont :

- Lit bactérien ;
- Les boues activée
- Lagunage naturel ou aéré
- BRM: Le Bio Réacteur à Membrane

Les boues étudiées dans le présent travail sont issues d'un procédé de traitement par **boues activées** ce procédé utilisée à l'origine pour éliminer la pollution carbonée, elle est aujourd'hui exploitée pour traiter simultanément l'azote et le phosphore [9], la dégradation est assurée par voie biologique aérobie à l'aide de populations bactériennes maintenues dans le système épuratoire sous forme floculée. Ce principe naturel de floculation permet de séparation l'eau traitée par simple décantation et de recycler une partie de la masse activée ver le réacteur biologique pour maintenir une activité biologique optimale.

-Les caractéristiques des boues dépendent alors fortement du procédé traitement biologique des eaux usées qui est utilisé [6].

### II-4-1 Types des boues

Les boues désigner l'ensemble des résidus de l'activité biologique des micro-organismes vivant dans les stations d'épuration, qui transforment les matières transportées par les eaux usées pour qu'elles puissent en être extraites. Elles sont constituées essentiellement d'eau, de sels minéraux et de matière organique. Elles sont réparties selon les familles suivantes :

▪ **Boues primaires:** qui proviennent du traitement primaire par simple décantation des eaux usées, elles sont constituées de matières minérales (sable, terre...) et de matières organiques qui peuvent évoluer.

▪ **Boues biologiques:** (secondaire) qui provient du traitement biologique secondaire, elles sont essentiellement constituées de bactéries et sont très organiques et peu concentrées. Et d'un petit pourcentage de composés inorganiques. C'est une boue granulaire, de couleur brune jaunâtre.

▪ **Boues mixtes:** mélange de boues primaires et de boues biologiques.

▪ **Boues physico-chimiques:** proviennent de la décantation après traitement avec un réactif.

Ne sont pas concernés, les résidus qui résultent des phases de prétraitement:

- Dégrillage: déchets de dégrillage (éléments volumineux).
- Déshuilage: graisse de station d'épuration (éléments légers).
- Dessablage: sable de station d'épuration (éléments lourds).

Les boues d'épuration contiennent des micro-organismes vivants qui proviennent des rejets d'eaux usées mais aussi et de la nature des boues produites par ces stations [5]. Des infimes parties sont pathogènes, elles appartiennent à cinq catégories différentes : virus, bactéries, protozoaires, champignons et helminthes (vers parasites). Certains sont dangereux pour l'homme, d'autres pour les animaux et d'autres pour les végétaux.

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

▪ **pour la matière organique:** de graisses, de protéines, de fibres et d'une grande variété de micro-organismes, la boue biologique contient un grand nombre d'agents pathogènes [6].

▪ **pour la matière minéral:** essentiellement de  $\text{CaCO}_3$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , mais aussi de toutes sortes de métaux lourds sous formes de traces [6].

### II-4-2 États physiques d'une boue [5]

Etat	SICCITE (%)
LIQUIDE	≤ 10%
PATEUX	12% à 25%
SOLIDE	25% à 85%
SEC	> 85%

### II-4-3 Filières de traitement des boues d'épuration

Toutes les boues nécessitent une forme de traitement avant d'atteindre leur destination finale. Le choix d'une filière de traitement des boues est important et complexe [10] car il dépend de nombreux Paramètres techniques, économiques et environnementaux. Les deux objectifs principaux de ce traitement sont:

- La réduction du pouvoir fermentescible (limitation des odeurs) par stabilisation.
- La réduction du volume (facilitation de la manutention) par épaissement et déshydratation.
- Éliminer l'essentiel des organismes pathogènes

Quatre premières étapes se succèdent généralement trois autres étapes peuvent compléter le processus de concentration

#### II-4-3-1 L'épaississement

C'est le premier stade de traitement des boues son principe consiste à enlever une partie plus ou moins importante de l'eau contenue dans les boues. Il a pour objectif de réduire le Volume des boues brutes et d'augmenter la concentration des matières (résultat : 3 à 8% de siccité selon les techniques utilisées). Cet épaissement peut être statique (tassement naturel au fond d'un épaisseur) ou dynamique (systèmes de grille, tamis rotatif flottation, voire centrifugeuse).

L'épaississement peut être gravitaire, ou S'effectuer par flottation, par égouttage ou par centrifugation. L'épaississement facilite en particulier les traitements

**II-4-3-2 Conditionnement des boues**

Modification des caractéristiques des boues pour faciliter la séparation des deux phases solide / liquide. Pour rendre exploitables les différents équipements de déshydratation, il faut procéder à la floculation de la boue pour casser la stabilité colloïdale et pour augmenter la taille des particules. C'est le conditionnement, qui a recours à des procédés de nature physique (thermique principalement) mais plus souvent de nature chimique.

**II-4-3-3 Déshydratation**

Peut intervenir avant ou après la stabilisation en traitement des boues, action d'augmenter la siccité pour obtenir une meilleure qualité du produit boues (pâteuses ou solides) réduire la teneur en eau pour en diminuer le volume et augmenter le pouvoir calorifique. Après conditionnement de celles-ci, l'eau libérée peut être séparée des matières sèches par différents moyens mécaniques, qui consiste en une filtration et une centrifugation ou un séchage. Plusieurs types de filtres sont utilisés : filtre continu sous vide, filtre presse, filtre à bandes...

**II-4-3-4 La stabilisation**

Elle permet de diminuer le pouvoir de fermentation des boues, c'est-à-dire soit de dégrader les matières organiques qu'elles contiennent, soit de bloquer leurs réactions biologiques. Cette opération peut aussi assurer une fonction d'hygiénisation partielle, c'est-à-dire d'élimination des agents pathogènes présents dans les boues. Elle permet, puisqu'elle évite la fermentation des boues de limiter les nuisances olfactives. La stabilisation peut être obtenue par des moyens biologiques, chimiques ou thermiques. Si elle intervient après l'épaississement, la stabilisation est souvent obtenue par digestion anaérobie en absence d'air et la digestion aérobie en présence d'air. Lorsqu'elle est mise en oeuvre après déshydratation, elle est réalisée par chaulage (ajout de chaux), compostage ou séchage.

**II-4-3-4-1 Digestion anaérobie des boues**

Les boues subissent une fermentation anaérobie dans des digesteurs étanches à l'air qui transforme de 30 à 50 % de leur fraction organique en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> sans dégagement d'odeurs. La digestion anaérobie des boues primaires et secondaires permet donc une réduction de leur volume et leur stabilisation (stockage sans nuisance possible) et récupération du gaz méthane.

La digestion des boues et des déchets avant incinération permet:

- La réduction des quantités à déshydrater, incinérer
- La réduction des quantités d'eau à évaporer (économie d'énergie)
- La réduction du volume des fumées.

La digestion avant épandage présente des avantages :

- Réduction des quantités à déshydrater, à stocker.
- Réduction des nuisances olfactives.
- Elimination des agents pathogènes.
- Production de boues plus homogènes (dans le cas des stations d'épuration).
- Augmentation de la proportion sous forme ammoniacale de l'azote (assimilation plus rapide par les végétaux).
- Propriétés agronomiques : richesse en phosphore et calcium, teneur moyenne en azote.

#### **II-4-3-4-2 Séchage des boues**

Généralement réservé au séchage thermique, IL peut être réalisé pour mieux adapter les boues aux besoins de la filière d'élimination choisie et notamment répondre aux contraintes de stockage et de transport. Consiste à évacuer par évaporation l'eau présente dans les boues. Le séchage peut être partiel (teneur en eau résiduelle de 30 à 70%) ou quasi-total (teneur en eau de 5 à 10%).et le séchage poussé (autour de 60% de siccité), pour les boues destinées à la valorisation agricole

#### **II-4-3-4-3 Le compostage**

Ce post-traitement peut également être effectué afin de modifier la valeur agronomique des boues. Il consiste à mélanger les boues à un autre produit (sciure, écorces, copeaux, fumier, papier, carton, etc.), puis à maîtriser l'évolution du mélange avec l'aération afin d'obtenir un amendement organique. Outre la modification de la valeur agronomique du produit, il est ainsi stabilisé et hygiéniste par la montée en température qui se produit. Suivant la technique utilisée, le compostage réduit le volume

#### **II-4-3-4-4 La méthanisation**

Elle se différencie du compostage en ce sens qu'elle consiste en une fermentation anaérobie; contrairement à ce dernier .s'appliquant de préférence à des déchets organiques De

plus, la méthanisation s'accompagne d'une production de gaz méthane, dont le pouvoir calorifique peut être récupéré.

## **II-5 Destination finale des boues**

La valorisation des boues est souvent aléatoire et leur évacuation constitue presque toujours une charge d'exploitation importante. Sur le plan économique le but à atteindre est de limiter les frais de leur traitement et de leur transport, d'où l'importance de leur teneur en eau qui peut conduire à recommander un séchage thermique. Les trois principales destinations des boues sont les suivantes

### **II-5-1 Incinération des boues**

L'incinération des boues conduit à l'élimination totale de l'eau interstitielle et à la combustion des matières organiques. C'est le procédé permettant d'obtenir le minimum de résidus finaux : les cendres, constituées par les seules matières minérales de la boue.

### **II-5-2 Épandage agricole des boues**

Consiste à épandre des boues traitées ou du compost sur des terres agricoles pour utilisation des boues comme matière fertilisante pour mettre à profit les capacités biologiques naturelles des sols, pour digérer les boues et réintroduire les éléments dans les cycles naturels, et valoriser les propriétés fertilisantes pour les cultures agricoles.

### **II-5-3 La mise en décharge**

La mise en décharge des boues est donc remise en cause et elle devrait désormais largement diminuer. En fait, la mise en décharge doit être normalement réservée aux déchets ultimes, les autres déchets devant faire l'objet d'un autre traitement. Les déchets ultimes sont des résidus qui ne sont plus "susceptibles d'être traités dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux".

**II-6 Exemple de station d'épuration [5]**

LA S.T.E.P station d'épuration d'eau usée en TOUGGOURT est de type à boue activée à faible charge (ou à aération prolongée).

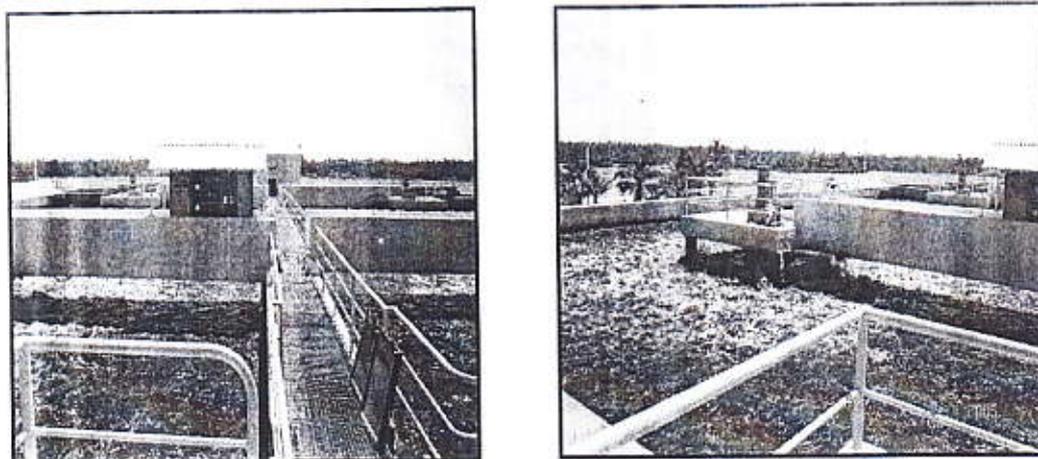
Cette entreprise mise en service à l'année de 1991, ses données de base sont le suivant:

Type de réseau	unitaire
Nature d'eau brute	domestique
Débit moyen journalier	9360m <sup>3</sup>
Boue fraîche extraite	104 m <sup>3</sup> /mois
Concentration des boues sèches	54 m <sup>3</sup> /mois

**II-6-1 Photos Superficie construite**

Bassins aération: 1600 m<sup>2</sup>

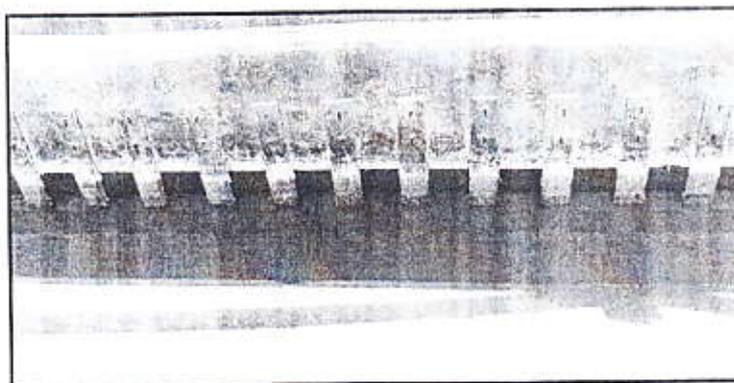
Il consiste de dégrillage, dessablage, déshuilage



**Photo 1 :** Bassins aération

**Dégrillage:**

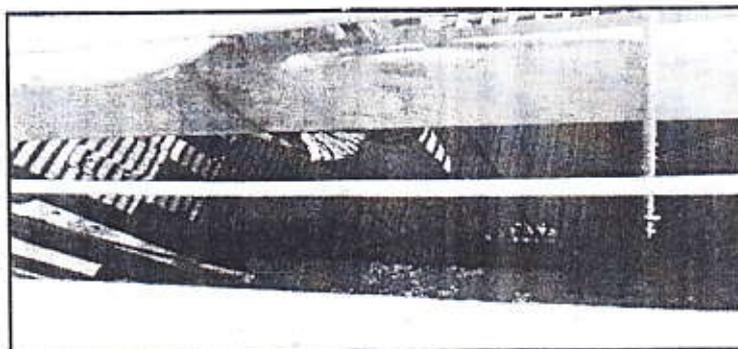
Consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux retiennent les éléments les plus grossiers.



**Photo 2 : Dégrillage**

**Dessablage:**

Séparation solide-liquide est étapes de réservoirs en forme de canaux utilisés pour évacuer les matériaux inorganiques ou minéraux, tels que le sable, la vase, le gravier



**Photo 3 : Dessablage**

Déshuilage:

Séparation liquide/ liquide

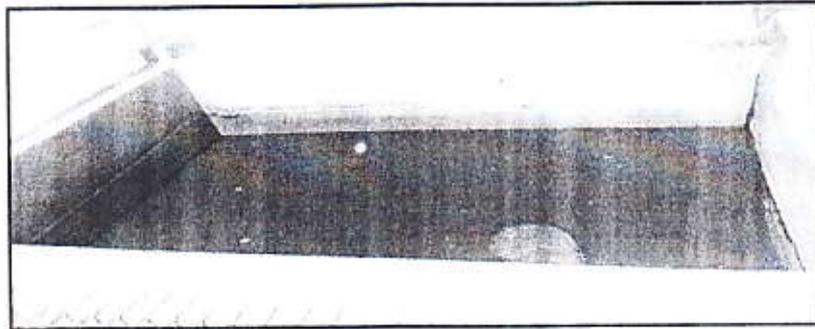


Photo 4 : Déshuilage

Décanteurs: la surface est de (904m<sup>2</sup>)

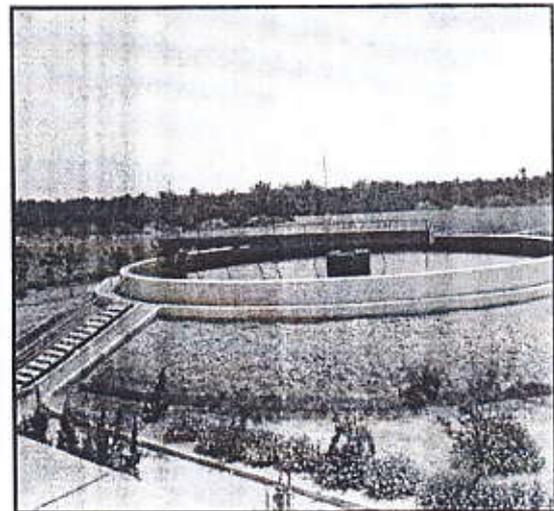


Photo 5 : Décanteurs

Bassins chloration : la surface est de (94,20m<sup>2</sup>)

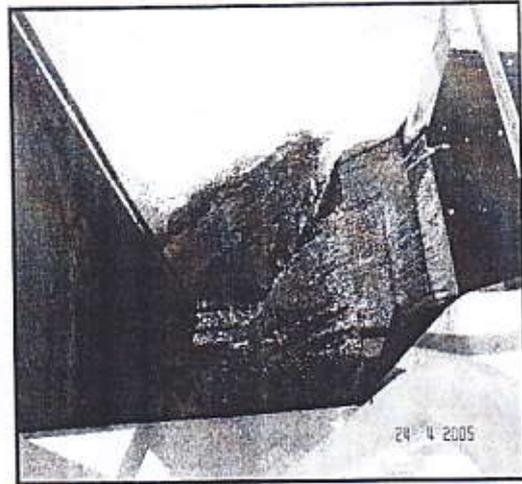
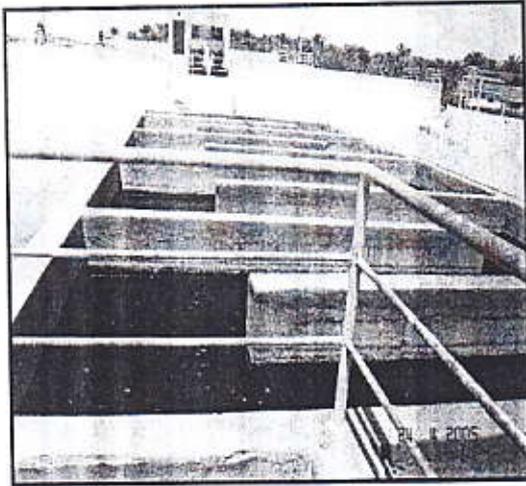


Photo 6 : Bassins chloration

Epaississeur : la surface (50m<sup>2</sup>)

