



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur  
Et de la recherche scientifique  
Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen  
Faculté de technologie  
Département de Génie mécanique

**Mémoire**  
**Pour l'Obtention du Diplôme du Master**  
**Génie énergétique et environnement**  
**Option : Génie thermique et énergies renouvelables**

**Thème**

**Etude sur la valorisation par séchage solaire  
Des boues d'épuration des  
Eaux urbaines – cas de la station d'Office Nationale  
d'Assainissement (ONA)- Tlemcen**

**Présenté par :**

**TELLI SIDI MOHAMED**

**Soutenu le : 19 Septembre 2013**

**Devant le jury :**

Président :	GUENIFED Abdelhalim	MAA, Université Tlemcen
Encadreur :	BENMOUSSAT Abderrahim	MCA, Université Tlemcen
Co-encadreur :	SELADJI Chakib	MCA, Université Tlemcen
Examineurs :	Mme BESSEDIK Leila	MAA, Université Tlemcen
	Mr SAIM Rachid	MCA, Université Tlemcen
Membres invités :	Mme HABI	Directrice de STEP ONA-Tlemcen

Mémoire préparé avec la collaboration ONA – Tlemcen

**Année: 2012-2013**

## REMERCIEMENT

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

J'adresse mon vif remerciement à mes encadreurs **Mr. BENMOUSSAT Abderrahim** et **Mr. SELADJI Chakib** pour ses compréhensions et ses conseils et ses aides. Pour ses gentillesse et ses orientations efficaces.

Je tiens également à remercier **Mr. GUENIFED Abdelhalim** d'avoir accepté de présider le jury de mon projet de fin d'études.

Je remercie **Mme. BESSEDIK Leila** et **Mr. SAIM Rachid** qu'ont bien voulu examiner mon travail. Leur présence va valoriser, de manière certaine, le travail que j'ai effectué.

Aussi, je remercie **Mme. HABI** la Directrice de STEP ONA-Tlemcen d'avoir accepté pour faire un stage au niveau de la station et pour sa compréhension et ses conseils et ses aides. Pour sa gentillesse et sa orientation efficace.

J'adresse également mon profonde gratitude à tous les professeurs de l'université ABOUBAKR BELKAID en particulier ceux du département GENIE MECANIQUE. Votre enseignement a porté ses fruits.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

**Merci à tous**

# *Dédicace*

*Grâce à dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire plus particulièrement :*

- *A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et orientations dans ma vie.*
- *A toute ma famille et mes très chers frères et mes sœurs*
- *A mon meilleur cher ami **Haddouche Bilal** qui je l'aime beaucoup et que je lui souhaite une bonne chance dans sa vie et ses études et inchallah il vas obtenue son diplôme comme ce jour là*
- *A tous mes enseignants et à ma promotion de génie mécanique.*
- *A tout mes amis (**BENBOUZIANE Oussama**, **BENMOKHTARI Ismail**, **Imane**, **khadija**, **aniss**, **B. Mohamed Tahar**, et mes petits-neveu **Randa.**, **Amina.**, **Hadjer**, **Asma** et **mehdi** ...)*

*A tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à ma formation.*

*Telli Mohamed*

## Table des matières

### LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

الخلاصة

Abstract

Résumé

### Introduction générale

## CHAPITRE I : Boues d'épuration des eaux usées

I.1-Introduction .....	23
I.2- Stations d'épuration d'eaux usées urbains en Algérie.....	24
I.3- Nécessité et objectif de l'épuration .....	24
I.3.1- Caractères réglementaires d'une eau épurée .....	24
I.4- Les différentes étapes d'épuration des eaux résiduaires.....	24
I.4.1- Traitement préliminaire (prétraitement).....	25
I.4.1.1- Dégrillage.....	26
I.4.1.2- Tamisage.....	26
I.4.1.3- Le dessablage.....	27
I.4.1.4- Déshuilage- Dégraissage.....	27
I.4.2- Traitement primaire .....	28
I.4.2.1- Décantation.....	28
I.4.2.2- La coagulation- floculation .....	29
I.4.2.2.1- Coagulation .....	29
I.4.2.2.2- Floculation .....	30
I.4.3- Traitement secondaire .....	31
I.4.3.1- Lit bactériens « filtre bactérien » .....	32
I.4.3.2- Disques biologiques .....	33
I.4.3.3- Boues activées .....	34
I.5- Gestion des boues .....	35
I.6.1- Origine et caractéristiques des boues .....	36
I.6.2- Origine .....	36
I.6.3- Caractéristique .....	38
I.6.3.1- Siccité d'une boue .....	38
I.6.3.2- Concentration en Matières Sèches (M.S).....	38

<b>I.6.3.3- La Teneur en Matières Volatiles en Suspension : (M.V.S).....</b>	<b>38</b>
<b>I.6.4- Notion de Stabilité d'une boue.....</b>	<b>39</b>
<b>I.7- Quantité de boue produit.....</b>	<b>40</b>
<b>I.7.1- Evaluation .....</b>	<b>40</b>
<b>I.7.2- Extraction.....</b>	<b>40</b>
<b>I.8- Filière de traitement .....</b>	<b>40</b>
<b>I.8.1- LES PHASES DE TRAITEMENT.....</b>	<b>41</b>
<b>I.8.1.1- L'ÉPAISSISSEMENT .....</b>	<b>41</b>
<b>I.8.1.1.1- Épaississement par décantation ou épaississement statique....</b>	<b>41</b>
<b>I.8.1.1.2- Épaississement dynamique.....</b>	<b>41</b>
<b>I.8.1.1.2.1- Épaississement par flottation.....</b>	<b>41</b>
<b>I.8.1.1.2.1- Épaississement par égouttage.....</b>	<b>42</b>
<b>I.8.1.1.2.2- Épaississement par centrifugation.....</b>	<b>42</b>
<b>I.8.1.2- LA STABILISATION .....</b>	<b>43</b>
<b>I.8.1.2.1.- La stabilisation aérobie thermique.....</b>	<b>43</b>
<b>I.8.1.2.2- La stabilisation aérobie .....</b>	<b>43</b>
<b>I.8.1.2.3- La stabilisation anaérobie.....</b>	<b>43</b>
<b>I.8.1.2.4- La stabilisation chimique .....</b>	<b>44</b>
<b>I.9- Technique de Séchage des boues :.....</b>	<b>46</b>
<b>I.9.1- Déshydratation des boues .....</b>	<b>46</b>
<b>I.9.1.1- Déshydratation mécanique et naturelle .....</b>	<b>46</b>
<b>I.9.1.2- Procédés de Déshydratation .....</b>	<b>46</b>
<b>I.9.1.2.1- Conditionnement par ajout de réactifs minéraux .....</b>	<b>47</b>
<b>I.9.1.2.2- Conditionnement aux poly-électrolytes.....</b>	<b>47</b>
<b>I.9.1.3.Le Filtre à Bandes .....</b>	<b>48</b>
<b>I.9.1.4- Le Filtre-presse.....</b>	<b>49</b>
<b>I.9.1.4.1- Le filtre à plateaux.....</b>	<b>50</b>
<b>I.9.1.4.2- Filtres à plateaux membranes.....</b>	<b>50</b>
<b>I.9.1.5- Centrifugation .....</b>	<b>51</b>
<b>I.9.1.5.1-Fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse.....</b>	<b>51</b>
<b>I.9.1.5- Lits de séchage .....</b>	<b>52</b>
<b>I.9.1.5.1- Lagunes de séchage.....</b>	<b>53</b>
<b>I.9.1.6- Déshydratation thermique.....</b>	<b>54</b>
<b>I.9.1.6.1- Sécheurs directs .....</b>	<b>55</b>
<b>I.9.1.6.2- Sécheurs indirects .....</b>	<b>56</b>
<b>I.10- Destination finale des boues et contraintes afférentes.....</b>	<b>58</b>
<b>I.10.1- Valorisation agricole.....</b>	<b>59</b>
<b>I.10.2- Qualité des boues.....</b>	<b>60</b>
<b>I.10.2.1- Nature et localisation des sols.....</b>	<b>60</b>

<b>I.10.3- Valorisation énergétique.....</b>	<b>61</b>
<b>I.10.3.1- Incinération.....</b>	<b>61</b>
<b>I.10.3.1.1- Incinération dans un four spécifique.....</b>	<b>61</b>
<b>I.10.3.1.2- Co-incinération avec ordures ménagère.....</b>	<b>61</b>
<b>I.10.3.1.3- Oxydation par voie humide (OVH).....</b>	<b>61</b>
<b>I.10.3.1.4- Thermolyse.....</b>	<b>62</b>
<b>I.10.3.1.5- Gazéification.....</b>	<b>62</b>
<b>I.14- SYNTHESE BIBLIOGRAPHIE SUR LES BOUES D'EPURATION.....</b>	<b>63</b>
<b>I.14.4- Synthèse des principales techniques du marché en Algérie .....</b>	<b>64</b>
<b>I.14.4.1- Programme de développement 2011-2012.....</b>	<b>64</b>
<b>I.15- Conclusion .....</b>	<b>66</b>

## **CHAPITRE II : Station d'épuration des eaux usées urbaines**

<b>II.1-Introduction .....</b>	<b>71</b>
<b>II.1-Description de la station d'épuration de la ville de Tlemcen.....</b>	<b>71</b>
<b>II.2- description des installations .....</b>	<b>72</b>
❖ Déversoir d'orage.....	72
❖ Deux Dégrilleurs.....	73
❖ Dessableur- déshuileur (2 unités).....	73
❖ Bassins d'aération .....	74
❖ Décanteurs secondaires.....	74
❖ Bassin de chloration.....	75
❖ Un poste de pompage des boues avec pompe de recirculation.....	75
❖ Épaississeur à boue .....	76
❖ Lits de séchage.....	77
❖ Aire de stockage des boues séchées.....	77
<b>II.3-Données de bases .....</b>	<b>78</b>
<b>II.4-Composition globale des boues et production de boues d'une station d'épuration d'eaux usées urbaines .....</b>	<b>78</b>
<b>II.5- Destination des boues traitées.....</b>	<b>80</b>
<b>II.5.1- La valorisation agricole.....</b>	<b>80</b>
<b>II.5.1.1- Intérêt agronomique.....</b>	<b>80</b>
<b>II.6.STEP Tlemcen et ISO 14001 .....</b>	<b>81</b>
<b>II.6.1- ISO 14001 .....</b>	<b>82</b>

II.6.2- Périmètre d'application de la norme ISO 14001.....	83
II.6.3-Liste des normes de la série ISO 14 000 .....	83
II.6.3.1- Avantage .....	84
II.7- Caractéristiques thermodynamiques des boues .....	85
II.7.1-Les méthodologies de la mesure de propriétés thermodynamiques de la boue.....	85
II.7.1.1- Définition des isothermes de sorption.....	85
II.7.1.2- Les méthodes de détermination des isothermes .....	85
II.8- Système DVS .....	86
IV.9. - Le méthode de Mesure de la capacité calorifique massique .....	87
IV.10- Résultats sur les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation....	88
IV.10.1- Isothermes de désorption .....	88
II.10.2-Forme générale des isothermes .....	89
IV.10.3-Capacité calorifique massique .....	90
II.11-Conclusion .....	91

### **Chapitre III : Modélisation de séchage solaire des boues d'épuration**

III.1- Introduction.....	95
III.2. Terminologie de séchage.....	95
III.2 .1. Humidité.....	95
III.2 .2. Taux d'humidité.....	95
III.2 .3. États de siccité.....	95
III.2 .4. Taux d'humidité à l'équilibre.....	95
III.2.5. Corps hygroscopique .....	96
III.2 .6. Les différents modes de liaison de l'eau.....	96
III.2 .7. Energie de liaison – chaleur de vaporisation.....	96
III.2 .8. Transferts de chaleur .....	97
III.2.8.1- Séchage par convection .....	97
III.2.8.2- Séchage par conduction .....	98
III.2.8.3- Séchage par rayonnement.....	98
III.3- Place du séchage dans une optique valorisation.....	100
III.3.1- Séchage et épandage.....	100
III.3.2- Séchage et valorisation énergétique.....	101
III.3.3- Déshydratation par séchage solaire des boues.....	101
III.3.4- Avantages du séchage solaire.....	101
III.4- Problématique actuelle du séchage solaire.....	102
III.4.1- Différents procédés de séchage solaire.....	102
III.4.1.1- La serre ouverte.....	103

III.4.1.2- La serre fermée .....	104
III.5- Préparation de la solution de polyelctrolyte.....	104
III.5.1-descriptif du groupe de dosage .....	105
III.5.2- principe de fonctionnement du groupe de dosage.....	106
III.5.3- mise en service.....	107
III.5.4- réglage eaux et poudre :.....	109
III.5.4.1-réglage eaux.....	109
III.5.4.2-réglage poudre ( DOSEUR DE POUDRE ) .....	109
III.6- performance du groupe :.....	110
III. 6- Théories descriptives du phénomène de séchage.....	112
III.6.1- La théorie diffusionnelle.....	112
III.5.2 La théorie capillaire (1937) .....	112
III.6. L'activité de l'eau dans un produit :.....	113
III.6 .1. Isothermes de sorption.....	114
III.6 .2. Formes et modèles des isothermes de sorption.....	114
III.6.3. Chaleur isostérique de désorption.....	116
III.7- Différentes étapes du séchage d'un produit humide.....	116
III.7.1 Caractéristiques de séchage de la boue.....	116
III.7.2- Analyse de la cinétique de séchage.....	117
III.7.2.1- Période de mise en température.....	117
III.7.2.2- Les deux périodes de ralentissement.....	118
III.7.2.3- Receding front model.....	118
III.7.2.4- Wetted-surface model.....	118
III.7.2.5- La classification de Sherwood.....	119
III.8.Modélisation simplifiée des phases de séchage.....	120
III.8.1- Période à vitesse constante.....	120
III.8.2.Période à flux décroissant.....	121
III.8.2.1- Modes de transport de l'eau.....	121
III.9-Modélisation.....	122
III.9.1- Courbe caractéristique de séchage.....	122
III.10- Modèle numérique de séchage solaire sous serre.....	123
III.10.1- Description du modèle.....	124
III.10.2- Analyse Xysique du modèle.....	125
III.10.2.1- Représentation des composants de la serre.....	125
III.10.2.2- Ecriture des bilans thermiques et massiques.....	125
III.8.2.2.2- Bilans massiques.....	127
III.11- Expression des flux énergétiques.....	130
III.11.1- Flux radiatifs solaires.....	130
III. 11.2- Flux convectifs.....	132
III.11.3- Transfert de masse.....	135
III.12- Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation.....	136



III.13-Synthèse bibliographique sur la modélisation des procédés de séchage solaire Des boues.....	137
III.14-Conclusion.....	141

## **Chapitre IV : Simulation numérique du séchage solaire sous serre**

IV.1- Introduction.....	146
IV.2- Etude de du séchage.....	147
IV.2.1- Géométrie et dimensionnement des serres.....	147
IV.2.2- Fixation des conditions opératoires.....	149
IV.2.3- L'obtention des courbes de séchage .....	149
IV.2.4- Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage....	149
IV.3- Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle....	151
IV.4- Résolution du système d'équations.....	155
IV.5-Résultats et discussion .....	156
IV.5.2- Analyse de l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur .....	160
IV.6-Conclusion.....	164

## **Conclusion générale**

## Listes des tableaux

### Chapitre I : Boues d'épuration des eaux usées

Tableau I.1 Etat physique des boues.....	39
Tableau I.2 Valeurs de production des boues de quelques STEP en Algérie.....	39
Tableau I.3 Critère de dimensionnement des lit de séchage.....	53
Tableau I.4 Critères de choix entre sécheur direct et sécheur indirect.....	57

### Chapitre II : Station d'épuration des eaux usées urbains

Tableau II.1 Production de boues d'une station d'épuration d'eau urbaine.....	78
Tableau II.2 variation de la siccité de la boue dans le STEP Tlemcen pendant l'année...79	
Tableau II.2 Evolution de la composition des boues en fonction de la ligne de traitement d'eau.....	79

### Chapitre III : Modélisation de séchage solaire des boues d'épuration

Tableau III.1 Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés.....	115
Tableau III.I1 Récapitulatif de la notation des flux.....	128

### Chapitre IV : Simulation numérique de séchage solaire sous serre

Tableau IV.I- Formulation du système d'équation du modèle.....	151
Tableau IV.II- paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle.....	153

## Listes des figures

### Chapitre I : Boues d'épuration des eaux usées

Figure I.1 « Schéma des différentes étapes d'épuration des eaux résiduaires ».....	25
Figure I.2 Schéma d'un traitement préliminaire d'un station d'épuration.....	25
Figure I.3 Schéma d'un dégrilleur .....	26
Figure I.4 Schéma d'un Tamisage.....	26
Figure I.5 Schéma d'un dessableur / déshuileur-dégraisseur.....	27
Figure I.6 Schéma d'un décanteur.....	28
Figure I.7 Schéma d'un procédé de coagulation- floculation.....	31
Figure I.8 Schéma d'un Procédé Lit bactérien.....	33
Figure I.9 Schéma d'un procédé Disques biologiques.....	34
Figure I.10 Schéma d'un procédé boues activées.....	35
Figure I.11 Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées.....	37
Figure I.12 Schéma d'un épaisseur circulaire.....	43
Figure I.13 Schéma d'un fonctionnement de stabilisation chimique.....	45
Figure I.14 Schéma d'un procédé déshydratation Filtre a band.....	49
Figure I.15 Schéma d'un procédé de déshydratation par Filtre presse.....	50
Figure I.16- Schéma de fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse.....	51
Figure I.17 Schéma d'un lit de séchage.....	52
Figure I.18 Schéma d'un sécheur thermique direct des boues.....	56
Figure I.19 Schéma d'un principe de fonctionnement d'un sécheur indirect des boues.....	57

## **Chapitre II : Station d'épuration des eaux usées urbains**

Figure II.1	Vue générale de la Station d'épuration ONA – Tlemcen.....	71
Figure II.2	Déversoir d'orage.....	72
Figure II.3	Grille grossière manuelle (1unité).....	72
Figure II.4	Grille mécanisée (2unités).....	73
Figure II.5	Déssableur- déshuileur.....	73
Figure II.6	Bassins d'aérations.....	74
Figure II.7	Clarificateurs.....	74
Figure II.8	Bassins de chloration.....	75
Figure II.9	Vis de recirculation.....	75
Figure II.10	Epaississeur.....	76
Figure II.11-	Pompe de la boue.....	76
Figure II.12	Aire de stockage & Lits de séchage.....	77
Figure II.14 :	L'ISO 14001 repose sur le principe de la roue de Deming .....	83
Figure II.15-	Photographie du système DVS.....	87
Figure II.16	calorimètre C80.....	88
Figure II.17-	Isotherme de désorption à une température de 30°C et à 50°C.....	89

## **Chapitre III : Modélisation de séchage solaire des boues d'épuration**

Figure III.1-	Schéma d'un exemple de serre ouverte.....	103
Figure III.2-	Schéma d'un serre fermée – Extraction en pignon.....	104
Figure III. 3	SCHEMA DESCRIPTIF DU GROUPE DE DOSAGE.....	106
Figure III.4-	Schéma d'un fonctionneman.....	107
Figure III.5	Courbe de débit maximal.....	110
Figure III.6	Courbe de Krischer théorique.....	117
Figure III.7	Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche référéncées par Sherwood (1936).....	119
Figure III.8	Eléments et mécanismes à prendre en compte dans un modèle de sécheur solaire.....	125
Figure III.9	Schéma des flux solaires absorbés.....	130

## **Chapitre IV : Simulation numérique de séchage solaire sous serre**

<b>Figure IV.1 Schéma d'un serre ouverte .....</b>	<b>146</b>
<b>Figure IV.2 -Schéma d'un serre ouverte a convection libre.....</b>	<b>148</b>
<b>Figure IV.3- Schéma d'une serre fermée a convection forcé.....</b>	<b>148</b>
<b>Figure IV.4- Courbes de séchage représentant l'évolution des teneurs en eau sur base sèches, en fonction du temps.....</b>	<b>156</b>
<b>Figure IV.5- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de l'air intérieur en fonction du temps.....</b>	<b>157</b>
<b>Figure IV.6- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de couverture en fonction du temps.....</b>	<b>158</b>
<b>Figure IV.7- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de boue en fonction du temps.....</b>	<b>159</b>
<b>Figure IV.8- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur les teneurs en eau en fonction du temps.....</b>	<b>160</b>
<b>Figure IV.9- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de l'air intérieur en fonction du temps.....</b>	<b>161</b>
<b>Figure IV.10- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de couverture en fonction du temps.....</b>	<b>162</b>
<b>Figure IV.11- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de boue en fonction du temps.....</b>	<b>163</b>

## LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

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

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

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



w	angle horaire en degré	(°C)
X	teneur en eau de la boue en base sèche	(kg eau /kg ms)
X <sub>eq</sub>	teneur en eau en équilibre	(kg eau /kg ms)
X <sub>cr</sub>	teneur en eau critique	(kg eau /kg ms)
X <sub>i</sub>	teneur en eau initiale	(kg eau /kg ms)
$(-\frac{dX}{dt})$	vitesse de séchage	(kg eau /kg ms)
$(\frac{dX}{dt})_1$	vitesse de séchage à phase constante	(kg eau /kg ms)
<b>Lettres grecques</b>		
$\epsilon_c$	coefficient d'émissivité de la couverture	(-)
$\epsilon_b$	coefficient d'émissivité de la couverture	(-)
$\rho_b$	coefficient de réflexion de la couverture	(-)
$\tau_c$	coefficient de transmission de la couverture	(-)
$\sigma$	constante de Stephan Boltzmann	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> )
$\lambda$	conductivité thermique de l'air	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$\mu$	viscosité dynamique	(Pa.s)
$\rho$	masse volumique	(kg.m <sup>-3</sup> )

## الملخص

لقد انصب اهتمامنا في هذه المذكرة حول دراسة محاكاة رقمية لمجفف شمسي لمحطة تطهير مياه الصرف الصحي لولاية تلمسان التابعة للديوان الوطني للتطهير

الهدف من هذه الدراسة هو محاولة لتطوير تصميم رياضي للتجفيف الشمسي على مستوى الأغشية الرقيقة للأوحال وذلك بالاستعانة بمجفف شمسي مباشر وفق شروط طبيعية وبيئية معتمدة على التغير الحراري على مدار اليوم والسنة.

يعتمد التجفيف على عدة عوامل أهمها درجة حرارة المجفف ' سرعة التجفيف ' مدة تعرض المجفف لأشعة الشمس ' معدل المواد الجافة للوحل ' درجة الرطوبة ' الخصائص الفيزيائية والكيميائية لنموذج المجفف من حيث عامل امتصاص أشعة الشمس وعامل تخزينها وعزلها'

الطريقة التي اعتمدت في تجسيد هذا المشروع هي محاكاة رقمية لمجفف شمسي باستعمال بيت زجاجي انطلاقا من المعطيات والخصائص الفيزيائية والكيميائية للأوحال الناتجة عن محطة تطهير مياه الصرف لتلمسان

بعد دراسة سلوك وطبيعة التجفيف الشمسي وديناميكية التجفيف استطعنا محاكاة نموذج رقمي شبيه بالواقع يحتوي على جميع الشروط المتوفرة في نموذج حقيقي ولقد تم الاستعانة بطريقة رانج كوتا لحل جملة المعادلات الرياضية المتحكمة في ذلك، وذلك باستعمال برنامج في برمجة نظام التجفيف الشمسي.

كنتيجة منطقية لبرنامج المحاكاة تبين أن درجة حرارة الهواء المجفف للأوحال هو أبرز العوامل المتحكمة في جودة التجفيف

## كلمات مفتاحية

أوحال التصفية ، التجفيف الشمسي ، الدراسة التحليلية للتجفيف ، التصميم الرياضي للمجفف ، المحاكاة الرقمية للمجفف

## **Abstract**

The study within the framework of this project is a simulation of the solar drying of the clarification sludge of the water used in the station of water treatment of Tlemcen managed by the national office of cleansing (ONA).

The objective of this work consists in developing a mathematical model, for solar drying on thin layer of muds, by using a direct solar drier under the typical ecological conditions of time .Drying is characterized by several parameters: the temperature of drying, the speed of drying, the exposure time the dimensioning of the device of drying, the rate of dryness (water content), characteristics of the materials absorbing, transparencies and insulators.

Methodology that we followed in the realization of this project is a simulation of a solar drying under greenhouse starting from the data of characterization of muds .In order to study the behavior of the drier, and the dynamics of drying, we designed and simulated a direct solar drier.Discretization of the equations, and the resolution of the systems by the method of Rung-kutta, using MATLAB software to made it possible to generate the various energy parameters of the models.

At the end of this study, we concluded that the temperature of the draining air represents the most significant parameter acting on the kinetics of drying.

Key words:clarification sludge - solar drying - modeling of drying - simulation of drying -

## Résumé

L'étude dans le cadre de ce projet est une simulation du séchage solaire des boues d'épuration des eaux usées dans la station de traitement des eaux de Tlemcen gérée par l'office national d'assainissement (ONA).

L'objectif de ce travail consiste à développer un modèle mathématique, pour le séchage solaire sur couche mince des boues, en utilisant un séchoir solaire direct dans les conditions écologiques typiques du temps. Le séchage est caractérisé par plusieurs paramètres : la température de séchage, la vitesse de séchage, la durée d'exposition le dimensionnement du dispositif de séchage, le taux de siccité (taux d'humidité), les caractéristiques des matériaux absorbants, transparents et isolants.

La méthodologie que nous avons suivie dans la réalisation de ce projet est une simulation d'un séchage solaire sous serre à partir des données de caractérisation des boues. Afin d'étudier le comportement du séchoir, et la dynamique du séchage, nous avons conçu et simulé un séchoir solaire direct. La discrétisation des équations, et la résolution des systèmes par la méthode de Rung-kutta, ont permis d'engendrer les différents paramètres énergétiques des modèles.

Au terme de cette étude, nous avons conclu que la température de l'air asséchant représente le paramètre le plus important agissant sur la cinétique du séchage.

Mots clés : boues d'épuration – séchage solaire – modélisation du séchage - simulation du séchage -

## Introduction générale

Le séchage des boues issues des opérations d'épuration des eaux usées peut se faire par plusieurs méthodes : lits de séchage, presses mécaniques... où les résultats peuvent être différents. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation du séchage à air libre sous exposition solaire connu comme la méthode traditionnelle du séchage.

Cette méthode de séchage est peu précise : le manque de capacité de commander le processus correctement, incertitudes du temps, cout de main d'œuvre élevé, nécessité des zones vastes, infection par des insectes et autres corps étrangers.

L'épuration des eaux usées est un traitement par différents procédés physico chimiques pour une séparation en eau épurée et en boues. Historiquement, la création des premiers réseaux d'égouts structurés à la fin de la première XIX<sup>ème</sup> siècle, les responsables ont proposés des solutions pour lutter contre l'infection provoquée par les eaux d'égouts.

Nous sommes intéressés dans ce travail à la valorisation par séchage des boues d'épuration des eaux usées gérées par l'Office National de l'assainissement, ONA – Tlemcen en remplaçant le séchage par lit par convection naturelle séchage envisagé dans cette station par le séchage solaire sous serre. Un séchoir solaire est un dispositif permettant se sécher la boue par circulation d'air chauffé, l'apport en énergie est fourni par le solaire.

Le séchage est caractérisé par plusieurs paramètres : la température de séchage, la vitesse de séchage, la durée d'exposition le dimensionnement du dispositif de séchage, le taux de siccité (taux d'humidité), les caractéristiques des matériaux absorbants, transparents et isolants.

La méthodologie que nous avons suivie dans la réalisation de ce projet est une simulation d'un séchage solaire sous serre à partir des données de caractérisation des boues obtenue par le laboratoire de l'Office National de l'assainissement, ONA Tlemcen : taux de siccité, composition chimique et organique, capacité calorifique, isothermes de sorption.

Nous introduisons des notions de base de gestion des procédés de traitement des boues par boues activées existantes au niveau des installations épuratoires gérées par l'Office National de l'assainissement sans omettre pour autant de citer les autres techniques pratiquées à travers le monde, pour une meilleure maîtrise de leur gestion et par conséquent une meilleure approche de la problématique afin de trouver les solutions les moins irrationnelles.

L'objectif de ce travail consiste à développer un modèle mathématique, pour le séchage solaire sur couche mince des boues, en utilisant un séchoir solaire direct dans les conditions écologiques typiques du temps.

Le problème du séchage a été étudié par plusieurs scientifiques notamment la modélisation du séchage solaire des produits (boues) ainsi que les études des dispositifs [1]

Nous présenterons dans le premier chapitre les différentes filières de traitement des boues d'épuration des eaux usées et dans le second chapitre une présentation de la station d'épuration des eaux STEP – Tlemcen. Le Troisième chapitre est une approche générale sur la théorie du séchage. Le chapitre quatre sera consacré à la simulation du séchage des boues en serre ouvert. Le chapitre cinq est une discussion sur les résultats obtenus et la validation du modèle et nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Boues d'épuration des eaux usées**

# BOUES D'EPURATION DES EAUX USEES

## I.1- Introduction

Le parc des stations d'épuration d'eaux usées urbaines en Algérie est constitué essentiellement de procédés d'épuration à « BOUES ACTIVEES », et à un degré moindre « LAGUNAGE NATUREL ».

Ce dernier produit des boues de façon périodique (période variant de 5 à 10 ans), une périodicité assez longue qui ne nécessite pas la gestion de ces boues au niveau de la station.

Le procédé à boues activées produit des boues de manière régulière (Journalière) qui oblige leur gestion sur le site de la station avant destination finale. De cette contrainte est née la filière de traitement des boues en parallèle avec celle de l'eau pour une meilleure maîtrise du devenir de ce sous produit de traitement. Les procédés de traitement des boues existants au niveau des stations d'épuration dépendent de l'origine et de la nature des boues produites par ces stations. [1]

Ainsi les stations à moyenne charge sont dotées de procédé de stabilisation et celles à faible charge ne le sont pas car elles produisent des boues ayant été déjà stabilisées au niveau de la filière de traitement de l'eau.

En 2005, l'Algérie avait six stations d'épuration d'eau opérationnelles. A ce jour, le pays s'est doté de 145 stations d'épuration dont la majorité est certifiée ISO. Le volume global de l'eau traité est de 800 millions de m<sup>3</sup> annuellement. A l'horizon 2015, le réseau d'épuration sera composé de 200 stations. Ces chiffres ont été dévoilés par le ministre des Ressources en eau, Hocine Necib lors d'une rencontre, à Alger, sous le thème « Réalisations et défis à relever », dans le secteur de l'assainissement et du traitement des eaux usées. [2]

Pour rappel, l'Algérie bénéficie de l'aide de la communauté européenne à travers un programme d'appui au secteur des ressources en eau. Ce programme est doté d'une enveloppe de 40 millions d'euros dont 30 millions émanent de la communauté européenne. Selon le ministre, le réseau d'assainissement est programmé en fonction du développement économique du pays et de la démographie.

Pour étayer ses propos, le représentant du gouvernement dira que « le taux de raccordement à l'eau potable a atteint 87% contre un taux de 30% en 1970 ».

Ce qui place l'Algérie, d'après le locuteur, au deuxième rang au niveau africain. Etait également présent également à ce séminaire, l'ambassadeur et chef de la délégation de l'Union européenne, Marek Skolil. [1]

Selon lui, l'Algérie a ainsi beaucoup avancé dans le domaine de l'assainissement des eaux usées par la réalisation, explique-t-il, de nombreuses installations de mobilisation des eaux conventionnelles et non conventionnelles ainsi que la construction de nombreuses stations d'épuration et d'assainissement des eaux usées, a-t-il ajouté, mettant en évidence l'expérience européenne mise à la disposition de l'Algérie. [2]



## **I.2- Stations d'épuration d'eaux usées urbains en Algérie :**

De par sa vocation, sa raison d'être une station d'épuration existe pour protéger le milieu environnant notamment la ressource hydrique. On a souvent tendance à confondre entre le rôle principal et les rôles secondaires d'une station d'épuration.

Nous insistons pour dire que la protection de la ressource hydrique est le rôle principal de la station à savoir eau souterraine, eau de surface, eau de baignade (zone côtière).

Les rôles secondaires restent bien entendu la réutilisation des eaux épurées en agriculture et à usage industriel ainsi que la valorisation des boues produites en agriculture. Les eaux épurées peuvent aussi être utilisées pour l'entretien des places publics et l'arrosage des espaces verts. [3]

## **I.3- Nécessité et objectif de l'épuration :**

L'épuration des eaux résiduaires est devenue une nécessité pour les raisons sanitaires, des raisons économiques et législatives et même pour préserver l'environnement.