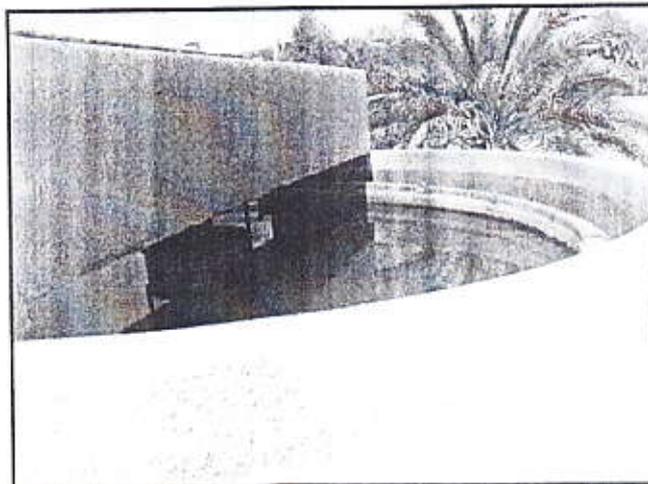
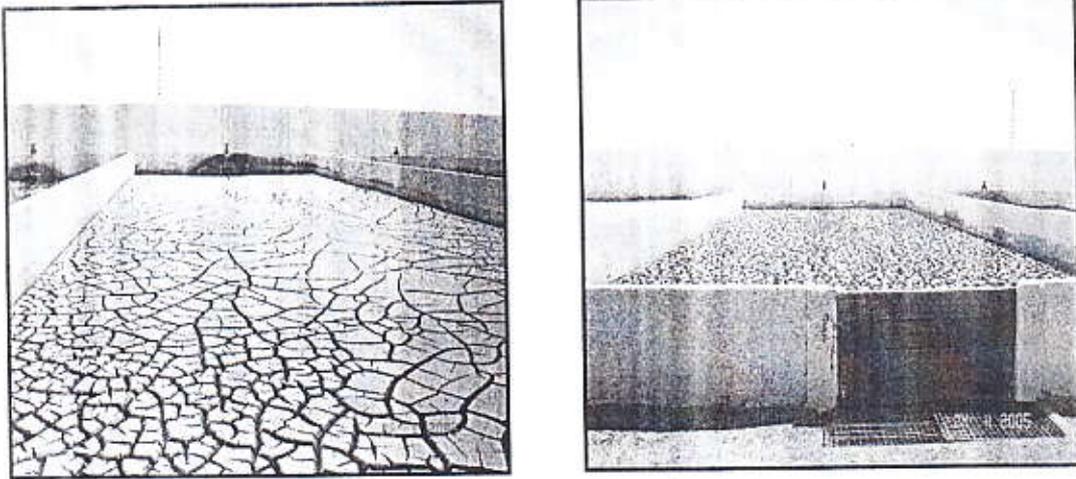


Photo 7 : Epaississeur

**Lits de séchage:**

La surface totale utilisant dans le séchage 3200 m<sup>2</sup>

(Chaque lit du séchage est de 200 m<sup>2</sup>= 25\*8m)



**Photo 8 :** Lits de séchage

**II-7 Circuit des boues dans station de Touggourt**

Les boues proviennent des fonds des deux décanteurs au niveau de chaque bassin de décantation, les boues sont raclées et collectées dans le fosse centrale à partir de laquelle elles sont transférées gravitairement vers une bêche. A boues par une conduite en amiante de diamètre 400 mm. Les boues ainsi collectées sont dites boues secondaires, la plus grande partie dite « BOUES DE RECIRCULTION » est recyclée vers le bassin d'aération et ceci afin qu'il y soit maintenue une concentration en matière sèche de l'ordre 6 g /l l'autre partie dite « BOUES EN EXCES » est pompée vers l'épaississement.

**Les boues de circulation**

Le taux de recirculation est de 150% il est assuré par deux vis archimède a une hauteur de 1,05m, celle du rejet dans le canal de recirculation

**Les boues en excès**

Les boues dont la quantité journalière maximale est de 250m<sup>3</sup> / j ont une concentration minimale de 1 % (soit 10 g /l)

Elles sont envoyées vers l'épaississeur par pompage au moyen d'une pompe, cette pompe fonctionne en moyenne 9 heures par jour (pour une quantité moyenne de boues de 208m<sup>3</sup> / j.

La concentration de boues est assurée par l'épaississeur au sein duquel les boues séjournent pendant 3,5 jours.

Après l'épaississeur les boues sont transférées vers les « Lits de Séchage » par une pompe spéciale débitant  $20\text{m}^3 / \text{h}$ . Le séchage des boues d'effectuée dans 16 lits de séchage ayant chacun une superficie de  $200\text{ m}^2$  ( $25 \times 8\text{ m}$ ), la déshydratation se fait par drainage et par évaporation. La concentration des boues sèches qui peut atteindre  $650\text{ g/l}$  est fonction de la température et de l'humidité.

### **II-8 Problèmes et propositions**

Lors de la visite de la station, nous avons remarqué que le séchage de la boue prend long temps sur les lits par l'air libre: en été; à peu près une semaine, et en hiver, le séchage prend environ un mois ou plus. La conséquence est la création d'autres problèmes qui sont le dégagement d'odeurs à cause de la fermentation des matières organiques, ce qui est nocif pour la santé des travailleurs en particulier, et l'environnement en général. Il existe aussi le problème du stockage de boue puisqu' il est effectué manuellement.

Dans une tentative de trouver des solutions, nous comptons fabriquer un séchoir solaire direct. Ce choix est motivé par la rentabilité d'un séchoir solaire sous serre en bon fonctionnement à l'échelle réelle, et qui nous aidera à exploiter l'énergie solaire abandonnée dans le désert.

## **Chapitre III**

### Séchage thermique des boues

**III-1 Introduction**

Le séchage est un transfert de masse et de chaleur visant à évaporer l'eau contenue dans les boues, on distingue dans les boues l'eau libre et l'eau liée. L'eau libre, faiblement absorbée, s'élimine par déshydratation mécanique. L'eau liée est chimiquement attachée par des liaisons très fortes aux bactéries ou aux autres particules et ne peut être éliminée que par séchage thermique au-delà de 105 °C. [11]

Le séchage des boues peut classiquement être assuré par action du soleil, ou de manière plus intensive, par action de la chaleur.

Les objectifs du séchage sont l'élimination de l'eau interstitielle, l'amélioration de la texture, l'augmentation de la capacité calorifique (en vue d'une incinération) et enfin la stabilisation qui se conjugue avec l'hygiénisation. L'intérêt du séchage est d'ouvrir l'éventail des solutions puisque, les boues séchées peuvent être valorisées en agriculture par épandage dans le cadre d'un plan d'épandage ou mises sur le marché sous couvert d'une homologation.

Plutôt adapté à des stations de moyenne ou grande capacité, le séchage thermique complète un traitement de déshydratation par centrifugation ou par filtres presses.

Les boues séchées thermiquement peuvent également être incinérées (seules ou en co-incinération) ou, en cas de besoin, évacuées au centre de stockage des déchets ultimes. Les taux de siccité obtenus sont en général compris entre 60 et 90 %, ce qui témoigne d'une considérable diminution du volume et du tonnage et donc des coûts de transport jusqu'au point d'élimination finale [12] Le pouvoir fermentescible des boues et donc la production d'odeurs sont fortement réduites ce qui favorise la conservation du produit et évite les nuisances.

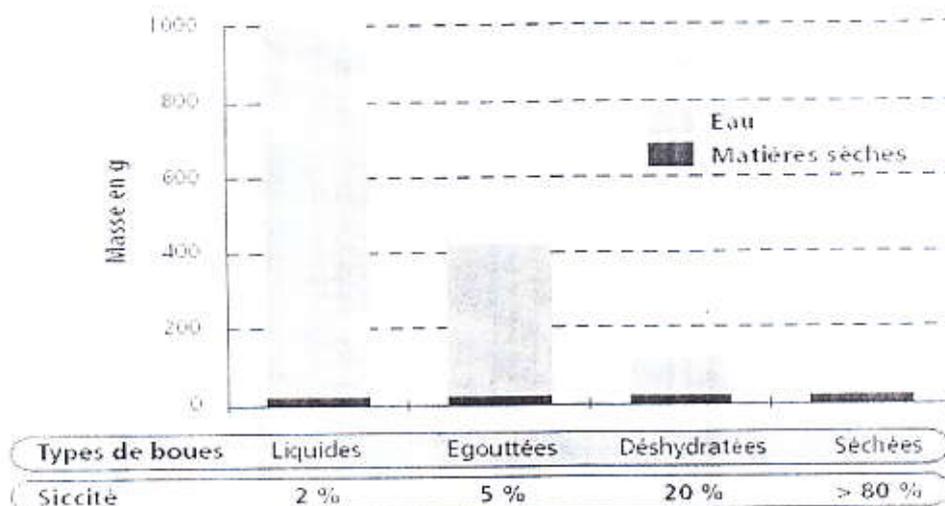


Figure 4 : Relation entre le type de boues et la teneur en eau

## III-2 Différentes techniques de séchage des boues

### III-2-1 Lits de séchage

#### III-2-1-1 Lits de séchages (non plantés)

Cette technique se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine l'évaporation naturelle et le drainage de l'eau libre à travers une couche de filtration de sables et de graviers, sur une épaisseur d'environ 30cm de boue. On obtient une siccité de l'ordre 30% après un temps de séjour de trois semaines dépendant des conditions météorologiques [6].

#### III-2-1-2 Lits de séchage plantés de roseaux

Cette technique se pratique à l'air libre sur des boues liquide et combine de drainage et d'évaporation. 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 et dépendant des conditions météorologiques [6].

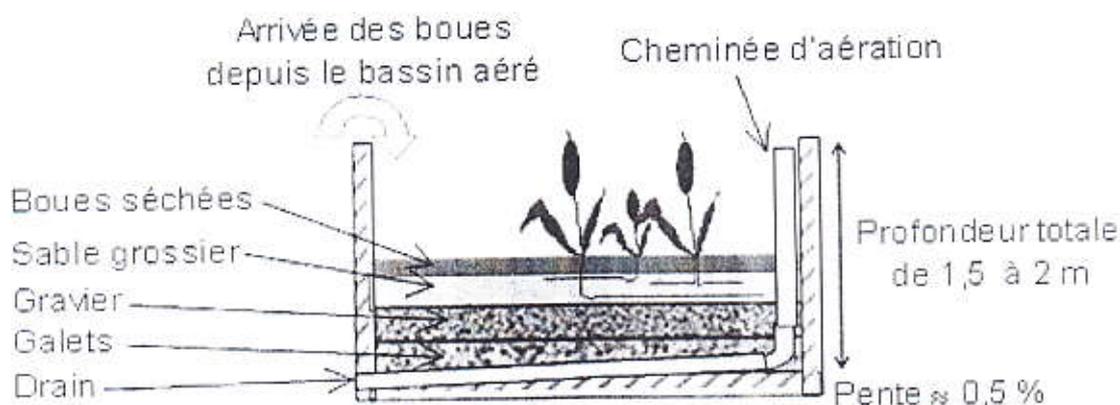


Figure 5 : Lits de séchage plantés de roseaux

### III-2-2 Séchage thermique

Le séchage thermique des boues revêt un effet temporaire de stabilisation (par absence d'eau), persistant aussi longtemps que les boues ne sont pas réhumectées. On peut obtenir une siccité de l'ordre de 90-95%. Les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés [6].

Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, il existe dans la pratique trois types de séchage:

#### a- Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au chauffage est apportée par contact avec une paroi chauffée: les vapeurs dégagées par le produit durant le séchage sont aspirées ou entraînées par un gaz de balayage [11]

#### b- Séchage par convection

Il consiste à mettre en contact un gaz chaud avec un produit [11]

#### c- Séchage par rayonnement

On peut aussi réaliser des séchages où la transmission de chaleur se fait par rayonnement. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus ou moins complète par le produit à sécher [12]

**III-2-3 Le séchage thermique des boues : Technologie et mise en œuvre [13]**

La technologie du séchage des boues des stations d'épuration a été développée en Europe, pour lui-même en préalable à une incinération. La conception des séchoirs à boues s'inspire en fait des nombreux procédés qui existaient dans d'autres domaines comme l'industrie agroalimentaire, le textile....

Les procédés se divisent en deux grands types : les séchoirs directs et indirects. Il existe également des procédés pour lesquels les étapes de séchage et d'incinération se produisent successivement au sein du même appareil.

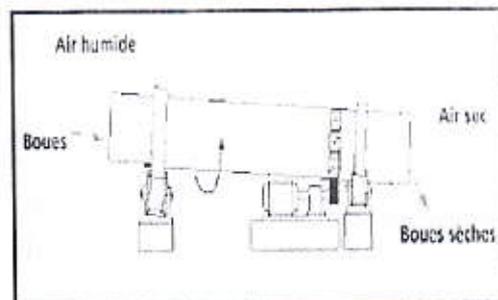
**III-2-3-1 Les séchoirs directs [14]**

L'analyse du marché montre que 40 % des séchoirs thermiques utilisés pour le séchage des boues sont des séchoirs directs où les gaz chauds rentrent en contact direct avec les boues et le séchage s'effectue essentiellement par convection.

Les différents séchoirs directs se distinguent par la manière dont l'agent séchant est mis en contact avec les boues. La technologie a l'avantage d'être simple. Par exemple:

**a- Le séchoir rotatif (ou à tambour) :**

Les éléments constitutifs de ces sècheurs sont les mêmes que dans le cas des indirects, mais les parois en contact avec les boues ne sont pas chauffées.

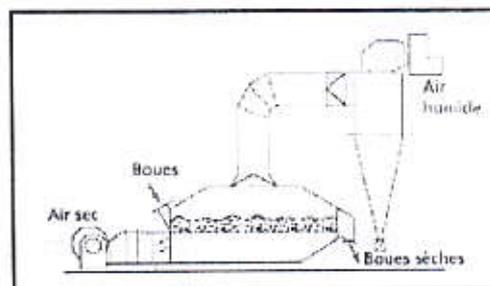


**Figure 6 : Le séchoir rotatif**

Le séchage s'effectue par une circulation d'air chaud dans le même sens ou en sens inverse des boues.

**b-Le séchoir pneumatique dit séchoir flash:**

Le matériau à sécher est transporté jusqu'à l'entrée du sécheur où il est dispersé dans le réacteur par un injecteur.



**Figure 7 : Le séchoir pneumatique dit séchoir flash**

Le courant d'air chaud transporte ensuite les particules avant que le produit sec soit séparé des buées.

**c- Autres séchoirs directs:**

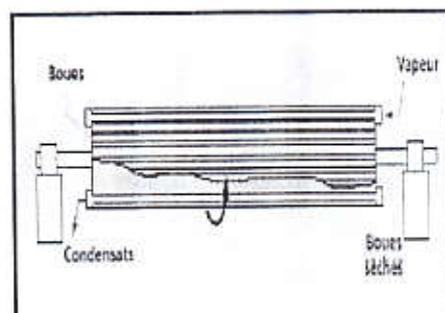
Séchoirs à lit fluidisé, séchoirs à bandes, séchoirs utilisant l'énergie solaire.....

**III-2-3-2 Les séchoirs indirects [14]**

Les séchoirs indirects constituent 52 %des installations de séchage de boues. Le séchage s'effectue principalement par conduction ou par rayonnement selon les positions relatives du matériau à sécher et des surfaces chaudes.

**a- Les séchoirs rotatifs:**

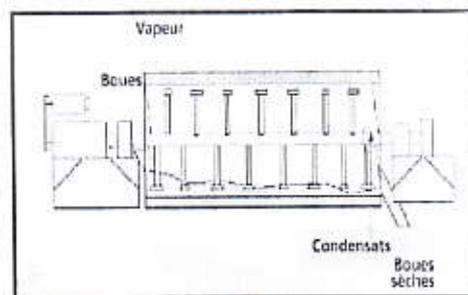
Ils sont constitués d'un cylindre tournant dont l'axe est légèrement incliné par rapport à l'horizontale pour favoriser l'avancée des boues. La rotation lente du tambour partiellement rempli assure le renouvellement du produit sur la surface d'échange



**Figure 8 :** Le séchoir rotatif

**b- Le séchoir à palettes:**

Les séchoirs à palettes disposent d'une double enveloppe extérieure immobile et d'un plusieurs rotors sur lesquels sont fixées les palettes. Le fluide caloporteur circule dans la double enveloppe, les rotors et les palettes



**Figure 9 :** Le séchoir à palettes

**III-2-4 Séchage solaire des boues [15]**

Le séchage solaire, procédé apparu en Allemagne en 1994, est plutôt mis en œuvre dans des stations d'épuration de capacité inférieure à 50 000 équivalent/.habitants.

Les boues placées sous serre sont déshydratées sous l'effet de la concentration des rayons solaires. Ce procédé connaît un récent développement en France avec une vingtaine de références en 2005.

Le séchage solaire consiste à évaporer l'eau contenue dans la boue déshydratée grâce à l'énergie solaire. Pour optimiser le procédé et éviter les précipitations, les boues sont séchées dans une serre avec une ventilation asservie à un contrôle de l'humidité.

Le séchage est fortement consommateur en énergie thermique et électrique. Il est donc intéressant de l'associer à une source de chaleur sur la station (biogaz de digestion, incinération). Le séchage solaire, occupant de grandes surfaces, est réservé à de petites et moyennes installations. [16]

**III-2-4-1 Le principe des procédés de séchage solaire des boues**

Le principe du séchage solaire repose sur trois facteurs :

L'augmentation de la température par effet de serre, le retournement mécanique des boues pour optimiser le contact entre la boue humide et l'air de séchage en évitant tout processus de fermentation et la désaturation de l'air de la serre grâce à une extraction mécanique. C'est la parfaite combinaison de ces trois facteurs qui permettra un séchage satisfaisant. [17]

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

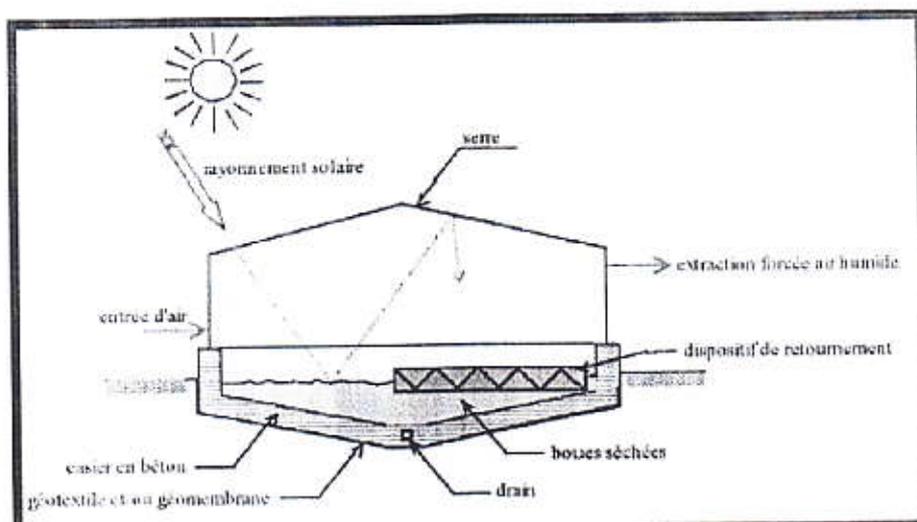


Figure 10 : Schéma de principe du séchage solaire

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, 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, [ 5]

#### III-2-4-2 Avantages du séchage solaire

Les boues d'épuration nécessitent d'être séchées pour diminuer de volume avant d'être traitées. Le séchage solaire constitue une solution technique écologique et économique intéressante, car très peu consommatrice d'énergie. En utilisant le soleil comme unique source d'énergie, [18]

Il permet : [ 5]

- La réduction du volume (les volumes de boues sont réduits de 3 à 5 fois);
- L'influence est directe sur le coût de transport et sur le stockage;
- L'hygiénisation: les température et les temps de séjour entraînent généralement l'élimination des micro-organismes au cours séchage;
- La stabilisation : la diminution de la teneur en eau, rendant toute activité biologique impossible, stabilise la boue sèche;
- La réduction des odeurs émises : le stockage de la boue sèche n'engendre pas de problèmes d'odeurs, contrairement à celui de la boue fraîche;

- L'augmentation du pouvoir calorifique des boues qui peut être intéressant en vue d'une incinération;
- La mise en forme accompagnant le séchage: une mise en forme (granulée) de la matière séchée est souvent possible, facilitant transport et manutention;
- Un bilan environnemental positif puisqu'il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre, de plus la consommation énergétique n'est que de 20 à 80 kWh électriques par tonne d'eau éliminée (contre 700 à 1000 kWh thermique/t d'eau évaporée- 70 à 120 kWh électriques/t d'eau évaporée pour les procédés conventionnels de séchage thermique).

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

#### **III-2-4-3 Contraintes du séchage solaire [5]**

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

- La station d'épuration de Brumath (67) d'une capacité de 21 000 EH, possède 2 serres de dimension 960m<sup>2</sup> chacun (procédé Heliantis);
- La station d'épuration de Forbach (57) d'un capacité de 70 000 EH possède également deux serres de 250 et 4800m<sup>2</sup> (procédé Solia).

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

**III-2-4-4 Problématique actuelle du séchage solaire [5]**

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

Concernant le premier point, le séchage solaire sous serre implique un bon transfert thermique à l'intérieur de la serre favorisant l'évaporation. A l'heure actuelle, le dimensionnement et les méthodes de conception des unités sont assez empiriques. Un outil prédictif capable de guider le concepteur serait un atout majeur.

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

**III-2-4-5 Différents procédés de séchage solaire [5]**

Technique empruntée aux industriels céréaliers, le séchage solaire est désormais appliqué au séchage des boues urbaines .Ce procédé consiste en un ensemble de serres qui, en piégeant le rayonnement solaire, permettent d'augmenter la température ambiante et d'évaporer l'eau interstitielle contenue dans les boues.

En hiver, lorsque l'ensoleillement est faible, les serres permettent alors de stocker les boues à l'abri des événements climatiques (pluie et froid), préjudiciables à leur séchage. Plusieurs systèmes ont été développés pour permettre d'améliorer le taux d'évaporation. Ces dispositifs concernent essentiellement :

- La ventilation forcée de la serre à un débit élevé 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 andains de boues. Ce qui doit permettre un brassage régulier et uniforme pour renouveler les surfaces d'évaporation, et une aération de la couche

de boues afin de limiter les réactions de fermentation anaérobie, sources d'importantes nuisances olfactives;

- Le chauffage de l'air ambiant ou du radier en vue de réduire les surfaces de séchage à mettre en œuvre. Ce type de dispositif n'est généralement proposé que pour les très grandes installations, qui ont la possibilité de recycler les énergies issues d'autres procédés épuratoires comme sources de chauffage de la production de boue.

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

### III-2-4-6 Séchage solaire sous serres

#### a- Principe de fonctionnement

Les parois de la serre permettent de piéger le rayonnement solaire. Un retournement mécanique régulier aide à augmenter la surface d'échange entre l'air et les boues. L'air chargé en humidité est extrait par des ventilateurs vers les biofiltres qui piègent les odeurs.

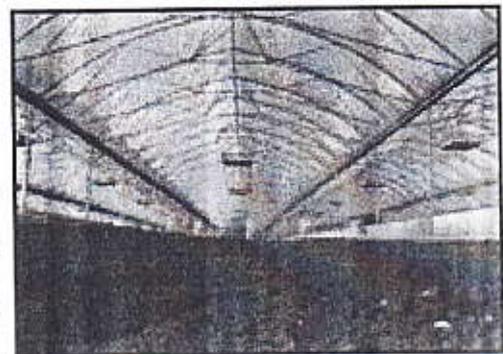


Figure 11 : Séchage solaire sous serres de boue

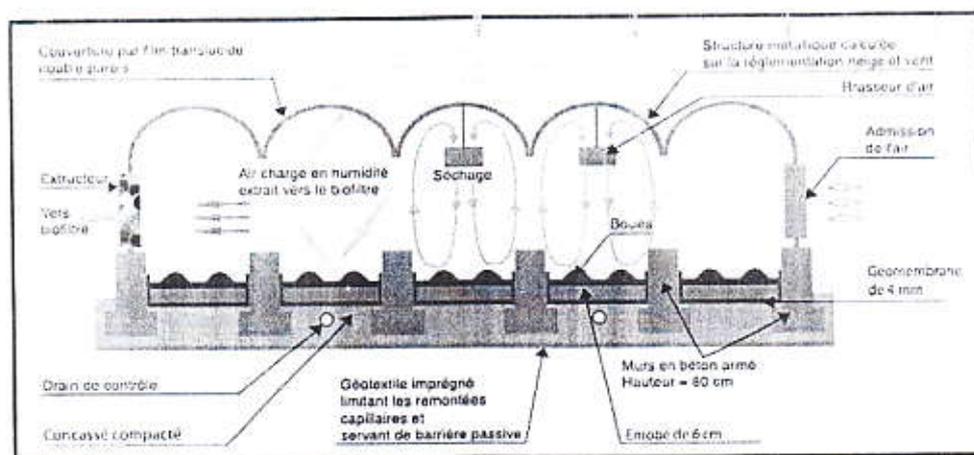


Figure 12 : Schéma de fonctionnement de serre

La serre est constituée en général de parois en matière plastique transparent, 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, paramètre 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, imparti au séchage. La largeur des casiers en béton correspond généralement à la largeur standard des serres, comprise entre 9 et 10m. Les boues sont stockées sur de faibles hauteurs, quelques dizaines de centimètres, compatibles avec la taille des retourneurs. La hauteur des casiers n'excède ainsi pas 1m. [19]

Il existe 2 types de serre dont le choix dépend des conditions d'installation et des garanties demandées: [5]

#### ▪ La serre ouverte

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

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.

#### ▪ La 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".

#### **b- Alimentation de la serre**

L'alimentation des serres dépend du procédé utilisé pour le retournement de la boue. Il existe 2 types d'alimentation, l'alimentation discontinue utilisée par système Thermo system et l'alimentation continue pratiquée par le système IST, Soliamix et Huber. [19]

Les serres sont alimentées en boues pâteuses à l'aide : [19]

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

### c- 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 bios filtration. [19]

### d- Retournement et fermentation des boues

Le retournement des andains de 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 retourneurs sont conçu pour fonctionner sans surveillance du personnel, sur programmation de l'automate de la station. [19]

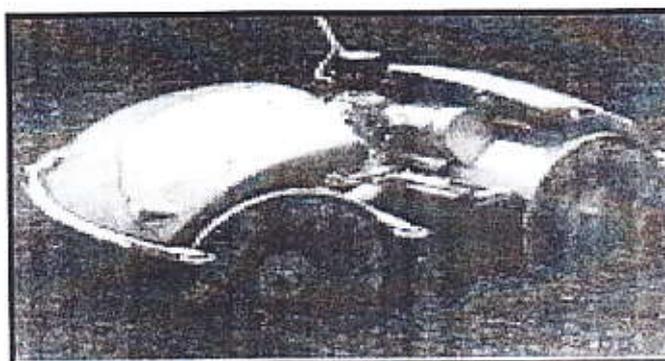


Figure 13 : Cochon électrique

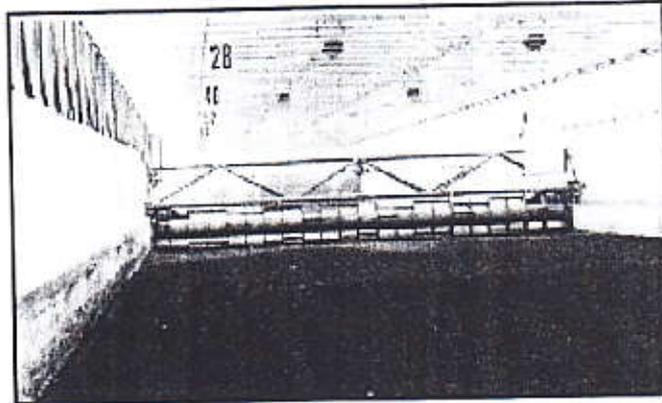


Figure 14 : Rouleau scarificateur du système IST

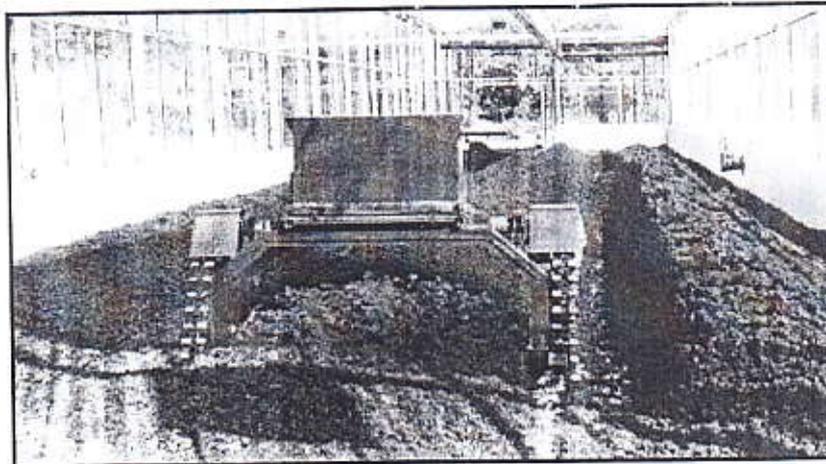


Figure 15 : Système de retournement du procédé Soliamix

**III-3 Conception de séchoir solaire sous serre des boues**

Il n'existe pas de mécanique universelle dans le choix technologique d'un séchoir solaire. Des diverses études de cas et présentations ont été faites. Il en ressort qu'il est difficile d'avoir des éléments indiscutables de validation et de comparaison entre les différents modèles de séchoirs, soit l'outil de séchage est encore en phase d'expérimentation et de validation dans les conditions réelles d'utilisation, soit il est difficile d'extrapoler les résultats en zone climatique différente pour des produits différents [20]. Dans notre cas d'application, tenant compte de l'information offerte par la littérature disponible et regardant l'objectif visé par cette étude, à savoir, réalisation d'un prototype de séchage solaire à échelle de laboratoire, la logique de notre choix et conception s'est appuyée sur les considérations suivantes.

**a- Types de séchoirs**

Pour le séchage solaire de boue urbaine on peut réaliser deux types de séchoirs (direct, indirect). L'adoption d'un séchoir solaire direct présente le choix le plus économique et le plus simple à mettre en oeuvre. Le séchoir à chauffage direct entraîne la réduction de temps de séchage. Ceci présente l'avantage d'être beaucoup plus simple à construire que les séchoirs indirects.

**b- Modes de ventilation**

Il existe deux modes de ventilation (forcée et naturelle).

En pratique, lorsque l'on est face à un séchage imposant un débit supérieur à 20 m<sup>3</sup>/h, le séchage ne pourra être effectué de manière naturelle. C'est pourquoi il faut envisager d'aider l'air à circuler grâce à des éléments périphériques comme un ventilateur. Si ce débit était compris entre 20 et 60 m<sup>3</sup>/h, nous aurions pu utiliser une cheminée solaire [21].

Mais les analyses précédentes ne conviennent pas à notre cas parce qu'on est devant un test primaire alors on prend le ventilateur naturel jusqu'à l'étude de ce système (les avantages et les inconvénients)

En effet, nos principales exigences pour le choix du séchoir se sont portées sur un matériel:

- Présentant un faible coût de fabrication et d'entretien
- Réalisable au laboratoire LENREZA de l'université de OUARGLA

- Adapté au séchage des boues urbaines
- A partir des matériaux disponibles localement.

### III-3-1 Transfert thermique dans le séchoir

Du fait que le séchage des produits solides (les boues), soit une opération essentiellement thermique, il est nécessaire d'avoir une idée correcte de cet aspect car dans la pratique industrielle ce sont généralement les considérations thermiques qui conditionnent les dimensions des appareils et non pas l'aspect d'un transfert de masse.

### III-3-2 bilan thermique

Le chaleur fournie au séchoir doit servir à :

- 1- Chauffer de l'air de l'alimentation jusqu'à la température de vaporisation de liquide
- 2- Vaporisation du liquide
- 3- Chauffer le solide sec jusqu'à la température de sortie
- 4- Chauffer la vapeur fournie jusqu'à la température de sortie

Si  $m_s$  représente le débit massique de matière sèche et  $X_e$  et  $X_s$  les humidités à l'entrée et à la sortie du séchoir, alors la quantité de chaleur nécessaire s'écrit:

$$\frac{Q}{M_s} = c_{p_s}(T_{ss} - T_{sc}) + X_e c_{p_L}(T_{vap} - T_{sc}) + (X_e - X_s)\lambda_{vap} + X_s c_{p_L}(T_{ss} - T_{vap}) + (X_e - X_s)c_{p_v}(T_{vs} - T_{vap}) \quad (III.1)$$

### III-3-3 Bilans massiques

#### III-3-3-1 Bilan massique sur la boue

$$\dot{M} = -M_s \frac{dx}{dt} \quad (III.2)$$

#### III-3-3-2 Bilans massiques sur l'eau évaporée

Débit massique de l'eau en l'entrée + débit de l'eau évaporé = débit massique de l'eau à la sortie.

$$GH_e + \dot{M}_v = HsG \quad (III.3)$$

# **PARTIE EXPERIMENTALE**

# **Chapitre IV**

## Conception de séchoir solaire

Le dispositif expérimental présenté, sur la **Figure 16** comprend essentiellement un séchoir solaire sous serre de type direct qui opère en convection naturelle, le système est simple et pourvoyeur à balance qui mesure les variations de poids du produit pendant l'opération de séchage.