Pour raison, l'homme a créé des procédés d'épuration dont le but essentiel est l'élimination des matières organiques en solution et sous formes colloïdales et la réduction ou l'élimination des charges microbiennes et en particulier les micro-organismes pathogènes. [4]

### **I.3.1- Caractères réglementaires d'une eau épurée :**

Le traitement d'une eau usée donne un effluent qui n'altère pas l'état du milieu récepteur dans une mesure incompatible avec les exigences de l'hygiène publique ; il ne doit pas porter atteinte aux intérêts et activités telles que l'alimentation en eau des hommes, des animaux et des plantes, les intérêts piscicoles ayant notamment une valeur de test à l'égard des pollutions [1].

Une eau épurée doit répondre à certains critères fondamentaux ; en pratique, on s'assurera en outre que :

- Température de l'eau ne doit pas dépasser 30°C
- Sa couleur ne doit pas provoquer une coloration visible dans le milieu récepteur
- PH doit être de la neutralité

## **I.4- Les différentes étapes d'épuration des eaux résiduaires :**

La station d'épuration des eaux d'une agglomération urbaine importante comporte une chaîne de traitement dont la complexité dépend des degrés d'épuration jugés nécessaires, cette chaîne comprend. [5]

- Traitement préliminaire (prétraitement)
- Traitement primaire
- Traitement secondaire

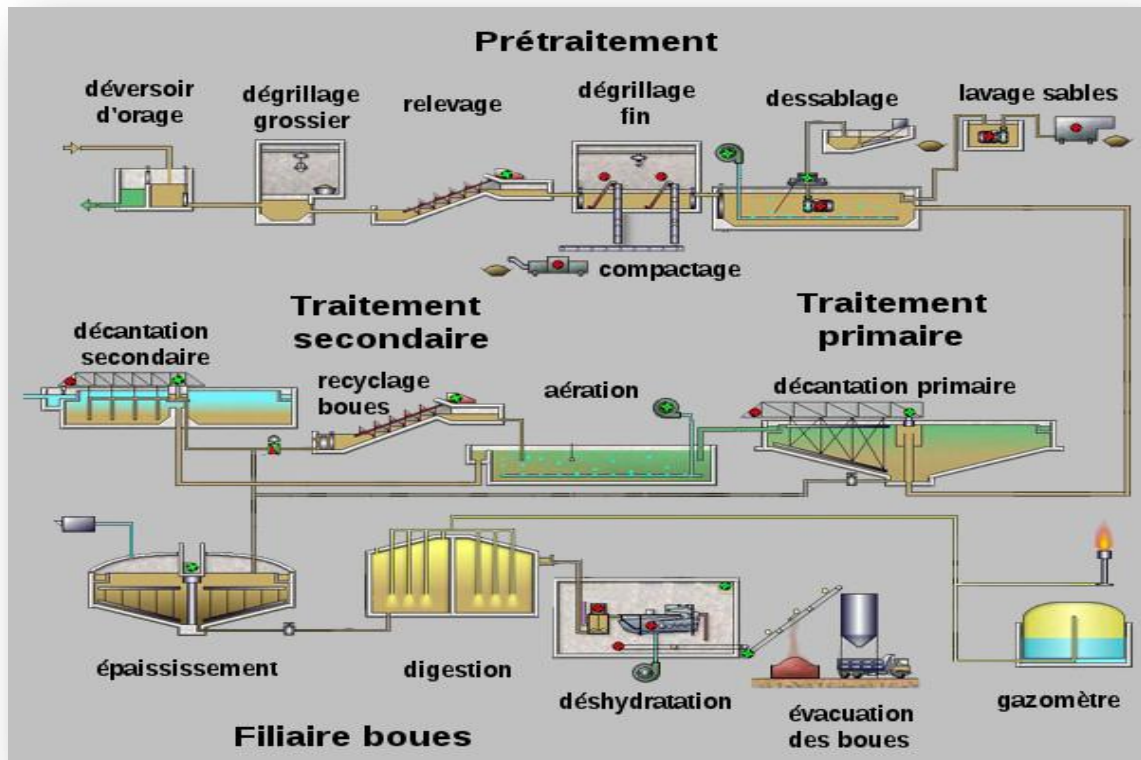


Figure I.1 « Schéma des différentes étapes d'épuration des eaux résiduaires » [5]

#### I.4.1- Traitement préliminaire (prétraitement)

Les eaux brutes subissent à l'arrivée dans une station d'épuration un certain nombre d'opération mécanique ou physique destinées à extraire le maximum d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour un traitement ultérieur. Ces opérations sont : le **dégrillage**, le **tamissage**, le **dessablage**, le **déshuilage** et **dégraissage**. [5]

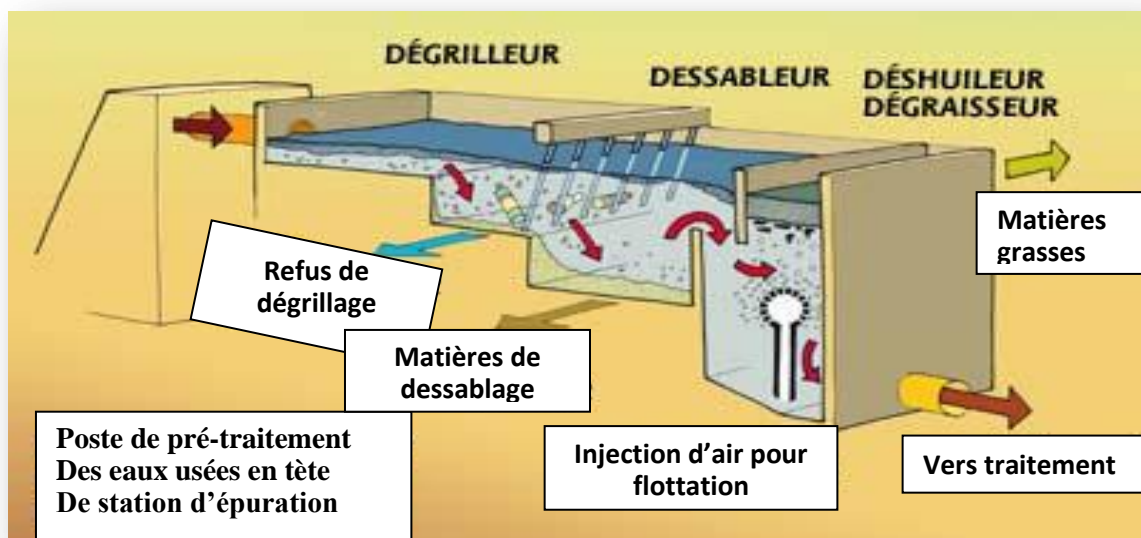


Figure I.2 Schéma d'un traitement préliminaire d'une station d'épuration [5]

### I.4.1.1- Dégrillage

Le dégrillage consiste à séparer les matières les plus volumineuses charriées par l'eau brute, on faisant passer l'effluent d'entrée à travers des barreaux dont l'écartement est bien calculé. L'efficacité du dégrillage est en fonction de l'écartement entre les barreaux de la grille ; on distingue :

- Pré dégrillage pour écartement 30 à 100mm
- Dégrillage moyen pour écartement 10 à 25 mm
- Dégrillage fin pour écartement 3 à 10 mm

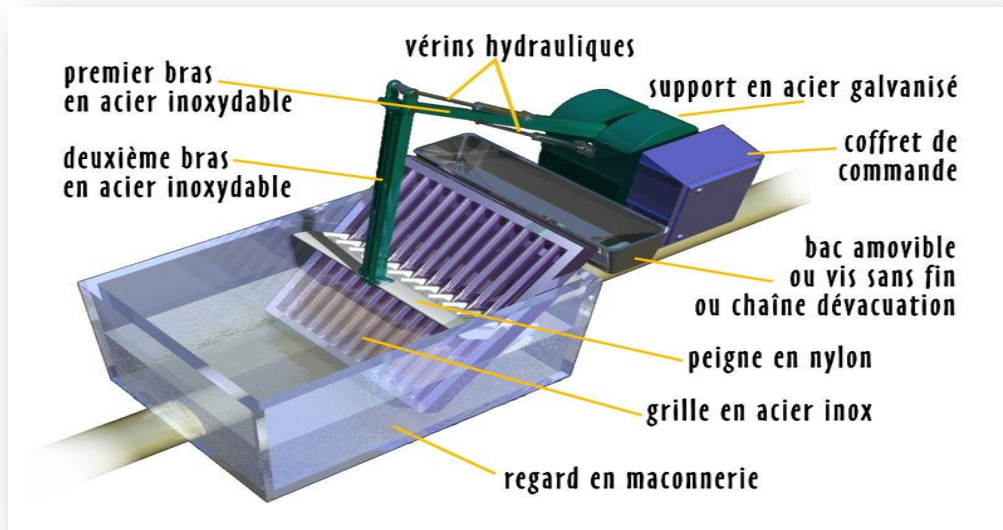


Figure I.3 Schéma d'un dégrilleur [3]

### I.4.1.2- Tamisage

Le tamisage est un dégrillage poussé utilisé dans les stations d'épuration industrielles. Il consiste en une filtration sur toile mettant en œuvre des mailles de différentes dimensions. Il existe un macro-tamisage (mailles > 0.3mm) et un tamisage (mailles < 100µm) [3].

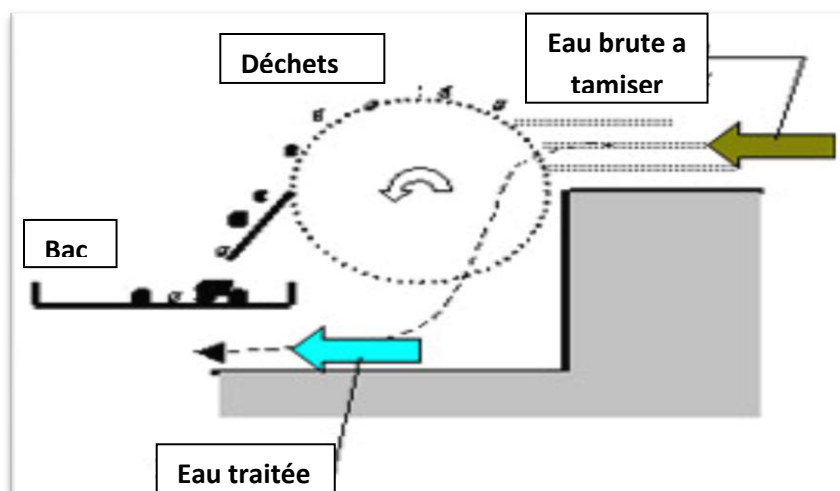


Figure I.4 Schéma d'un Tamisage [3]

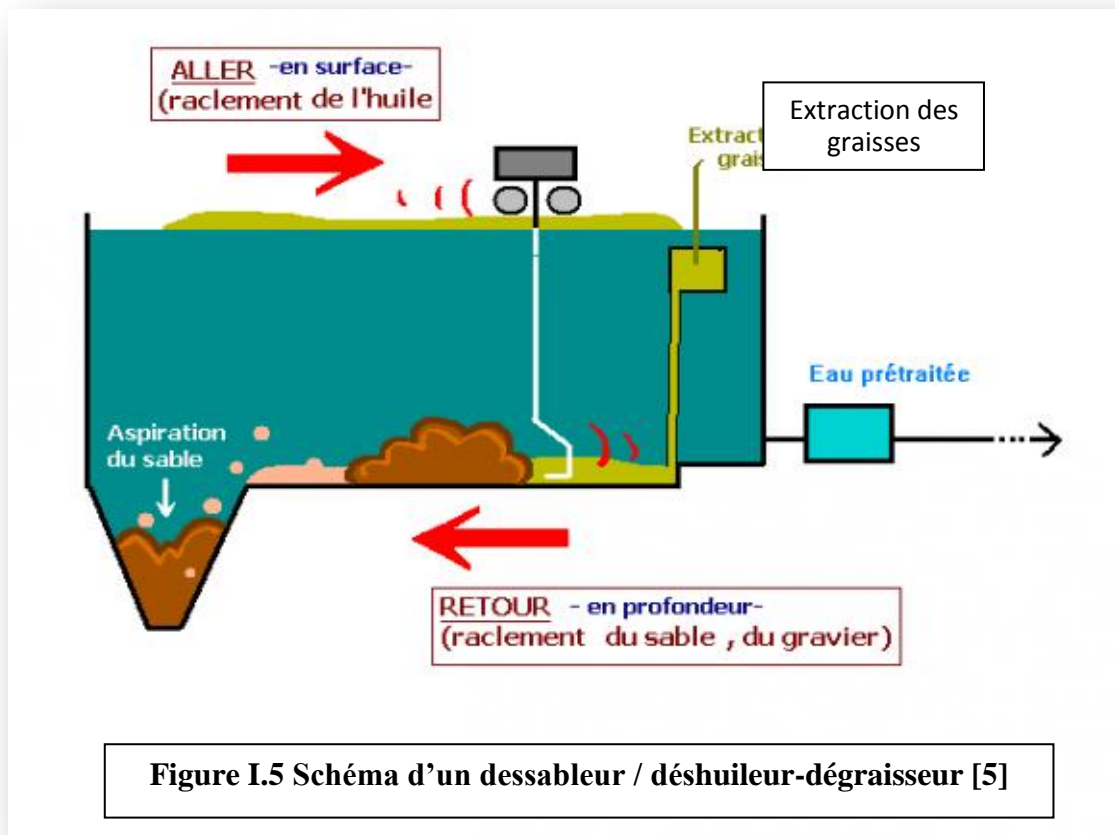
### I.4.1.3- Le dessablage

Le dessablage consiste à retirer de l'effluent les sables et les particules minérales plus ou moins fines, a fin de protéger les conduites et pompes contre la corrosion et éviter même le colmatage des canalisations par les dépôts à la cour de traitement, la technique classique du dessaleur consiste à faire circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation avec une vitesse d'environ de 0.3m/s qui permet le dépôt d'une grande partie des sables [5].

### I.4.1.4- Déshuilage- Dégraissage :

C'est un procédé destiné à éliminer les graisses et les huiles dans les eaux résiduaires. Les huiles et les graisses présentent plusieurs inconvénients pour le traitement tel que [5].

- Envahissement des décanteurs
- Mauvaise diffusion de l'oxygène dans les décanteurs
- Mauvaise sédimentation dans les décanteurs
- Risque de bouchage des canalisations et des pompes
- Diminution du rendement du traitement qui arrive après



## I.4.2- Traitement primaire :

Le traitement est un traitement physico-chimique qui consiste à éliminer [6] :

- Matière décantables par une simple décantation
- Turbidité qui est traité par la coagulation-floculation
- Certaines matières en solution par la précipitation chimique

### I.4.2.1- Décantation

La décantation se distingue du dessablement en ce sens qu'elle enlève toutes les matières en suspension, alors que le dessablement arrête seulement le sable et les autres matières (plus lourd que les matières organiques).

Dans les décanteurs, les eaux résiduaires circulent à une vitesse réduite à un point tel que les matières décantables peuvent se rassembler au fond sous forme de boues. Le mécanisme de sédimentation est du type partiellement floculé, c'est-à-dire que la vitesse d'une particule va en croissant, par suit de son agglomération avec des particules voisines. La vitesse de sédimentation n'est plus calculable, mais se détermine par des essais.

Il existe de nombreux types de décanteurs qui se distinguent, d'une part d'après le sens d'écoulement des eaux, et d'autre part d'après les dispositions adoptées pour l'évacuation des boues [6].

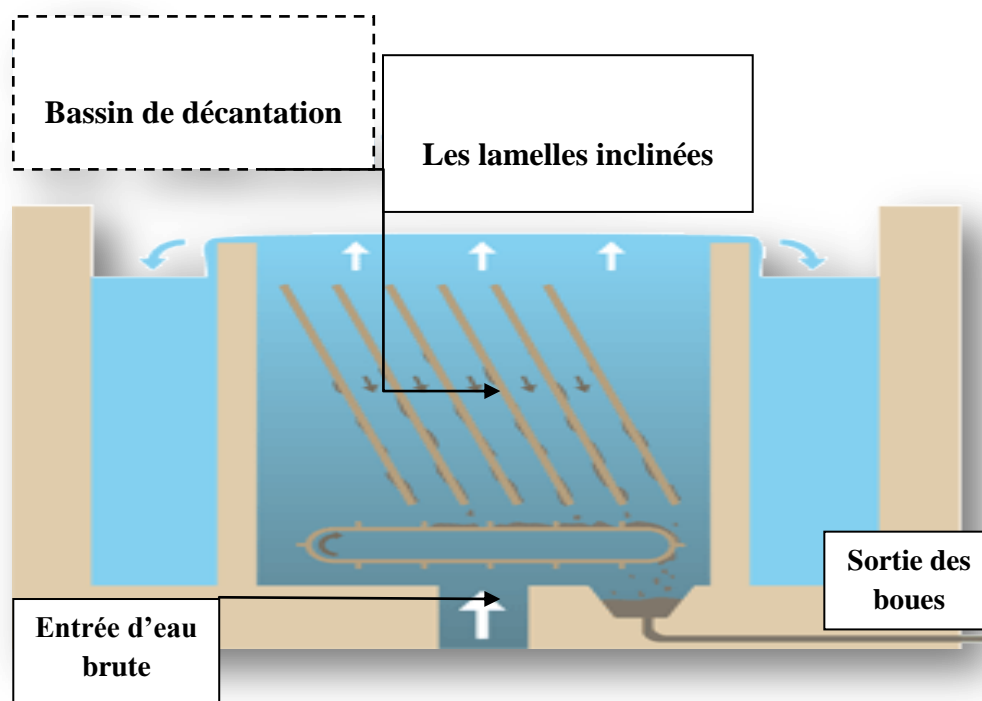


Figure I.6 Schéma d'un décanteur [5]

Les boues primaires soutirées en pied de décanteur sont composées à la fois de matières minérales et organiques. Dans certains cas, un traitement de coagulation-floculation est effectué pour améliorer la décantation. On parle alors de boues primaires physico-chimiques.

#### **I.4.2.2- La coagulation- floculation :**

Les processus de coagulation et floculation sont employés pour séparer les solides en suspension de l'eau lorsque la vitesse de décantation naturelle est trop lente pour obtenir une clarification efficace [7]. Et utilisé pour le traitement de potabilisation ou le traitement d'[eau usée](#).

##### **➤ Les particules colloïdales**

Les particules colloïdales sont caractérisées par deux points essentiels : d'une part, elles ont un diamètre très faible (de 1 nm à 1 µm) - d'autre part, elles ont la particularité d'être chargées électro-négativement, engendrant des forces de répulsions inter-colloïdales. Ces deux points confèrent aux colloïdes une vitesse de sédimentation extrêmement faible (que l'on peut même considérer comme nulle dans le cadre du traitement de l'eau).

La coagulation-floculation est un procédé permettant, en deux temps, de s'affranchir de cette absence de sédimentation. Cette technique permet de s'attaquer aux deux caractéristiques - mentionnées précédemment - rendant impossible une élimination naturelle des particules colloïdales. [7]

**I.4.2.2.1- Coagulation :** Dans un premier temps, *la coagulation*, par un ajout de [sels](#) métalliques (généralement de fer ou d'aluminium), permet de supprimer les répulsions inter-colloïdales : les [cations](#) métalliques ( $Al^{3+}$  et  $Fe^{3+}$ ) se lient aux colloïdes et les neutralisent. Les particules colloïdales peuvent désormais se rencontrer.

Elle a pour but la déstabilisation des colloïdes et l'agglomération des particules fines en suspension. Elle agit également par adsorption sur les substances et les grosses molécules organique hydrophiles en suspension stable. [7]

Elle est utilisée pour la clarification, la décoloration, l'agglomération des précipités résultant d'un adoucissement calcosodique, l'amélioration de goûts et odeurs.

Les coagulants utilisés pour le traitement des eaux destinées à l'alimentation doivent :

- ✓ Etre peu couteux
- ✓ Etre totalement inoffensif par eux-mêmes et par les produits qu'ils forment
- ✓ Pouvoir être mis en œuvre aisément
- ✓ Avoir être dispersés sans difficultés
- ✓ Avoir un pouvoir floculant vis-à-vis des colloïdes hydrophiles

**I.4.2.2.2- Flocculation :** Dans un second temps, *la flocculation* permet de s'attaquer au problème du faible diamètre des colloïdes. Le véritable souci est en fait la masse, qui ne permet pas une sédimentation naturelle et exploitable dans le cadre d'un traitement.

La solution exploitée par la flocculation est de provoquer, grâce à l'ajout de [floculant](#), une agglomération des particules colloïdales. Par la suite, cet agglomérat de colloïdes appelé *floc* dispose d'une masse suffisante pour pouvoir se décantier. Le floculant ajouté est généralement un [polymère](#), qu'il soit organique ou naturel, qui va jouer le rôle de colle entre les colloïdes.

La flocculation a pour but d'accroître par agglomération, le volume, le poids et la cohésion de l'agglomération formée des floes [7]. Le grossissement des floes est favorisé par l'emploi de certains produits flocculant (les adjuvants). On peut distinguer les flocculants par :

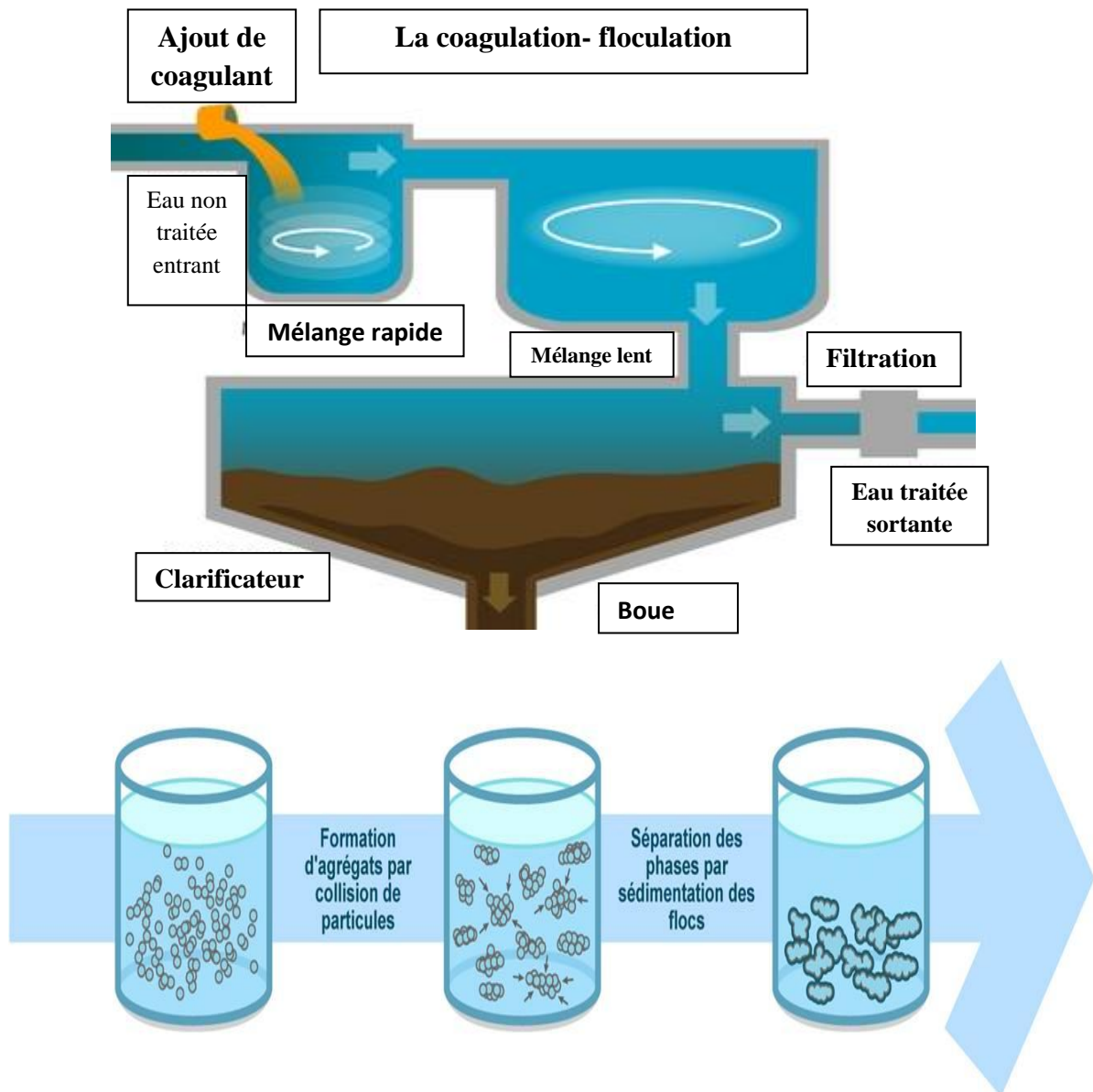
- ✓ Leur nature (minérale ou organique)
- ✓ Leur origine (synthétique ou minérale)
- ✓ Leur charge électrique (anionique, cationique, non ionique)

Les flocculants les plus couramment utilisés sont :

- ✓ Silice activée
- ✓ Polyamide
- ✓ Agrile
- ✓ Charbon actif
- ✓ Sable fin

Pour obtenir une bonne flocculation, il est nécessaire de créer une agitation. Ce type de traitement primaire n'est pas généralisé à toutes les **STEP** mais la coagulation - flocculation, suivie d'une décantation permet d'éliminer jusqu'à 90% de **MES** et de 40 à 65% de la **DBO<sub>5</sub>** des effluents résiduels urbains.





**Figure I.7 Schéma d'un procédé de coagulation- floculation [7]**

### **I.4.3- Traitement secondaire :**

Le traitement secondaire est un traitement purement biologique des eaux usées et a pour objet de réduire la teneur en matière organique présentes dans ces eaux et leur dégradation biologique par les micro-organiques [8].

Parmi les divers micro-organismes responsables de la dégradation on trouve les bactéries aérobies et les bactéries anaérobies.

Cependant la vitesse de la dégradation des matières organiques est plus élevée au milieu aérobie, pour ce fait, les installations d'épuration biologique fonctionnent généralement en présence d'oxygène, parmi les procédés biologique d'épuration des eaux usées, dans ce chapitres en utilise le technique intensives classique.



### ➤ **technique intensives classiques**

Les techniques les plus développées au niveau des stations d'épuration urbaines sont des procédés biologiques intensifs. Le principe de ces procédés est de localiser sur des surfaces réduites et d'intensifier les phénomènes de transformation et destruction des matières organiques que l'on peut observer dans le milieu naturel [8].

Trois grands types de procédés sont utilisés

- Lits bactériens
- Disques biologiques
- Boues activées

#### **I.4.3.1- Lit bactériens « filtre bactérien » :**

Les processus des lits bactériens sont une technique de traitement qui s'inspire de la filtration par le sol.

Le principe des lits bactériens consiste à faire ruisseler l'eau à traiter préalablement décantée sur une masse de matériaux poreux (filtrant) qui sert de support aux micro-organismes (bactéries).

Les lits bactériens sont généralement réalisés en forme circulaire, en se basant sur trois paramètres suivants [8] :

- Choix des matériaux
- Répartition de l'effluent
- Utilisation de recyclage

Pour un bon rendement, une aération apporte l'oxygène nécessaire aux micro-organismes qui se développent sous forme d'un film biologique en surface de matériaux.

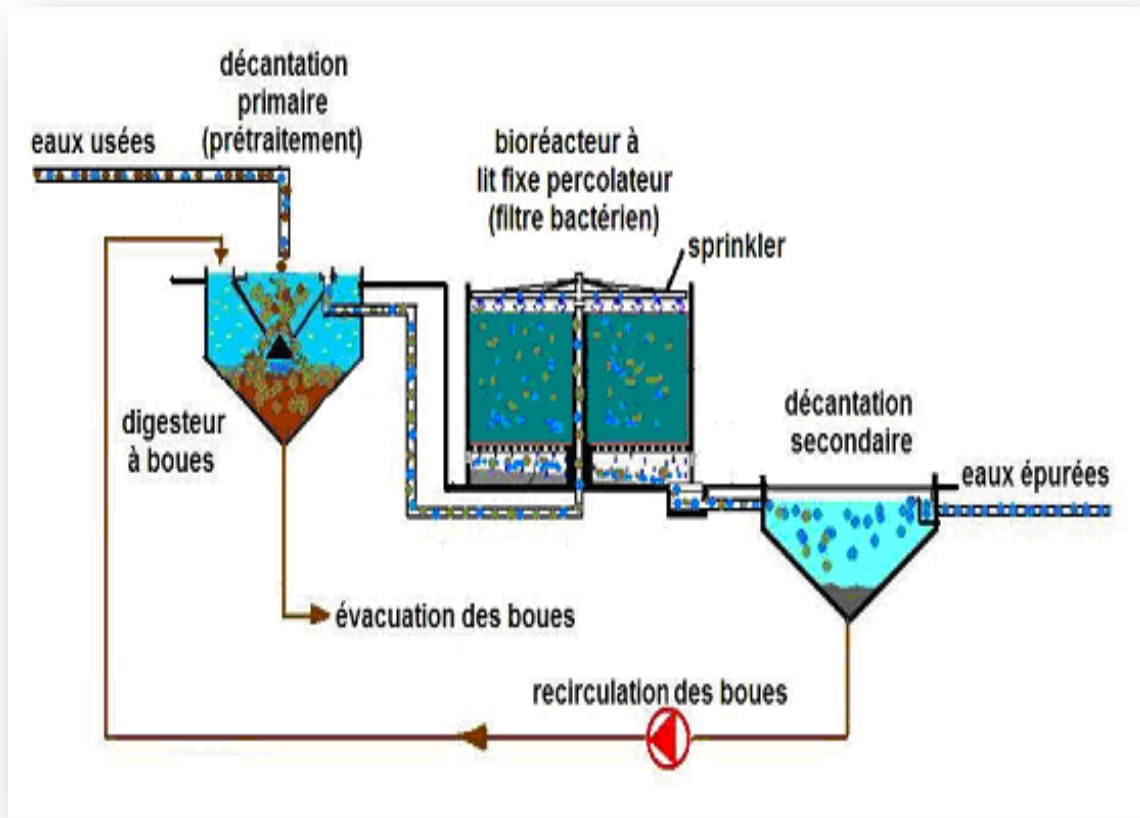


Figure I.8 Schéma d'un Procédé Lit bactérien [8]

#### I.4.3.2- Disques biologiques :

Le dispositif est constitué d'un ensemble de disques en matière plastique, parallèles et régulièrement espacés par un axe commun. Pour constituer un tambour. Les disques sont immergés à 40% approximativement dans un bassin recevant l'eau à traiter.

L'écartement entre les disques qui sont environ 2 cm qui permet la circulation de l'eau. La rotation des disques permet le contact du film biologique qui les recouvre avec l'eau usées et l'air, c'est presque le même système que le lit bactérien traditionnel [8].

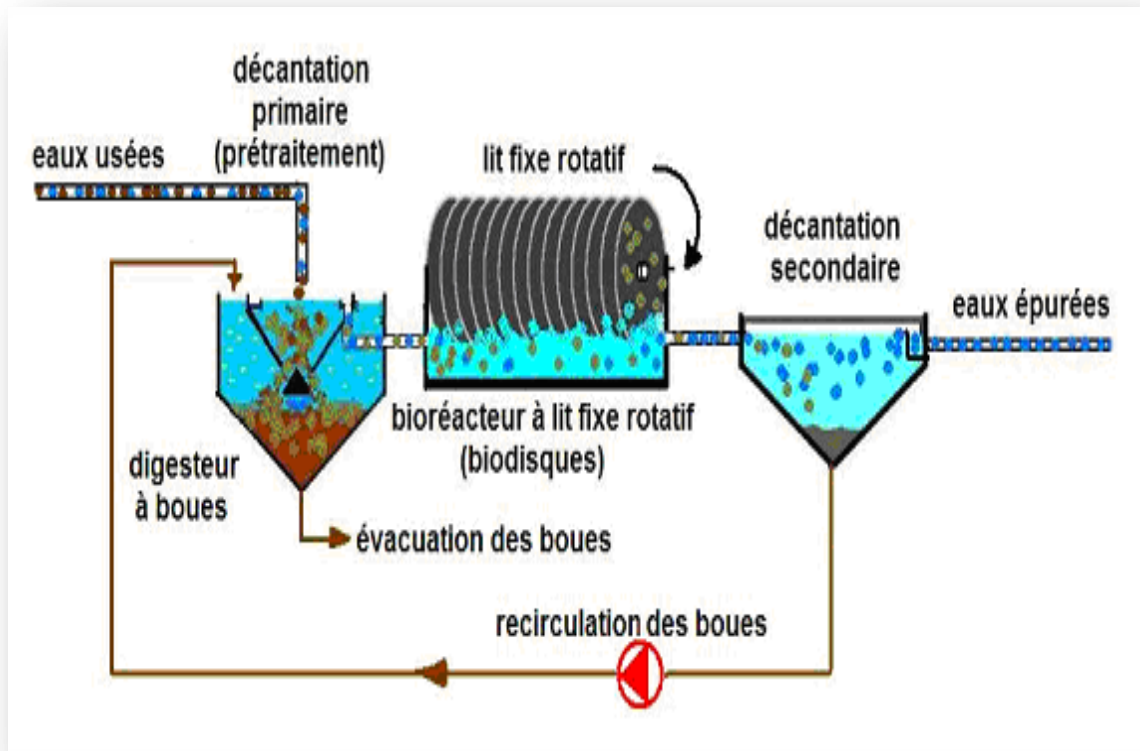


Figure I.9 Schéma d'un procédé Disques biologiques [8]

#### I.4.3.3- Boues activées :

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

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

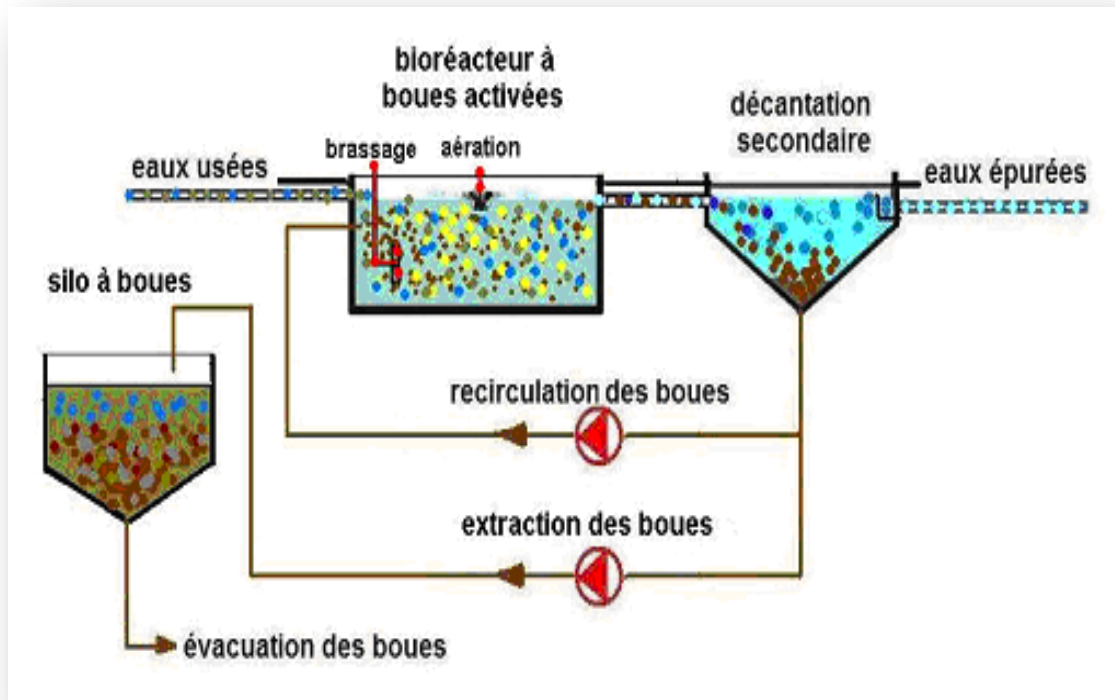


Figure I.10 Schéma d'un procédé boues activées [8]

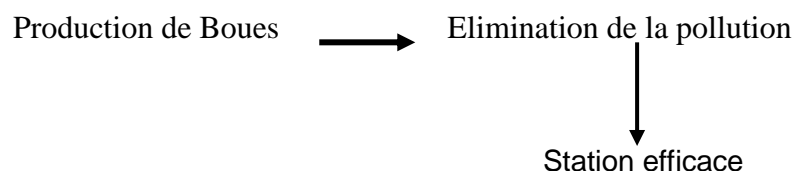
#### + Le traitement tertiaire

a pour but d'affiner l'épuration selon les qualités exigées pour l'eau rejetée. Les traitements tertiaires les plus courants sont la dé-phosphatation et la désinfection. Dans le cas de la dé-phosphatation tertiaire, il s'agit d'un traitement physico-chimique qui produit des boues dites tertiaires. [9]

#### I.5- Gestion des boues :

L'élimination des pollutions apportées par les eaux usées laisse au passage des résidus.

S'il y'a élimination, il y'a donc production de ces résidus constitués essentiellement de Boues. Donc :



**Une station qui produit des boues est une station  
qui élimine la pollution des eaux**

Ces boues constituent une pollution formée de matières en suspension, matières organiques, azote, phosphore... d'où la nécessité de leur gestion.

Si on n'extrait pas les boues des ouvrages d'épuration : Décanteurs, bassins d'aération, clarificateur, on aura une forte accumulation qui perturbera le fonctionnement de ces ouvrages. [5]

**Il faut évacuer les boues régulièrement  
des ouvrages d'épuration**

La gestion des boues consiste en fin de compte à apporter des réponses aux questions suivantes :

**Quand évacuer ?  
Quelles quantités évacuer et sous quelles formes ?**

#### **I.6- Problématique des boues résiduelles :**

##### **I.6.1- Origine et caractéristique des boues :**

Une boue est une suspension dans l'eau, de matières solides, individualisées ou colloïdales.

Les boues fraîches présentent un aspect liquide, elles peuvent contenir jusqu'à 95% d'eau sous forme de :

- Eau libre séparable par décantation (plus ou moins 70%)
- Eau d'hydratation colloïdale séparable par filtration sous pression réduite.(plus ou moins 20%)
- Eau capillaire séparable par filtration sous pression élevée (filtre presse).(plus ou moins 20%)
- Eau cellulaire inséparable mécaniquement, séparable par traitement thermique (plus ou moins 10%) .

Les boues peuvent être toxiques car elles renferment souvent des matières polluantes, nocives ou génératrices de toxicité :

- matières fermentescibles : composés organiques biodégradables.
- Matières nauséabondes : dérivés organiques soufrés ou ammoniacés
- Matières toxiques / métaux lourds, produits chimiques issus de laboratoires ou d'ateliers urbains.
- Savons et détergents.
- Germes pathogènes : parasites, virus, champignons. [9]

### I.6.2- Origine :

- **Boues primaires :**

Ce sont des Boues obtenues par simple décantation primaire des eaux usées. Elles sont constituées de matières minérales (sable, terre...) et de matières organiques qui peuvent évoluer. Ce sont des boues présentant des concentrations élevées.

- **Boues biologiques ou secondaires :**

Ce sont les boues issues du traitement biologique. Elles sont essentiellement constituées de bactéries et sont très organiques et peu concentrées.

Nous distinguons :

- les boues mixtes : c'est le mélange des boues biologiques et des boues primaires. Elles existent au niveau des STEP dotées d'une filière de traitement complète.
- les boues d'aération prolongée : ces boues existent au niveau des Step sans décantation primaire.

Elles sont moins organiques et donc produisent moins de nuisances ultérieures. [9]

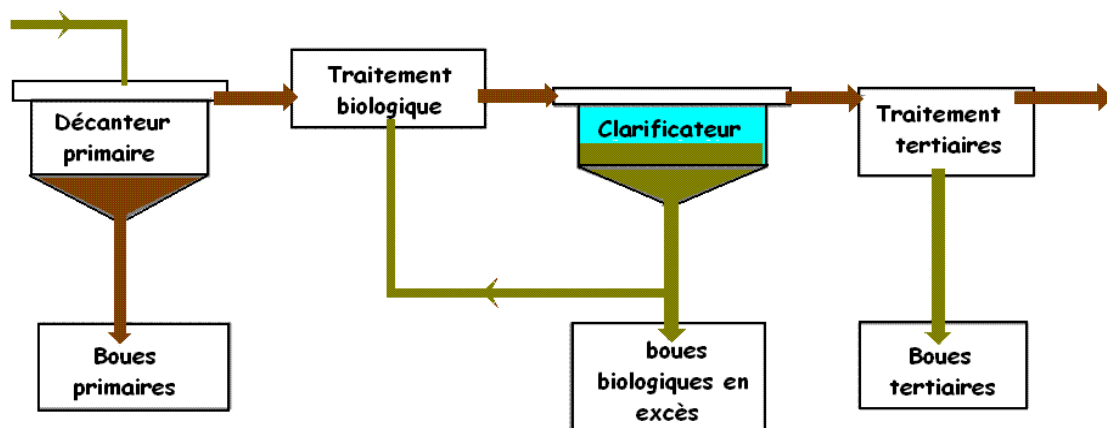


Figure I.11 Schéma des différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées [9]

### I.6.3- Caractéristique :

#### I.6.3.1- Siccité d'une boue :

La boue est constituée d'eau et de matières sèches (MS).

Le pourcentage en eau représente l'humidité.

Le pourcentage en matières sèches représente la **Siccité**.

$$\text{BOUES} = \text{EAU} + \text{MATIERES SECHES}$$

(Equation I.1)

$$100\% = \text{HUMIDITE} (\%) + \text{SICCITE} (\%)$$

#### Exemple :

Une boue à 20% de Siccité présente une humidité de 80%.

#### I.6.3.2- Concentration en Matières Sèches (M.S) :

Soit une boue à 20 g/l de M.S (c'est la concentration).

On suppose, en général que 1 litre de boue pèse approximativement 1 Kg (1 000 grammes).

Donc, 20 g de M.S sont contenus dans 1 litre de boue c'est-à-dire dans 1 000 g de boue.

En % on aura :

$$\frac{20 \text{ g de M.S}}{1000 \text{ g de boue}} = 2\%$$

(Opération I.1)

En résumé, 20 g/l de M.S correspondent à 2 % de Siccité

#### I.6.3.3- La Teneur en Matières Volatiles en Suspension : (M.V.S)

Les matières sèches englobent des matières minérales (M.Min) et de matières organiques appelées aussi Matières Volatiles Sèches (MVS).

$$\text{MS} = \text{MVS} + \text{M.Min}$$

Equation ( I.2)

Généralement, on exprime la concentration des MVS en pourcentage par rapport aux MS , dans ce cas on parle de Taux de MVS.

Ce paramètre nous renseigne sur le degré de stabilité de la boue. [8]

#### I.6.4- Notion de Stabilité d'une boue :

Une boue est dite stable lorsqu'elle est débarrassée de ses matières organiques (MVS). Donc, plus une boue est stable, moins elle contient de matières organiques.

En général, une boue issue du traitement primaire ou secondaire présente environ un taux de MVS entre 70% et 75%.

Les procédés de stabilisation assurent un abattement maximum de 45% du taux de MVS et produisent ainsi une boue dite « stable ». [7]

**Tableau I.1 Etat physique des boues [5]**

<b>ETAT</b>	<b>SICCITE (%)</b>
<b>Liquide</b>	≤ 10%
<b>Pâteux</b>	12% à 25%
<b>Solide</b>	25% à 85%
<b>Sec</b>	> 85%

Valeurs de quelques STEP : Mois de Février 2012

**Tableau I.2 Valeurs de production des boues de quelques STEP en Algérie [3]**

<b>STEP</b>	<b>BOUE</b>	<b>SICCITE (%)</b>	<b>TAUX DE MVS (%)</b>
<b>Tizi ouzou (boues séchées)</b>	Moyenne charge	46	Pas de hote
<b>Hadjout (boues déshydratées)</b>	Faible charge	21	Pas de hote
<b>Sétif(boues séchées)</b>	Moyenne charge	70	59 (Boues épaissies)
<b>B.B.A(boues séchées)</b>	Faible charge	66	65(Boues épaissies)
<b>Tlemcen (boues séchées)</b>	Faible charge	45	62 (Boues épaissies)



## **I.7- Quantité de boues produites :**

### **I.7.1- Evaluation :**

On estime généralement la production de boues en excès sur une STEP à :

40 g/j/habitant raccordé.(source CEMAGREF-SATESE [ 5 ]).

Néanmoins, cette estimation peut être corrigée en fonction des données locales de la STEP :

- Composition des eaux usées (s'il y'a des apports d'eaux usées Industrielles ou de matières de vidange).
- L'efficacité du réseau d'assainissement (Taux de raccordement, fuites sur réseau et infiltration d'eaux parasites).
- Efficacité de fonctionnement de la STEP (pertes de boues, ajout de réactifs par exemple).

### **I.7.2- Extraction:**

L'extraction des boues se fait généralement par pompage de boues liquides (parfois gravitairement).

La relation Masse/Volume nous permet de déterminer le volume de boues à extraire.

Nous savons que :

$$\text{Concentration de la boue (kg de MS/m}^3\text{)} = \frac{\text{Masse de la boue produite (Kg de Ms)}}{\text{Volume de la boue (m}^3\text{)}}$$

Equation I.3

Donc le volume de la boue à extraire :

$$\text{Volume} = \frac{\text{Masse de la boue produite}}{\text{Concentration de la boue}}$$

Equation I.4

Plus ces boues sont concentrées, plus le volume à extraire est faible.

Moins ces boues sont concentrées, plus le volume à extraire est important. [10]

## **I.8- Filières de traitement :**

Le choix de la filière de traitement des boues dépend de leur origine et de leur destination finale.

Le traitement vise deux principaux objectifs :

- Réduction du volume.(épaississement, déshydratation)
- Réduction du pouvoir fermentescible.(stabilisation)

Les filières de traitement différent mais l'objectif reste le même.

Les procédés de traitement de boues qui peuvent exister au sein d'une STEP :

- Épaississement (raclé et non raclé).
- Digestion ou stabilisation (aérobie, anaérobie et chimique).
- Déshydratation (filtre à bandes, filtre presse, centrifugeuse, lit de séchage)
- Séchage thermique
- Incinération.

### **I.8.1- les phases de traitement :**

#### **I.8.1.1- L'épaississement :**

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

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

##### **I.8.1.1.1- Epaississement par décantation ou épaississement statique**

L'épaississement se fait par décantation en piston des boues. La décantation est aidée par une herse à mouvement lent qui, en faisant rouler les particules de boues les unes sur les autres, favorise l'écoulement de l'eau interstitielle et l'évacuation des gaz occlus. Le tassement des boues est donc ainsi favorisé. [10]

##### **I.8.1.1.2- Epaississement dynamique**

###### **I.8.1.1.2.1- Epaississement par flottation**

Le principe consiste à réduire la masse volumique apparente de la phase solide par adsorption ou absorption de bulles gazeuses pour en provoquer l'entraînement vers la surface avec une vitesse ascensionnelle qui, en modèle laminaire, sera donnée par la loi de Stokes. [10]

#### **I.8.1.1.2.2- Epaissement par égouttage**

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

La concentration des boues augmente progressivement en avançant sur le champ de grille, le réglage est optimal lorsque la boue ne contient plus d'eau libre en fin de parcours.

Le débit de la pompe à boue, de l'injection du polymère ainsi que la vitesse de raclage sont réglables. Le lavage de la grille est réalisé de façon cyclique au moyen de pulvérisation d'eau sous pression.

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

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

- **Les silos** ont pour unique fonction de stocker les boues sans évacuation de l'eau.

Dans la pratique et pour des raisons souvent fondées relatives aux difficultés rencontrées dans l'élimination des boues, l'exploitant cherche à optimiser sa durée de stockage en évacuant régulièrement l'eau surnageant, et augmente ainsi très fortement les risques de dysfonctionnements biologiques. [11]

#### **I.8.1.1.2.3- Epaissement par centrifugation**

L'épaissement par centrifugation présente les inconvénients d'être lourds en investissement et en coût d'exploitation (consommation d'énergie 150 à 300 kWh/tonne de MES. Par contre, il a l'avantage de n'occasionner que peu de nuisances olfactives (car l'appareil est fermé) et d'être très compact. L'épaissement obtenu est plus important que par flottation. Par ailleurs, sous peine d'avoir des rendements de capture et des débits alimentaires possibles faibles, l'emploi d'un polymère (1 à 2 kg/t MES) est indispensable.

Nous risquons aussi en cas de fonctionnement sans polymère d'avoir une classification des boues avec départ de fines. La centrifugation consiste en une décantation accélérée par force centrifuge.

Généralement, le procédé utilisé est l'épaississement gravitaire, il est :

- Statique pour les petites stations.
- Raclé et hersé pour les moyennes et grosses stations.

L'épaississeur ne doit pas être utilisé comme un stockeur, si les boues séjournent trop longtemps (plus de 48 heures), surtout en été, elles fermentent et les conséquences sont :

- Ces boues deviennent hétérogènes, malodorantes et peu concentrées
- Impact négatif sur la déshydratation qui devient difficile
- La surverse devient chargée et perturbe le traitement biologique. [11]

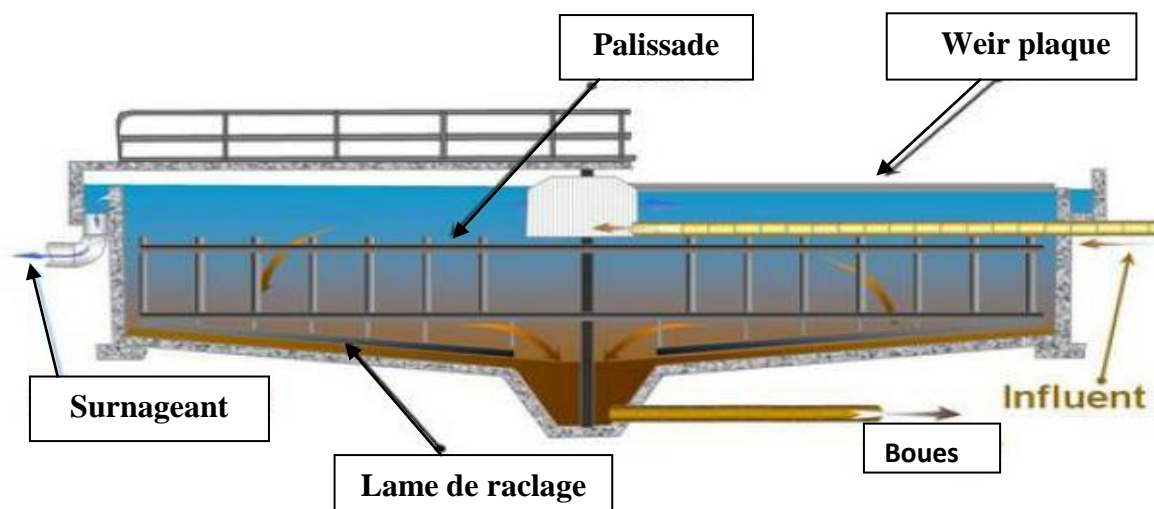


Figure I.12 Schéma d'un épaisseur circulaire [10]

### I.8.1.2- LA STABILISATION :

La stabilisation des boues est la réduction des matières organiques, On distingue les stabilisations biologique, chimique et thermique. La stabilisation biologique peut être atteinte par méthanisation (digestion anaérobie mésophile), et stabilisation aérobie thermophile.

Le traitement chimique peut s'effectuer par un chaulage ou une stabilisation aux nitrites. Le séchage (siccité supérieure à 90%) quant à lui constitue une forme de stabilisation thermique.

Elle peut se faire :

- En présence d'air : c'est la digestion aérobie.
- En absence d'air : c'est la digestion anaérobie.
- Par adjonction de chaux : c'est la stabilisation chimique. [11]

### **I.8.1.2.1.- La stabilisation aérobie thermique**

C'est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie avec dégagement de chaleur et production de CO<sub>2</sub>. Pour être optimale, la réaction doit se dérouler à une température comprise entre 50 et 55°C.

Les applications actuelles de ce procédé visent deux objectifs différents :

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

### **I.8.1.2.2- La stabilisation aérobie**

- Respiration des micro-organismes dans un bassin de stabilisation (identique au bassin d'aération).
- Oxygénation par aération de surface ou insufflation d'air.
- Maintien d'une concentration en oxygène dissous d'au moins 2 mg/l.
- Concentration des boues de l'ordre de 15 à 20 g/l.
- Efficacité aléatoire en période hivernale (temps de séjour de 15 à 20j Insuffisant).

### **I.8.1.2.3- La stabilisation anaérobie : (ou digestion anaérobie)**

- Elle permet l'obtention d'une fermentation bactérienne complète de manière contrôlée dans un ouvrage appelé **Digesteur**.

Les bactéries dégradent la matière organique en dioxyde de carbone et en méthane

- La fermentation s'effectue en deux phases principales :
  - Acidification ou fermentation acide.
  - Méthanisation ou fermentation méthanique.
- Ce procédé permet une réduction du taux de la matière organique jusqu'à 45%.
- Et, aussi une réduction de la masse totale de boue de 15 à 30%.
- minéralisation de l'azote organique : eau interstitielle riche en NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (1 à 2 g/l)
- boue plus homogène (disparition de corps fibreux) et plus diluée.

#### I.8.1.2.4- La stabilisation chimique

- La stabilisation se fait par ajout de la chaux à la boue.
- Une stabilisation chimique efficace passe par un mélange intime de la chaux et des boues (Malaxeur).

➤ Avant déshydratation :

La chaux est utilisée sous forme de lait de chaux préparé à partir de la chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) à une concentration entre 50 et 100 g/l.

➤ Après déshydratation :

La chaux est utilisée sous forme de poudre (pulvérulente) à partir de chaux éteinte ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ou chaux vive  $\text{CaO}$ .

➤ Effets :

Les boues, ayant subies une stabilisation chimique, sont assez favorables en déshydratation, mais souvent difficiles à flocculer à cause des pH élevés (plus de 12).

En milieu basique la fermentation est bloquée. [9]

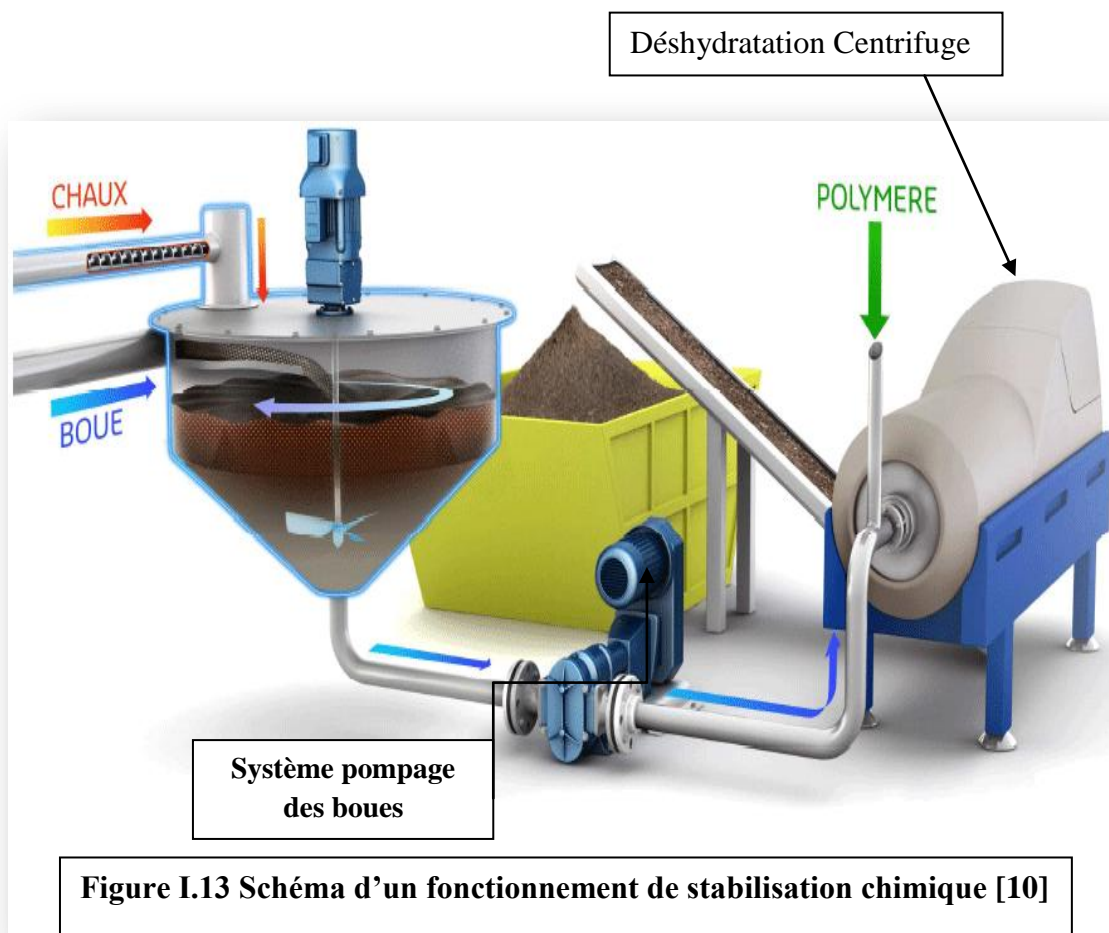


Figure I.13 Schéma d'un fonctionnement de stabilisation chimique [10]

## **I.9- Technique de Séchage des boues :**

### **I.9.1- Déshydratation des boues**

#### **I.9.1.1- Déshydratation mécanique et naturelle :**

La déshydratation est une étape du traitement des boues faisant passer les boues de l'état liquide à un état physique.

Les boues en entrée sont à l'état liquide, ce qui signifie qu'elles peuvent être prises soit en sortie de décanteurs, soit après une première étape d'épaississement (cas le plus fréquent). Les critères de choix d'une technologie sont liés aux objectifs de traitement, à la valorisation des boues, au terrain, à l'environnement, aux contraintes de coûts, de main d'œuvre. [10]

#### **But :**

- Réduction de la teneur en eau de la boue (humidité inférieure à 88% ce qui correspond à des siccités supérieures à 12%).
- L'aspect de la boue obtenue diffère ; il est pâteux, solide ou sec.

#### **I.9.1.2- Procédés de Déshydratation :**

Il existe plusieurs procédés de déshydratation qui sont choisis selon le contexte local et l'objectif à atteindre :

- Système drainant : c'est un égouttage à travers un système filtrant.
  - Filtre-presse
  - Filtre à bandes
- } filtration sous pression
- Centrifugation : c'est une décantation accélérée.
  - Lit de séchage : c'est une filtration et évaporation naturelle.
  - Déshydratation thermique

Nous ne verrons que les procédés existants au niveau des installations gérées par l'ONA c'est-à-dire : lits de séchage, filtres à bandes et filtres-presses.

Ces deux derniers procédés nécessitent un conditionnement préalable de la boue (c'est-à-dire la rendre apte à la déshydratation) ; ce sera un conditionnement réalisé par l'ajout d'un réactif chimique :

- C'est de la chaux et du chlorure ferrique pour les Filtres-presses.
- C'est du poly-électrolyte pour les filtres à bandes. [10]

### **I.9.1.2.1- Conditionnement par ajout de réactifs minéraux :**

C'est le conditionnement adapté à la déshydratation sur filtres presses, appareils mettant en œuvre une filtration à travers un gâteau en formation avec un support filtrant à mailles fines (100 à 200  $\mu\text{m}$ ). Ce conditionnement nécessite l'emploi de réactifs minéraux conduisant à la formation de floccs fins, mais mécaniquement stables.

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

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

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

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

### **I.9.1.2.2- Conditionnement aux poly-électrolytes**

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

Les poly-électrolytes ont pour effet :

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

Un grand nombre de poly-électrolytes est à disposition. Il faut donc effectuer des tests simples de floculation pour déterminer le produit le mieux adapté à la boue à traiter. Les polymères cationiques sont surtout efficaces pour le conditionnement des boues organiques, les anioniques pour les boues d'eau potable [7].



### **I.9.1.3.Le Filtre à Bandes :**

Pour rendre la boue apte à la déshydratation, la boue est mélangée à un polymère (poly électrolyte) dans un flocculateur : on obtient un foc bien résistant.

La boue ainsi flocculée passe par différentes phases :

- Egouttage
- Compression (inférieure à 2 bars)
- Cisaillement
- Pressage (parfois) pression 10 bars.
- Décollement du gâteau des toiles.
- Lavage automatique des toiles (6 à 8 bars).

Pour une bonne efficacité du procédé, un bon centrage des toiles est nécessaire. Pour cela, un dispositif de recentrage de ces toiles est prévu en cas de « déraillement », assuré par :

- Détecteurs de déraillement.
- Des vérins (hydrauliques ou pneumatiques) de Recentrage.

#### ➤ **Exploitation :**

➤ Les réglages à suivre au niveau du procédé sont :

- Débit de la pompe à boues.
- Débit de la pompe doseuse.
- Débit de l'eau de dilution.
- Vitesse du flocculateur.
- Vitesse d'entraînement des toiles.
- La tension des toiles.
- La pression d'eau de lavage.

L'efficacité de la déshydratation dépend de la pression effective appliquée sur la boue et aussi du temps de pressage. On obtient une siccité de l'ordre de 14 –18 % (boues biologiques)



- La pression atteinte en fin de pressée
- Le degré d'encrassement des toiles.

#### I.9.1.4.1- Le filtre à plateaux

Le filtre à plateaux, encore appelé « filtre-pressé à plateaux », permet la déshydratation de tout type de boues (urbaines, d'eau potable, industrielles) préalablement épaissies. Il est à mettre en concurrence avec les autres techniques de déshydratation mécanique que sont le filtre à bandes et la décanteuse centrifuge.

En eaux usées, les filières de traitement d'eau actuellement mises en place le destinent surtout à la déshydratation des boues biologiques en eaux brutes (faibles charges et aération prolongée) ou aux boues digérées.

#### I.9.1.4.2- Filtres à plateaux membranes

C'est un perfectionnement du filtre-pressé. Il permet une mise en pression terminale (en fin de cycle) au moyen d'eau ou d'air sous pression injecté dans une poche en membrane caoutchoutée (élastomère) afin d'éviter l'effet négatif du débit de fuite sur les flocs en fin de montée en pression.

Cette disposition autorise un gain de siccité de l'ordre de 4 à 6 points par rapport au filtre plateaux conventionnel ou un accroissement de la productivité d'environ 40 % par raccourcissement du temps de filtration.

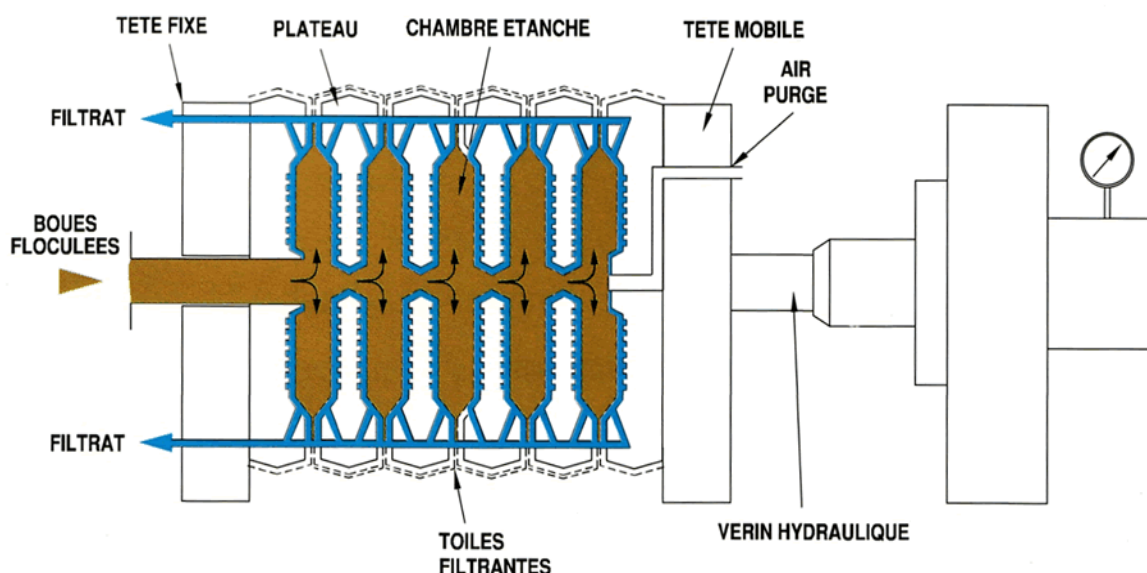


Figure I.15 Schéma d'un procédé de déshydratation par Filtre presse [7]

### I.9.1.5- Centrifugation :

La déshydratation des boues est basée sur la technologie de centrifugation. Une décanteuse utilise la force centrifuge pour accélérer la sédimentation des particules solides de la boue à séparer de l'eau.