#### **IV-1 Fiche technique de séchoir**

**Matériaux :** Tôle galvanisée épaisseur( $e = 0,5$  mm) et le verre (épaisseur  $e=4$ mm)

**Dimensions extérieures (Hauteur- largeur- longueur) :** 75cm x 80cm x 100cm

**Isolation :** polystyrène (épaisseur  $e= 3$ cm)

**Dimension de la claie :** 50cm x 40cm x 3cm

**Surface de séchage :**  $2000\text{cm}^2= 0,2\text{m}^2$

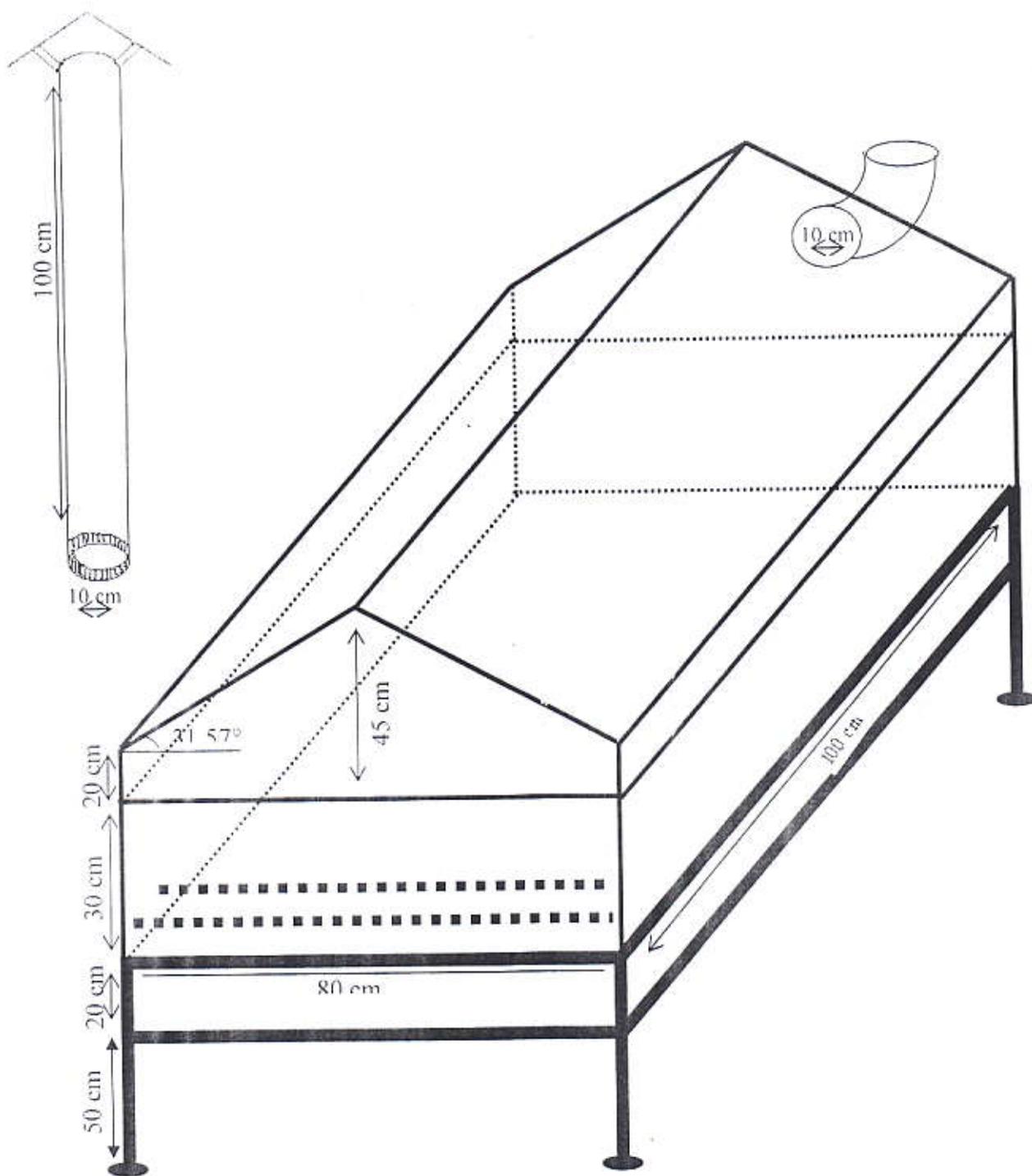


Figure 16 : Schéma de séchoir solaire sous serre

IV-2 Matériaux utilisés



Peinture noire



outil de rivetage



tronçonneuse



perceuse



Silicone



tiges



vis- écrous



crochets



Coupeuse



plieuse mécanique

IV-3 Etapes de conception du séchoir

Le séchoir est construit d'une façon étudiée et technique comme l'indique les étapes suivantes:

Etape 1

Réalisation de la boîte de séchage sous forme parallélépipédique réalisée entièrement en tôle galvanisée avec les dimensions 100cm x 80cm x 30cm en suivant les étapes ci-dessous:

- a- Choix de la tôle
- b- Traçage
- c- Découpage
- d- Pliage utilisant une plieuse mécanique

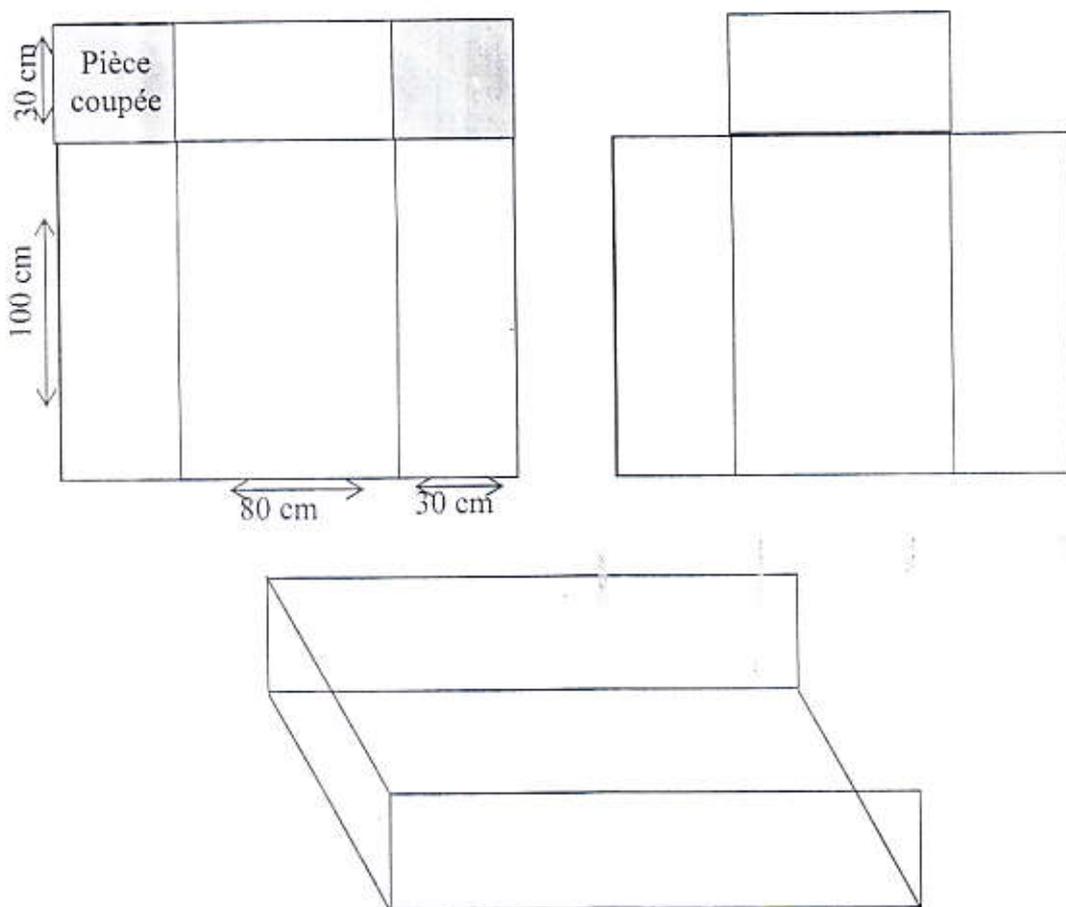
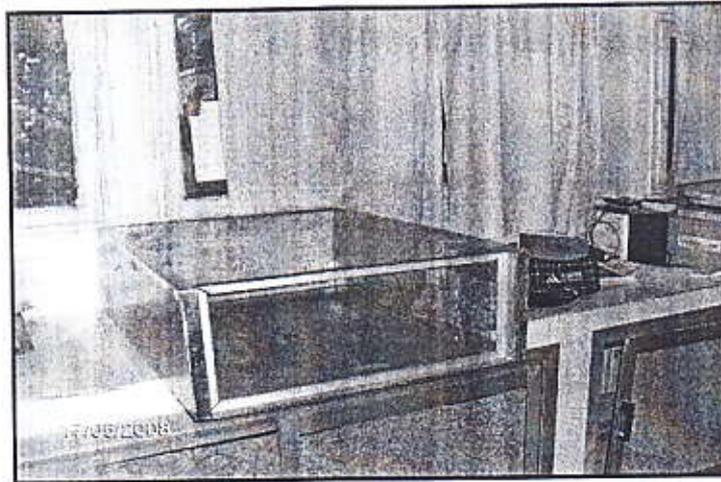


Figure 17 : Etape 1

**Etape 2**

Dans un deuxième temps, nous posons l'isolant dans les trois cotés de la boîte, puis nous le couvrons par une pièce (galvanisée) qui s'applique aux trois cotés puis nous fixons l'ensemble par des clous pour éviter la pertes thermiques et conserver la température dans la boîte (**Figure 18**)



**Figure 18 : Etape 2**

**Etape 3**

La préparation de la porte qui consiste en une pièce galvanisée des dimensions 80cm x 36cm pliée en haut et en bas, ensuite nous la couvrons par l'isolant, puis par une autre pièce (comme l'étape-2-), enfin, nous plaçons la porte dans le quatrième coté à l'aide des crochets, pour permettre le chargement et le déchargement des produits à sécher.

**Etape 4**

Préparer le cadre sur lequel s'appuie le verre, et qui est d'une hauteur de 20cm de la boîte, puis l'incliner avec un angle de  $31,57^\circ$ , ce dernier représente l'angle optimal pour capter le rayonnement solaire selon la région de Ouargla. (Voir **Figure 19**)



Figure 19 a : Etape 4

Ensuite, couper le verre en 6 pièces pour avoir la forme suivante:

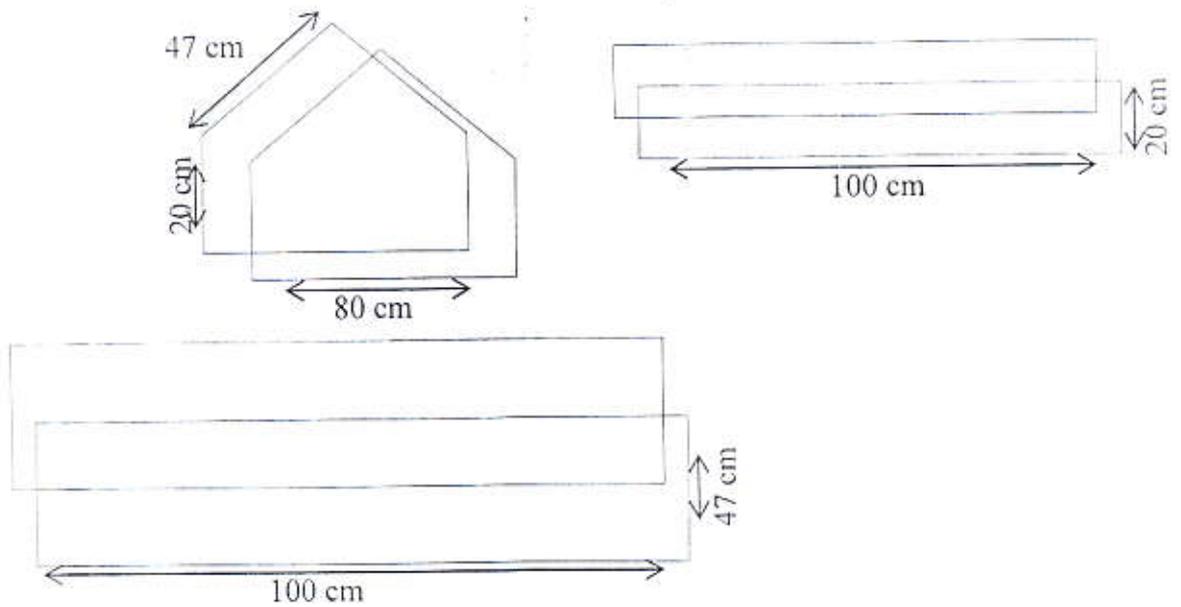


Figure 19 b : Etape 4



Figure 19 c : Etape 4

Etape 5

Mettre l'isolant dans la base de la boîte de manière à la couvrir complètement, puis utiliser une autre pièce de galvanisé fixée par des boulons pour couvrir l'isolant. (Figure 20)

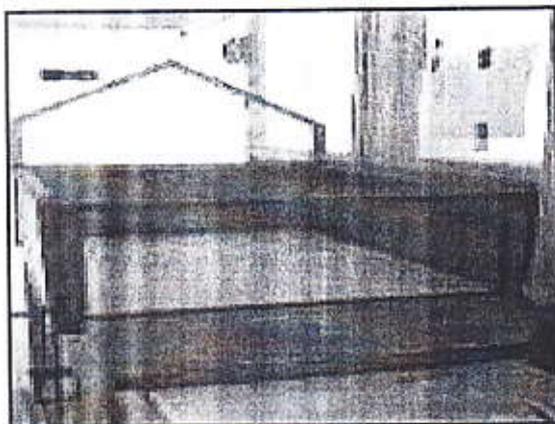


Figure 20 a : Etape 5

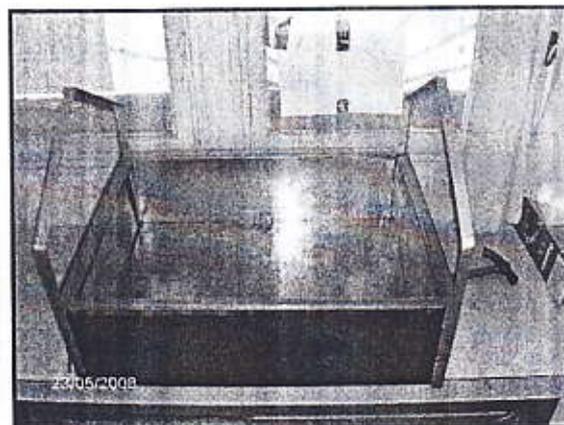
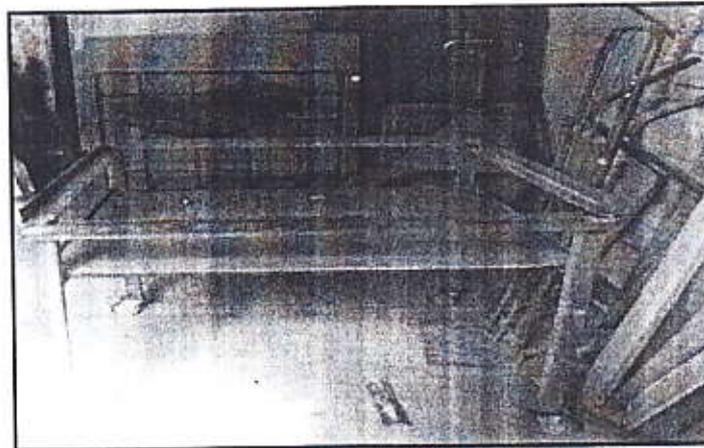


Figure 20 b : Etape 5

**Etape 6**

Fabrication d'un support en cornière métallique avec une étagère en de bois destinée à supporter la balance.(voir **Figure 21**)



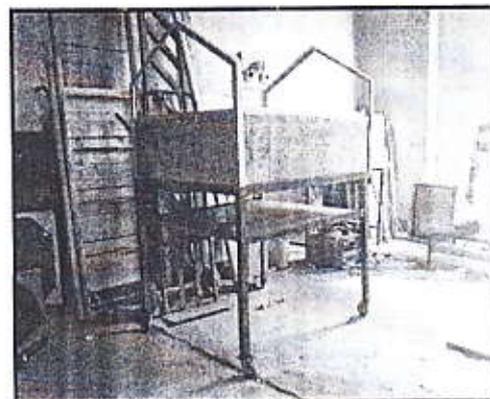
**Figure 21 :** Etape 6

**Etape 7**

Mettre le séchoir sur le support et la balance sur de l'étagère (voir **Figure 22**)



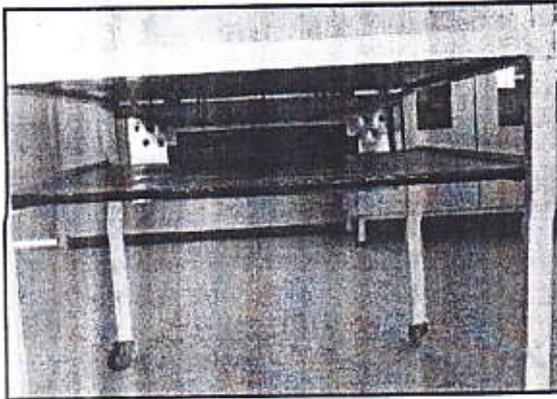
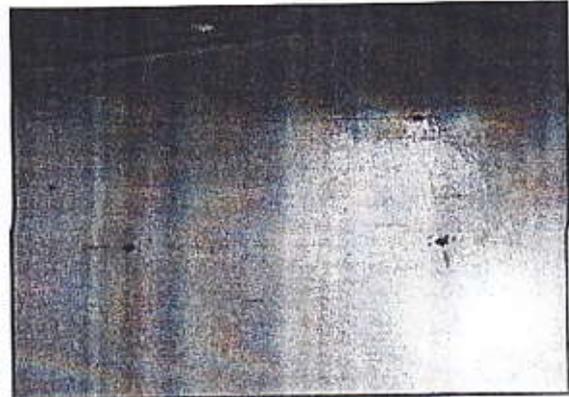
**Figure 22 a :** Etape 7



**Figure 22 b :** Etape 7

**Etape 8**

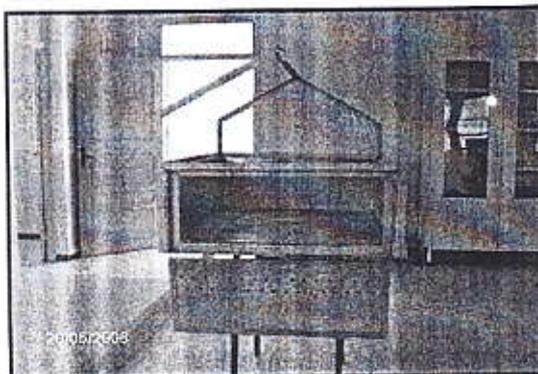
Dans la base de la boîte, nous perforons quatre trous dans lesquels nous mettons quatre tiges reliées à la balance qui mesure les variations de masse du produit pendant l'opération de séchage. Les trous sont légèrement élargis (diamètre 1.3cm) de manière à éviter les frottements. La claie portant le produit à sécher sera déposée directement sur les quatre tiges par le biais d'une plaque plane originale à la balance.

**Figure 23 a : Etape 8****Figure 23 b : Etape 8****Etape 9**

Perforation des trous permettant la circulation de l'air selon la conception suivante:

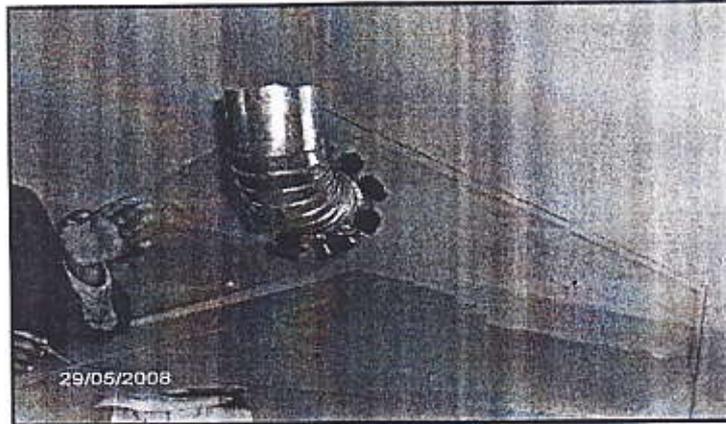
**a)- Entrée de l'air**

Perforer dans la porte deux rangées de trous dont le diamètre ( $\Phi = 1\text{cm}$ ) et la distance inter axiale égale à ( $d = 5\text{cm}$ ). La perforation est faite de sorte que les trous d'aération soient au même niveau que la claie comportant le produit.