Les boues à déshydrater sont pompées dans le bassin ou la lagune pour être injectées dans la centrifugeuse. Préalablement à leur injection, elles sont mélangées avec un polymère qui améliore l'efficacité de la déshydratation. L'eau (centrats) séparée de la fraction solide est évacuée gravitairement en tête de station ou dans une lagune. Les boues, sous forme pâteuse, sont évacuées au moyen de vis de reprise. [ 11 ]

#### I.9.1.5.1-Fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse

La boue à traiter est introduite, via un tube d'alimentation et un distributeur, dans un rotor constitué d'un bol et d'une vis convoyeuse. Le bol et la vis tournent à haute vitesse, la vis légèrement plus vite que le bol. La vis évacue le solide décanté vers l'extrémité conique du bol. Le liquide clarifié (centrat) est évacué à l'autre extrémité puis renvoyé en tête de station. La quantité d'eau de lavage utilisée se limite à un nettoyage en fin de période de centrifugation. [ 5 ]

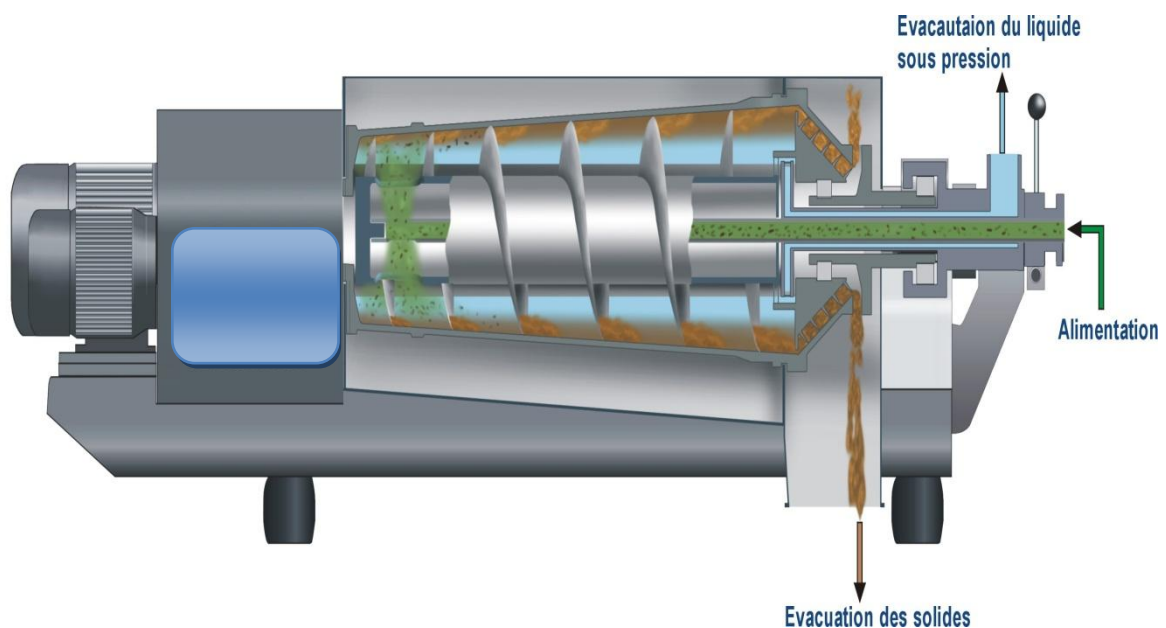


Figure I.16- Schéma de fonctionnement de la décanteuse centrifugeuse [11]

### I.9.1.6- Lits de séchage :

Le procédé ne nécessite pas un conditionnement chimique au préalable. C'est une filtration et évaporation naturelles de la boue sur une aire de séchage.

C'est une technique applicable à des boues d'aération prolongée ou digérées sa structure est de  $8 \times 20$  m environ : bicouche sable + gravillons. Au moins 4 cellules sont à prévoir afin de fonctionner en 2 phases de remplissage/séchage :

Le lit de séchage composée de :

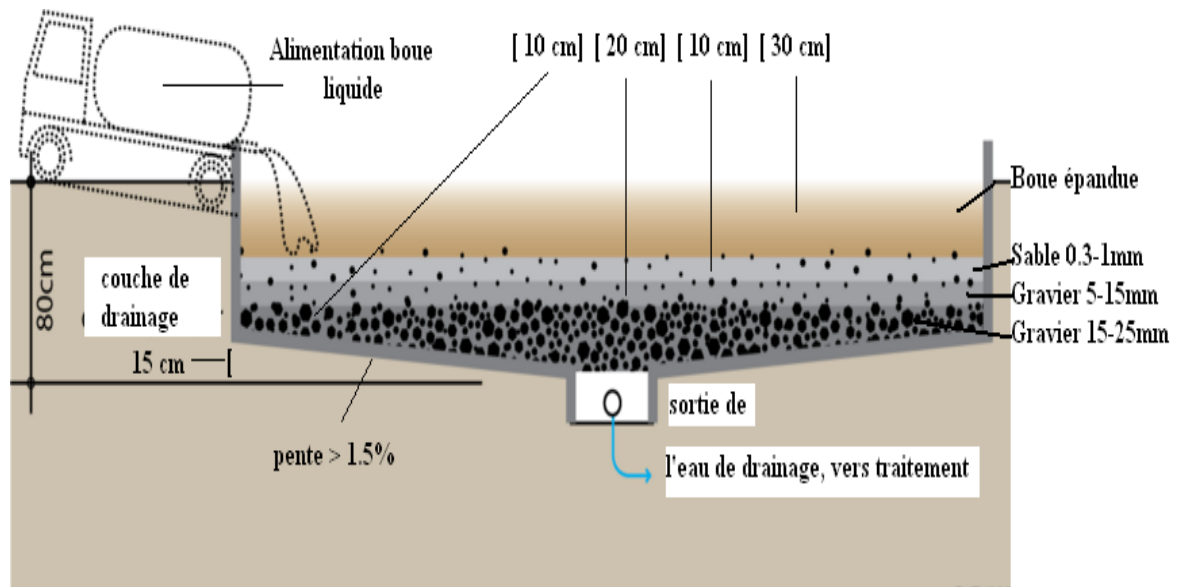


Figure I.17 Schéma d'un lit de séchage [12]

La figure donne un exemple d'implantation à ajuster en fonction des conditions géophysiques (résistance à l'écrasement des engins de manutention...).

Le dimensionnement doit prendre en compte : [12]

- le climat : le bilan hydrique, égal à la différence entre l'évaporation naturelle d'un plan d'eau

et les précipitations calculées sur l'année.

- la siccité des boues en entrée : plus celle-ci est élevée, meilleures sont les performances.

La boue passe par deux étapes :

- Filtration naturelle à travers le lit : perte jusqu'à 80% de la teneur en eau.
- Évaporation naturelle (Séchage atmosphérique).

➤ Critères de dimensionnement des lits de séchage :

**Tableau I.3 Critère de dimensionnement des lit de séchage [12]**

Climat	Durée d'un cycle (semaine)	Bilan hydrique annuel (mm)	Siccité initiale (%)	Siccité obtenue (%)	Charge appliquée (kgDs/m <sup>2</sup> /an)
Océanique	8 à 10	300 à 800	3 à 4	12 à 4	25
Continental	8 à 10	800 à 1500	3 à 4	20 à 25	50
Méditerranéen	8 à 10	1500 à 2000	3 à 4	30 à 40	80
Aride	8 à 10	2000 à 2500	3 à 4	50 à 25	160
Tropical humide	1 à 3	< 0	3 à 4	20 à 25	60

➤ **Exploitation :**

Les paramètres à suivre pour ce procédé :

- Veiller à l'enlèvement de toute végétation.
- Arroser le lit avant une coulée de boues
- Alimenter le lit avec une boue pas trop épaisse.
- La couche de boues ne doit pas dépasser :
  - 20 cm pour des boues épaissies.
  - 10 cm pour des boues digérées
- Le lit sera dégagé (enlèvement des boues) avant chaque nouveau remplissage.
- L'enlèvement des boues se fait à l'aide d'une fourche à cailloux.
- Apport en sable nécessaire (jusqu'à 5 cm) après quelques enlèvements sur un même lit.

**I.9.1.6.1- Lagunes de séchage**

Le principe n'est pas fondamentalement différent du lit de séchage, sauf qu'il n'y a pas d'étape de percolation. En revanche, compte tenu des temps de séjour très importants, il est intéressant d'évacuer par surverse la phase clarifiée, notamment si les boues n'ont pas subi d'étape préalable d'épaississement.

En outre, la profondeur de la boue est 3 à 4 fois plus importante et la boue séjourne de 1 à 3 ans dans la lagune avant curage. La profondeur de boues en début de cycle est de 0,7 à 1,4 m ; la reprise des eaux claires est effectuée par goulotte perforée. [12]

Le dimensionnement est basé sur les paramètres suivants :

- bilan hydrique annuel précipitation/évaporation
- qualité du sol, afin de ne pas contaminer la nappe
- qualité de la boue : préférentiellement digérée
- charges : en première approximation, 35 à 40 kg.DS/m<sup>2</sup>/an

#### **I.9.1.7- Déshydratation thermique :**

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues consistant à évaporer de l'eau libre et liée. Cette opération vient obligatoirement après une étape de déshydratation. Actuellement, les deux applications suivantes peuvent être retenues, selon la siccité visée en sortie en deçà ou au-delà de l'état pâteux collant de la boue, compris grossièrement entre 50 et 60% de siccité : [11]

- le séchage partiel destiné à remonter la siccité de la boue à une valeur acceptable en vue de son auto combustibilité dans un incinérateur à boue du type Pyrofluid, soit couramment 35 % environ (45 % maximum).
- le séchage poussé à une siccité généralement supérieure à 90 %, ou au moins à 65 %, afin de stocker puis d'évacuer de la boue sous un volume minimum en vue de son utilisation ou de son incinération déportée dans un four à ordures ménagères, voire un four à ciment (la cendre issue de la boue sèche joue alors le rôle d'un filler)

Le séchage conduit à une réduction de volume jusqu'à plus de 60 %, voire 90 % de siccité si nécessaire. Il peut être aussi utilisé en couplage avec un four afin de dépasser la siccité requise (supérieure à 30 %) pour rendre la boue toujours auto combustible.

Le phénomène d'évaporation procède en deux étapes successives :

- un premier régime dit « superficiel », concernant l'eau libre uniquement, pendant lequel la boue présente une surface mouillée. Vis-à-vis de la phase gazeuse, cette surface se comporte comme un plan d'eau et demeure donc à la température de bulbe humide de l'air de séchage
- un deuxième régime en fin de séchage pendant lequel l'eau de la boue doit migrer des profondeurs ou des cavités internes des boues vers la surface de contact. La vitesse d'évaporation est alors limitée par la vitesse de migration. Localement, la température peut s'élever et conduire à un début de combustion sèche de la boue.

Concrètement, la chaleur fournie peut être transmise de deux manières :

- via un fluide gazeux caloporteur en contact avec la boue, soit de l'air ou un mélange d'air et de fumées de combustion. On parle alors de séchage direct, ou encore de séchage à flux mélangé.
- par conduction à travers une paroi chauffée en contact avec la boue. Il s'agit alors de séchage indirect, ou encore de séchage à flux séparé. La paroi est chauffée soit électriquement, soit par un fluide caloporteur, vapeur ou liquide thermique (eau pressurisée, huile...). Une ventilation d'air dans le sécheur est toutefois nécessaire pour permettre de maintenir le gradient de pressions partielles  $\Delta P$  à une valeur satisfaisante.

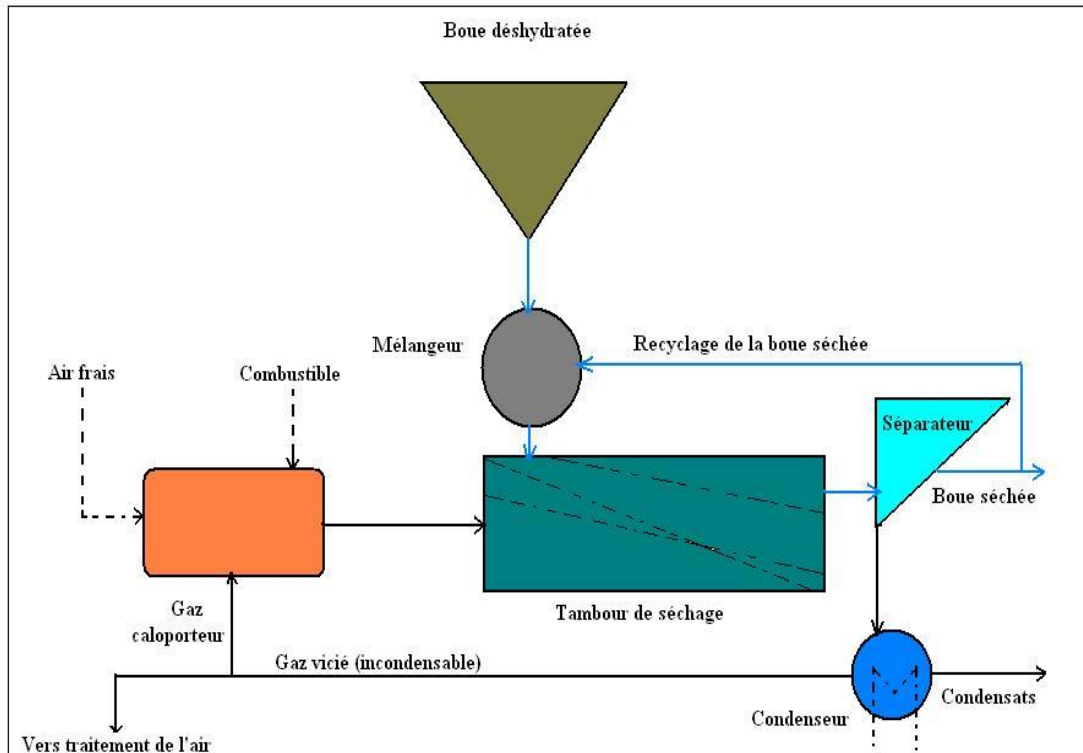
#### **I.9.1.7.1- Sécheurs directs :**

La boue à sécher est entraînée dans un courant de gaz chaud. La boue se déplace dans un tambour rotatif principalement à l'état fluidisé, ou du moins finement divisé. Aussi est-il nécessaire d'introduire la boue dans le tambour sous une forme déjà divisée, ce qui nécessite de recycler une partie de la boue séchée. Corrélativement, cette boue ne peut sortir que dans un état de siccité poussé (séchage poussé), un degré moindre de séchage étant obtenu par remélange avec de la boue déshydratée.

Le gaz caloporteur est généralement constitué de fumées de combustion provenant d'un brûleur installé immédiatement en amont du tambour. Une partie du gaz vicié est remélangée à ces fumées afin d'améliorer le bilan thermique et de limiter le flux de composés malodorants à traiter. Il est également possible de passer de l'air sur un échangeur, notamment si on désire minimiser la formation de NOx.

Mélangeur Air d'entraînement Fluide caloporteur, moyennant une surconsommation de + 10%.





**Figure I.18 Schéma d'un sécheur thermique direct des boues [12]**

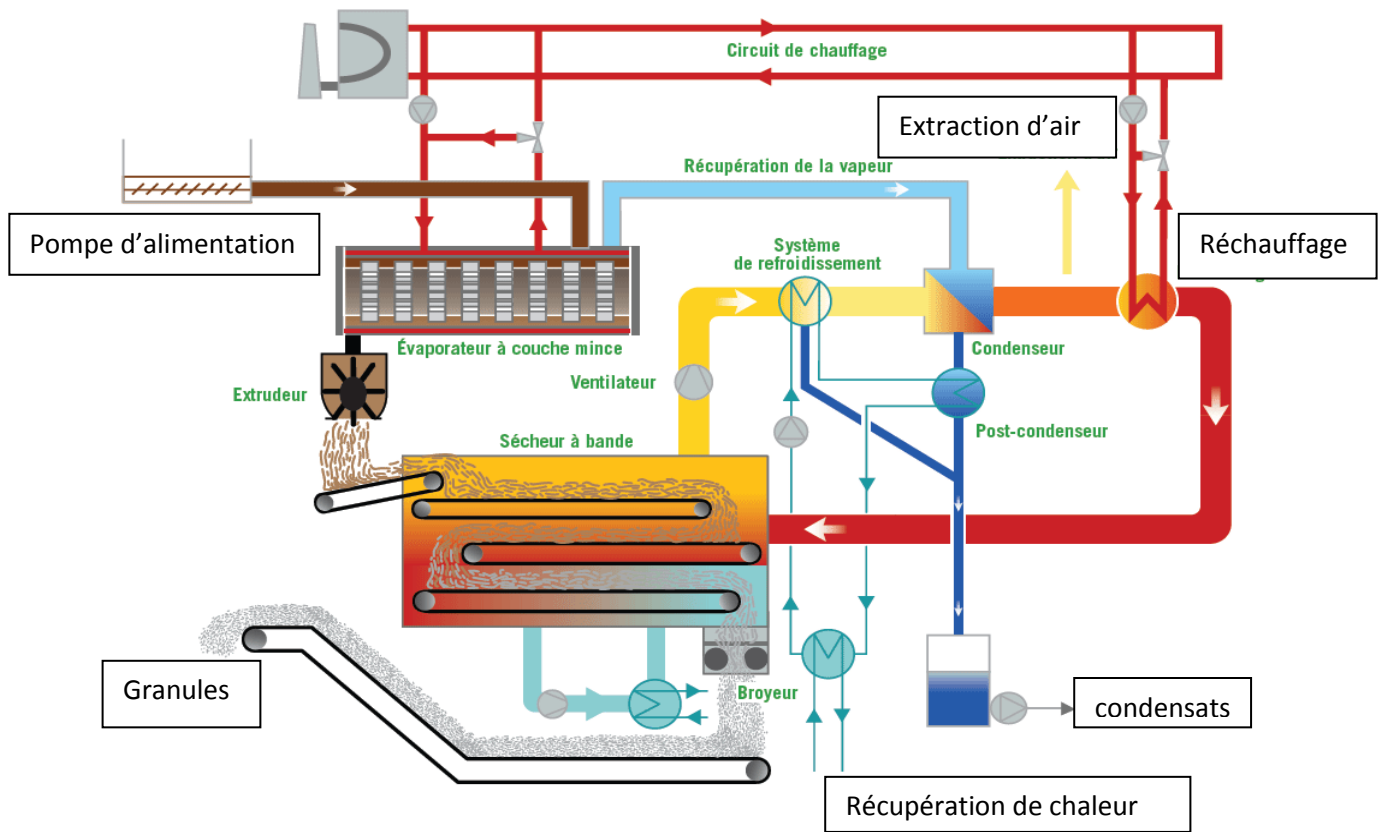
#### **I.9.1.7.2- Sécheurs indirects :**

Ces sécheurs comportent classiquement un stator constitué d'un fût cylindrique, fixe et horizontal, muni de racleurs et un rotor comportant des palettes agitatrices. Le fluide caloporteur circule généralement dans l'arbre du rotor et éventuellement dans une double enveloppe du stator.

Les conditions de fonctionnement d'un sécheur indirect sont a priori moins favorables que dans le cas précédent. En effet, la boue arrive en masse dans le sécheur et la phase gazeuse est à faible température et peu vélocité. La présence des racleurs et des palettes permet de faire avancer la boue et de la retourner afin de maintenir le régime superficiel d'évaporation et d'améliorer ainsi le transfert,

La boue présentant en permanence une surface humide. En outre, un ventilateur de tirage entraîne les buées dégagées vers leur traitement. Des ouïes d'aération permettent l'entrée d'une petite quantité d'air.

Le fluide caloporteur peut être de la vapeur ou un liquide thermique. En cas de couplage avec un four Pyrofluid, il est avantageux d'utiliser de l'eau pressurisée récupérant les calories des fumées au niveau de l'économiseur. Ceci permet l'économie d'une chaudière mais le coefficient global d'échange dans le sécheur étant un peu moins bon que dans le cas de l'utilisation de vapeur, la taille du sécheur doit être un peu plus importante.



**Figure I.19 Schéma d'un principe de fonctionnement d'un sécheur indirect des boues [12]**

➤ **Critères de choix d'une technologie**

**Tableau I.4 Critères de choix entre sécheur direct et sécheur indirect [12]**

Critère	Sécheurs directs	Sécheurs indirects
<b>Rendement Energétique</b>	650 à 1000 kcal/kg d'eau	650 à 1000 kcal/kg d'eau
<b>Abrasion</b>	faible	Moyenne à importante
<b>Traitement des odeurs</b>	Volumes importants à traiter	Volumes faibles à traiter
<b>Granulation</b>	Intégrée	Granuleuse à rajouter
<b>Sécurité</b>	Risque de déflagration	Risque d'incendie
<b>Maintenance préventive et Main d'œuvre</b>	Nécessaire	Nécessaire
<b>Coûts d'investissement</b>	Plus avantageux pour des grandes capacités	Plus avantageux pour des petites capacités
<b>Hygiénisation</b>	Très bonne	Risques de courts-circuits

## **I.10- Destination finale des boues et contraintes afférentes**

### **➤ Au niveau européen**

Au niveau européen, les principales filières de gestion des boues sont la valorisation en agriculture, la mise en décharge et l'oxydation thermique par incinération ou par voie humide.

Le rejet en mer est interdit depuis 1998. Les boues sont également utilisées dans de moindres quantités comme combustible pour les cimenteries et les briqueteries (Gross, 1993) ou sont épandues sur des sols non agricoles (essais en zones forestières). La répartition moyenne entre les trois filières principales diffère quelque peu selon les sources et l'année considérée.

Suite à la politique de l'Union Européenne en matière d'enfouissement de déchets urbains municipaux, la mise en décharge des boues devra être abandonnée au profit de voies d'élimination écologiquement et économiquement durables.

À moyen terme, il semble donc que la valorisation agricole et la valorisation énergétique (incinération et oxydation par voie humide) soient les deux voies qui subsisteront. De nouvelles pistes sont également explorées. Parmi celles-ci, citons la gazéification des boues séchées. [12]

### **➤ L'Algérie veut investir dans la récupération des eaux usées qui seront destinées à l'irrigation des terres agricoles.**

Une quarantaine de nouvelles stations de traitement des eaux usées sera réalisée à l'horizon 2014, a annoncé par le directeur de l'assainissement au ministère des Ressources en eau. Ce programme va nécessiter de lourds investissements, car la construction d'une seule station d'épuration de capacité moyenne coûte en moyenne deux milliards de dollars.

La grande station d'El Kerma a coûté, à titre d'exemple, un investissement de six milliards de dollars. Une centaine de stations de traitement des eaux usées, avec une capacité annuelle de 550 millions mètres cubes, est opérationnelle à travers le territoire national. Leur nombre a progressé en six ans pour passer de 28 en 2002 à 105 stations fin 2009. «Les stations tournent à 50% de leurs capacités.

Nous traitons annuellement entre 200 et 300 millions mètres cubes d'eaux usées. Cette quantité est utilisée pour l'irrigation», précise le même responsable sur les ondes de la chaîne III. L'Algérie produit annuellement 750 millions de mètres cubes d'eaux usées.

L'intervenant a assuré que les eaux traitées dans les stations d'épuration sont de très bonne qualité et conformes aux normes de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS). Questionné sur le coût de l'entretien de ces stations, il a déclaré que la maintenance des équipements devra nécessiter 20 milliards de dinars.

D'ailleurs, un dossier a été déposé au ministère des Finances pour l'affectation d'une enveloppe supplémentaire. S'agissant du problème de remontée des eaux, il a annoncé que les projets de collecte des eaux des deux cuvettes d'El Oued et Ouargla seront prochainement opérationnels. Les deux projets ont coûté au Trésor public 60 milliards de dinars. Un montant justifié par l'importance des installations de collecte des eaux et la réalisation d'un transfert de 40 kilomètres. Abordant la protection des villes des inondations, il a révélé que 40 milliards de dinars seront débloqués dans le plan 2010/2014 pour sécuriser les centres urbains à risque.

Un projet est ainsi prévu pour protéger le centre d'Alger, en particulier le quartier de Bab- El Oued des inondations. Il devra être entamé dès le mois prochain. Interrogé sur le cas de la ville de Ghardaïa, le directeur de l'assainissement affirme que les deux nouvelles digues, réalisées pour contenir les crues, sont en cours d'achèvement.

#### **I.10.1- Valorisation agricole**

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

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

Enfin, l'épandage agricole des boues subit la concurrence des sous-produits de l'agriculture : les déjections animales et les sous-produits des industries agro-alimentaires. L'épandage après compostage constitue une solution alternative à l'épandage direct.

En effet, le compostage dégrade les matières organiques fermentescibles et donne un produit riche en éléments fertilisants, mais aussi en matières humiques qui permet une bonne revégétalisation des sols appauvris par les engrais minéraux.

### **I.10.2- Qualité des boues**

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

- les éléments traces métalliques et plus particulièrement les métaux lourds (Cd, Hg,Pb).

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

- les polluants organiques : pesticides, détergents, PCB, HAP. Sauf cas particulier (pollution, accident), les teneurs couramment observées restent faibles ;
- les micro-organismes pathogènes : bactéries, parasites, virus, champignons. D'un point de vue épidémiologique, les seuls risques majeurs pour l'homme et les animaux sont la présence de salmonelles ou d'œufs de ténia. Pour faire face à ces risques sanitaires (ainsi qu'aux nuisances olfactives), les directives imposent un traitement afin de réduire le pouvoir fermentescible des boues et de les hygiéniser [13].

#### **I.10.2.1- Nature et localisation des sols**

Les quantités de boues épandues sont déterminées en fonction de leur composition et de celle du sol. La proximité de nappes phréatiques, sources ou rivières est bien entendu prise en compte avant tout épandage. Des distances minimales par rapport à ces zones sensibles sont exigées. En outre, l'épandage n'est pas permis en cas de gel, de fortes pluies ou sur des sols saturés d'eau pour éviter tout ruissellement ou percolation rapide vers des nappes. [13]

### **I.10.3- Valorisation énergétique**

#### **I.10.3.1- Incinération**

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

##### **I.10.3.1.1- Incinération dans un four spécifique**

Cette solution est adoptée par des stations qui produisent de grandes quantités de boue mais peut aussi être le résultat d'une association de plusieurs stations d'épuration qui valorisent leurs boues conjointement. [13]

##### **I.10.3.1.2- Co-incinération avec ordures ménagères**

Cette option est envisagée lorsque le volume de boue ne justifie pas la construction d'un four et qu'un incinérateur ménager est situé à proximité. La capacité thermique du four doit être telle qu'elle permet l'introduction de boues.

La boue sous forme pâteuse (15 à 30% MS) est plutôt considérée comme un fluide de refroidissement alors qu'une boue de teneur en matières sèches supérieure à 60% possède un pouvoir calorifique inférieur proche des ordures et fait office de combustible. [13]

##### **I.10.3.1.3- Oxydation par voie humide (OVH)**

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

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

L'oxydation par voie humide a été validée à l'échelle pilote et sur quelques installations à grandeur réelle. Cette technique pourrait constituer une alternative à l'incinération pour un coût global de traitement généralement inférieur (OTV, 1997).

Cependant, des difficultés technologiques liées à la corrosion, à la précipitation de sels inorganiques et au travail sous pression retardent son développement industriel. [14]

#### **I.10.3.1.4- Thermolyse**

La thermolyse ou pyrolyse des boues (> 85% MS) est obtenue en l'absence d'air ( $O_2 < 2\%$ ), à moyenne (400-500°C) ou haute (500-700°C) température. Cette distillation thermique nécessite un apport externe d'énergie et produit du gaz et du coke. Les gaz de pyrolyse (PCI de 10 à 20 MJ/Nm<sup>3</sup>) sont en général brûlés et fournissent une part de l'énergie requise par les processus endothermiques (Antonini, 2000). Quant au coke, il peut être utilisé comme combustible secondaire.

En fonction de la composition initiale des boues, une épuration du coke peut s'avérer nécessaire. En effet, la charge polluante (métaux lourds, chlore,...) se retrouve alors concentrée dans le coke. [14]

#### **I.10.3.1.5- Gazéification**

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

La gazéification à l'air fournit un gaz pauvre (PCI de 4 à 7 MJ/Nm<sup>3</sup>), tandis que l'utilisation d'oxygène conduit à la production d'un gaz plus riche (PCI de 10 à 20 MJ/Nm<sup>3</sup>) par suppression du ballast d'azote (Antonini, 2000). [14]

#### **I.14- Synthèse bibliographique sur les boues d'épuration :**

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

#### **les formes d'eau dans les boues d'épuration**

**Vesilind et Martel (1989)** [01] : proposent la classification suivante suite à des tests dilatométriques : l'eau libre est celle qui peut être éliminée par simple décantation gravitaire ; l'eau interstitielle est celle qui est enfermée dans les floes ou dans des structures cellulaires, son enlèvement nécessite la rupture des floes ou des cellules ; l'eau vicinale est celle qui est retenue en surface des particules solides par des liaisons hydrogènes, son élimination passe par un traitement thermique; enfin l'eau d'hydratation est celle qui est chimiquement liée et qui nécessite une importante dépense énergétique pour son enlèvement. « **Thermal conductivity of sludges** » **Water Res.,23 :2,1989**

**Smollen (1990)** :[02] utilise un séchage basse température pour distinguer les catégories d'eau dans une boue déshydratée. L'eau qualifiée de libre est celle qui a pu être éliminée par déshydratation mécanique. Lors du séchage, l'auteur constate qu'une certaine quantité d'eau appelée 'eau immobilisée' est éliminée à une vitesse constante. L'eau qui subsiste est de l'eau liée, physiquement et chimiquement. « **Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction** .**Water Science & Technology Vol 22 No 12 pp 153–161 © IWA Publishing 1990** »

**Tsang et Vesilind (1990)** :[03] utilisent également une méthode thermogravimétrique pour distinguer les types d'eau dans une boue déshydratée. L'eau libre est la somme de l'eau éliminée par déshydratation et par séchage à vitesse constante. Les ruptures de pente de la courbe de séchage leur permettent de distinguer l'eau interstitielle, l'eau de surface (eau vicinale) et l'eau liée chimiquement qui n'est pas éliminée. « **Moisture distribution in sludge**. **Water Science & Technology 22 :135-142, 1990**



## **I.15- Synthèse des principales techniques du marché en Algérie**

### **I.15.1- Programme de développement 2011-2012**

- Station d'épuration de la ville d'Aflou (Laghout) : 92 000 EH.
  - Entreprise de réalisation : STEREAU / SAUR / HYDRO.AMENAGEMENT (France /Algérie).
  - Délai : 18 mois (réalisation), 24 mois (Exploitation)
  - Démarrage des travaux prévu en Janvier 2012.
  
- Protection du barrage Béni Haroun (2 tranche) :
  - Lot 1 : STEP Ferdjioua - Ain Beida de capacité de 80 000 EH.
    - Entreprise de réalisation : Groupement AQUA ENGINEERING / CHINAGEO-CORPORATION « CGC » / SPA CHINAGEO- ALGERIE « CGA » (Autriche / Chine / Algérie).
    - Délais d'exécution : 22 mois (réalisation) 24 mois (exploitation) - Démarrage des travaux prévu en Janvier 2012.
  - Lot 2 : STEP Zeghaia – Oued Endja de capacité de 38 000 EH.
    - Entreprise de réalisation : Groupement WATERLEAU / HYDRO- TECHNIQUE (Belgique / Algérie)
    - Délai : 18 mois (réalisation) et 24 mois (exploitation).
    - Démarrage des travaux prévu en janvier 2012.
  
- Station d'épuration de la ville de Biskra : 330 000 EH.
  - Entreprises de réalisation : Groupement H.AMENAGEMENT/COMPASA/DAM (Algérie/Espagne)
  - Démarrage des travaux prévu courant du 1er trimestre 2012.
  
- Station d'épuration de Djanet (Illizi) : 15 000 EH.
  - Entreprises de réalisation : CHIALI SERVICE - Délai : 14 mois
  - Démarrage des travaux prévu courant du 1er trimestre 2012.
  
- Station d'épuration de Ain M'Lila (Oum-Bouaghi) : 117 705 EH.
  - Evaluation des offres est en voie de finalisation, l'avis d'attribution sera publié incessamment.
  - Démarrage des travaux prévu courant du 2ème trimestre 2012.
  
- Station d'épuration d'Akbou, y compris collecteur (Béjaia) : 100 000 EH.
  - Ouverture des plis prévue pour le 08/01/2012.

- Station d'épuration de Barika (Batna) : 200 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 22/01/2012.
  
- Station d'épuration de Bousmail (Tipaza) : 230 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 02/02/2012.
  