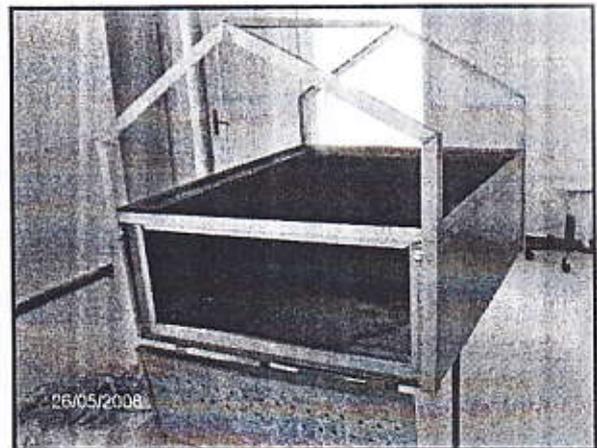
**Figure 24 a : Etape 9****Figure 24 b : Etape 9**

**b)- Sortie de l'air**

La sortie de l'air est conçue suivant un système cheminée de diamètre ( $\Phi=10\text{cm}$ ) trouée dans la vitre (du coté opposé à la porte) et allant sur une hauteur de ( $h=57\text{cm}$ ) permettant ainsi une bonne aspiration et évacuation de l'air humide en sortie du séchoir.

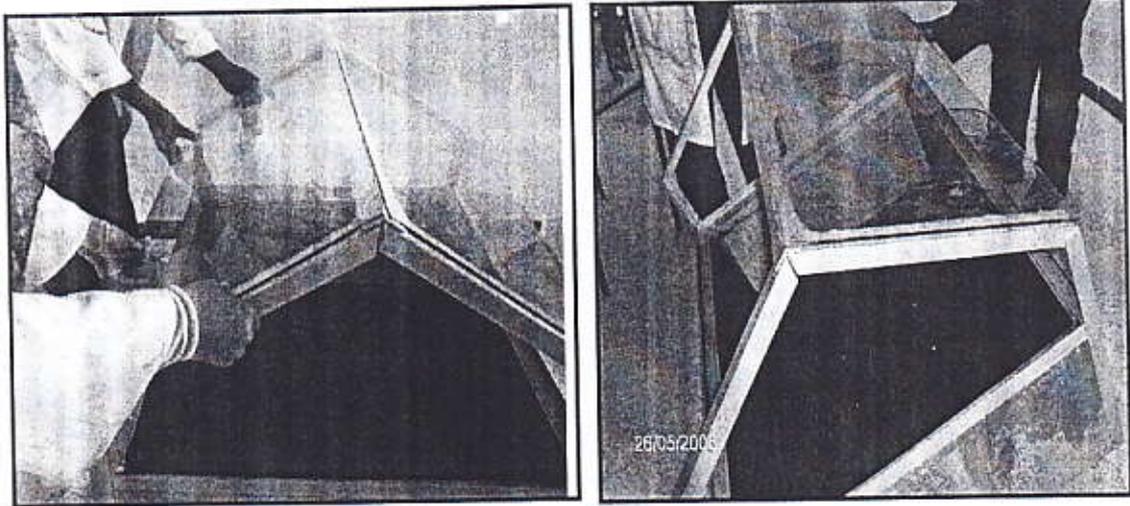
**Figure 24 c : Etape 9****Etape 10**

Peindre l'intérieur de la boîte (les trois coté, la porte et la base) par la couleur noire mat pour assurer l'absorption du rayonnement solaire et l'augmentation de la température (voir. **Figure 25**)

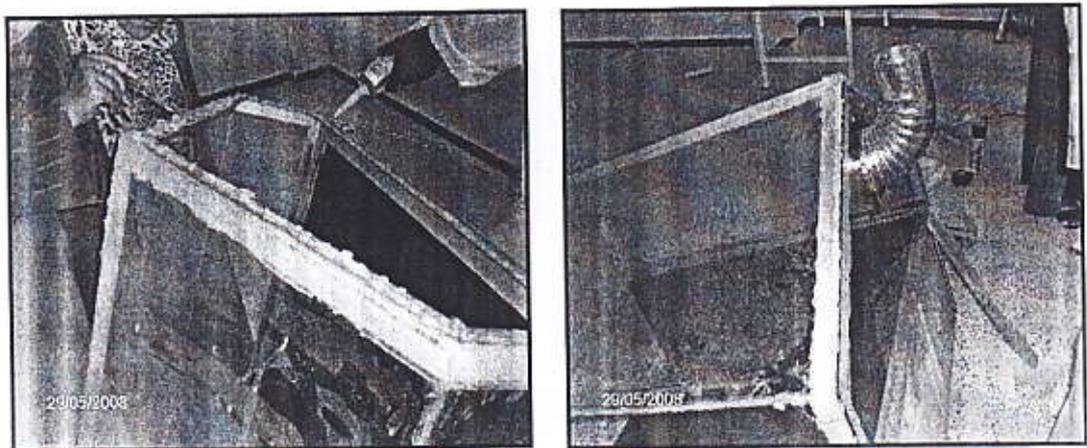
**Figure 25 a : Etape 10****Figure 25 b : Etape 10**

**Etape 11**

Dans un dernier temps, nous fixons les plaques de verre sur le cadre, en utilisant du silicone comme le montre les figures suivantes :



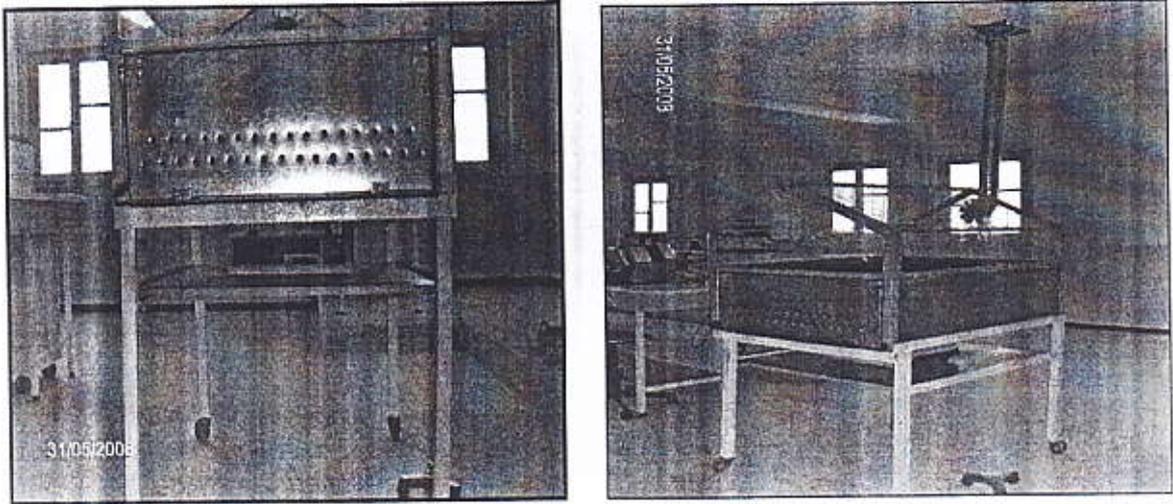
**Figure 26 a : Etape 11**



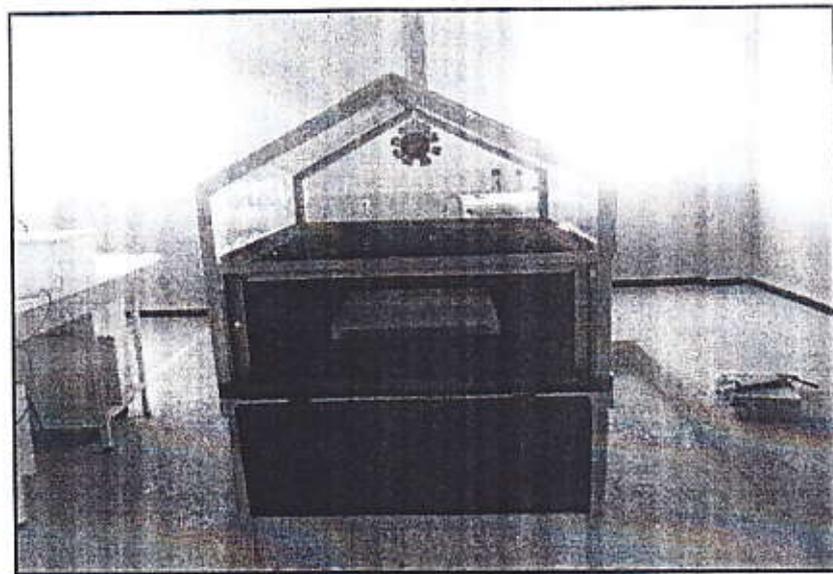
**Figure 26 b : Etape 11**

**Etape finale**

Le montage final du prototype de séchage réalisé est donné ci-après en photos sur les (Figure 27)



**Figure 27 a : Etape finale**



**Figure 27 b : Etape finale**

#### IV-4 Essais de fonctionnement du séchoir

Cette partie du travail est consacrée au séchage des boues traitées au niveau de la station d'épuration S.T.E.P de TOUGGOURT. Le but essentiel de cette partie expérimentale est de tester les conditions de fonctionnement du séchoir réalisé et ce par le moyen d'un suivi adéquat des différents paramètres physiques tels que températures, humidité relative de l'air asséchant et teneur en eau du produit.

##### IV-4-1 Appareillage de mesures

###### IV-4-1-1 Mesures des températures

Les mesures des températures s'effectuent à l'aide des thermocouples de type K dans plusieurs endroits du séchoir solaire:

- L'entrée du séchoir ( $T_{e\text{ séch}}$ )
- L'absorbeur ( $T_{\text{abs}}$ )
- Le produit ( $T_{\text{pro}}$ )
- L'entrée de cheminée ( $T_{\text{che}}$ )
- La plaque de verre externe ( $T_{\text{ex}}$ )
- La plaque de verre interne ( $T_{\text{in}}$ )
- Le milieu ambiant ( $T_{\text{amb}}$ )

Les thermocouples sont reliés à un appareil testo 445

La température ( $T_{\text{mil}}$ ) au milieu de séchoir est mesurée par un appareil testo 425.

###### IV-4-1-2 Mesure de l'humidité et de la vitesse de l'air

• L'humidité et la vitesse de l'air dans la cheminée sont mesurées respectivement à l'aide d'une sonde à affichage numérique et d'un manomètre connecté à un appareil de marque testo 645.

- L'humidité de l'air à l'entrée de séchoir est mesurée à l'aide d'un hygromètre (PS09).
- La vitesse de l'air externe est mesurée à l'aide d'un anémomètre.

**IV-4-1-3 Mesure du rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire global est mesuré en  $\text{kW/m}^2$  à l'aide d'un solarimètre et les résultats obtenus sont affichés sur un appareil affichage numérique.

**IV-4 -1-4 Mesure de la perte de masse du produit**

La variation de la masse mesurée par une balance de précision (5g)

**IV-4-2 Détermination de la masse sèche de produit (la boue)**

La détermination de la masse sèche de boue s'effectue à l'aide d'un analyseur (type MA 45) d'humidité selon les étapes suivantes:

- Introduction d'une masse initiale (7,060g) de la boue dans la chambre de l'analyseur
- Démarrage de l'analyseur d'humidité en choisissant le programme convenable de chauffage.
- Arrêt automatique de l'appareil quand la masse de l'échantillon reste constant
- Résultat de l'analyse d'humidité : Une masse sèche de 1.307g est obtenue après 35 minutes de fonctionnement de l'analyseur qui affiche par conséquent une humidité à base humide de 81,487%.

**IV-4-3 Résultats expérimentaux****IV-4-3-1 La variation en teneur d'eau dans le séchoir**

La figure (28) montre la variation de la teneur en eau en fonction du temps pour séchage de la boue.

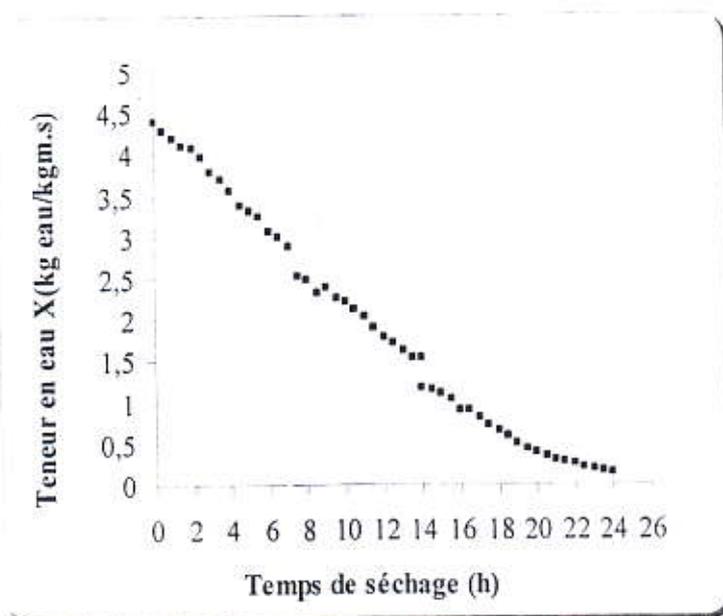


Figure 28 : Variation de la teneur en eau pour les boues en fonction de temps

La durée du séchage pour avoir une teneur finale  $X_f = 0,13$  est (24h). Le premier jour (7 h), on remarque sur la figure (29) une diminution 4,4 à 2,8 kg eau /kg ms, ce qui explique l'évaporation d'une quantité d'eau importante représentant une de 0,915kg, pour le deuxième jour (7h) (figure 30), la diminution de 2,59 à 1,54 kg eau/ kg ms et la quantité d'eau évaporée est de 0,880kg, et enfin pour le 3<sup>ème</sup> jour (figure 31) le X tend vers la teneur finale de séchage de la quantité d'eau évaporée pendant cette période (10h) 0,865kg.

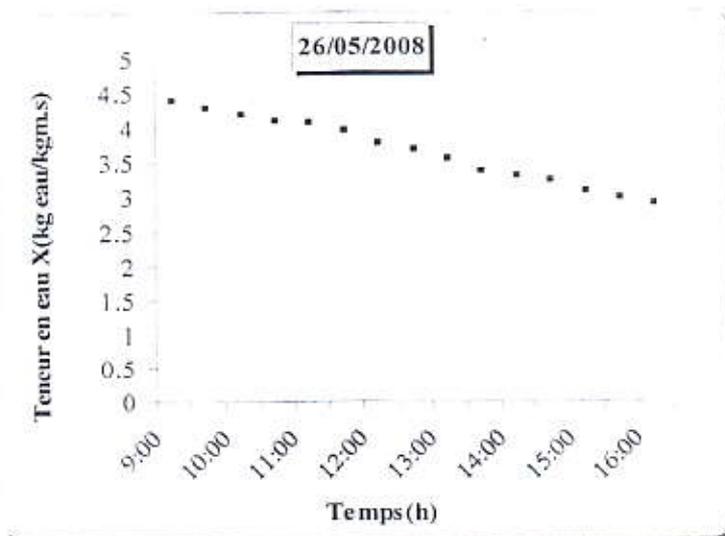


Figure 29 : Variation de la teneur en eau pour le 1<sup>er</sup> jour

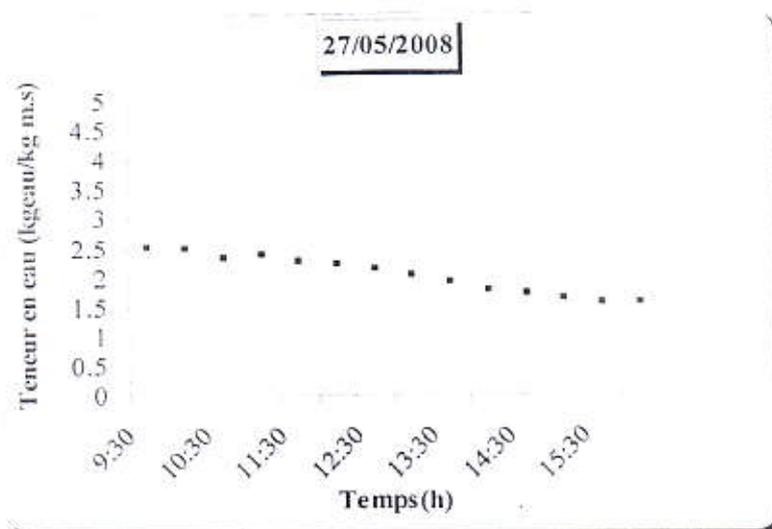


Figure 30 : Variation de la teneur en eau pour le 2<sup>ème</sup> jour

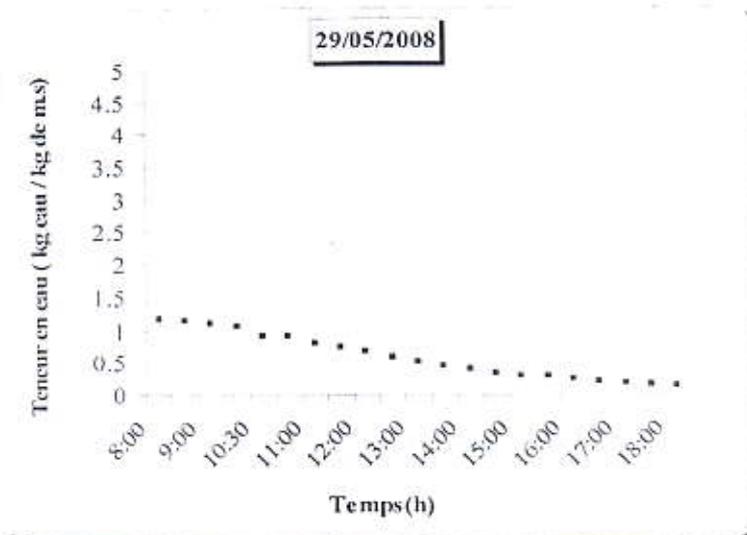


Figure 31 : Variation de la teneur en eau pour le 3<sup>ème</sup> jour

IV-4-3-2 Evolution du rayonnement solaire

Les figures (32), (33), (34), montrent la variation du rayonnement solaire globale en fonction de temps pour les trois jours. Cette variation atteint pour le dernier jour un maximum de 800W/m<sup>2</sup> à 12:30h.

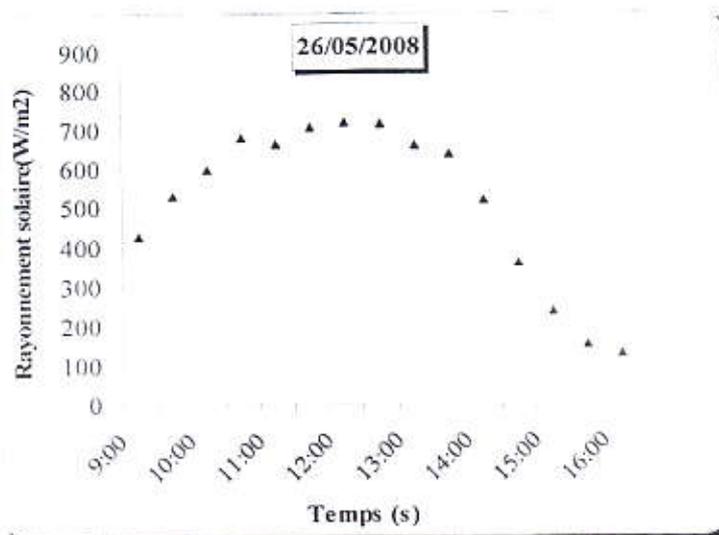


Figure 32 : Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 1<sup>er</sup> jour

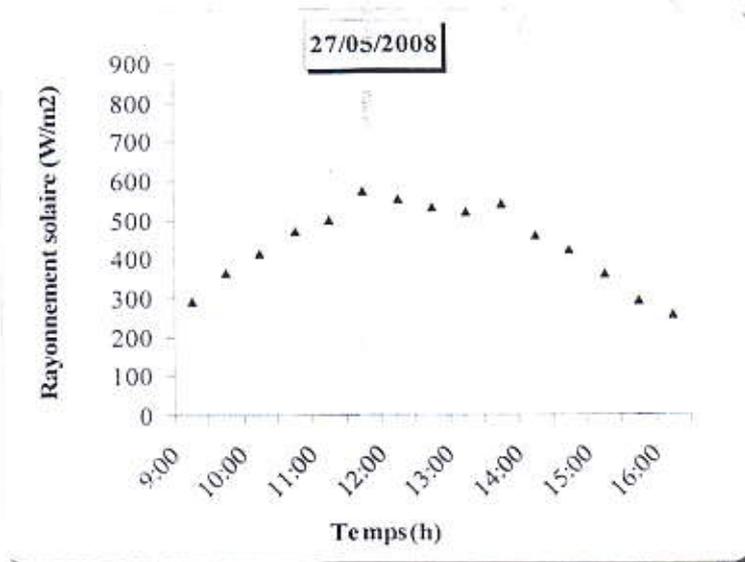


Figure 33 : Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 2<sup>ème</sup> jour

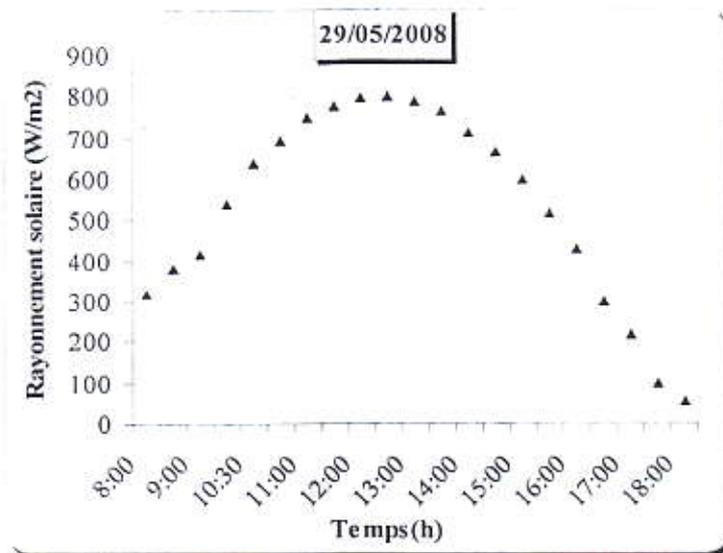


Figure 34 Variation du rayonnement global en fonction de temps pour le 3<sup>ème</sup> jour

IV-4-3-3 Evolution de la température dans le séchoir solaire

Les figures (35), (36) et (37), présentent la distribution de températures dans le séchoir solaire pour les trois jours de séchage.

Les variations de températures dans le séchoir

température°C	T <sub>e</sub> séch			T <sub>abs</sub>			T <sub>mit</sub>		
	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	1	2	3	1	2	3
Les jours									
minimum	50,4	35,6	28,7	51	40,6	34,1	46,4	39	32,1
maximum	68	61,6	62,4	93,4	75,4	79,3	66,8	61,5	61,4
Température°C	T <sub>prods</sub>			T <sub>chem</sub>			T <sub>amb</sub>		
	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ème</sup>	3 <sup>ème</sup>	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ém</sup>	3 <sup>ème</sup>	1 <sup>er</sup>	2 <sup>ém</sup>	3 <sup>ème</sup>
Les jours									
minimum	24,5	29,1	31,6	37	50,4	40,6	34	28,4	24
maximum	55	48,5	50,1	60,8	56,1	57	43,1	37	30,9

On remarque sur les figures ci-dessous une diminution de la température de sortie (cheminée) par rapport à la température d'entrée  $T_{\text{eséch}}$ . Ceci peut être expliqué par la diffusion de vapeur d'eau dans l'air asséchant lorsque ce dernier lèche la surface du produit.

L'écart de température entre le milieu du séchoir et l'ambiance externe varie entre 23.7 et 30.6°C pour les trois jours de séchage, cet écart est dû aux influences ajoutées du rayonnement solaire piégé (effet serre) et de son effet sur la surface absorbante conçue autour de la claie sur laquelle on a pu mesurer une température maximale de 93.4°C. Cette température élevée de l'absorbeur justifie bien notre choix de conception fondé sur la réduction de la surface de contact air/produit au profit de la surface absorbante.

On remarque aussi que la température du produit atteint un maximum de 55°C, 49.5°C et 50.1°C respectivement pour les trois jours de l'essai en suivant le même comportement que les différentes températures mesurées. D'autre part on peut facilement voir sur les courbes de températures que dans une même journée d'essai, les températures mesurées à l'entrée et au milieu du séchoir sont pratiquement confondues. Cela indique une bonne homogénéité dans la répartition des températures à l'intérieur du séchoir qui est une situation très recherchée pour le bon fonctionnement de ce type d'appareil. Cette constatation se trouve appuyée par l'état final du produit séché homogène sur toutes ses zones, du moins par appréciation visuelle.

Dans un autre sens de l'analyse, si on compare les courbes de températures se rapportant aux les trois journées de l'essai, on peut aussi remarquer que l'écart de température entre le produit et l'air asséchant diminue globalement en fonction de l'avancement du séchage pour la même raison déjà mentionnée pour les écarts en humidité relative de l'air (IV-4-3-3). En effet ceci est expliqué par le fait qu'une bonne partie de la chaleur est consommée comme chaleur latente de vaporisation en début de séchage où le produit est encore riche en eau, par contre vers la fin du processus la présence de l'eau devient minimale et par conséquent l'air chaud a tendance à échauffer le produit dans la direction d'un équilibre thermique entre le produit et l'air.

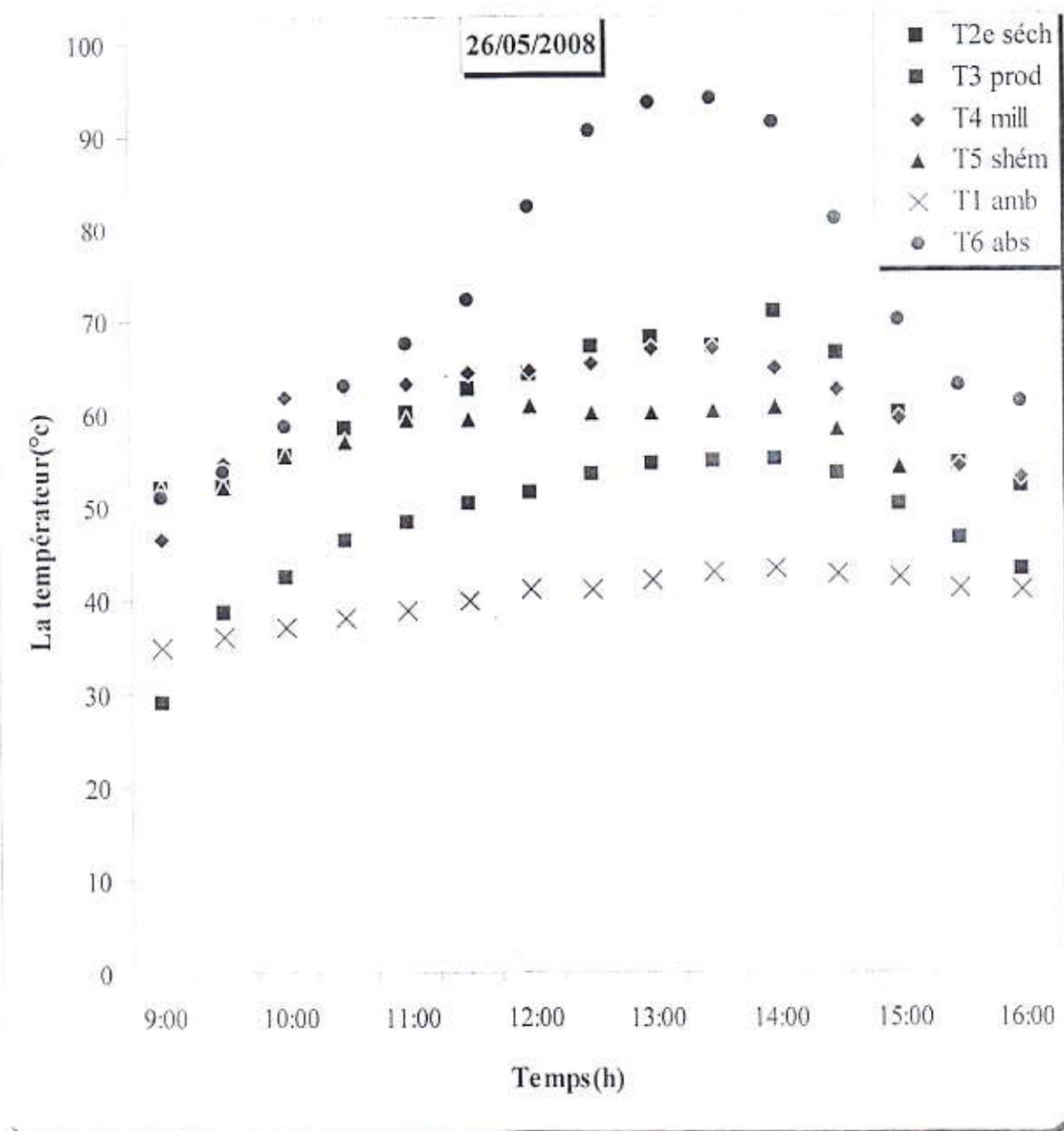


Figure 35 : Variation de la température en fonction du temps pour le 1<sup>er</sup> jour

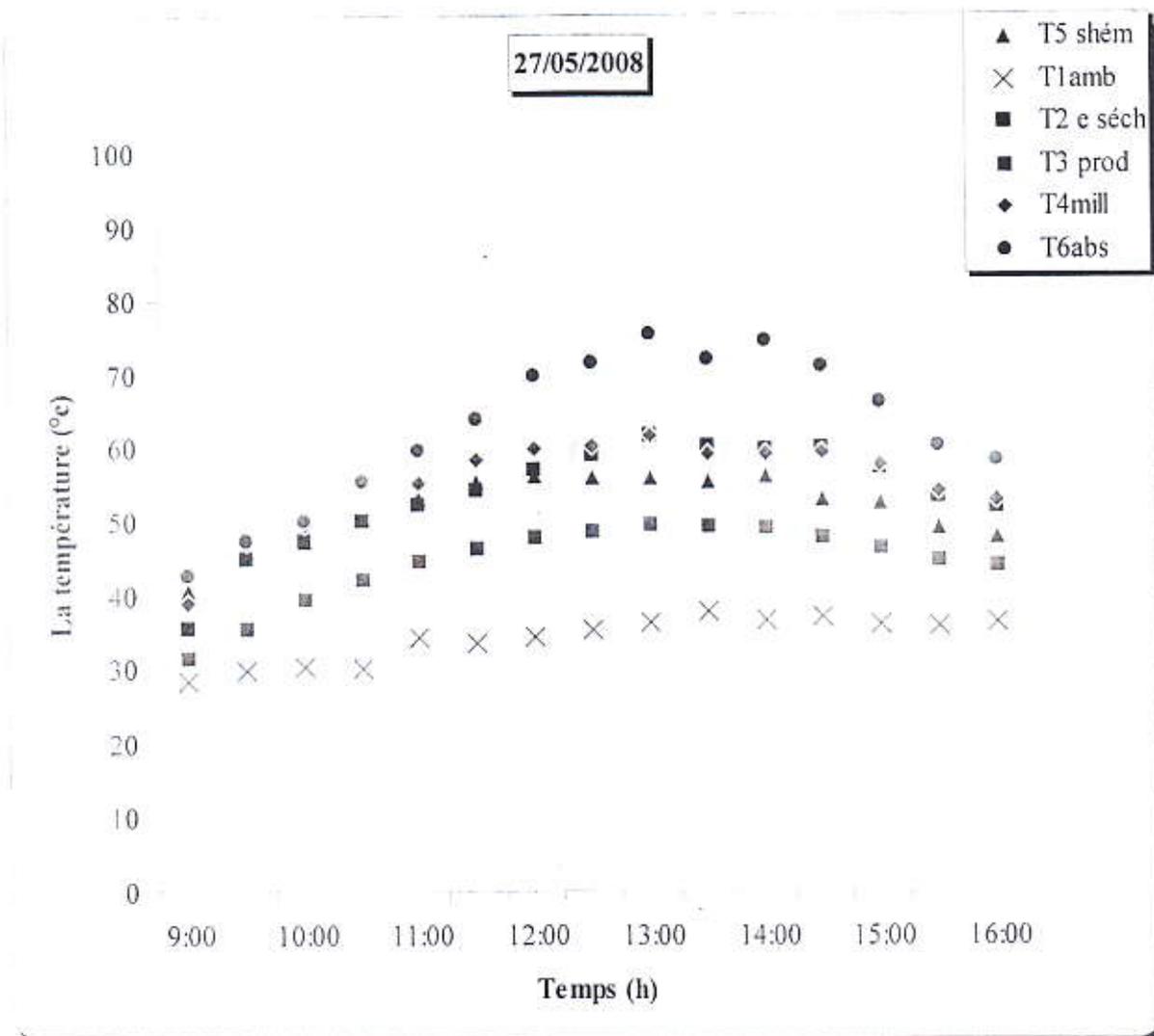


Figure 36 : Variation de la température en fonction du temps pour le 2<sup>ème</sup> jour

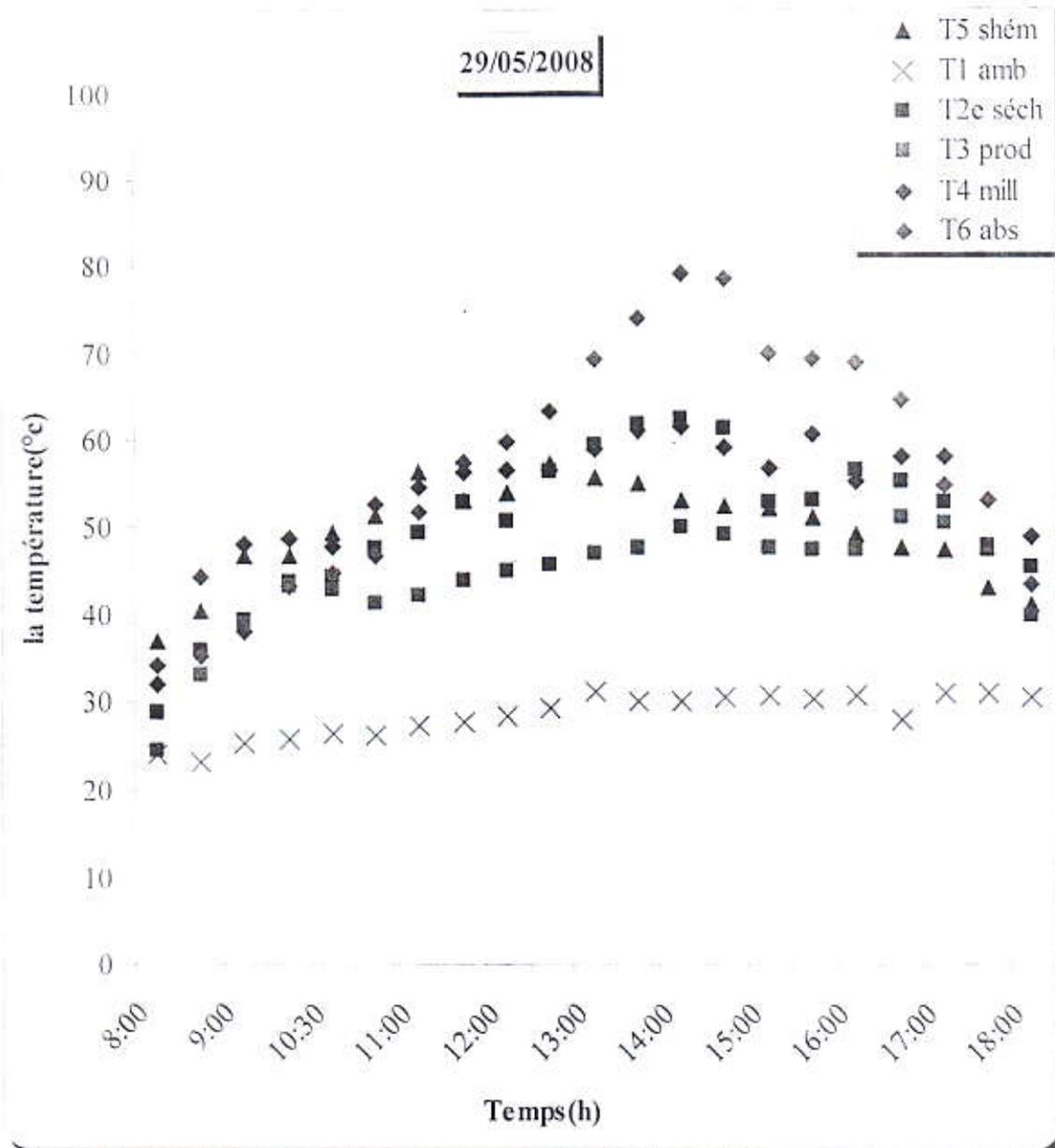


Figure 37 : Variation de la température en fonction du temps pour le 3<sup>ème</sup> jour

## IV-4-3-3 Evolution de l'humidité relative de l'air au cours du séchage

Les figures (38, 39, 40) présentent la variation de l'humidité relative de l'air à l'entrée et à la sortie (cheminée) du séchoir en fonction de temps. L'écart en humidité relative à l'entrée et à la sortie du séchoir est directement lié à la variation du rayonnement solaire. En effet cela se traduit par un écart  $\Delta H_R$  assez petit en début et en fin de journée mais plus large au milieu de la journée où le rayonnement solaire est important. Cet écart en humidité relative est directement liée à une écart en humidité absolue, ce qui traduit finalement un pouvoir évaporatoire de l'air asséchant qui suit la même allure, c'est à dire assez faible en début et en fin de journée, et important en milieu de journée. L'exception de cette constatation est remarquée sur la figure (39) correspondant au deuxième jour pour lequel on a arrêté le séchage vers 16h, la température était encore assez élevée ( $T_{amb}=47^\circ\text{C}$ ) et donc l'écart  $\Delta H_R$  reste assez élevée. D'autre part la comparaison des trois figures (38, 39, 40) montre lisiblement que l'écart en humidité relative diminue avec l'avancement du processus de séchage et il devient minimum vers la fin du troisième jour où le produit s'approche de la teneur en eau d'équilibre.