- Station d'épuration de Béni- Mered (Blida) : 383 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 23/02/2012
  
- Station d'épuration d'Oum El Bouaghi : 145 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 27/02/2012.
  
- Station d'épuration d'Arris (Batna) : 63 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 28/02/2012.
  
- Station d'épuration de Boufarik (Blida) : 375 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 26/02/2012.
  
- Station d'épuration de Sidi Aich (Béjaia) : 65 000 EH.
- Ouverture des plis prévue pour le 29/02/2012.

Les stations d'épuration ci dessous citées seront lancées au mois de janvier 2012 sur la base du Cahier des charges type :

- Station d'épuration de Mohammadia (Mascara) y compris collecteurs : 95 000 EH.  
(Avis d'appel d'offres transmis à l'ANEP pour publication).
- Station d'épuration de Mostaganem : 350 000 EH.
- Station d'épuration de Tebessa : 300 000 EH.
- Station d'épuration de Timimoun (Adrar) : 45 000 EH.
- Station d'épuration de Tenès (Chlef) : 72 000 EH.
- Station d'épuration de Rouached, Boughardaine (Mila) : 19 500 EH et 15 000 EH.
- Station d'épuration de Marset Ben M'Hidi (Tlemcen) y/c collecteur : 80 000 EH.
- Stations d'épuration protégeant le barrage de Taksebt contre la pollution générée par six localités à savoir :
  - Irdjen 1 et Irdjen 2 :..... 15 000 EH et 11 200 EH.
  - Ain El Hammam :.....15 500 EH.
  - Ouacif :.....11 000 EH.
  - Ouadhia :.....21 500 EH.
  - Mechtras :..... 25 000 EH.

## **I.16- Conclusion**

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

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

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

Nous présenterons dans le chapitre suivant le contexte industriel de la station d'épuration des eaux résiduaires, ONA – Tlemcen

## Références :

- [1] Valorisation agronomique des boues – JEAN Luc Martel –Suez environnement cirse octobre 2010.
- [2] Melle KAROUNE Samira Effets des boues résiduelles sur le développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L) Université Mentouri Constantine. Soutenu en 2008
- [3] Mr. Yousfi Mustapha « Etude d'un séchoir solaire de boue » soutenu le 24/10/2011 Université abu bakr balkaid-Tlemcen.
- [4] Nadia Chalal « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect » soutenu le 16/12/2007 Université Mentouri- Constantine
- [5] Haoua Amadou « Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station dépuratoire Urbains » Thèse de doctorat Université Louis Pasteur- Strasbourg I Discipline: Sciences pour l'ingénieur Soutenue 04/05 /2007.
- [6] Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par micro tomographie à rayons x, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège (2002).
- [7] Legrand, V., Etude du gonflement et de la floculation de gels de poly-électrolytes : application à la déshydratation des boues de stations d'épuration. PHD thèses, Université Paris VI, (1997).
- [8] Bongiovanni, J.-M., Traitement des boues résiduelles par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).
- [9] Boudez, j-c., Rhéologie et physico-chimie des boues résiduelles pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage. Thèse de doctorat Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts(ENGREF) de Paris (2001).
- [10] Antonini, G., "Les procédés de valorisation thermique des boues," Actes Du Colloque Les Boues. Quels Enjeux ? Quelles Solutions ?, Pau, France, 23-24 Février, 2000.
- [11] Surh, P., "Incinération combinée des boues d'épuration et des ordures ménagères: une filière qui séduit.," L'eau, l'industrie et les nuisances, 209, 34-36 (2002).

- [12] Cornice, R., "Conditionnement et traitement des boues des stations d'épuration des eaux résiduaires urbaines et des usines de production d'eau potable." Institut National Agronomique de Paris, cycle "Valorisation agricole des déchets des usines de traitement des eaux", 13-17 avril 1992.
- [13] OTV., Traiter et valoriser les boues, collection OTV édition, (1997), pp
- [14] ADEME, et Cabinet Arthur Andersen., Examen de la situation de la filière de recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde, Ademe Editions (1999).
- [15] Nadia Chalal « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect » soutenu le 16/12/2007 Université Mentouri- Constantine
- [16] Boussalia Amar « Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux » Université mentouri-constantine .soutenu(27/06/2010)
- [17] Cemagref. Satese. Production et gestion des boues dans les stations d'épuration, rapport de synthèse, (1991).
- [18] OTV., Traiter et valoriser les boues, collection OTV édition, (1997), pp
- [19] Kazakura, T., et Hasatani, M., "R&D needs - Drying of sludge," Drying Technol., 14, 1389- 1401 (1996).

# **Chapitre II**

## **Station d'épuration des eaux usées urbaines**

## II.1-Introduction :

L'épuration des eaux usées est un traitement par différents procédés physico chimiques pour une séparation en eau épurée et en boues. Historiquement, la création des premiers réseaux d'égouts structurés à la fin de la première XIX<sup>ème</sup> siècle, les responsables ont proposés des solutions pour lutter contre l'infection provoquée par les eaux d'égouts.

Le séchage des boues issues des opérations d'épuration des eaux usées peut se faire par plusieurs méthodes : lits de séchage, presses mécaniques... où les résultats peuvent être différents. Cependant, la production à grande échelle limite l'utilisation du séchage à air libre sous exposition solaire connu comme la méthode traditionnelle du séchage. [1]

## II.2- description de la station d'épuration des eaux usées

La station d'épuration de la ville de Tlemcen se situe au nord du chef lieu « Tlemcen Ville », à l'ouest de Chetouane « Daïra » sur la Route de Ain El Houte conçue pour une population de 150 000 eq/hab d'une capacité de 30 000 m<sup>3</sup>/j, elle a été réalisée par l'Entreprise Hydrotraitement mise en service le 05 Novembre 2005 gérée et exploitée actuellement par l'Office National de l'Assainissement. [2]

La station d'épuration de la ville de Tlemcen est de type Boues activées à faible charge. Dans le traitement biologique des effluents, on fait généralement appel aux processus aérobies par lesquels les bactéries provoquent une oxydation directe des matières organiques des eaux usées à partir de l'oxygène dissous dans l'eau [2]

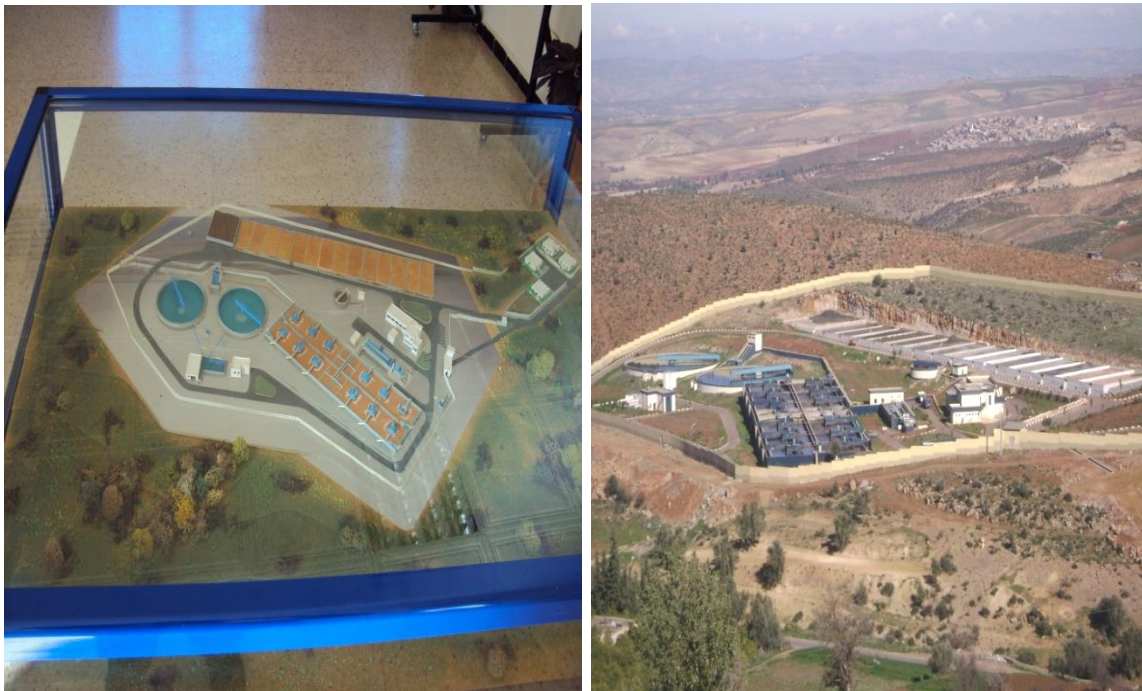


Figure II.1 Vue générale de la Station d'épuration ONA – Tlemcen [2]



## II.2- description des installations :

La station comprend :

- Pour la partie **Eaux Usées**

- ❖ Déversoir d'orage

- Il est dimensionné pour prendre en charge un maximum de 3300 m<sup>3</sup>/h



**Figure II.2 Déversoir d'orage [2]**

- ❖ Deux Dégrilleurs

- Grille grossière manuelle (1unité) ;

- Largeur de la grille : 1,8m

- Inclinaison : 70%

- Écartement entre les barreaux : 50mm



**Figure II.3 Grille grossière manuelle (1unité) [2]**



- Grille mécanisée (2 unités) ;
  - Largeur de la grille : 1,0m
  - Profondeur du chenal : 1,5m
  - Écartement entre les barreaux : 20mm
  - Puissance du moteur : 0,37kw



**Figure II.4 Grille mécanisée (2 unités) [2]**

- ❖ Désableur- déshuileur (2 unités)
 

Sous forme trapézoïdale, le dessableur déshuileur est équipé d'un pont suceur et écumeur et a pour dimensions :

  - Longueur : 26m
  - Largeur : 4m



**Figure II.5 Désableur- déshuileur [2]**

- ❖ Bassins d'aération : Quatre bassin Chaque bassin a les dimensions suivantes ;
  - Volume :  $4723\text{m}^3$
  - Forme rectangulaire de
  - Longueur : 55,5m
  - Largeur : 18,5m
  - Profondeur d'eau : 4,6m
  - Hauteur béton : 5,6m



**Figure II.6 Bassins d'aérations [2]**

- ❖ Décanteurs secondaires : deux décanteurs chacun est équipé de;
  - Pont racleur à vitesse de rotation 0,04m/s
  - Sont de forme circulaire
  - Diamètre : 46m
  - Surface :  $1661\text{m}^2$
  - Profondeur d'eau : 4m en périphérie



**Figure II.7 Clarificateurs [2]**



❖ Bassin de chloration :

Il est en béton armé et d'un volume de l'ordre de 700 m<sup>3</sup>



**Figure II.8 Bassins de chloration [2]**

- Pour la partie **Boues**
- ❖ Un poste de pompage des boues avec pompe de recirculation



**Figure II.9 Vis de recirculation [2]**

- ❖ Épaisseur à boue : Il est en béton armé et à un pont support de la tête tournante avec moteur et réducteur.
  - Diamètre : 14m
  - Hauteur utile : 04m
  - Pente de fond : 1/10



**Figure II.10 Epaisseur [2]**

Les lits de séchages sont alimentés directement depuis le clarificateur de la station évitant ainsi l'utilisation de polymères et le passage sur table d'égouttage.

La siccité des boues en entrée doit se situer autour de 2% à 5% de MS (20 à 50 g/litre). Il s'agit de boues liquides qui n'ont reçu aucun traitement particulier.



L'eau interstitielle des boues s'écoule le long des tiges et rejoint le réseau de racines pour atteindre, durant ce périple épurateur, la couche de matériau qui permettra son évacuation par des drains. Cette eau est reconduite à la station en amont. Les études montrent que ce retour est généralement moins chargé que ceux provenant des autres procédés de densification comme les filtres à bandes ou les tables d'égouttages.



**Figure II.11- Pompe de la boue [2]**

- ❖ Lits de séchage : Quatorze lits de séchage Chaque lit a les dimensions suivantes ;
  - Nombre : 14
  - Longueur : 30 m
  - Largeur : 15 m



**Figure II.12 Lits de séchage [2]**

- ❖ Aire de stockage des boues séchées
- Bâtiments
  - Un bâtiment d'exploitation
  - Un bâtiment de chloration



**Figure II.13 Aire de stockage [2]**

### **II.3-Données de bases**

La station d'épuration de la ville de Tlemcen a été dimensionnée sur la base des données suivantes [4] :

1/ horizon	_____	2005
2/ type de réseau	_____	unitaire
3/ nature des eaux brutes	_____	domestiques
4/ population	_____	150 000 EQ/HAB
5/ débit journalier	_____	30 000 m <sup>3</sup> /j
6/ débit de pointe horaire admis au traitement	_____	3 800 m <sup>3</sup> /h
7/ DBO <sub>5</sub> journalière	_____	9 300 kg/j
8/ matière en suspension	_____	13 950 kg/j
9/ azote à nitrifier	_____	1 980 kg
10/ l'équivalence calculée sur la DBO	_____	172 000 EQ/HAB

## II.4-Composition globale des boues et production de boues d'une station d'épuration d'eaux usées urbaines :

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

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

**Tableau II.1 Production de boues d'une station d'épuration d'eau urbaine [2]**

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

Les boues primaires comportent pour l'essentiel des matières minérales, cellulose, fibres et autres constituants bien structurés. Leur traitement ultérieur est facile.

Les boues biologiques sont très organiques et colloïdales, donc fortement hydrophiles et difficilement déshydratables. Cependant, elles comportent la majeure partie de l'azote et du phosphore.

**Tableau II.2 variation de la siccité de la boue dans le STEP Tlemcen pendant l'année [2]**

Date	Siccité (%)	Date	Siccité (%)
<b>02/01/2012</b>	<b>52.5</b>	<b>09/08/2012</b>	<b>81.89</b>
<b>08/01/2012</b>	<b>77.92</b>	<b>21/08/2012</b>	<b>93.3</b>
<b>11/01/2012</b>	<b>40.3</b>	<b>23/08/2012</b>	<b>90.58</b>
<b>26/02/2012</b>	<b>45.2</b>	<b>03/10/2012</b>	<b>41.5</b>
<b>08/04/2012</b>	<b>52.5</b>	<b>07/10/2012</b>	<b>40</b>
<b>25/04/2012</b>	<b>59.52</b>	06/01/2013	35.97
<b>02/07/2012</b>	<b>48.94</b>	10/01/2013	35.65
<b>25/07/2012</b>	<b>66.25</b>	20/01/2013	20.53
		03/02/2013	35.64

**Tableau II.3 Evolution de la composition des boues en fonction de la ligne de traitement d'eau [ 2 ]**

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

## **II.5- Destination des boues traitées**

Une destination régulière et fiable est souvent difficile à trouver.

Trois solutions possibles se présentent :

- la valorisation agricole
- la mise en décharge
- l'incinération
  
- **La valorisation agricole** : c'est la meilleure solution vu la pouvoir fertilisant des boues.



Les boues doivent être dépourvues d'éléments indésirables ( Métaux lourds, parasites, Germes...) et doivent subir au préalable un épaissement, une stabilisation et dans certains cas une déshydratation voire même un compostage.

En outre l'existence d'une réglementation qui définira les modalités de son utilisation et fixera les responsabilités et prérogatives des secteurs concernés, est nécessaire pour la mise en œuvre de cette solution.

- **La mise en décharge contrôlée :** cette solution reste préalable à une stabilisation de la boue et une déshydratation poussée. Elle consiste à enfouir les boues (des fois mélangées avec les ordures ménagères) dans un site étanche ou l'on compacte les résidus et on traite les jus de décharges (lixiviats).
- **L'incinération :** les boues doivent uniquement être bien déshydratées. Cette solution est envisageable pour de grosses quantités de boues non stabilisées pour l'utilisation du pouvoir d'auto combustion de ces boues nécessaire au maintien du four en température.

## II.5.1- La valorisation agricole

### II.5.1.1- Intérêt agronomique :

- **Matière organique :** bénéfique sur la structure du sol et sur son activité biologique.
- **L'azote :** sous forme organique, il est minéralisé par les micro-organismes du sol.  
Les boues contiennent 40 à 80 kg d'azote par tonne de matières sèches.  
On considère que 40% de cet azote pourra être assimilé par les plantes.
- **Le phosphore :** comme pour les engrais chimiques, les teneurs en phosphore sont exprimées en acide phosphorique ( $P_2O_5$ ).

Les boues contiennent 20 à 70 kg de  $P_2O_5$  par tonne de matière sèche.

- **Le calcium :** utilisé pour l'entretien du sol. les quantités habituelles de calcium exprimées en CaO ne suffisent généralement pas pour corriger l'acidité des terres. sauf pour le cas des boues chaulées. Les boues contiennent de 20 à 80 kg de CaO par tonne de MS.
- **Le potassium et le magnésium :** très solubles dans l'eau, ils sont de ce fait peu présents dans les boues et devront être apportés par une fertilisation complémentaire.

- **Les Oligo-éléments** : indispensables à la croissance des végétaux, ils sont en quantités non négligeable dans la boue.

Il s'agit essentiellement : Zinc, manganèse, le cuivre, le molybdène.

➤ **Il est important de retenir que :**

L'apport au champ de ces différents éléments ne doit excéder la quantité nécessaire aux besoins des plantes, l'excédent étant une source de pollution. La croissance de ces besoins nécessite un suivi agronomique à la parcelle.

- **Contraintes**

1- Conformité des boues

2 -Aptitudes des parcelles agricoles à l'épandage

3- Epandage soigné et surveillé

- respect des doses d'apport définies par le suivi agronomique en tenant compte des fertilisants apportés par les boues déjà dans le sol et utilisés par la culture.

- tenir compte des conditions climatiques (en dehors de périodes de gel, neige, pluies)

## **II.6. STEP Tlemcen et ISO 14001**

La **norme ISO 14001** est la plus utilisée des normes de la série des normes ISO 14000 qui concernent le environnemental. Elle a été réalisée par l'Organisation internationale de normalisation, désignée internationalement par le sigle ISO qui est systématiquement repris dans la dénomination des normes.

La contribution des normes est très souvent imperceptible dans notre quotidien, leur importance se manifeste surtout lorsque celles-ci font défaut, tant en termes de fiabilité du produit, de sa dangerosité ou des mauvaises conditions d'hygiène et de sécurité dans notre environnement de travail, mais aussi des impacts environnementaux que peuvent avoir nos activités.

En termes de normalisation, il y a deux types d'approche : l'approche produit que l'on abordera par la création de label par exemple, et l'approche processus comme pour les normes ISO 14000 qui représentent une famille de « normes génériques de système de management ». Les normes sont « génériques », elles ont vocation à pouvoir être appliquées à toute organisation, quelle que soit sa taille, quel que soit son produit, dans tout

secteur d'activité, et que l'organisme soit une entreprise commerciale, une administration publique ou un département gouvernemental.

## II.6.1- ISO 14001

La norme ISO 14001 est une norme internationale établie par l'Organisation internationale de normalisation, qui constitue la référence des organismes pour mettre en place un système de management environnemental. Elle a pour objectif d'aider les entreprises à gérer l'impact de leurs activités sur l'environnement et à démontrer l'efficacité de leur gestion. La norme ISO 14001 peut être certifiable par un organisme agréé.[3]

Cette norme peut s'appliquer à n'importe quelle entreprise quelles que soient sa taille et son activité, mais peut aussi s'appliquer à tout autre type d'organisme (services publics, administrations...). Son application n'est pas obligatoire et dépend donc de la volonté de chaque organisme. En 2009, l'ISO dénombrait plus de 223 000 certifications de l'ISO 14001 dans le monde. [4]

Son principe repose sur le processus d'amélioration continue de la roue de Deming pour assurer à l'organisme de maîtriser les impacts environnementaux de son activité. Elle engage l'organisme dans une démarche de progrès continu de ses performances environnementales et lui permet de rester conforme à la réglementation environnementale.

La norme ISO 14001 fait partie de la famille des normes ISO 14000 qui regroupe des normes complémentaires relatives au management environnemental. La norme ISO 14001 est aussi un élément de la triple certification qualité-sécurité-environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001 qui permet aux entreprises d'avoir une politique globale de management des risques.

Ces trois normes reposent sur un modèle similaire qui facilite leur intégration. Elle est également une des normes sur lesquelles s'appuie l'ISO 26000 dans laquelle elle s'imbrique et s'articule.

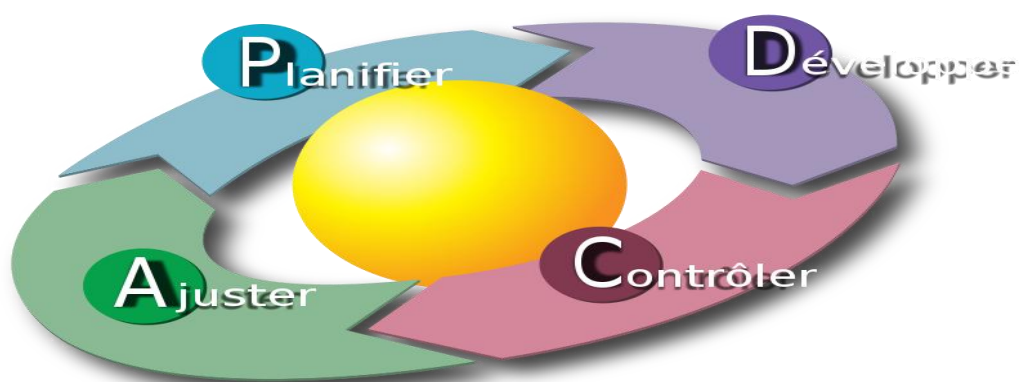


Figure II.14 : L'ISO 14001 repose sur le principe de la roue de Deming.[4]

## II.6.2- Périmètre d'application de la norme ISO 14001

ISO 14001 est applicable à tout organisme qui souhaite :

- établir, mettre en œuvre, tenir à jour et améliorer un système de management environnemental,
- s'assurer de sa conformité avec sa politique environnementale établie,
- démontrer sa conformité à la présente Norme internationale en :
  - réalisant une autoévaluation et une autodéclaration,
  - recherchant la confirmation de sa conformité par des parties ayant un intérêt pour l'organisme, telles que les clients,
  - recherchant la confirmation de son autodéclaration par une partie externe à l'organisme,
  - recherchant la certification/enregistrement de son système de management environnemental par un organisme externe

## II.6.3-Liste des normes de la série ISO 14 000

- **ISO 14001 Management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation. Deuxième édition parue le 15 novembre 2004.**
- **ISO 14004** : Lignes directrices du système environnement
- **ISO 14006** : Eco-conception, réduction des impacts environnementaux des produits et des services. système management Environnemental - Lignes directrices pour incorporer l'écoconception.
- **ISO 14010, 11, 12** : Audit du système environnement
- **ISO 14031** : Indicateurs environnementaux
- **ISO 14040** : Analyse du cycle de vie, principes et cadre
- **ISO 14044** : Analyse du cycle de vie, exigences et lignes directrices

Alors que les normes ISO 14004 et ISO 14010, 11, 12 sont considérées comme des normes outils, la norme ISO 14001 constitue le référentiel de base pour la certification. Il représente 18 exigences réparties en 6 chapitres :

1. Les exigences générales (intentions de l'établissement en termes d'environnement).
2. La politique environnementale (objectifs de l'entreprise).
3. La planification.
4. La mise en œuvre (réalisation des actions planifiées pour satisfaire à la politique environnementale)
5. Les contrôles et les actions correctives\* (surveillance de la fonctionnalité du système de management environnemental)
6. La revue de direction.

- Il n'y a pas d'exigences absolues en matière de performance environnementale
- Exigence d'engagement dans la politique de la direction.
- Obligation d'arriver en conformité avec la législation et aux réglementations applicables.
- Il faut respecter le principe d'amélioration continue.
- L'attribution de l'ISO 14001 se fait suite à un audit réalisé par un organisme certificateur accrédité tels que : AFNOR Certification, ECOPASS, BVQI, SGS,.... En France ces organismes sont accrédités par le Comité français d'accréditation
- L'auditeur doit vérifier la conformité du système avec les exigences de la norme. Si une non-conformité majeure est notifiée, le système ne peut pas être certifié tant qu'elle n'est pas levée. L'auditeur porte ensuite son rapport d'audit devant une commission qui va décider de la certification ou non du système audité.
- La certification se déroule par cycle de 3 ans :
  - Année 1: audit complet (durée 2 à 3 jours)
  - Année 2 et 3: audit de suivi.

### **II.6.3.1- Avantage**

Bien qu'elle ne soit pas obligatoire, la norme rencontre un succès important auprès des entreprises. Une étude de l'Afnor auprès de 800 entreprises souligne quatre facteurs de motivation qui reviennent dans la majorité des cas : améliorer l'image de l'entreprise (77 %), se mettre en conformité avec la réglementation environnementale et anticiper les lois futures (65 %), améliorer la performance globale de l'entreprise (64 %), répondre aux exigences du Groupe en vue d'une reconnaissance interne (58 %) [5].

Norme internationale de référence, l'ISO 14001 est un gage de sérieux facilement valorisable auprès des parties prenantes de l'entreprise en démontrant aux partenaires que la gestion des risques environnementaux est organisée et maîtrisée.

Elle apporte un avantage concurrentiel dans la mesure où de plus en plus de clients exigent de leurs fournisseurs qu'ils maîtrisent leurs impacts environnementaux.

L'ISO 14001 semble avoir un réel effet positif sur la performance environnementale de l'entreprise. Une étude de l'Insee démontre que la certification entraîne une réduction de plusieurs impacts environnementaux (eau, combustibles, CO<sub>2</sub>, énergie).

- Diminuer les dépenses
- Anticiper et maîtriser les risques environnementaux en intégrant les problématiques environnementales dans le système de management global de l'entreprise
- Mobilisation des employés et cercle vertueux
- Source d'innovation
- Elle apporte un avantage concurrentiel en permettant à l'entreprise d'être mieux perçue par ses parties prenantes et de démarcher plus facilement des investisseurs

## **II.7- Caractéristiques thermodynamiques des boues**

### **II.7.1-Les méthodologies de la mesure de propriétés thermodynamiques de la boue**

Les boues utilisées lors de nos expériences, sont de type primaire en provenance de la station d'épuration de la ville de Tlemcen traitant les effluents urbains d'une population de 150 000 eq/hab et d'une capacité de 30 000 m<sup>3</sup>/j .

Les propriétés thermodynamiques de la boue intervenant dans la modélisation sont : les isothermes de sorption et la chaleur massique. [5]

#### **II.7.1.1- Définition des isothermes de sorption :**

les isothermes de sorption sont des courbes obtenues par une série de couples de points ( activité de l'eau ; teneur en eau) . C'est donc « la quantité d'eau adsorbée après équilibre, en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère entourant le matériau, à une température constante.

Dès lors, on distingue deux types d'isothermes de sorption :

**L'isotherme d'adsorption** : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec. Elle est utile pour les opérations de ré-humidification des produits déshydratés.

**L'isotherme de désorption** : si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau. Elle présente un grand intérêt en séchage.

#### **II.7.1.2- Les méthodes de détermination des isothermes :**

Une grandeur est souvent utilisée pour caractériser l'interaction eau-solide dans les boues : il s'agit de la teneur en eau libre. L'eau libre, par opposition à l'eau liée, est définie comme l'eau se comportant thermodynamiquement comme de l'eau pure. [5]

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

➤ **Méthodes gravimétriques**

Il s'agit de mesurer la masse d'un échantillon en contrôlant la température et l'humidité relative de l'ambiance gazeuse. La pesée peut être effectuée en continu. Les techniques de contrôle d'humidité relative sont nombreuses.

**Systèmes chimiques:** la plus répandue des méthodes utilisées en laboratoire est celle dite des bocaux. Un récipient hermétique est placé dans une enceinte climatique. Dans ce récipient, l'échantillon est posé dans une coupelle placée au dessus d'une solution aqueuse. Le rôle de cette solution aqueuse est d'assurer une pression partielle de vapeur connue dans l'ambiance. Ces méthodes ont l'inconvénient d'être longues, Il faut compter de une semaine à un mois pour une mesure.

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

➤ **Méthodes manométriques**

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

La plus part des méthodes de mesure d'isothermes de sorption présentées, utilisent la notion d'équilibre total. On attend la stabilisation de la masse ou de l'humidité relative. La méthode mise en œuvre dans ce travail utilise la notion d'équilibre local en surface, ce qui réduit le temps de la mesure et dispense d'un contrôle direct de l'humidité relative. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir une isotherme de sorption complète en une seule expérimentation et pour une durée n'excédant pas quelques heures.

## II.8- Système DVS

Le cœur du système DVS est une microbalance à enregistrement continu ultrasensible capable de mesurer des changements de masse de l'échantillon inférieurs à 1  $\mu\text{g}$ . Ce type de microbalance a comme caractéristique principale d'avoir une très bonne stabilité à long terme et est par conséquent idéal pour la mesure de phénomènes de sorption de vapeurs qui durent entre quelques minutes et quelques jours. Cette microbalance est placée dans un incubateur qui permet de générer une température de mesure constante et précise. Les humidités relatives demandées sont générées par le mélange d'un flux de vapeurs sec et d'un flux de vapeurs saturé dans les proportions appropriées à l'aide de fluxmètres de précision. [5]

Des sondes combinées d'humidité et de température sont situées juste en dessous des nacelles d'échantillon et de référence afin de permettre une vérification indépendante des performances du système. Le mécanisme de la microbalance est très sensible à la sorption et à la désorption de l'humidité.

le four de l'appareillage est programmé pour effectuer une montée rapide à la température de l'isotherme souhaitée. Après une stabilisation à la température du four de quelques minutes, l'enregistrement de la perte de masse peut débuter. Le flux gazeux est réglé de façon à ce qu'il soit supérieur (au moins cinq fois) au débit de vapeur d'eau en provenance de l'échantillon. [5]



Figure II.15- Photographie du système DVS [5]



## II.9. - Le méthode de Mesure de la capacité calorifique massique

De nombreuses techniques calorimétriques ont été développées et utilisées pour la détermination des capacités calorifiques.

### ➤ Techniques de types calorimétries adiabatiques.

les calorimétries adiabatiques consistent à délivrer une quantité de chaleur connue à un échantillon que l'on a thermiquement isolé de son environnement et à mesurer l'élévation de température qui en résulte.

### ➤ Techniques de types calorimétries non adiabatiques

Ils s'accommodent de l'existence d'un couplage thermique entre la source froide et l'échantillon. De plus, la présence d'une source froide permet de soumettre l'échantillon à un régime thermique périodique, de moyenniser les signaux obtenus, et d'améliorer ainsi le pouvoir de résolution de la méthode. L'appareillage utilisé pour la mesure de la capacité calorifique massique est le calorimètre.

L'appareillage utilisé pour la mesure de la capacité calorifique massique est le calorimètre



Figure II.16 calorimètre C80 [5]

## II.10- Résultats sur les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation

### II.10.1- Isothermes de désorption

La méthode présentée est directement appliquée sur les boues de la station d'épuration. La température considérée pour l'isotherme est la température moyenne de l'air intérieur calculée pour la totalité de la mesure. Les résultats présentés sur la Figure II.17 sont obtenus pour une boue d'un même lot pour deux températures différentes. On constate que les deux courbes ont pratiquement la même allure et possèdent une forme de type II dans la classification BDDT (Brunauer et al., 1940). [5]

Le même type d'isothermes de désorption sur des boues résiduaires urbaines a été observé par Bongiovanni (1998), Léonard (2003) et Vaxelaire et al., (2002). Cette figure montre un taux d'eau liée relativement faible pour une humidité relative faible, celle-ci augmentant progressivement à humidité relative croissante. En effet, la teneur en eau liée dépend de l'air ambiant, la température et l'humidité relative.

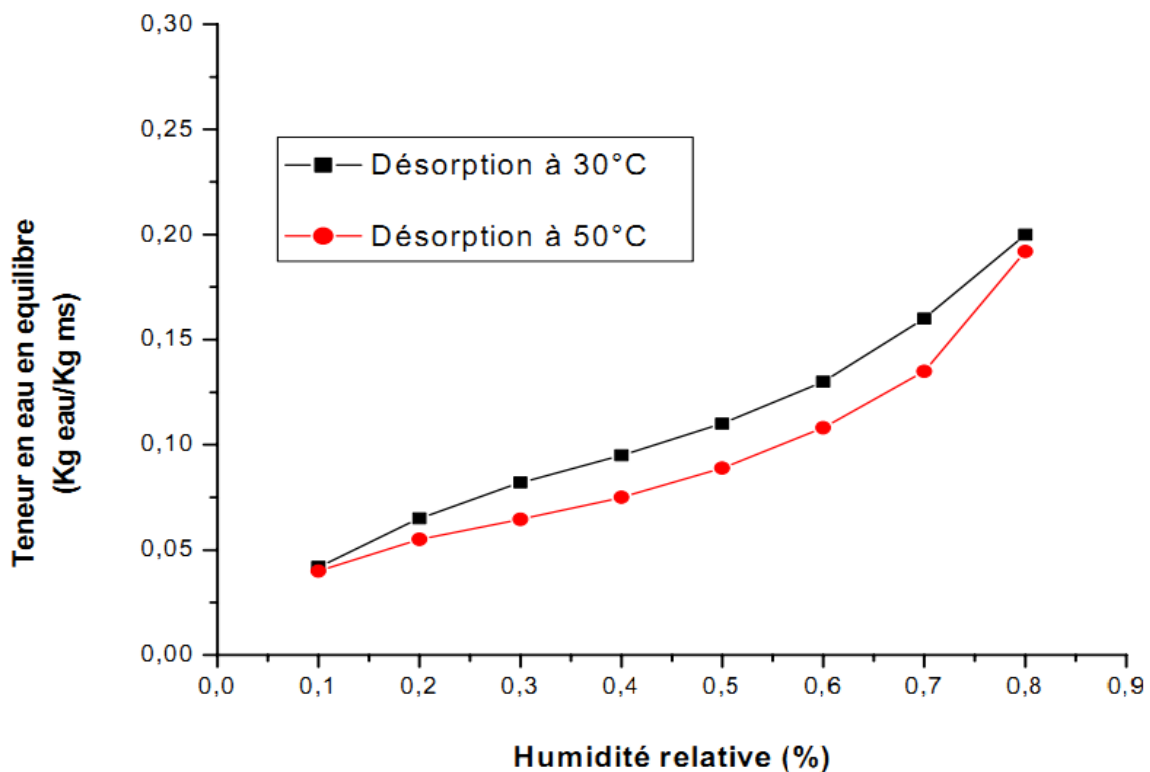


Figure II.17- Isotherme de désorption à une température de 30°C et à 50°C [5]

## II.10.2-Forme générale des isothermes :

Les isothermes d'adsorption et présentent en générale trois zones, Chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

**Zone1** : constitution d'une monocouche moléculaire à la surface de produit. Elle est caractéristique de l'action des forces de Van Der Waals entre les groupements hydrophiles et molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les surfaces des pores du produit.

L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivant s'effectue quand toute la surface est saturée.

**Zone2** : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale.

L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

**Zone3** : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue.

## IV.10.3-Capacité calorifique massique

Pour calculer la capacité calorifique massique d'un produit humide, on utilise la loi de composition suivante [5].

$$Cp = \frac{MsCp_{an\ hydr e} + meCpe}{m} \quad \text{Equation IV.4}$$

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

$$Cp = \frac{1}{1+X} Cp_{an\ hydr e} + \frac{X}{1+X} Cpe \quad \text{Equation IV.5}$$

$C_{pe}$  : capacité calorifique massique de l'eau (= 4180 J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>)

$C_{p_{anhydre}}$  : capacité calorifique massique de la masse sèche de la boue (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>)

La capacité calorifique massique  $C_{pe}$  de l'eau étant connue, seule la valeur pour la matière sèche des boues  $C_{p_{anhydre}}$  est à déterminer. Le calorimètre C80 a ainsi été utilisé pour déterminer la valeur de  $C_{p_{anhydre}}$  sur des boues séchées.

On obtient alors un  $C_{p_{anhydre}}$  de l'ordre de 1182 J/kg.°C pour une température de référence de 20°C. Cette valeur de 20°C a été choisie de manière arbitraire, la variation de la température n'ayant pas trop d'influence sur la chaleur massique de la masse anhydre de la boue (Vaxelaire et al., 2002).

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

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

## II.11-Conclusion

Les boues d'épuration (urbaines ou industrielles) sont les principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Ces sédiments résiduels sont surtout constitués de bactéries mortes et de matière organique minéralisée. Une installation moyenne produit environ un excès de 40 g de matière sèche par jour et par habitant.

Un lit de séchage non planté est un lit simple et perméable qui, une fois chargé avec la boue, draine la partie liquide et permet à la boue de sécher par évaporation. Approximativement,

50 à 80% du volume des boues percale comme liquide. Cependant, la boue n'est pas stabilisée.

Le problème de séchage par lit est (Exige un grand espace, Les odeurs et les mouches sont normalement perceptibles, Long temps de stockage, Requier la participation d'un spécialiste pour la conception et l'exploitation, Main d'œuvre requise pour l'enlèvement des boues séchées, Le lixiviat exige un traitement secondaire).

Le chapitre suivant est une modélisation de séchage solaire des boues d'épuration à partir de la théorie du séchage afin de développer dans le chapitre d'après la simulation

## Références

[1]- « Notices d'exploitation ». STEP de SETIF et REGHAIA

[2] - Document technique, ONA Office National d'assainissement pour la récupération et l'élimination des déchets. La valorisation agricole des boues de stations d'épurations urbaines, Laboratoire ONA – STEP -Tlemcen jour d'exploitation (2013)

[3]- ISO, La famille ISO 14000 des normes internationales pour le management environnemental, 2009, p. 6.

[4]- ISO, Survey 2009, page consultée le 3 décembre 2012.

[5] Haoua Amadou « Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station dépuratation Urbains » Thèse de doctorat Université Louis Pasteur- Strasbourg I Discipline: Sciences pour l'ingénieur Soutenue 04/05 /2007.

[6]- Melle KAROUNE Samira Effets des boues résiduairees sur le développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L) Université Mentouri Constantine. Soutenue en 2008

# **Chapitre III**

## **Modélisation de séchage solaire des boues d'épuration**

### **III.1- Introduction :**

Le séchage est un [procédé qui sépare](#) un liquide d'un solide, d'un semi-solide (pate) , voire d'un liquide par [évaporation](#). On arrive toujours à un produit solide dans le cas de séchage. Cette élimination peut-être réalisée soit par évaporation à l'ébullition ; soit par évaporation et entrainement à l'aide d'un gaz (l'air en générale). Cette opération est [endothermique](#) et nécessite l'apport d'énergie thermique. Cette énergie peut être apportée : conduction ; convection ou par rayonnement comme source d'énergie pour le séchage nous avons l'énergie électrique, fossile, ou solaire [1].

Le séchage est une opération consistant à abaisser l'activité du liquide d'un produit, jusqu'au seuil en deçà duquel les réactions enzymatiques et d'oxydation sont inhibées, de même que le développement des micro-organismes [1].

Il est question donc d'étude de transfert de masse et de chaleur, mais avant d'aborder cette étude, passons en revue quelques définitions utiles. Deux principaux mécanismes ont été avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher :

- la diffusion
- la migration capillaire

### **III.2. Terminologie de séchage**

#### **III.2 .1. Humidité**

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

#### **III.2 .2. Taux d'humidité**

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

#### **III.2 .3. États de siccité**

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

#### **III.2 .4. Taux d'humidité à l'équilibre**

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.



### III.2.5. Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit [1], en d'autres termes à celle de la vapeur saturante.

Quand la pression de vapeur émise par le produit ( $P_{vp}$ ) est inférieure à la pression de vapeur saturante ( $P_{vs}$ ), le produit est entré dans le domaine de l'hygroscopicité et une partie de son eau, "l'eau liée", est fixée par la matière. Plus la teneur en eau du produit est faible, plus la tension de vapeur qu'il émet est réduite et plus l'activité de l'eau ( $a_w$ ) est basse. On définit l'activité de l'eau dans le corps humide  $a_w$  par la relation [2] :

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad \text{Equation(III.1)}$$

Pour qu'il y ait séchage, quels que soient le niveau de teneur en eau du produit et l'activité de l'eau, il faut donc que l'humidité relative ( $\Phi$ ) de l'air soit constamment inférieure à l'activité de l'eau ( $\Phi < a_w$ ) de façon à ce que  $P_{vp} > P_v$  (pression de vapeur de l'air dans l'enceinte). [2]

### III.2 .6. Les différents modes de liaison de l'eau

La liaison est très forte pour l'eau liée chimiquement par association moléculaire et encore plus forte pour l'eau insérée dans un réseau cristallin. Dans ces deux cas, le corps est dit hydraté. Enlever cette eau d'hydratation revient à détruire le corps. L'opération de séchage consiste à enlever toute l'eau du corps (l'humidité) autre que son eau d'hydratation [2].

### III.2 .7. Energie de liaison – chaleur de vaporisation [2]

La chaleur ou l'énergie de vaporisation de l'eau libre ne dépend que de la température régnant à la surface du produit soumis au séchage; cette chaleur n'est autre que la chaleur de vaporisation de l'eau, donnée par la formule :

$$L_v = 597 - 0,56 \theta \quad \text{(Equation III.2)}$$

Où  $L_v$  est exprimée en Kcal/Kg et  $\theta$  en degrés Celsius. Lorsque l'eau est absorbée dans le produit, en - dessous d'un certain seuil d'hydratation (correspondant à la limite entre eau "libre" et eau osmotique),

les molécules d'eau sont liées à la matière avec une certaine énergie de liaison, qui devient d'autant plus importante qu'il s'agit d'eau osmotique absorbée, combinée chimiquement. Pour évaporer cette eau, lors du séchage, il faut fournir un supplément d'énergie thermique. Dans ces conditions, la chaleur totale de vaporisation de l'eau du produit peut s'écrire :

$$L = L_a + L_v \quad (\text{Equation III.3})$$

Pour le séchage la chaleur de liaison de l'eau ( $L_a$ ) est négligée car la dessiccation s'arrête à un certain seuil dit d'équilibre, et la chaleur de vaporisation est celle de l'eau dite "libre".

### III.2 .8. Transferts de chaleur

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction - rayonnement : Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [3]

#### III.2.8.1- Séchage par convection

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques. [3]

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = h A (T_a - T_s) \quad (\text{Equation III.4})$$

avec :

- $Q$  (W) : la quantité de chaleur transférée par unité de temps,
- $A$  ( $m^2$ ) : surface d'échange,
- $(T_a - T_s)$  (K) : l'écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher,
- $h$  ( $W / m^2 \cdot K$ ) : coefficient d'échange par convection.

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après:

- La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit alors un diamètre moyen des particules.

D'après la formule (Equation III.4), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est, elle-même, importante.

Donc la diminution de la taille des particules constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

- L'écart ( $T_a - T_s$ ) n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue.[3]

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

- Le coefficient d'échange  $h$  peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des nombres adimensionnels tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que de celles du produit à sécher.

Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à **10 mm**, le coefficient d'échange par convection  $\alpha$  peut être calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$Nu = h d_p / \lambda_a \quad (\text{Equation III.4.a})$$

$\lambda_a$  : la conductivité thermique de l'air,

Grâce à la relation  $Nu = C Re^m Pr^n$  (4.b)

$Re$  : le nombre de Reynolds,

$Pr$  : le nombre de Prandtl, égal à 0,7 dans le cas de l'air,

$C$  : une constante ajustée expérimentalement,

$m$  : proche de 0,8 et  $n$  de 0,5.

$Re$  étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître  $Nu$  donc le coefficient  $\alpha$  ; cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur.

### III.2.8.2- Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif [3]

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante.

Le flux thermique (en  $W/m^2$ ) est donné par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl} \quad (\text{Equation III.5}) \quad (\text{lois de fourier})$$

Avec  $\lambda$  ( $W / m \cdot K$ ) conductivité thermique de la pellicule de produit ou de gaz à travers laquelle s'effectue le transfert,

$\frac{dT_s}{dl}$  : Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

### III.2.8.3- Séchage par rayonnement [3]

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement.

Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil.

La quantité de chaleur  $Q$  (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stephan Boltzmann :

$$Q = A_1 C \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \phi \quad (\text{Equation III.6})$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (\text{Equation III.6'})$$

$T_1$  (K) : température de la source émettrice,

$T_2$  (K) : température du produit,

$A_1$  : ( $m^2$ ) surface du corps recevant le rayonnement,

$A_2$  : ( $m_2$ ) surface de l'émetteur d'infrarouge,  
 $\phi$  : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a  $\phi = 1$ ),  
 $\epsilon_1$  émissivité du produit à traiter,  
 $\epsilon_2$  émissivité de l'émetteur,  
 $\sigma$  constante de Stephan Boltzmann ( $\sigma = 5,673 \times 10^{-8} \text{ w / m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

### III.3- Place du séchage dans une optique valorisation

Une opération de séchage des boues après déshydratation mécanique présente différents atouts tant en amont de la valorisation agricole que de l'incinération. La siccité visée par le séchage dépend de l'application. En épandage, on a tendance à pousser le séchage à son terme, alors qu'un séchage partiel est parfois recherché pour l'incinération [4].

#### III.3.1- Séchage et épandage

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

Ces intérêts sont les suivants :

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

Suffisamment haute (30 min à 70°C suffisent) ;

- passage d'une texture pâteuse à une texture solide qui facilite l'épandage.

### **III.3.2- Séchage et valorisation énergétique**

L'oxydation par voie humide mise à part, tous les procédés de valorisation énergétique utilisent de la boue partiellement ou complètement séchée. L'intérêt principal du séchage est l'augmentation du pouvoir calorifique. En effet, le PCI d'une boue déshydratée à 20% MS est voisin de 1,25 MJ/kg alors que celui d'une boue séchée à 90% MS se situe entre 14,5 et 16,8 MJ/kg. Un séchage partiel jusqu'à des siccités comprises entre 30 et 45% permet d'obtenir. [4]

L'auto-combustibilité des boues et trouve son application avant incinération dans un four spécifique. Un séchage mené de manière à atteindre 60 à 90% de matières sèches permet d'élever le PCI des boues au niveau de celui des ordures ménagères (8400 kJ/kg), ce qui est intéressant pour la co-incinération. De cette façon, l'introduction de boues séchées ne perturbe pas le fonctionnement du four.

En ce qui concerne la pyrolyse ou la gazéification, le pré- séchage de la boue (85% MS) est généralement intégré au procédé et est obtenu dans un sécheur en amont.

### **III.3.3- Déshydratation par séchage solaire des boues :**

Le séchage se positionne comme un procédé intermédiaire, qui préserve l'ensemble des possibilités d'élimination ou de valorisation dans les principales filières actuelles. Le séchage a pour but d'éliminer par évaporation ou vaporisation l'eau imprégnant les boues. Le principe des procédés actuels de séchage solaire des boues résiduaire 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 [4].

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

### **III.3.4- Avantages du séchage solaire :**

- un bilan environnemental positif puisqu'il n'y a pas d'émission de gaz à effet de serre
- Faible consommation électrique pour le séchage des boues ;
- Augmentation de la siccité du produit final (70% à 90%) ;
- Augmentation du pouvoir calorifique des boues qui peut être intéressant en vue d'une incinération
- Fonction de stockage et de séchage des boues ;
- Gestion automatisé des boues ;
- Produit plus attractif pour plusieurs débouchés ;
- Faible cout d'exploitation et d'évacuation des boues ;

- Faible cout de maintenance et d'entretien ;
- De plus, cette technologie utilise une source d'énergie renouvelable.

### **III.4- Problématique actuelle du séchage solaire**

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

- Concernant le premier point, le séchage solaire sous serre implique un bon transfert thermique à l'intérieur de la serre favorisant l'évaporation. A l'heure actuelle, le dimensionnement et les méthodes de conceptions des unités sont assez empiriques. Un outil prédictif capable de guider le concepteur serait un atout majeur.
- Le second point important concerne la caractérisation de la boue en vue du séchage. De ce point de vue, la notion d'eau libre-eau liée, qui permet d'évaluer la disponibilité de l'eau contenue.

Dans le matériau à sécher, est fondamentale en séchage. L'une des méthodes permettant de mesurer cette grandeur est la mesure d'isothermes de sorption. Outre la quantité d'eau libre et d'eau liée, cette méthode permet aussi de déterminer une seconde grandeur intéressante pour le dimensionnement, la teneur en eau minimale pouvant être atteinte par séchage [5].

#### **III.4.1- Différents procédés de séchage solaire :**

Technique empruntée aux industriels céréaliers, le séchage solaire est désormais appliqué au séchage des boues urbaines. Ce procédé consiste en un ensemble de serres qui, en piégeant le rayonnement solaire, permettent d'augmenter la température ambiante et d'évaporer l'eau inertielle 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.[5]

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 boues. Ce qui doit permettre un brassage régulier et uniforme pour renouveler les surfaces d'évaporation, et une aération de la couche de boues afin de limiter les réactions de fermentation anaérobie, sources d'importantes nuisances olfactives ;
- Le chauffage de l'air ambiant ou du radier en vue de réduire les surfaces de séchage à mettre en œuvre. Ce type de dispositif n'est généralement proposé que pour les très grandes installations, qui ont la possibilité de recycler les énergies issues d'autres procédés épuratoires comme sources de chauffage de la production de boues

Il n'existe pas de règles générales de conception du procédé. Chaque concepteur dispose de sa technologie [5].

#### III.4.1.1- La serre ouverte

La serre ouverte a des ouvertures en partie basse et en partie haute afin de favoriser la convection naturelle ( cas typique des serres horticoles) et est démunie de porte. La gestion de l'atmosphère dans la serre est assurée par convection naturelle. Le taux de renouvellement de l'air dans la serre n'est pas parfaitement maîtrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet de gérer le débit de ventilation dans la serre [6].

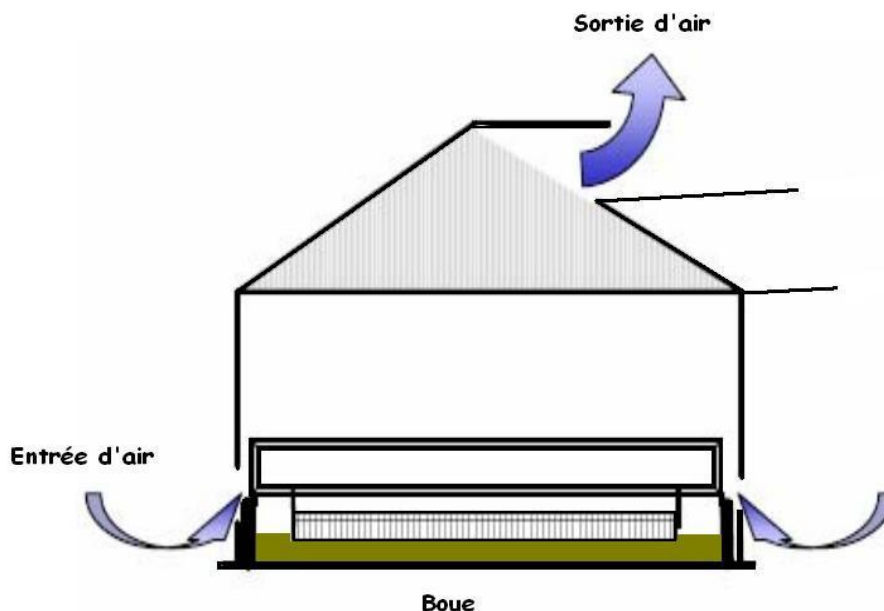


Figure III.1- Schéma d'un exemple de serre ouverte [6]



➤ **Avantage :**

- Conception simple
- Limitation des dépenses énergétiques
- Si ventilation suffisante, dilution constante des odeurs dans l'atmosphère.

➤ **Inconvénients :**

- Températures intérieures plus que dans une serre fermée
- Performances de séchage sur l'année moindres et aléatoires.

### III.4.1.2- 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» [6].

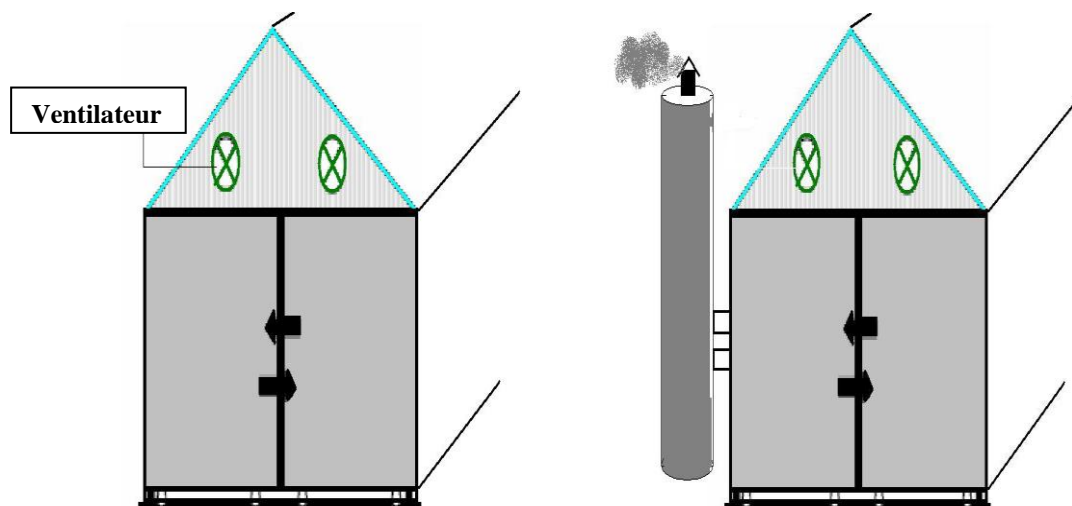


Figure III.2- Schéma d'un serre fermée – Extraction en pignon [6]

➤ **Avantage :**

- Maitrise de la ventilation donc du taux de renouvellement
- Performances de séchage constantes tous l'année

➤ **Inconvénients :**

- Dépenses énergétiques plus importantes
- Conception initiale plus compliquée et plus onéreuse

### **III.5- Préparation de la solution de polyelectrolyte**

Plusieurs stations d'épuration que gère l'ONA disposent d'un procédé de déshydratation par FILTRE A BANDES conditionné par la présence d'un dispositif de préparation d'une solution de polymère (poly électrolyte).

Ce produit donne un aspect flocculant à la boue d'où le choix d'une concentration optimale pour doser la boue est primordial à une meilleure filtrabilité de la boue.

Cette solution est réalisée en continu dans un groupe de dosage à partir de poly électrolytes en poudre.

La dissolution des flocculants est une opération difficile du fait des caractéristiques suivantes :

- les solutions mêmes diluées, sont très visqueuses. Elles ont une masse moléculaire élevée et une structure linéaire très longue. et sont donc sensibles à la dégradation mécanique sous agitation élevée.
  
- Les grains ont tendance à s'agglomérer s'ils ne sont pas mouillés et dispersés dans de bonnes conditions.

#### **III.5.1-Descriptif du groupe de dosage : (Voir Schéma ci-dessous)**

Le groupe de dosage est un ensemble compact, il comprend essentiellement :

- Une cuve à trois compartiments :
- un compartiment de dispersion (A)
- un compartiment de maturation (B)
- un compartiment de soutirage (C)
- Un collecteur de vidange avec trois vannes d'isolement. ( 10 )
- Une arrivée d'eau comprenant : ( 4 )
- Une vanne d'arrêt manuelle ( 4.1 )
- Un détendeur avec manomètre ( 4.2 )
- Une électrovanne pour le fonctionnement automatique (4.3)
- Un débitmètre ( 4.4 )
- Un système de dilution par buses de pulvérisation. ( 4.5 )
- Deux agitateurs à vitesse lente en INOX 100 T/mn ( 2 )
- Un doseur de poudre à vis avec ses accessoires ( 3 )
- Un contrôleur de niveau comprenant 4 alarmes ( 5 )
- Un Coffret électrique pour l'asservissement-régulation automatique de l'ensemble (7)

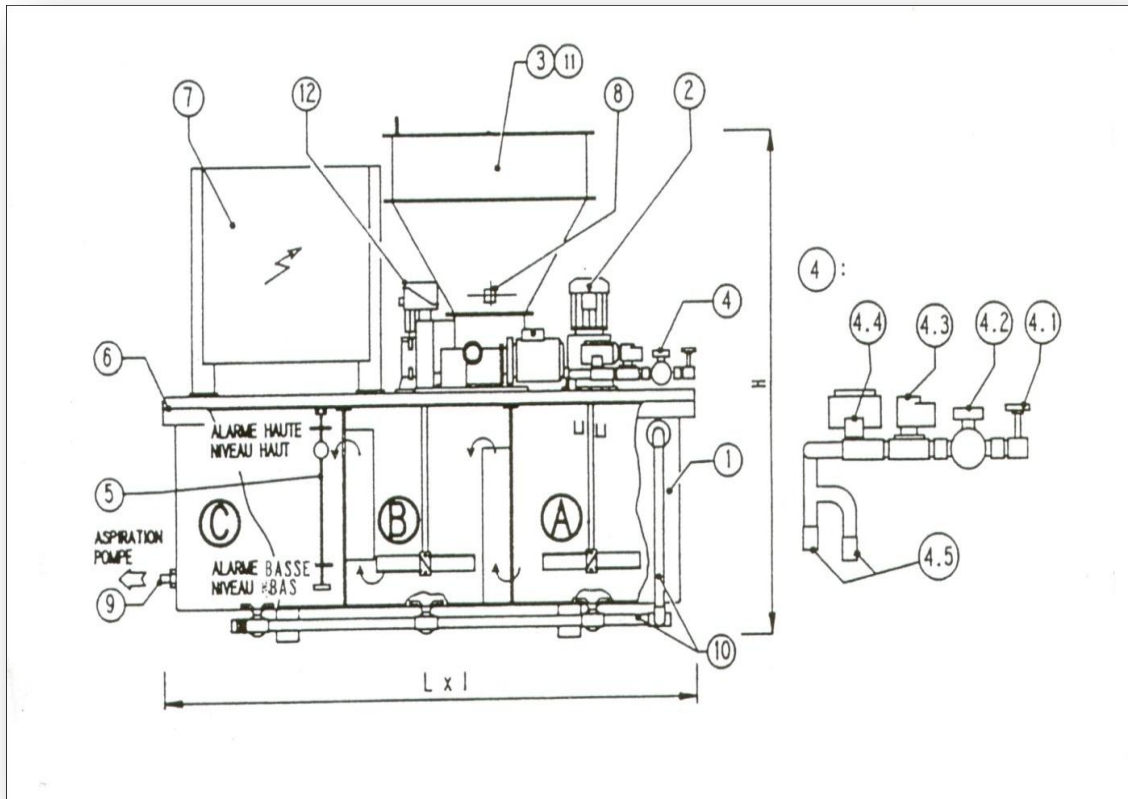


Figure III. 3 Scéma descriptif du groupe de dosage [7]

### III.5.2- Principe de fonctionnement du groupe de dosage

Le groupe se compose d'une cuve à trois compartiments : préparation (1), maturation (2) et soutirage (3). Ces compartiments sont reliés entre eux par des chicanes imposant un circuit préférentiel au polyélectrolyte afin d'éviter le passage direct de la cuve de préparation à la cuve de soutirage ; ceci assure une production de polyélectrolyte de bonne qualité.[07]

L'asservissement du groupe est réalisé par le régulateur de niveau installé dans le compartiment soutirage de la cuve.

La pompe doseuse étant en fonctionnement lorsque la solution atteint le « niveau bas », le contrôleur déclenche :

- l'ouverture de l'électrovanne d'arrivée (4.3) d'eau et le fonctionnement du doseur de poudre (3) . Les débits d'eau et de poudre sont réglés de façon qu'il y ait proportionnalité à tout instant. Quand la solution atteint le « niveau haut » , le contrôleur de niveau entraîne l'arrêt du doseur de poudre et la fermeture de l'électrovanne d'arrivée d'eau. [7]

Si le niveau « alarme basse » est atteint, le contrôleur arrêtera la pompe doseuse (3) de soutirage, le doseur de poudre(3) et l'électrovanne (4.3) .

Ensuite, il déclenchera un signal lumineux ( ou sonore sur option). Le même phénomène se produira si le niveau « alarme haute » est atteint. Les 2 agitateurs (2) fonctionnent en permanence quel que soit le stade du cycle.

Le coffret (7) comporte un bouton d'arrêt manuel des agitateurs.

En option le groupe peut être équipé de :

- Trop plein raccordé à la vidange ( 10)
- Trémie additive ( 11)
- Détecteur de niveau de poudre ( 12)
- Un troisième agitateur dans le compartiment de soutirage.

### III.5.3-Mise en service et fonctionnement

Pour la première mise en service, il est nécessaire de :

- Mettre sous tension le coffret de commande afin d'initialiser le régulateur de niveau ( 5) les voyants « sous tension » et « alarme TB » sont allumés.
- Mettre 200 mm d'eau dans le compartiment C soutirage ( Voir schéma ci-dessous) afin de dépasser l' Alarme Basse. Le voyant alarme TB s'éteint . Sans cette précaution le groupe ne démarre pas.

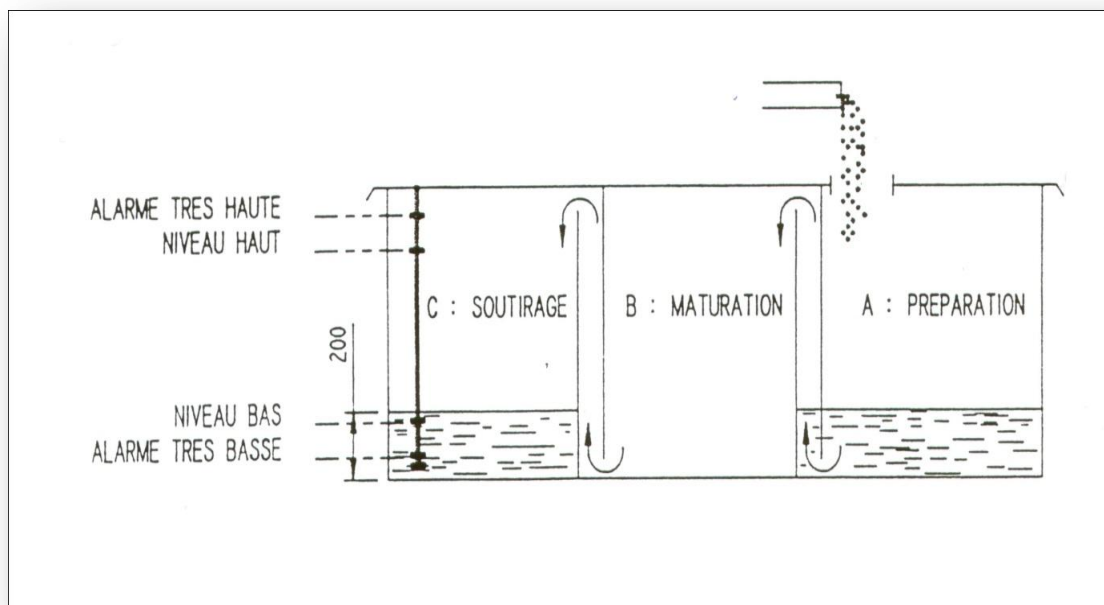


Figure III.4- Schéma d'une fonctionnement [7]

- Mettre 200 mm d'eau dans le compartiment A (préparation) afin d'éviter la formation de grumeaux pendant les opérations de réglage.
- Mettre les agitateurs en fonctionnement qui doivent tourner en permanence quel que soit le stade du cycle. C'est une sécurité supplémentaire en cas de défaut ou d'alarme.

La préparation est toujours en mouvement et ceci évite sa dégradation et la prise en blocs. Le groupe est prêt pour un cycle en automatique.

- Appuyer sur « Départ cycle ».
- Vérifier le système de dispersion et que le mouillage de la poudre se fait correctement.

Si le fonctionnement est correct et les buses bien orientées, la poudre doit être bien mouillée et entraînée vers l'axe de l'agitation mécanique..

A partir de cet instant le fonctionnement du groupe est réalisé automatiquement par l'armoire de commande.

#### ➤ **Exploitation :**

Le fonctionnement étant automatique, il n'y a pas de précautions particulières à prendre.

Cependant, il faut :

- Réapprovisionner régulièrement le doseur de poudre en fonction de la consommation.
- Avoir un débit de soutirage tel que le volume de solution utilisé pendant le temps de conservation du produit soit supérieur au volume total contenu dans les trois cuves.
- S'assurer que l'alimentation en eau ne subit pas de variation ou de coupure.

Ce groupe étant prévu pour fonctionner de manière automatique, il ne nécessite qu'un entretien réduit. Il faut s'assurer périodiquement du bon état et de la propreté du conduit du doseur de poudre et du bon fonctionnement du système de dispersion de la poudre.[7]

En cas d'arrêt de fonctionnement prolongé, il est nécessaire de vidanger les bacs, le doseur de poudre, de rincer à l'eau l'intérieur des cuves et les canalisations, car en séchant, le polyélectrolyte forme une pellicule solide qui peut gêner la remise en marche. Faire un cycle à l'eau claire.