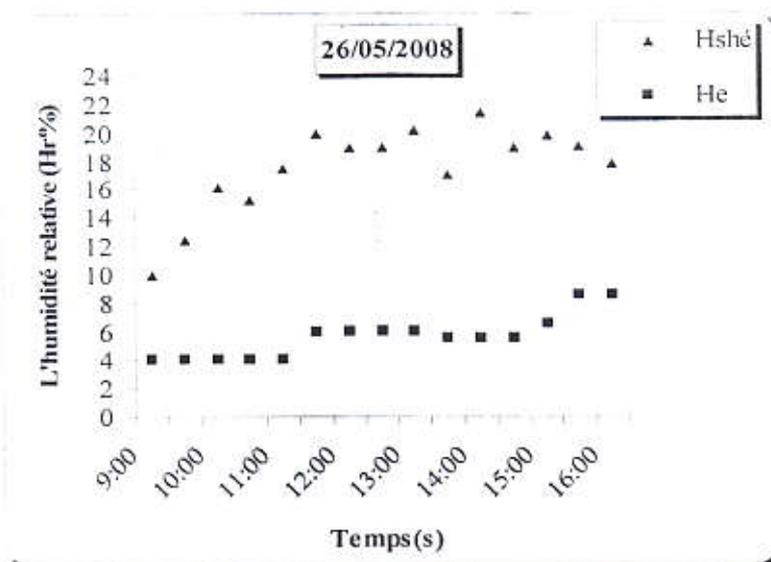


Figure 38 : Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour le 1<sup>er</sup> jour

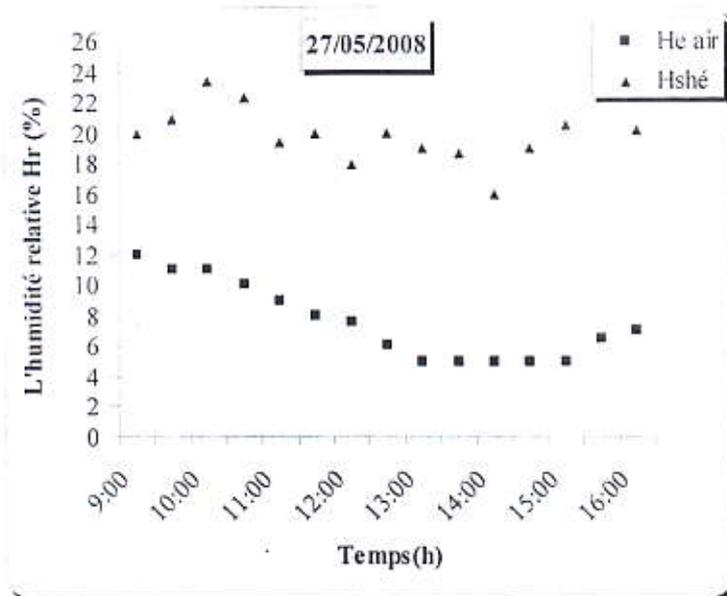


Figure 39 : Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour le 2<sup>ème</sup> jour

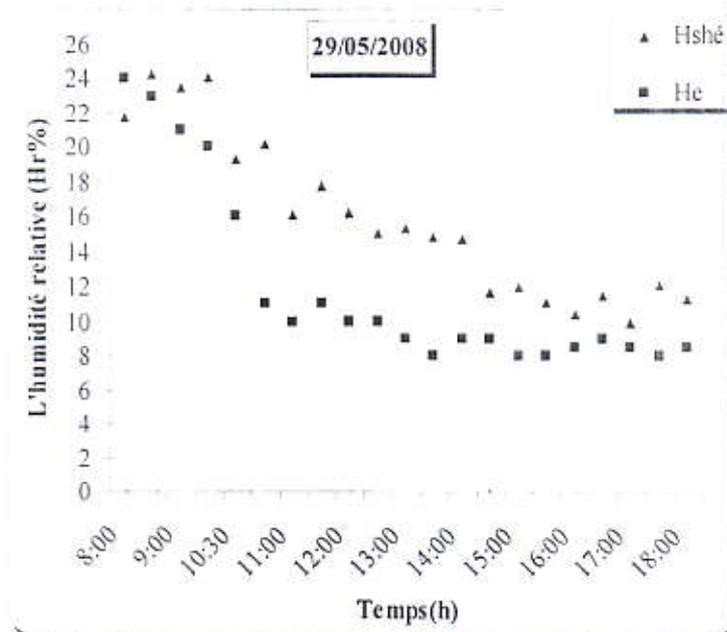


Figure 40 : Evolution de l'humidité relative de l'air en fonction de temps pour le 3<sup>ème</sup> jour

## IV-4-3-4 Evolution de vitesse d'air

Les figure (41.42.43) présenté la variation de la vitesse de l'air en fonction de temps. On remarque que la vitesse de l'air dans le milieu (vitesse d'écoulement) au dessus de la claie est uniforme et très faible il varié de 0.11 à 0.20 m/s. ce montre que le séchage ne se fait pas par convection forcée et le rôle de cette vitesse est tout simplement est d'évacuer la vapeur d'eau dégagée, qui sera aspiré par le cheminé et ce qu'on remarque lisiblement sur les figure(41.42.43) cette ordre de vitesse d'adsorption est pratiquement acceptable pour un bon dégagement de vapeur.

La vitesse de l'air extérieure de séchoir varie pour le 1<sup>er</sup> jour de 0.5 à 3.8 m/s, 2<sup>ème</sup> jour de 0.5 à 3 m/s, le 3<sup>ème</sup> jour de 0.4 à 2 m/s est instable car cette vitesse dépend des condition climatiques qui sont instables en fonction de temps.

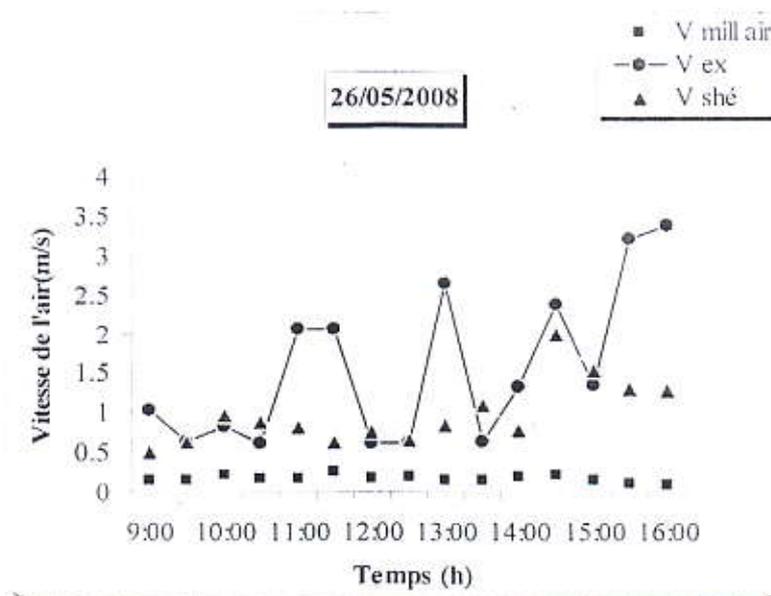


Figure 41 : Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 1<sup>er</sup> jour

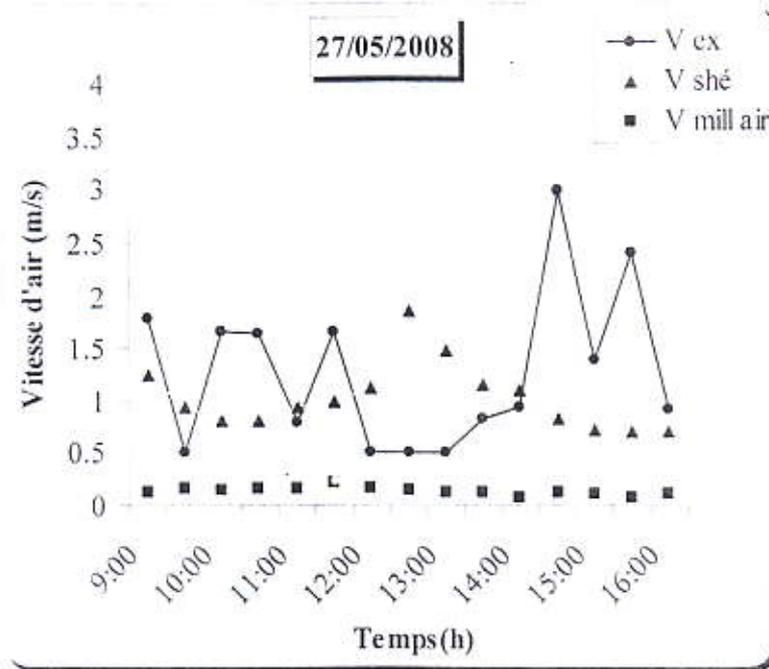


Figure 42 : Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 2<sup>ème</sup> jour

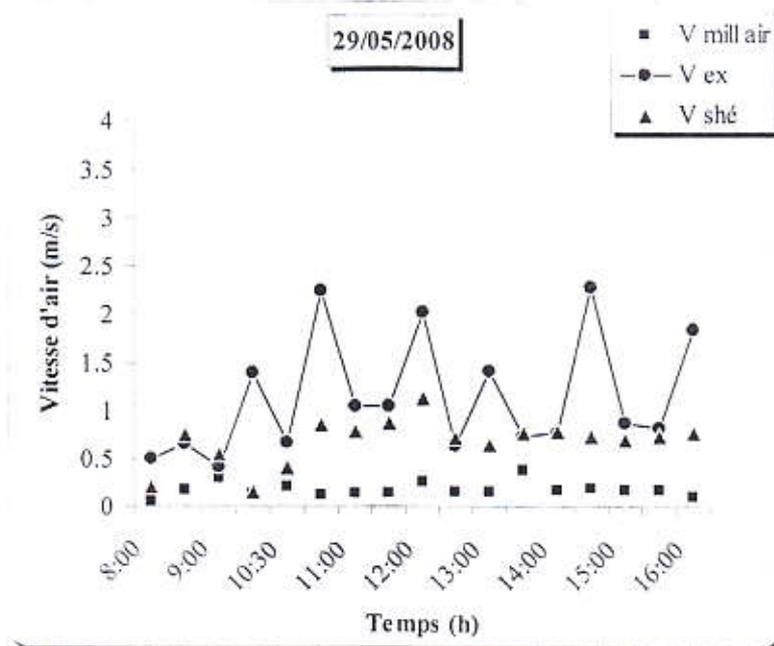


Figure 43 : Evolution de vitesse d'air en fonction de temps pour le 3<sup>ème</sup> jour

**Conclusion**

### Conclusion

Le séchage solaire est un moyen rentable pour le séchage des boues résiduaires de traitement d'eaux usées urbaines, le séchoir solaire direct est bien adapté à ce type de séchage.

Dans notre travail, on fait la conception et la réalisation d'un prototype de séchoir solaire direct de type serre.

Les résultats expérimentaux nous amènent aux conclusions suivantes:

- Le temps de séchage des boues pour avoir une teneur en eau finale des boues est de 13% en 24h.
- L'homogénéité de la répartition des températures à l'intérieur du séchoir présente le bon fonctionnement du séchoir solaire.
- Le choix d'une surface absorbante autour de la claie dans la conception du séchoir présente une source supplémentaire d'énergie pour le séchage des boues.
- la température dans le milieu du séchoir est plus importante que la température ambiante par un moyen (l'écart entre de  $T_{amb}$  et  $T_{mil}$ ) de 23.7 à 30.6°C. Ce qui signifie une puissance thermique assez importante qui mise en jeu.

Afin d'améliorer les caractéristiques de ce séchoir on recommande les points suivants :

- Pour accélérer l'opération de séchage, on peut augmenter la température de produit en colorant la claie en noir
- Si on réalise ce travail à l'échelle industrielle. On suggère que la claie (plateaux d'épandage) soit d'une épaisseur réduite et dotés d'un système d'égouttoir (drainage gravitaire) afin d'améliorer le séchage.

A l'échelle réelle, on propose des serres des bases partagées à des bassins d'épandage des boues et les places restantes exploiter comme absorbeur par les peintures en noir.

A la fin de cette étude, nous suggérons de choisir le séchoir solaire direct de type serre pour le traitement des boues résiduaires de traitement d'eau usée, qui va permettre un développement d'exploitation des boues.

# Références

## Les références

[1] <http://www.ulg.ac.be/sciences>

Université de Liège –Haute Ecole Charlemagne –Hemes

Les métiers de l'énergie –Ingénieurs de l'énergie

[2] Manouche Djamel « valorisation des produit agro-alimentaires et des plantes medcinales par les procèdes de séchage solaire », mémoire magistère, Ouargla (2006)

[3] kaddouri.F, Boumedienne. Y. "simulation numérique de séchage direct"

Mémoire d'ingénieur d'état en mécanique, Batna (2004)

[5] Debba Mouhamed Said, « rapport sur l'installation de vis archimed », station de TOUGGOURT (2007)

[6] H. AMADOU « Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbain » Docteur de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg (2007)

Page : 9 ,10 ,17 ,32 ,33 ,34 ,35

[7] [www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/eval/handbook-guide/vol\\_4/sludge-boues\\_f.html](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/eval/handbook-guide/vol_4/sludge-boues_f.html) - 51  
Guide canadien d'évaluation des incidences sur la santé - Volume 4 : Impacts sur la santé par secteur industriel *Chapitre 8*

[8] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Boues\\_d%27%C3%A9puration](http://fr.wikipedia.org/wiki/Boues_d%27%C3%A9puration)

« Essai d'épandage de boues de station d'épuration avant plantation de chêne sessile en forêt de Chantilly en France », G. Gibaud, RDV technique, ONF, n° 19 Hiver 2008.

[9] Traitement de boue [pagesperso-orange.fr/hydroland/TraitEU.htm](http://pagesperso-orange.fr/hydroland/TraitEU.htm) - 27k

[10] [WWW.territorial.fr](http://WWW.territorial.fr), Françoise BADIA-GONDARD « L'assainissement des eaux usées » ,page (49-51-52-160-161).

[11] Séchage thermique des boues urbaines et industrielles

[12] schnell.D. "Technique de séchage", (1983).

[13]- Angélique LEONARD « Etude du Séchage convection de boues de station d'épuration.