### **III.5.4- Réglages eau et poudre :**

Le dosage proportionnel de la poudre et de l'eau est établi à la concentration voulue par le réglage des divers appareils suivant la méthode ci après :

#### **III.5.4.1-Réglage eau**

a) Ouvrir l'arrivée d'eau en actionnant manuellement la vanne ( 4.1 )

b) Vérifier que la pression indiquée sur le mano- détendeur est bien comprise entre 2 et 2,5 bars.

En principe le détendeur est réglé en usine. Il se peut qu'en fonction des conditions d'installation (longueur et diamètre du tuyau d'arrivée, pression du réseau d'alimentation ), on soit obligé d'ajuster quelque peu la pression. La pression de 2 à 2,5 bars est nécessaire pour obtenir un jet d'eau aux buses d'aspersion, plat Et évasé suffisamment efficace pour séparer et mouiller les particules de poudre et éviter la formation de grumeaux.

c) Contrôler le débit d'eau souhaité par l'intermédiaire du débitmètre ( 4.4 ) et l'ajuster en actionnant la vanne d'arrivée ( 4.1 ). Le débit d'eau doit être 2 à 3 fois supérieur au débit de soutirage. Le contrôle du débit d'eau ne peut se faire qu'en fonctionnement, l'électrovanne devant être ouverte.

#### **III.5.4.2-Réglage poudre (DOSEUR DE POUDRE) :**

Les poly électrolytes en poudre ont des densités différentes suivant le type ou les fournisseurs. Il est donc nécessaire d'étalonner précisément le doseur en fonction de la poudre utilisée. Le rendement de l'appareil se trouve également modifié en fonction des caractéristiques du produit utilisé.

a) Fermer la vanne d'arrivée d'eau (3)

b) Vérifier qu'il y'a 200 mm d'eau dans le compartiment C (soutirage) afin d'éliminer l'alarme Très Basse (TB).

c) Vérifier qu'il y'a 200 mm d'eau dans le compartiment A (préparation) lors du réglage du doseur, un peu de poudre risque de tomber dans cette cuve et la présence d'eau évitera la formation de grumeaux.

d) Appuyer sur le bouton « Départ de cycle » du coffret électrique. Le doseur de poudre démarre. Positionner le bouton de réglage de celui-ci sur la position « 1 ».

Récupérer dans une éprouvette. La poudre qui tombe à l'extrémité du conduit de chute pendant une minute (par exemple). Peser ensuite cette poudre. Noter le résultat et continuer ainsi jusqu'à la position « 12 ».

Ce travail terminé, on aura une courbe des débits exacte en fonction du réglage de l'appareil.

Si on change de polyélectrolyte et qu'il y'a une densité différente du précédent, les opérations de a) jusqu'à c) sont à refaire.

Après ces divers réglages eau et poudre, l'ensemble est prêt à fonctionner.

### III.6- Performance du groupe :

La courbe ci-dessous indique le débit maximal de soutirage en fonctionnement continu que peut fournir le groupe en fonction du temps de maturation du poly électrolyte ( le temps de maturation est indiqué par le fournisseur du poly électrolyte en poudre)[03]

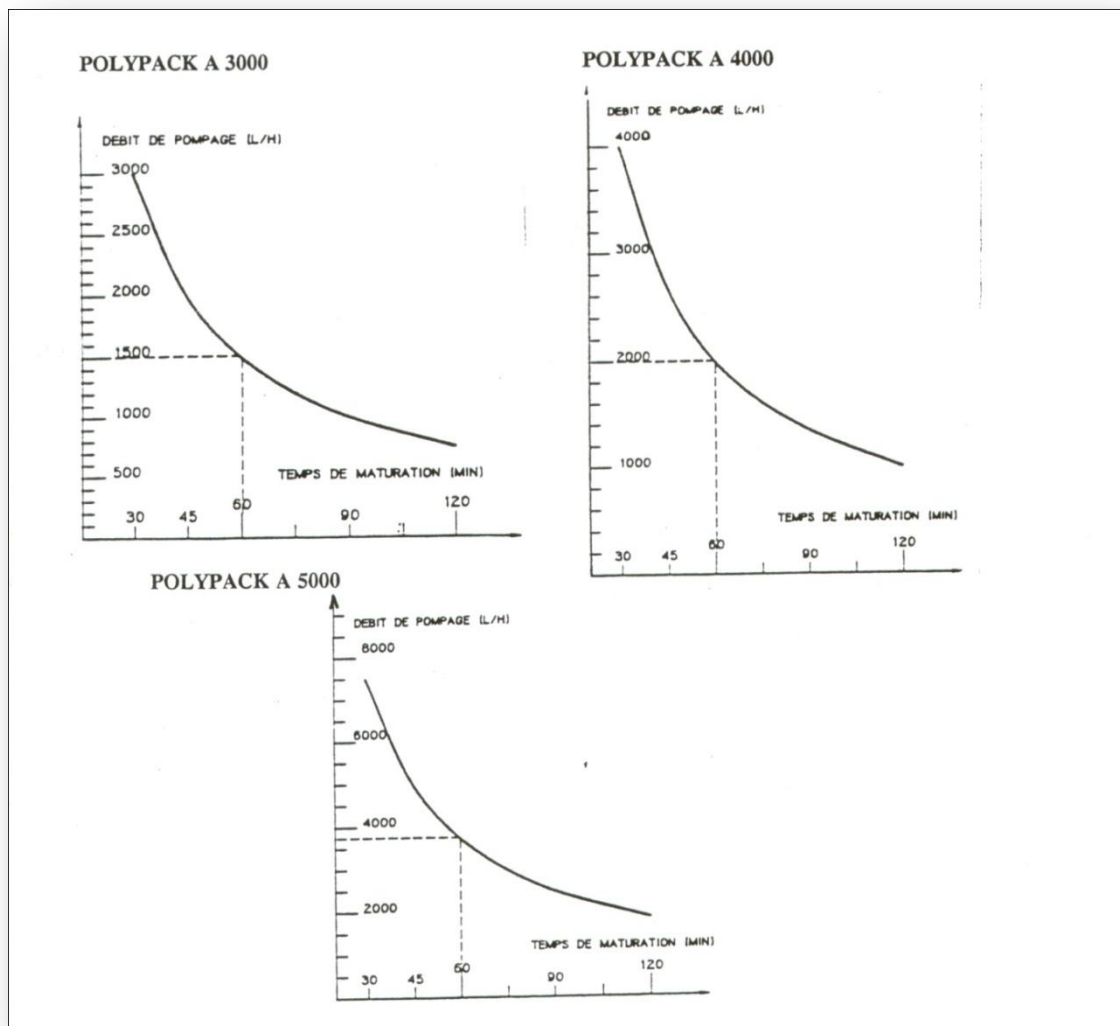


Figure III.5 Courbe de débit maximal [7]

Bien que l'ensemble soit une unité de production de polyélectrolyte en continu, le doseur de poudre et l'arrivée d'eau fonctionnent de façon discontinue pour permettre la maturation du produit.

#### **EXEMPLE :**

On désire soutirer en continu 3000 l/h de solution à 4 g/l .

1) pour pouvoir soutirer 3000 l/h, il faut que le temps de maturation du produit soit à 30 minutes

        Pour le POLYPACK A 3000.

2) l'arrivée d'eau doit être réglée à 6000 l/h

3) le doseur de poudre doit être réglé à /  $6000 \text{ l/h} \times 4 \text{ g} = 24\,000 \text{ g} = 24 \text{ kg/h}$

**Le doseur de poudre doit être réglé en fonction de l'arrivée d'eau et non du débit de soutirage.**

#### **➤ EXPLOITATION**

Le fonctionnement étant automatique, il n'y a pas de précautions particulières à prendre, Cependant il faut :

- Réapprovisionner régulièrement le doseur de poudre en fonction de la consommation.
- Avoir un débit de soutirage tel que le volume de solution utilisé pendant le temps de conservation du produit soit supérieur au volume total contenu dans les trois cuves.
- S'assurer que l'alimentation en eau ne subisse pas de variations ou de coupures.
- S'assurer périodiquement du bon état et de la propreté du conduit du doseur de poudre et du fonctionnement du système de dispersion de la poudre.
- En cas d'arrêt de fonctionnement prolongé, il est nécessaire de vidanger les bacs, Le doseur de poudre, de rincer à l'eau l'intérieur des cuves et les canalisations, car en séchant, le poly électrolyte forme une pellicule solide qui peut gêner la remise en marche. Il y'a lieu de faire un cycle à l'eau claire.



### **III. 7- Théories descriptives du phénomène de séchage**

#### **III.7.1- La théorie diffusionnelle**

La théorie diffusionnelle s'applique à des produits à structure continue. Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouvernée par la seconde loi de Fick qui permet d'exprimer le flux de matière au sein d'une particule en fonction du gradient d'humidité. Rappelons que la loi de Fick traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau [3], autrement dit du sein de la matière à sécher vers sa surface. Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits. Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques en la simple différence de concentration (et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits). Cette diffusivité ne peut être calculée que dans de rares cas. Il est pratiquement toujours nécessaire de la connaître. La diffusivité dépend de nombreux facteurs comme la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température [8].

#### **III.7.2 La théorie capillaire (1937)**

Elle s'applique à des produits poreux ou à des produits granulaires (dans ce dernier cas, les espaces entre les particules ont un comportement analogue à celui des pores). La théorie capillaire repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsque l'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on constate une élévation du niveau du liquide (appelée aussi ascension capillaire) dans le tube par rapport au niveau dans la cuve. [8]

La capillarité dans les produits se réfère à l'écoulement du liquide à travers les interstices jusqu'à la surface du produit, en raison de l'attraction moléculaire entre le liquide et le solide. Krischer de sa part démontre que la première période du séchage est contrôlée par la capillarité, ce qui est confirmé expérimentalement par Gorling sur la pomme de terre. D'autres théories ont été établies et développées en se basant sur les deux précédentes, tels

- La théorie de Krischer –Berger et Pei (1938)

Le premier suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires et dans l'état de vapeur au gradient de concentration de la vapeur. Les deux derniers proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillaires et au gradient de concentration; quant à la diffusion de la vapeur ; elle est due au gradient de pression de la vapeur.

- La théorie de Luikov (1934)

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité (le gradient de température est l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité).

- La théorie de Whitaker

C'est la théorie la plus récente (donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux) basée sur l'équation de continuité, de la quantité de mouvement, d'énergie pour les trois phases de la matière et des lois de la thermodynamique. [8]

### III.8. L'activité de l'eau dans un produit :

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

$$A_w = \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \quad (\text{Equation III.7})$$

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

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

### **III.8.1. Isothermes de sorption**

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

L'utilité des isothermes est double: d'une part, elles permettent de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage définies (température et humidité), appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation, particulièrement lorsque les matériaux sont fortement hygroscopiques (Coumans, 2000). A partir des isothermes, il est également possible de déterminer la chaleur isostérique de sorption qui est une mesure du degré de liaison de l'eau et de la quantité d'énergie à fournir pour libérer cette eau. Cette contribution énergétique doit être prise en compte lors du dimensionnement de sècheurs destinés à traiter des produits fortement hygroscopiques. [3]

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

### **III.8 .2. Formes et modèles des isothermes de sorption**

De nombreuses équations ont été proposées pour modéliser les isothermes. Certaines se basent sur un modèle théorique d'adsorption, alors que d'autres sont de nature empirique. Un inconvénient de ces relations est qu'elles ne sont pas applicables sur toute la gamme des humidités relatives. Le Tableau II 1 reprend les modèles les plus couramment utilisés.

L'équation de Langmuir (1918) fait référence à une adsorption mono-couche et n'est donc valable que dans la première partie de l'isotherme. Le modèle de Brunauer-Emmet-Teller (BET) tient compte d'une adsorption multicouche. Il suppose que la chaleur de sorption de la première couche est différente des couches suivantes, assimilées à de l'eau pure (Brunauer et al., 1938).  $X_m$  est la teneur en eau de la monocouche et  $C_{BET}$  la constante BET. [3]

Ce modèle est utilisé pour des isothermes de forme sigmoïdale, pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 40%. L'équation de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) peut être considérée comme l'amélioration du modèle BET en introduisant un comportement intermédiaire différent de l'eau pure pour les couches suivant la monocouche initiale (Anderson, 1946 ; De Boer, 1953 ; Guggenheim, 1966).

La zone de validité est très large ( $HR < 95\%$ ).  $CG$  est appelée la constante de Guggenheim et correspond à la chaleur de sorption totale de la première couche adsorbée.  $k$  est un facteur correctif tenant compte des propriétés de sorption des multicouches.

Les équations de Chung-Pfost (1967), d'Halsey (1948), d'Harkins-Jura (1944), d'Henderson (1952), de Kuhn (1967), d'Oswin (1946) et de Smith (1947) sont empiriques ou semi-empiriques. Certains de ces modèles existent également en versions dites modifiées afin de tenir compte de la température (Veltchev et Menkov, 2000).

**Tableau III.1 Modèles d'isothermes les plus couramment utilisés [9]**

Modèle	Formulation de $X_{eq}=f(H_r)$	Conditions d'utilisation
Langmuir	$X_{eq} = \frac{kn Hr}{1+Hr}$	Faibles $Hr$
BET	$X_{eq} = \frac{Xm C_{BET} Hr}{(1-Hr)(1+(C_{BET}-1)Hr)}$	$Hr < 0.5$
GAB	$X_{eq} = \frac{Xm C_G K Hr}{(1-KHr)(1+(C_G-1)KHr)}$	$0.1 < Hr < 0.9$
Chung-Pfost	$X_{eq} = \frac{1}{n} (\ln k - \ln(1 - \ln(Hr)))$	$0.2 < Hr < 0.9$
Halsey	$X_{eq} = \left(-\frac{k}{\ln Hr}\right)^{\frac{1}{n}}$	$0.1 < Hr < 0.8$
Harkins-jura	$X_{eq} = \left(-\frac{n}{\ln(Hr)-k}\right)^{\frac{1}{n}}$	$Hr > 0.8$
Henderson	$X_{eq} = \left(-\frac{\ln(1-Hr)}{k}\right)^{\frac{1}{n}}$	$0.5 < Hr < 0.95$
Kuhn	$X_{eq} = \frac{k}{\ln(Hr)} + n$	$Hr < 0.5$
Oswin	$X_{eq} = k \left(\frac{Hr}{1-Hr}\right)^n$	$0.1 < Hr < 0.9$
Smith	$X_{eq} = k \cdot n \ln(1-Hr)$	$0.5 < Hr < 0.95$

### III.8.3. Chaleur isostérique de désorption

La chaleur isostérique de désorption peut être calculée à partir d'une relation dérivée de l'équation de Clausius-Clapeyron (Équation III-2) (Labuza, 1984 ; Tsami et al., 1990 ; Veltchev et Menkov, 2000). Cette relation nécessite de déterminer les isothermes à différentes températures afin de calculer la variation logarithmique de l'humidité relative en fonction de l'inverse de la température, pour un teneur en eau d'équilibre fixée. Cependant, à partir des équations modifiées, il est possible d'obtenir l'expression analytique de la chaleur de sorption  $Q_s$

$$Q_s = -R \frac{d \ln \left( \frac{Hr}{100} \right)}{d \left( \frac{1}{T} \right)} \quad (\text{Equation III.8})$$

Avec :

$Q_s$  = chaleur isostérique de désorption .....( J<sup>-1</sup>)

R = constante des gaz parfaits .....( J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

Hr = humidité relative en %

T = température de l'air .....( K<sup>-1</sup>)

### III.9- Différentes étapes du séchage d'un produit humide

#### III.9.1 Caractéristiques de séchage de la boue

##### ➤ Matières sèches (Ms)

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

##### ➤ Calcul de la siccité (Si)

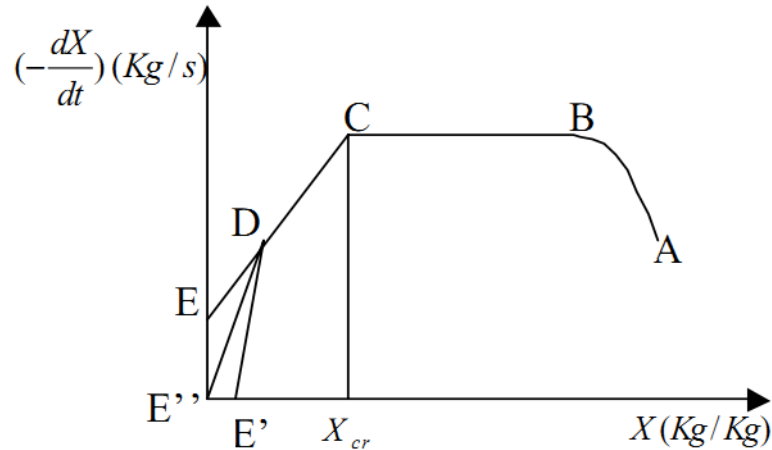
La siccité est le pourcentage de matière sèche. En effet, une boue avec une siccité de 10 % correspond à 90 % d'eau.

##### ➤ Etablissement des courbes de séchage

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

### III.9.2- Analyse de la cinétique de séchage

L'examen de l'allure des courbes de Krischer permet une première approche macroscopique du comportement du produit pendant le séchage. Sur la courbe schématisée présentée à la Figure III.1, on peut distinguer 3 ou 4 phases selon les cas. [5]



#### III.9.2.1- Période de mise en température

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

Cette période est généralement très courte vis-à-vis du temps de séchage total. Période à vitesse ou flux constant Pendant cette phase, souvent isenthalpique, l'eau est évacuée à flux constant (zone B-C).

Le qualificatif isenthalpique est employé lorsque la chaleur échangée par convection est intégralement utilisée pour la vaporisation de l'eau. Ceci n'est plus vrai lorsqu'une partie de la chaleur est échangée par rayonnement ou par conduction en plus de la convection. On considère que l'évaporation s'effectue à la surface du matériau et que la surface est couverte d'un film d'eau continu. [6]

L'eau éliminée est libre et la surface conserve la température humide mentionnée dans la première période. Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur du solide. Le flux de chaleur demeure constant lui aussi pendant toute cette période. Les résistances au transfert se situent presque exclusivement dans la couche limite.

La vitesse de séchage ne dépend donc principalement que des conditions externes, c'est-à-dire la vitesse superficielle, l'humidité et la température de l'agent séchant, la surface exposée au séchage et la pression.

Toutefois, l'état de surface peut avoir une importance : le flux peut être plus important pour une surface rugueuse que pour une surface plane (Geankoplis, 1993).

### **III.9.2.2- Les deux périodes de ralentissement**

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

### **III.9.2.3- Receding front model**

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

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

### **III.9.2.4- Wetted-surface model**

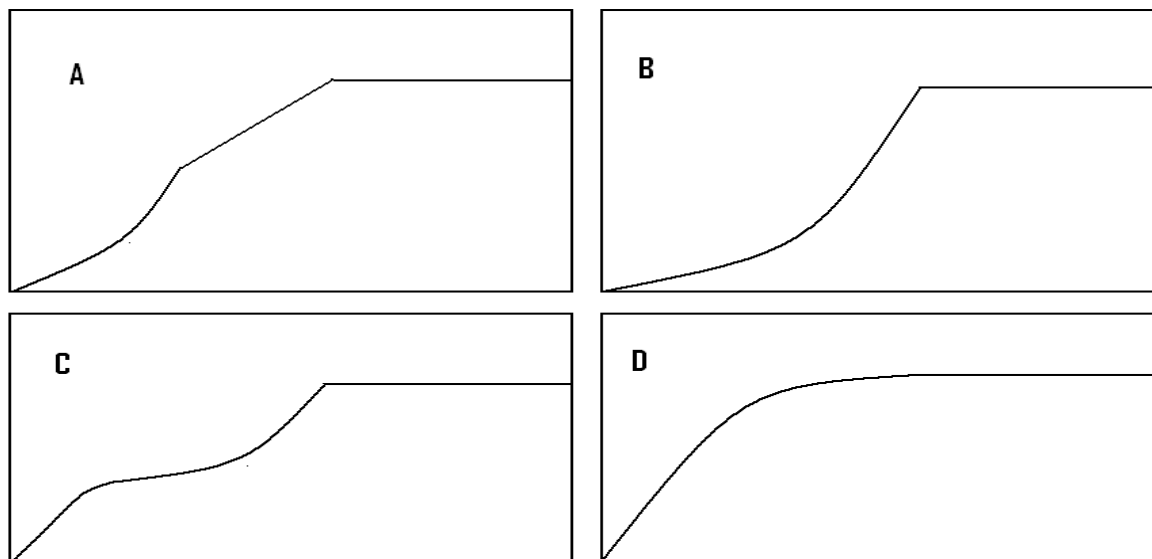
La chute du flux de séchage est liée à l'apparition de zones sèches à la surface du matériau, correspondant à une teneur en eau globale. Cependant, si on rapporte le flux à la fraction de surface mouillée, celui-ci est constant. Cette période se poursuit jusqu'à assèchement complet de la surface externe (Keey, 1978 ; Nadeau et Puiggali, 1995)(zone C-D). La seconde zone de ralentissement est le reflet d'un contrôle de la vitesse par la diffusion de l'eau à l'intérieur du matériau.

Le séchage se termine à teneur en eau nulle (zone D-E'') ou à  $X_{eq}$  pour les matériaux hygroscopiques (zone D-E'). Le front de séchage peut également se retirer dans le matériau et on retrouve alors le premier modèle .

### III.9.2.5- La classification de Sherwood

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

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



**Figure III.7 Types de courbes de flux en fonction de la teneur en eau sur base sèche référencées par Sherwood (1936). [8]**

Selon la forme de la courbe et l'orientation des concavités (Figure II.2), Sherwood (1936) fut l'un des premiers à proposer une classification portant sur l'importance plus ou moins grande des résistances aux transferts. La courbe B, de concavité tournée vers le haut, est typique d'un séchage contrôlé par des limitations intragranulaires ; la phase à flux constant décrite par la zone B-C sur la Figure II.1 n'est pas toujours présente. La courbe D, de concavité orientée vers le bas, illustre le cas inverse pour lequel les transferts sont limités par les transferts externes dans la couche limite.

La courbe A est un cas mixte: la portion de décroissance linéaire est contrôlée par des résistances externes au transfert, alors que la fin de la courbe ressemble à la courbe B (concavité vers le haut) et indique des limitations intragranulaires en fin de séchage. La courbe C correspond à un matériau dans lequel le front de séchage se retire. Au début du recul du front, la diffusion du liquide est limitante. Vers la fin du séchage, c'est la diffusion de l'eau en phase vapeur à travers le solide qui est limitante.



### III.10. Modélisation simplifiée des phases de séchage

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

#### III.10.1- Période à vitesse constante

Les résistances au transfert pendant cette période sont presque exclusivement confinées dans une couche limite à la surface du matériau humide. La nature et la structure interne du solide n'interviennent pas. Dans ce cas, les quantités de matière (Équation III-10) et de chaleur (Équation III-11) peuvent être exprimées comme le produit d'un coefficient de transfert ( $k$  ou  $h$ ) et d'un potentiel moteur au transfert. La quantité de chaleur est liée à celle de matière via la chaleur latente de vaporisation (Équation III-9).

$$Ms\left(-\frac{dX}{dt}\right) = KS(p_{sat} - Pv) \quad \text{Equation III.10}$$

$$Q = hS(T_a - T_s) \quad \text{Equation III.11}$$

$$Q = Ms\left(-\frac{dX}{dt}\right)Lv \quad \text{Equation III.12}$$

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

$$Ms\left(-\frac{dX}{dt}\right) = KS(P_{sat}(T_h) - Pv) \quad \text{Equation III.13}$$

Lorsqu'une autre forme d'énergie telle que l'énergie solaire intervient, la surface du produit pendant cette phase a une température supérieure à la température humide. La valeur de cette température de quasi-équilibre est donnée par l'équilibre entre l'apport d'énergie thermique sous toutes ses formes (convective et radiative) et la consommation de l'énergie pour l'évaporation de l'eau. L'équation (Équation III-13) montre qu'une augmentation du flux peut donc être provoquée par :

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

Les coefficients de transferts de chaleur et de matière peuvent être déterminés à partir de la mesure du flux pendant cette période contrôlée par les résistances extra granulaires (cf. Éq. III.10 et III.11).

Lorsque l'activité de l'eau devient inférieure à 1, on peut observer que la température à l'interface augmente et que le potentiel moteur diminue suite à l'abaissement de la teneur en humidité à l'interface. Progressivement les résistances intra granulaires deviennent limitantes. [8]

### III.10.2. Période à flux décroissant

#### III.10.2.1- Modes de transport de l'eau

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

On peut également inclure dans cette catégorie les matériaux dont les pores sont suffisamment fins ( $r_p < 0.1 \mu\text{m}$ ) pour lesquels le liquide est réparti uniformément et les matériaux fibreux. Bien que le transport de l'eau puisse être très complexe dans cette dernière catégorie (forces osmotiques, capillaires,...), il est assimilé à la diffusion pour la modélisation (Vanderschuren, 2000).

Le transport s'effectue aussi par diffusion lors de la fin du séchage de certains matériaux comme l'argile, l'amidon, la farine, le papier, le bois, ... Les modèles utilisés se basent sur la loi de Fick (Éq. III.14).  $J$  est le flux en  $\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $D$  le coefficient de diffusion en  $\text{m}^2/\text{s}$  et  $C$  la concentration en  $\text{kg/m}^3$ .

$$J = -D \nabla C \quad \text{Equation III.7}$$

Dans les milieux granulaires ou capillo-poreux ( $r_p > 0.1$  à  $1 \mu\text{m}$ ), le transfert de liquide est assuré par capillarité (papier, textile, sable, briques,...). Le transfert de liquide obéit à la loi de Darcy (Éq. II.8). Le mouvement de l'eau s'effectue dans le sens des pressions négatives croissantes, c'est-à-dire vers les zones où le liquide est en tension.  $K$  est la perméabilité en  $\text{m}^2$ ,  $\mu$  la viscosité dynamique en  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ , la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  et  $P_1$  la pression de liquide en  $\text{Pa}$ .

$$J = -\rho \frac{K}{\mu} \nabla P_1 \quad \text{Equation III.8}$$

Quand l'eau se trouve sous forme de vapeur, son déplacement peut s'effectuer par diffusion (receding front) ou diffusion-sorption dans le cas de vapeur d'eau liée. Historiquement, les premières études sur le séchage ne considéraient que le mode de transport par diffusion suivant la loi de Fick (Lewis, 1921 ; Sherwood, 1929).

Quelques années plus tard, notamment sous l'impulsion des recherches dans le domaine de la physique des sols, le transport de liquide lors du séchage de matériaux poreux a été attribué à la capillarité (Comings et Sherwood, 1934).

Ceaglske et Hougen (1937) ont émis des restrictions quant à l'utilisation du concept de diffusion de liquide et ils ont affirmé que le transport d'eau est induit par des gradients de pression dans les solides granulaires.

Le mécanisme de transport d'eau par diffusion est souvent utilisé en modélisation même si certaines réserves peuvent être émises sur le sens physique d'un tel mécanisme. [9]

### III.11-Modélisation

La zone de séchage à flux décroissant peut être modélisée par des lois comportementales simples. Le modèle décrit par l'Equation III.16 exprime la décroissance du flux observée sous la teneur en eau critique  $X_{cr}$  reliée par une loi de puissance à la réduction de la teneur en eau. Cette écriture permet de rendre compte, de manière simple, la cinétique de séchage de différents types de produits séchés dans diverses configurations (Nadeau et Puiggali, 1995).

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right) (T, Hr, Ui) \left(\frac{X-X_{eq}}{X_{cr}-X_{eq}}\right)^\beta \quad \text{Equation III.16}$$

L'écriture et l'intégration des bilans complets de matière et de chaleur ont été largement étudiées dans le cas de solides rigides. Depuis les premiers travaux de Lewis (1921) jusqu'à ce jour, des modèles phénoménologiques de plus en plus élaborés ont été proposés par différents auteurs. Luikov (1966) a appliqué la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour modéliser le transfert couplé de chaleur et de matière dans un milieu poreux. Plus tard, il proposa un modèle à deux zones dans le cas de solides capillo-poreux qui développent une zone sèche en surface (receding front model) (Luikov, 1975).

Pour la détermination des coefficients de transfert de masse, Suzuki et Maeda (1968) formulèrent un modèle tenant compte de la coexistence de zones sèches et humides à la surface du matériau. Krisher et Kast (1978) ont proposé un modèle 'multi-mécanisme' en considérant que le transfert d'eau s'effectue par capillarité et par diffusion en phase gazeuse.

La théorie de la prise de moyenne sur un volume élémentaire représentatif a été introduite dans le domaine du séchage par Whitaker (1977). Perré a développé des outils mathématiques adaptés à cette théorie (Perré et Degiovanni, 1990 ; Perré et Turner, 1999).

#### III.11.1- Courbe caractéristique de séchage

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

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

C'est ainsi que Van Meel (1957) puis Krischer et Kast (1978), ont proposé un mode de représentation des résultats de différentes expériences permettant, pour un produit donné, de tracer une courbe unique dite courbe caractéristique de séchage. Cette courbe permet le regroupement de résultats acquis dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air.[10]

### **III.12- Model numérique de séchage solaire sous serre**

Pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés du séchage solaire sous serre des boues, il apparaît nécessaire de développer une meilleure connaissance de l'outil 'serre-boue', ceci afin d'aboutir à des règles de conception moins empiriques qu'actuellement et prenant mieux en compte les processus mis en jeu.

L'intégration des connaissances acquises sous forme d'un modèle global de séchage solaires de boues résiduaires urbaines a pour but de permettre, pour une configuration de système donnée, de prévoir l'évolution de la vitesse de séchage nécessaires à l'obtention d'une siccité souhaitée. Par ailleurs la conception du modèle devra pouvoir intégrer en entrée la prise en compte des conditions climatiques locales (ensoleillement, températures moyennes, etc.) du lieu d'implantation du dispositif de séchage. [7]

Le modèle recherché devra par ailleurs permettre de comparer différents mode de conduite du procédé et donc œuvrer à une gestion plus optimale de ce moyen de séchage. D'une manière générale, quel que soit le produit à sécher, les éléments de base à représenter pour construire un modèle de sècheur solaire direct sont les suivants :

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

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

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

Les différents modes de transferts thermiques mis en jeu sont:

- les apports solaires au travers du matériau de la couverture ;
- les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments ;
- les échanges de convection à la surface de la couverture et à celle de la boue ;
- l'évaporation au niveau de la boue ;

- le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique

### **III.12.1- Description du modèle**

Les différences entre les modèles proposés dépendent notamment du mode de représentation des phénomènes mis en jeux, des hypothèses posées pour simplifier leur représentation mathématique, des valeurs estimées ou mesurées des paramètres caractéristiques, notamment ceux liés à la nature du produit à sécher. [5]

Le modèle proposé repose sur une approche globalement similaire: c'est un modèle de connaissance dynamique mono dimensionnel, qui s'articule autour de la formulation des bilans d'énergie instantanés des différents composants de la serre. Chacun des éléments du modèle est caractérisé par une variable d'état: la température.

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

- la serre est considérée comme un système physique dont les conditions aux limites sont les données météorologiques (température et humidité de l'air extérieur, vitesse du vent, rayonnement solaire global) ;
- la couverture de la serre est considérée comme une surface de faible épaisseur où l'échange par conduction entre la face extérieure et intérieure peut être négliger.