Suivi de la texture par micro tomographie à rayons X »

Docteur en Sciences appliquées de l'Université de Liège Ingénieur civil chimiste (2003) page (17)

[14]- Rayan SLIM « Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de Stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur »

Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Energétique" (2007) Page (9, 10,11)

[15]- Le maire et les boues d'épuration, Guide pratique pour les collectivités locales V  
Crédits photographique : Aconsult

Maquette et mise en page : Philippe Soilly41, quai d'Orsay 75343 Paris Cedex 07 Page (62)

[16]- Sébastien Renou « Analyse de cycle de vie appliquée aux systèmes de traitement des eaux usées » Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (2006) Page (25,26)

[17]- Valorisation des boues (Combiner séchage solaire et récupération d'énergie)

Solutions techniques, l'eau l'industrie, les nuisances- N°303, Titre:Un procédé de séchage solaire totalement automatisé

[18]- Ecologique et économique : le séchage solaire des boues de station d'épuration

Technique d'Energie Plus n°371 du 15 septembre 2006

© ATEE – ENERGIE PLUS - Tous droits réservés –

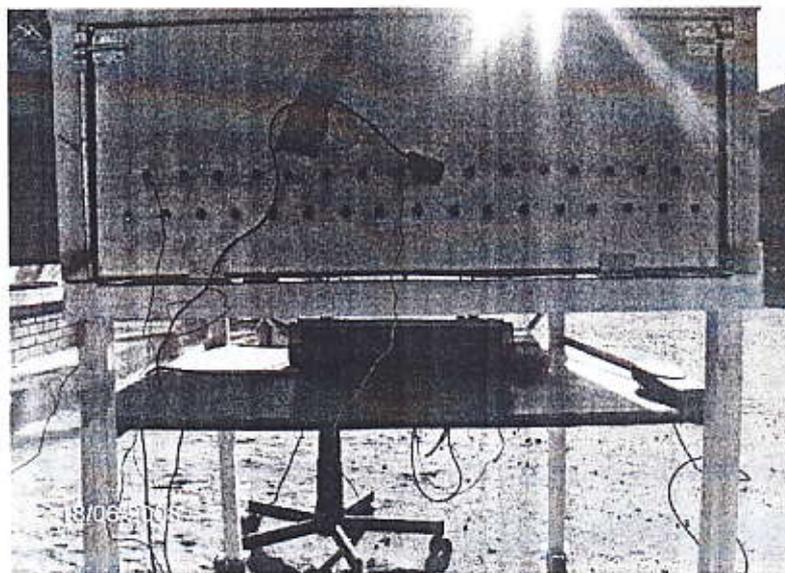
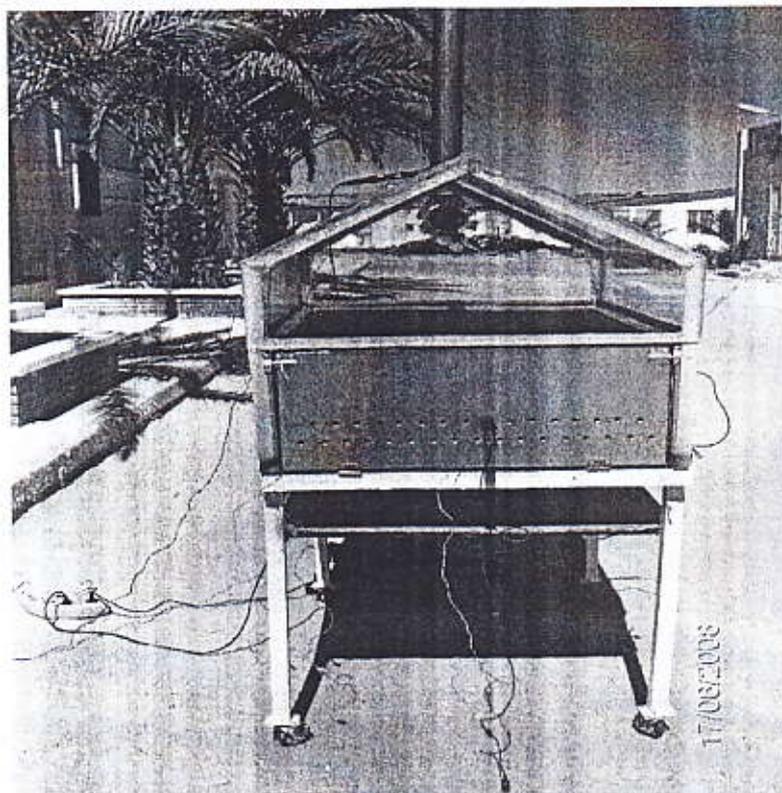
[19]-Les procédés "écologiques" pour le traitement des boues urbaines

[20] (A.Boulemtafès et D.Semmar) « conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect »  
centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62 route de l'observatoire,  
Bouzaréah, Alger

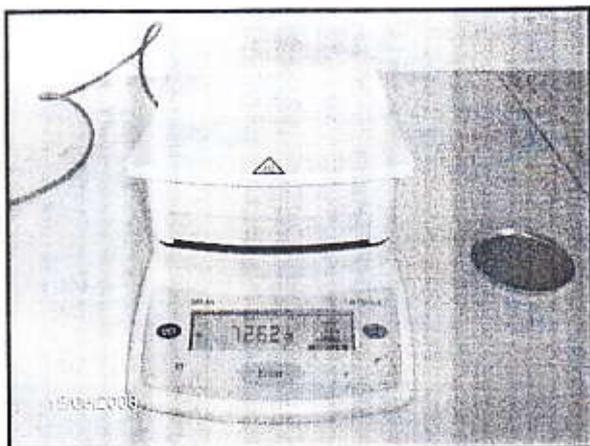
[21] dimensionnement et caractéristique de séchoir ( موسوعة أطلس العالم )

**ANNEXE**

## Annexe



Séchoir solaire sous serre direct



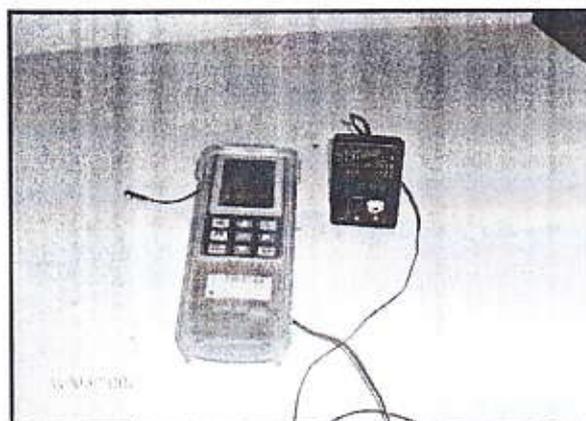
L'analyseur d'humidité



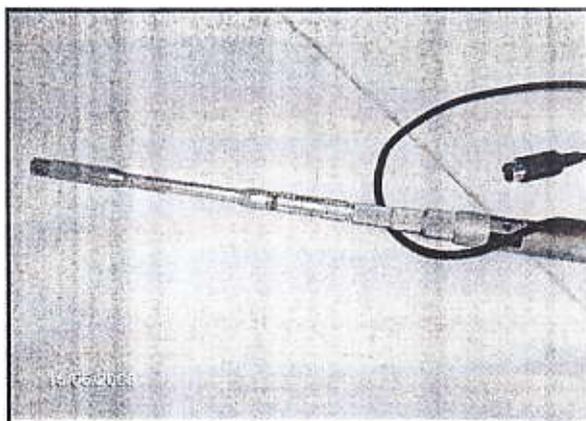
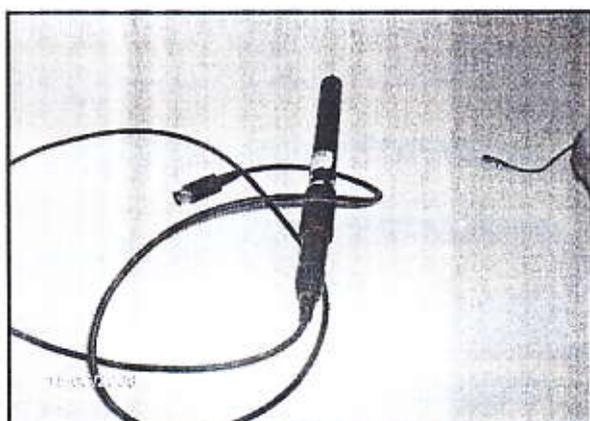
Manomètre testo 645



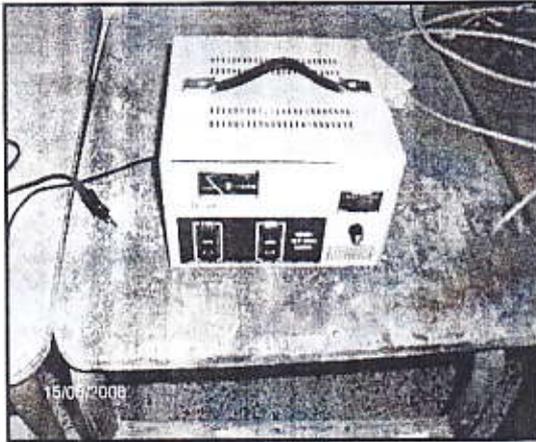
Testo 425



Testo 445



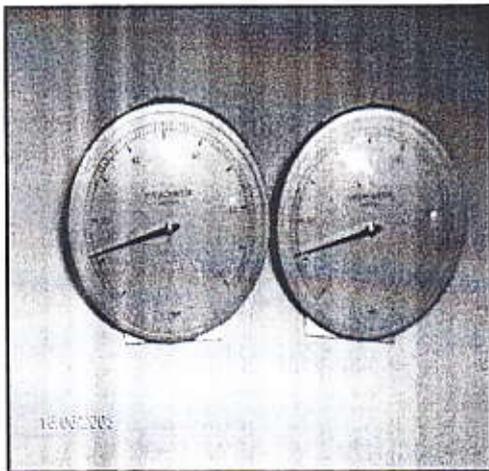
Anémomètre



Solirimètre



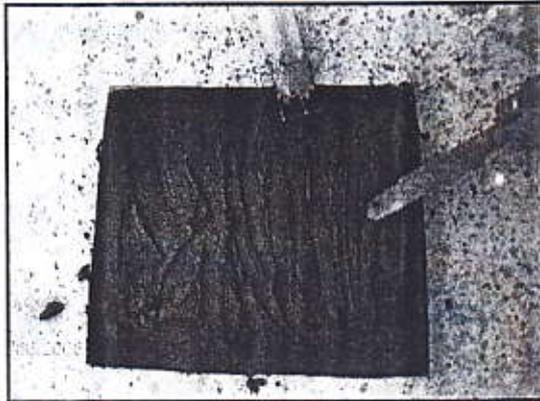
Un appareil affichage numérique



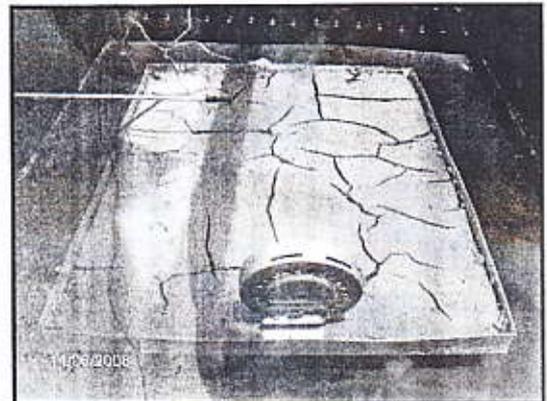
Un hygromètre (PS09)



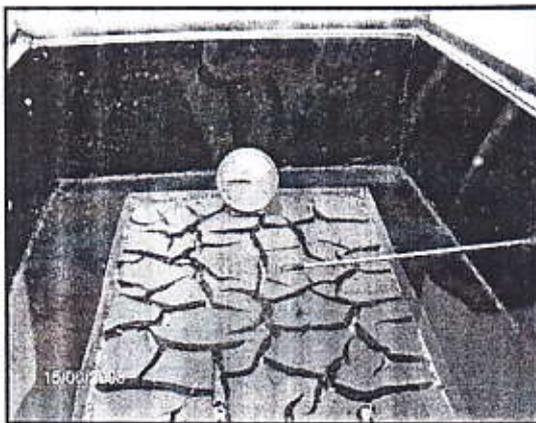
Les appareils de mesures contactées avec le séchoir



Les boues à teneur initiale



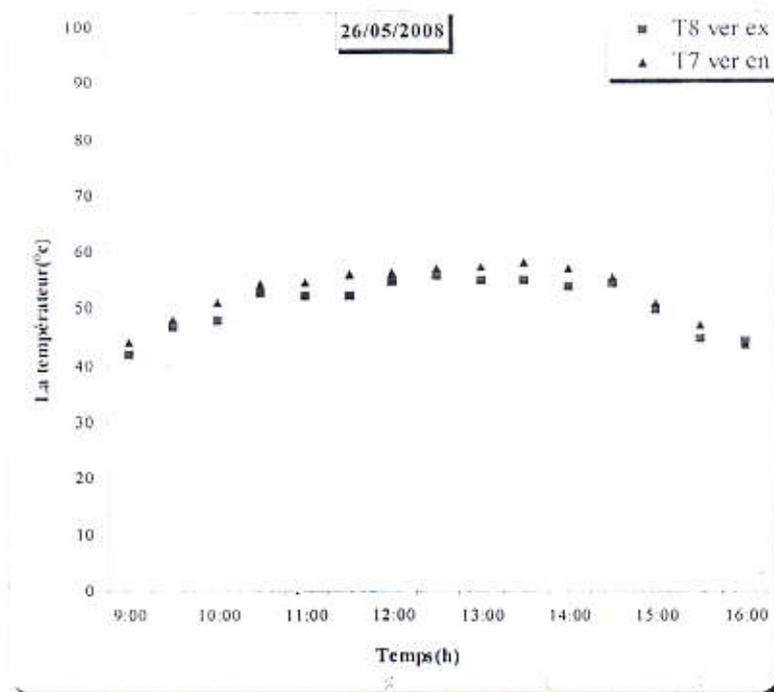
La boue cour le séchage pour 1<sup>er</sup> jour



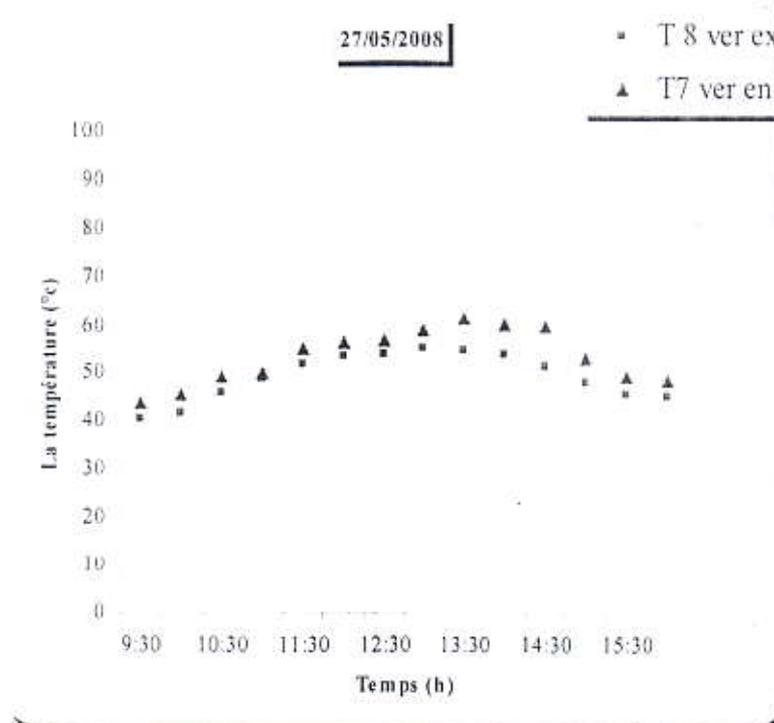
La boue pour 2<sup>ème</sup> jour de séchage



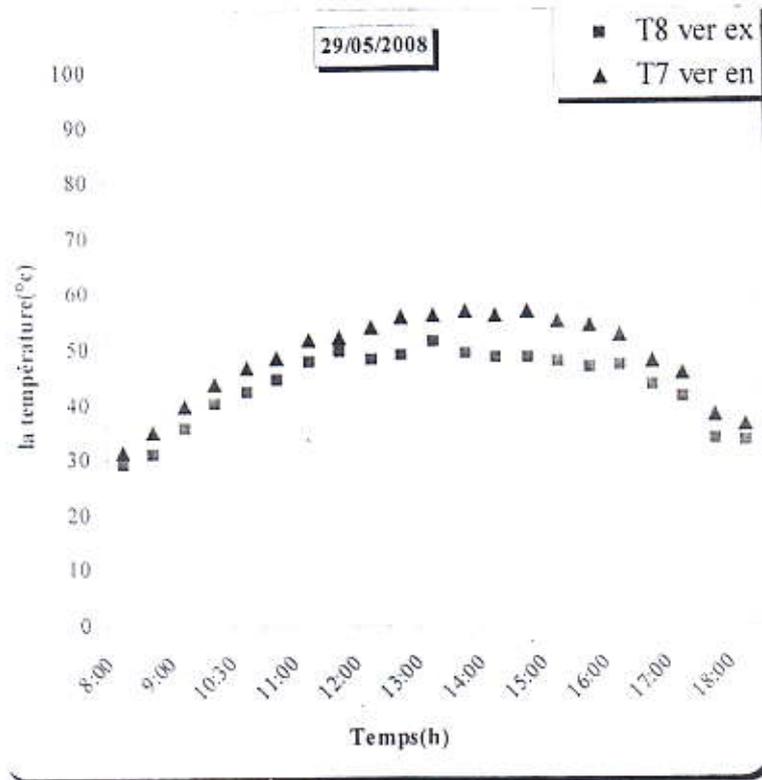
La boue pour 3<sup>ème</sup> jour de séchage



**Variation de température de plaque de verre en fonction de temps pour le 1<sup>er</sup> jour**



**Variation de température de plaque de verre en fonction de temps pour le 2<sup>ème</sup> jour**



Variation de température de plaque de verre en fonction  
de temps pour le 3<sup>ème</sup> jour

## Résumé

Dans le souci de contribuer à la protection de l'environnement et à valorisation des déchets issus des S.T.E.P, nous avons mené cette étude expérimentale qui consiste à la conception d'un séchoir solaire simple de type serre.

Les tests des conditions de fonctionnement du séchoir réalisés ont été faits par les moyens de suivi adéquats des différents paramètres physiques tel que le temps de séjour des boues dans le séchoir, les températures, l'humidité relative de l'air ainsi que la teneur en eau du produit.

L'efficacité de ce séchoir est prouvée après l'analyse des résultats expérimentaux qui montre l'augmentation de la température dans le séchoir et l'homogénéité du séchage des boues à cause de la distribution homogène de l'air asséchant.

**Mots clés :** les boues, séchoir solaire, séchage

## ملخص

في إطار حماية البيئة وتأمين الفضلات الناتجة من محطات تصفية المياه المستعملة، كانت هذه الدراسة التجريبية التي تتضمن تركيب نموذج لمجفف شمسي بسيط، واختبار شروط عمله بواسطة دراسة العوامل الفيزيائية التالية: زمن بقاء الوحل داخل المجفف، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية للهواء المجفف بالإضافة إلى نسبة الماء في الوحل.

إن فعالية المجفف تم التحقق منها من خلال تحليل نتائج التجربة التي برهنت على ارتفاع مهم لدرجة الحرارة داخل المجفف، وتجانس معتبر في طريقة تجفيف الوحل.

**الكلمات الدالة:** الوحل، مجفف شمسي، التجفيف.