Sont négligés les apports énergétiques éventuels:

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

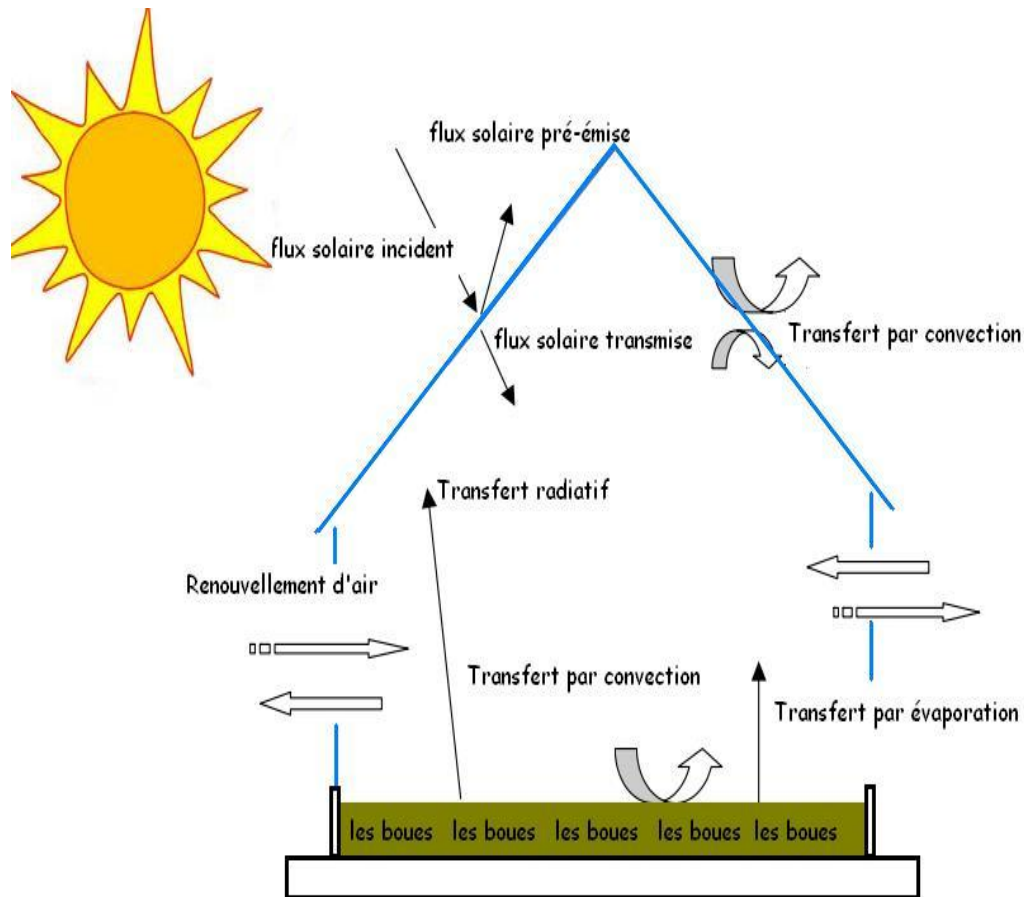


Figure III.8 Schéma de mécanismes dans un modèle de sécheur solaire [8]

### III.12.2- Analyse physique du modèle

#### III.12.2.1- Représentation des composants de la serre

Basé sur les travaux de thèse de Doctorat de Houa Amadou [3] l'analyse physique du modèle est représentée par des composants suivants :

##### ➤ Géométrie global de la serre

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

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

### ➤ Représentation de la couverture

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

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

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

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

### ➤ Représentation de l'air intérieur

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

La température de l'air ainsi définie doit être considérée comme une valeur moyenne conduisant aux mêmes effets globaux.

### ➤ Représentation de la boue

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

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

### ➤ Représentation du plancher

Le support de la boue dans les serres industrielles est une dalle en béton. Certains procédés comme Heliocycle développé par le groupe Saur intègre à la dalle des plaques chauffantes. La plaque chauffante est constituée de tubes circulaires régulièrement espacés.

A l'intérieur des tubes circulent de l'eau à une température élevée. Le transfert thermique par conduction entre la boue et son support est ainsi négligé.

➤ **Environnement extérieur**

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

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

**III.12.2.2- Ecriture des bilans thermiques et massiques**

Pour construire le modèle mathématique, la méthode des bilans thermiques pour chaque composant est utilisée. En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du modèle.[9]

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

$$\Delta E = W + Q \text{ ou } E_2 - E_1 = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2} \quad \text{Equation III.17}$$

Le premier principe est aussi connu sous le nom de principe d'équivalence, dans la mesure où il exprime l'équivalence entre les diverses formes d'énergie.



En d'autres termes, il s'agit d'un bilan global dans lequel l'énergie peut se manifester ou se transformer sous une forme ou une autre.

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

$$\frac{dE}{dt} = P_{méca} + P_{cal} \quad \text{Equation III.18}$$

➤ **Convention de notation des flux**

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

$$\Phi_{\text{IndF IndE IndR}}$$

Avec :

IndF = indice correspondant à la nature du flux

IndE = indice correspondant à l'élément émetteur

IndR = indice correspondant à l'élément récepteur

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

**Tableau III.I1 Récapitulatif de la notation des flux [8]**

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

### III.12.2.2.1- Bilans énergétiques :

#### ➤ Bilan sur la couverture :

$$\Phi_{Rc} + \Phi_{Icv} + \Phi_{Icb} - \Phi_{Ccae} + \Phi_{caic} = \Phi_{ic} \quad \text{Equation III.19}$$

avec :

$\Phi_{Rc}$  = flux net de rayonnement solaire reçu par la couverture

$\Phi_{Icv}$  = flux de rayonnement infra rouge émis vers la voûte céleste

$\Phi_{Icb}$  = flux de rayonnement infra rouge émis vers la boue

$\Phi_{Ccae}$  = flux convectif de la couverture vers l'air extérieur

$\Phi_{caic}$  = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture

$\Phi_{ic}$  = flux d'accumulation d'inertie thermique de la couverture

#### ➤ Bilan sur l'air intérieur

$$\Phi_{cbai} - \Phi_{caiae} - \Phi_{caic} = \Phi_{iai} \quad \text{Equation III.20}$$

avec :

$\Phi_{cbai}$  = flux convectif de la boue vers l'air intérieur

$\Phi_{caiae}$  = flux convectif de l'air intérieur vers l'air extérieur

$\Phi_{caic}$  = flux convectif de l'air intérieur vers la couverture

$\Phi_{iai}$  = flux d'accumulation d'inertie thermique de l'air intérieur

#### ➤ Bilan thermique de la boue

$$\Phi_{Rb} + \Phi_{Ibc} - \Phi_{Cbai} - \dot{m}Lv = \Phi_{ib} \quad \text{Equation III.21}$$

avec :

$\Phi_{Rb}$  = flux net de rayonnement solaire reçu par la boue

$\Phi_{Ibc}$  = flux de rayonnement infra rouge émis vers la couverture

$\Phi_{Cbai}$  = flux convectif de la boue vers l'air intérieur

$\Phi_{ib}$  = flux d'accumulation d'inertie thermique de la boue

$\dot{m}$  = flux massique d'eau évaporée de la boue

$Lv$  = chaleur latente de vaporisation de l'eau

### III.12.2.2.2- Bilans massiques :

#### ➤ Bilan massique en eau sur la boue :

$$\dot{m} = Ms \left( -\frac{dX}{dt} \right) \quad \text{Equation III.22}$$

avec :

$\dot{m}$  = flux massique d'eau évaporée de la boue

$M_s$  = masse sèche de la boue  
 $X$  = teneur en eau de la boue en base sèche  
 $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$  = vitesse de séchage

### III.13- Expression des flux énergétiques

#### III.13.1- Flux radiatifs solaires

Ce sont les flux liés au rayonnement émis par le soleil, et dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 0,2 et 2,5  $\mu\text{m}$ . L'intensité du rayonnement parvenant au sol se répartit pour moitié dans le visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ ), et pour moitié dans l'infrarouge de courte longueur d'onde (au delà de 0,8  $\mu\text{m}$ ), une très faible part se situant dans l'ultraviolet. [11]

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

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

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

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

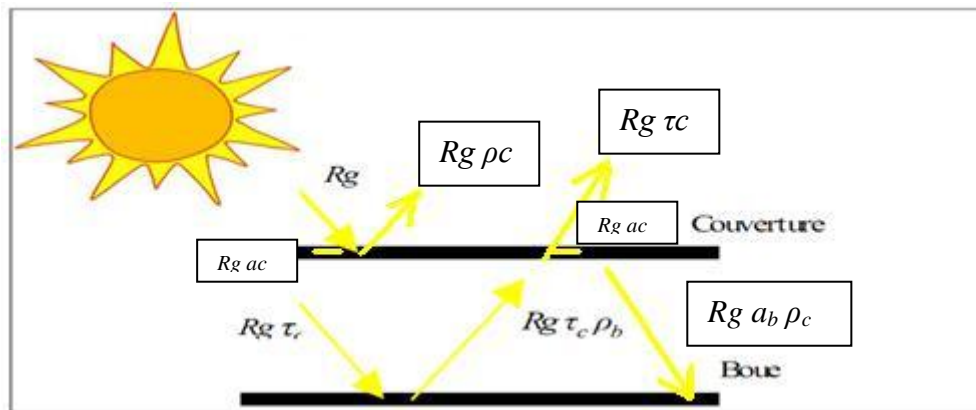


Figure III.9 Schéma des flux solaires absorbés [3]

➤ **Flux net absorbé par la couverture**

$$\varphi_{Rc} = Rg a_c (1 + \tau_c \rho_b) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III.23}$$

avec :

$Rg$  = intensité du rayonnement solaire ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$a_c$  = coefficient d'absorption de la couverture (-)

$\tau_c$  = coefficient de transmission de la couverture (-)

$\rho_b$  = coefficient de réflexion de la couverture (-)

➤ **Flux net absorbé par la boue**

$$\varphi_{Rb} = Rg \tau_c a_b \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III.24}$$

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

➤ **Flux radiatifs Infrarouges**

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

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

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

➤ **Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture**

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

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

$$\varphi_{Icv} = \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III.25}$$

avec :  $\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzmann  $(\text{W/m}^2/\text{K}^4)$   
 $\varepsilon_c$  = émissivité de la couverture  $(-)$   
 $T_v$  = température de la voûte céleste  $(\text{K})$   
 $T_c$  = température de la couverture  $(\text{K})$

La température équivalente de la voûte céleste est donnée par la relation de Swinbank (1963) : [10]

$$T_v = 0.0552 T_{ae}^{1.5} \quad (\text{K}) \quad \text{Equation III.26}$$

avec :  $T_{ae}$  = Température de l'air extérieur  $(\text{K})$

### ➤ Flux radiatif infrarouge au sein du modèle

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

Ce flux est encore égal au flux net échangé entre  $S_b$  et  $S_c$ .

Nous avons donc l'égalité :  $\varphi_{Icb} = -\varphi_{Ibc}$

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

$$\varphi_{Ibc} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) \quad \text{Equation III.27}$$

Avec :  $\varepsilon_b$  = Emissivité de la boue  $(-)$

$T_b$  = Température de la couverture  $(\text{K})$

### III. 13.2- Flux convectifs

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

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

2ème phase : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide. Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue:

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

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

$$\varphi_{Csf} = h S (T_s - T_f) \quad (\text{W}) \quad \text{Equation III.28}$$

avec :  $h$  = coefficient de convection  $(\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C})$

$S$  = surface d'échange  $(\text{m}^2)$

$T_s, T_f$  = Températures respectives du solide et du fluide  $(^\circ\text{C})$

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

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

#### ➤ **Echange convectif milieu extérieur / couverture**

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

$$h_e = a + b.Uv \quad (\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{°C}^{-1}) \quad \text{Equation III.29}$$

Avec :  $Uv$  = vitesse du vent  $(\text{m}/\text{s})$

$$a = 5.67 \quad (\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{°C}^{-1})$$

$$b = 3.86 \quad (\text{W}.\text{m}^{-3}.\text{s}.\text{°C}^{-1})$$

#### ➤ **Echange convectif au sein du modèle**

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

$$Nu = h \frac{L}{\lambda} \text{ d'où } h = Nu \frac{\lambda}{L} \quad (\text{W/m}^2/\text{°C}) \quad \text{Equation III.30}$$

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

$$Nu = a(Pr)^m (Re)^n \quad \text{Equation III.31}$$

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

ou :

$$\text{Nombre de Reynolds : } Re = \frac{U L}{v}$$

Avec :

$U$  = vitesse moyenne de l'air (m/s)

$Cp$  = chaleur massique de l'air sec (W/m<sup>-1</sup>.°C)

$L$  = longueur caractéristique (m)

$\rho$  = masse volumique de l'air (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = viscosité cinématique de l'air (m<sup>2</sup>/s)

$\lambda$  = conductivité thermique de l'air (W/m<sup>-1</sup>.°C)

Les relations utilisées pour calculer les différentes grandeurs ( $\rho$ ,  $v$ ,  $\lambda$ ,  $Cp$ ) qui interviennent dans les nombres adimensionnels se trouvant à l'annexe I. La variabilité des hypothèses de calcul, la détermination expérimentale de valeurs par l'intermédiaire de maquettes (qui met à profit l'aspect adimensionnel des coefficients) ont conduit les auteurs à proposer des formules de calcul de  $h$  très différentes les unes des autres.

Il a été retenu, l'expression du coefficient de convection entre la paroi interne du séchoir et l'air asséchant, ainsi que entre la boue et l'air asséchant – la surface de la boue est assimilée à une surface plane- la corrélation proposée par Sacadura (1978) pour un écoulement d'air sur une plaque plane:

$$Nu = 0.66Re^{0.5}Pr^{1/2} \quad Re \leq 10^5 \text{ et } 0.6 \leq Pr \leq 15$$

$$Nu = (0.0337Re^{0.8} + 872)Pr^{1/3} \quad 5.10^5 < Re \leq 10^7$$

$$Nu = 0.0336Re^{0.8}Pr^{1/3} \quad Re > 10^7 \text{ et } 0.5 \leq Pr \leq 50$$

Equation III.32

### ➤ L'échange convectif dû au renouvellement d'air intérieur

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

$$\varphi_{Caiae} = \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (\text{W}) \quad \text{Equation III.33}$$

avec :

$C_p$  = chaleur massique de l'air sec  $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$

$\rho$  = masse volumique de l'air  $(\text{kg}/\text{m}^3)$

$Q$  = débit volumique de l'air  $(\text{m}^3/\text{s})$

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

$$Q = RV \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{Equation III.33}$$

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

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

### III.13.3- Transfert de masse :

Les transferts de masse sont liés aux évaporations au niveau de la boue. Le transfert de matière peut être calculé à partir de la valeur du flux, en se basant sur l'équation (Équation III.10) et son équivalent pour le transfert de chaleur (Équation III-11).

$$M_s \left( -\frac{dx}{dt} \right) = KS(P_{sat} - P_v) \quad (\text{kg}_{\text{eau}}/\text{s}) \quad \text{Equation III.34}$$

avec :

$P_{sat}$  = pression de vapeur saturante à la température de la boue (Pa)

$P_v$  = pression partielle de vapeur à la température de l'air asséchant (Pa)

$K$  = coefficient de transfert massique ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )

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

$$K = \frac{h}{\rho C_p} \quad (\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}) \quad \text{Equation III.35}$$



### ➤ Inertie thermique

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

$$\varphi_i = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{W}) \quad \text{Equation III.36}$$

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

### III.14- Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation

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

- les isothermes de sorption, qui caractérisent l'interaction eau-solide dans les boues ;
- la chaleur massique, quantifie l'énergie emmagasinée par la boue pour augmenter sa température d'un degré.[10]

Ces paramètres sont utiles pour le dimensionnement des séchoirs. En effet l'intérêt des isothermes est double: d'une part, elles permettent de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage définies (température et humidité), appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation.

### **III.15-Synthèse bibliographique sur la modélisation des procédés de séchage solaire des boues**

Le séchage solaire des boues repose sur la mise en contact, sous une serre, d'un air régulièrement renouvelé et d'une boue étalée sur une dalle béton et brassée mécaniquement. Un système de ventilation assure un écoulement de l'air dans la serre afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide. A ce jour, au niveau bibliographie, il n'existe que très peu de travaux abordant spécifiquement la modélisation des procédés de séchage solaire appliqués aux boues résiduaires urbaines

**Botramamy (2006)** [1] : étudie la modélisation et l'identification d'un procédé de commande d'un séchoir de type serre agricole pour boue d'épandage. Ce travail est consacré à la modélisation d'un séchoir serre et à étudier l'influence du chauffage de la boue à travers son support (la dalle) chauffé au moyen de réseaux de tubes enterrés véhiculant de l'eau chaude. Le travail s'est porté également à établir une commande de température et d'humidité relative pour le séchoir. « Modélisation et régulation d'un séchoir-serre pour boues d'épandage » soutenue en 2006 sous la direction de [Alfred Gonzalez - Perpignan](#)

**A. Scrivani et al.,** ( 2007) [ 2 ] :Ils examinent le concept de type utilisant les creux centrales solaires de concentration pour l'eau production, l'assainissement et le traitement des déchets. Plantes résiduelles solaires sont une technologie mature qui mérite d'être diffusée dans toute l'Union européenne et dans les pays partenaires de la région méditerranéenne. le présente étude vise à trouver des applications du solaire à travers la technologie de concentration au-delà de la chaleur et réfrigération. Au stade actuel, un certain nombre de possibilités ont été identifiées, dont les principales qui seront considéré ici sont liés à la production propre de l'eau par des procédés tels que la distillation solaire, atmosphérique la condensation, et le traitement des déchets.

Ils discutent de leurs avantages économiques et environnementaux potentiels par rapport aux solutions existantes .

« **Solar trough concentration for fresh water production and waste water treatment** » (Desalination 206 (2007) 485–493).

**S. Pierucci et G. Buzzi Ferraris** ( 2010 ) [ 3 ] :Ils étudient , deux modèles complémentaires sont utilisées pour observer et prédire le fonctionnement des unités Solia™ à différentes échelles temporelles et spatiales. Un modèle 3D informe sur les aspects solaires et les profils internes des phénomènes multi-physiques. A 0D modèle intègre cinétique de séchage et une nouvelle approche en andain stratifié pour prévoir l'efficacité du cycle de séchage sur une échelle de temps grande.

Ces outils sont confrontés à données expérimentales acquises sur une unité Solia™ situés à Fonsorbes (France).

« **Modelling of the solar sludge drying process Solia™** » (20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20).

**Mathioudakis V.L et al., ( 2009 ) [ 4 ]** : Règlements de plus en plus strictes en matière de gestion des boues a suscité l'intérêt sur le séchage technologies. La faisabilité des boues d'épuration dans les serres de séchage solaire a été évaluée par expériences dans un m<sup>2</sup> échelle serre pilote 66 dans des conditions climatiques typiques de la Grèce. La serre était équipé de ventilateurs et d'un tambour tournant pour le mélange des boues. La période de séchage de boues séchées avec siccité > 70% varie entre 8-31 jours en fonction des conditions météorologiques. Pendant le séchage, le contenu organique des boues est diminuée par 5-21% et la teneur totale et coliformes fécaux dans les boues est réduite jusqu'à 3 ordres de grandeur. « **Sewage solar sludge drying in a pilot scale greenhouse** » (Department of Environmental Engineering, Democritus University of Thrace, 12 Vas. Sofias Str. Xanthi, 67100, Greece).

**Haoua AMADOU ( 2007 ) [ 5 ]** : Le développement d'un modèle numérique simulant le transfert d'eau de la boue lors du séchage solaire sous serre est abordé dans le chapitre III de ce travail. Une mise en équations des différents phénomènes complexes est effectuée. Le modèle développé est constitué de trois équations de bilan d'énergie et d'une de transfert de matière, couplées et non linéaires. Une approche de résolution numérique du problème est également présentée. « **Modélisation du séchage solaire sous serre des Boues de stations d'épuration urbaines** » These présentée pour obtenir le grade de (Docteur de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg Discipline: Sciences pour l'Ingénieur ÉCOLE DOCTORALE MSII Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur I (2007) U.P.R.SHU N°99026201

**Lyes Bennamoun ( 2012 ) [ 6 ]** : Séchage solaire a été bénéficié que d'utiliser l'énergie solaire gratuite peut réduire le coût de l'opération. D'autre part, elle joue un rôle important pour la réduction des agents pathogènes jusqu'à ce que l'Environmental Protection Agence (EPA) des recommandions. Dans certains cas étudiés, la valeur de 1000 CFU g-1 DS, qui représente la classe EPA Un agent pathogène exigence, pour les coliformes fécaux a été atteint. La conception générale des séchoirs solaires utilisés était constitué de: une serre fait avec un matériau transparent et un étage, où le produit est transpercé en couches épaisses. De plus, les ventilateurs et les ventilations peuvent être utilisées afin d'avoir une répartition homogène de l'air à l'intérieur de la serre avec le remplacement de l'air humidifié avec une douce. Mélange automatique ou la poignée de le produit a été utilisé une fois par jour ou plusieurs fois « **Solar drying of wastewater sludge** » (Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 1061–1073).

**L. Bennamoun<sup>1</sup>\* et A. Leonard ( 2011 ) [ 7 ]** : Ils travaillent sur, des résultats expérimentaux relatifs au séchage de boues générées dans deux stations d'épuration d'eaux usées sont présentés. Les expériences ont été effectuées dans un sécheur convectif reproduisant le fonctionnement d'un sécheur à bandes. Pour chaque essai, 1 kg de produit humide est extrudé en cylindres de 12 mm de diamètre sur une grille perforée au travers de laquelle l'air chaud circule. Le produit est séché jusqu'à élimination de la totalité de l'humidité initialement présente. Les résultats obtenus montrent que le procédé est affecté par plusieurs paramètres, tout particulièrement les conditions externes. « **Etude expérimentale et modélisation du séchage de boues générées par l'épuration des eaux usées** » (Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 1 – 12)

➤ **application du séchage solaire et à la déshydratation de produits agroalimentaire (fruits, légumes notamment).**

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

Dans ce domaine, plusieurs modèles énergétiques de serre ont été également publiés, dont celui de :

- 1- **Comary et Nicolas (1985)**, qui présentent un ouvrage de synthèse permettant d'appréhender les problèmes de la serre dans leur globalité. Leur modèle de serre, très complet, établit le bilan énergétique dynamique de dix sept composants, avec la possibilité de tenir compte d'un écran thermique.
- 2- **Monteil (1985)** présente une modélisation fine du comportement énergétique de la serre agricole et détaille particulièrement l'analyse des échanges par rayonnement infrarouge long et développe un outil informatique d'aide au dimensionnement de la puissance du système de chauffage principal et d'appoint d'une serre.

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

- 3- **Boumediene TOUATI : (2008) [ 8 ]** développer un code de calcul permettant de simuler le séchage solaire en convection forcée de cette plante, une détermination expérimentale des isothermes de sorption a été menée à l'aide de la méthode des solutions de sels saturés. Les courbes de sorption ainsi obtenues sont ensuite

approchées par des modèles empiriques et semi-empiriques utilisables dans un modèle numérique d'un séchoir. Le modèle développé dans ce travail permettra de dimensionner un séchoir et d'étudier son fonctionnement dans le cas d'utilisation avec un capteur solaire afin de définir les conditions optimales de séchage. « **Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte** » (Université Abu bakr balkaid Tlemcen )(2008).

- 4- **Atul Sharma et al., : (2009) [ 9 ]** Un examen détaillé des différents modèles, détails des principes de construction et d'exploitation de la grande variété de pratiquement réalisés conceptions de systèmes de séchage solaire en énergie rapportés précédemment sont présentées. Une approche systématique pour classification des séchoirs à énergie solaire a été évoluée. Deux groupes génériques de séchoirs à énergie solaire peut être identifiés, à savoir. séchoirs solaires à énergie passive ou à circulation naturelle et active ou à convection forcée séchoirs à énergie solaire. Certains développements très récents dans la technologie de séchage solaire sont mis en évidence. « **Solar-energy drying systems** » (Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1185–1210)
  
- 5- **S. El Mokretar et al., (2004) [9]** Ils étudient le bilan énergétique d'un séchoir solaire de type serre et le relevé temporel des paramètres suivants : • les différentes composantes du rayonnement solaire, • le taux d'humidité relative et les valeurs de température de l'air asséchant dans notre modèle, • Les pertes de masse, par convection naturelle, de certains produits agroalimentaires. Le séchoir expérimental a été conçu et réalisé au C.D.E.R. (Alger). Il comprend un système de stockage d'énergie composé d'un lit de galets. Les parois latérales et le plancher sont isolés thermiquement. Deux inclinaisons sont envisagées pour les vitrages: un vitrage fortement incliné ( $55^\circ$ ) maximisant la captation de l'énergie solaire pendant la période froide, et un autre, incliné de  $15^\circ$  permettant d'optimiser la transmission du rayonnement en saison estivale. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux d'énergie prend en compte, comme conditions initiales, les caractéristiques du climat extérieur. Un système de 06 équations différentielles du premier ordre régissant le fonctionnement du séchoir serre est résolu par la méthode numérique de Runge - Kutta au 4ème ordre. Les coefficients d'échange, par rayonnement et convection, sont déterminés en fonction du temps. L'écart maximum entre les résultats théoriques obtenus, comparé à ceux relevés expérimentalement est inférieur à 20 %. **Etude du Bilan d'Energie et de Masse d'un Séchoir de Type Serre Applications au Séchage des Produits Agro- alimentaires** (Rev. Energ. Ren. Vol. 7 (2004) 109-123).

### **III.16-Conclusion**

Un séchoir solaire est un dispositif permettant se sécher la boue par circulation d'air chauffé, l'apport en énergie est fourni par le solaire.

Le séchage est caractérisé par plusieurs paramètres : la température de séchage, la vitesse de séchage, la durée d'exposition le dimensionnement du dispositif de séchage, le taux de siccité (taux d'humidité), les caractéristiques des matériaux absorbants, transparents et isolants.

Le développement d'un modèle mathématique, pour le séchage solaire sur couche mince des boues, par utilisation d'un séchoir solaire direct dans les conditions écologiques typiques du temps avec l'extraction des bilans énergétique dans le model étudié.

Le problème du séchage a été étudié par plusieurs scientifiques notamment la modélisation du séchage solaire des produits (boues) ainsi que les études des dispositifs.

## Références :

- [1] Boudez, j-c., Rhéologie et physico-chimie des boues résiduelles pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage. Thèse de doctorat Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF) de Paris (2001).
- [2] Nadia Chalal « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect » soutenu le 16/12/2007 Université Mentouri- Constantine.
- [3] Haoua Amadou « Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station dépuratoire Urbains » Thèse de doctorat Université Louis Pasteur- Strasbourg I Discipline: Sciences pour l'ingénieur Soutenue 04/05 /2007.
- [4] Mr.Yousfi Mustapha « Etude d'un séchoir solaire de boue » soutenue le 24/10/2011 Université abu bakr balkaid-Tlemcen.
- [5] Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par micro-tomographie à rayons x, Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège (2002).
- [6] Kazakura, T., et Hasatani, M., "R&D needs - Drying of sludges," Drying Technol., 14, 1389- 1401 (1996).
- [7] Legrand, V., Etude du gonflement et de la floculation de gels de polyelectrolytes : application à la déshydratation des boues de stations d'épuration. PhD thesis, Université Paris VI, (1997).
- [8] Boussalia Amar « Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux » Université mentouri-constantine .soutenu(27/06/2010)
- [9] Cornice, R., "Conditionnement et traitement des boues des stations d'épuration des eaux résiduelles urbaines et des usines de production d'eau potable." Institut National Agronomique de Paris, cycle "Valorisation agricole des déchets des usines de traitement des eaux", 13-17 avril 1992.
- [10] Melle KAROUNE Samira Effets des boues résiduelles sur le développement des semis du chene liége (Quercus suber L) Université Mentouri Constantine.Setnu en 2008
- [11] Bongiovanni, J.-M., Traitement des boues résiduelles par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).

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

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

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

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

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

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

[18] Valorisation agronomique des boues – JEAN Luc Martel –Suez environnement cirse octobre 2010.



# **Chapitre IV**

## **Simulation numérique du séchage solaire sous serre**

#### IV.1- Introduction :

La valorisation par séchage des boues d'épuration des eaux usées gérées par l'Office National de l'assainissement, ONA – Tlemcen est un remplacement de séchage par lit par convection naturelle séchage envisagé dans cette station par le séchage solaire sous serre. Un séchoir solaire est un dispositif permettant se sécher la boue par circulation d'air chauffé, l'apport en énergie est fourni par le solaire. [1]

Le séchage est caractérisé par plusieurs paramètres : la température de séchage, la vitesse de séchage, la durée d'exposition le dimensionnement du dispositif de séchage, le taux de siccité (taux d'humidité), les caractéristiques des matériaux absorbants, transparents et isolants.

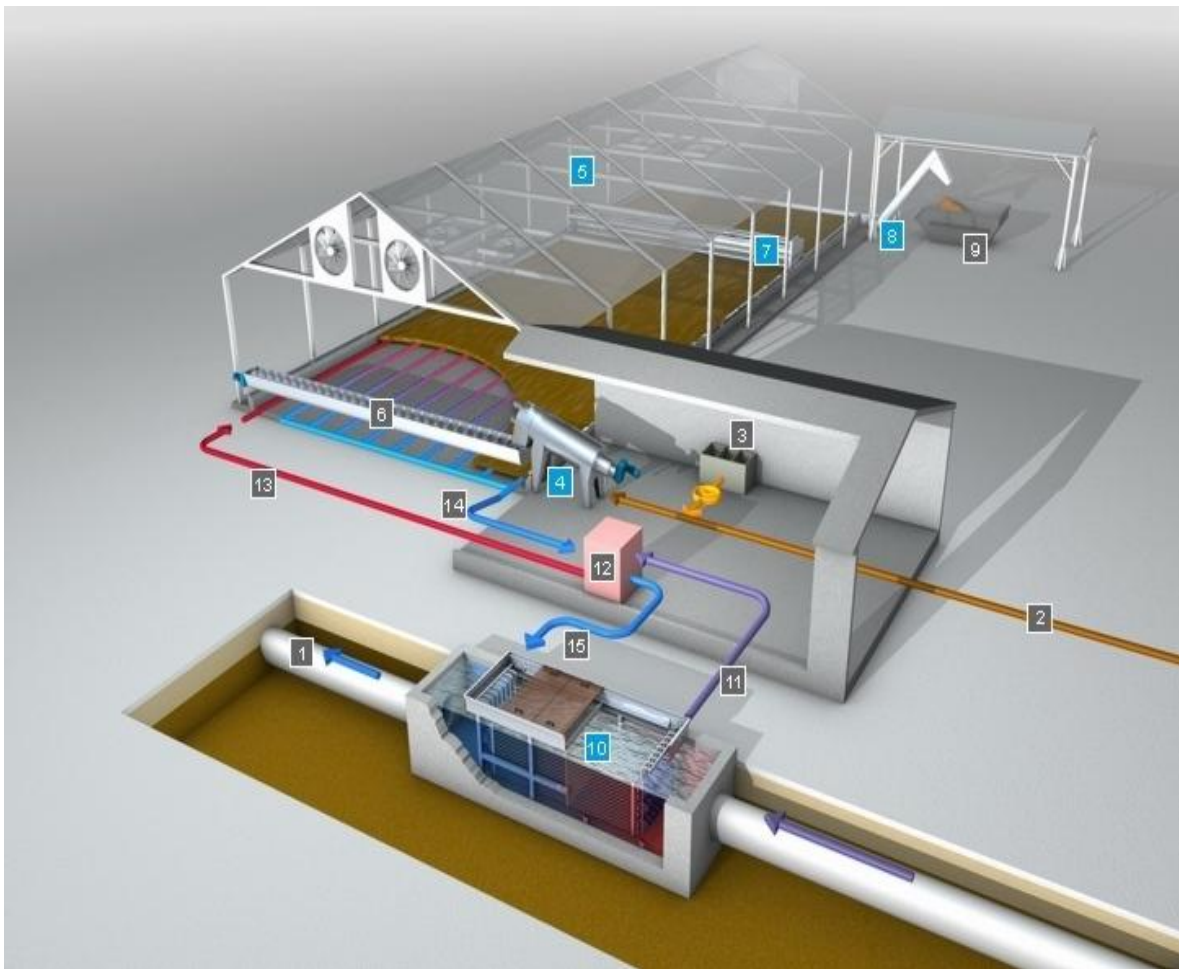


Figure IV.1- Schéma d'un modèle finale développé pour STEP-Tlemcen [1]

- [1]- **Sortie d'eaux traitées**
- [2]- **Alimentation de la boue vers la centrifugeuse**
- [3] -**Un pompe de la boue**
- [4]- **Un centrifugeuse**
- [5]-**Le vitrage**
- [6]-**Retournements fixé alimentés par la centrifugeuse**
- [7]-**Scarificateur rotatif**
- [8]-**Pompe de recirculation**
- [9]-**Aire de stockage des boues séchées**
- [10]- **Traitement préliminaire**
- [14]- **L'eau filtrée**

## **IV.2- Etude de du séchage**

### **IV.2.1- Géométrie et dimensionnement des serres**

La serre est constituée en général de parois en matière plastique transparente, ou en verre: elle est utilisée pour maximiser l'effet serre. Elle est comparable aux serres utilisées en agriculture.

Bien qu'il n'existe pas de règles générales. La surface utile de séchage est calculée sur la base de la capacité d'évaporation des boues, de paramètres dépendant essentiellement de la saison et de la localisation géographique. [2]

En valeur guide, il peut être retenu une capacité évaporatoire de l'ordre d'une tonne par mètre carré de serres, imparti au séchage. Le sol de la serre doit être imperméabilisé, et drainé: en général il s'agit d'une couche de béton. La largeur standard des serres, est comprise entre 9 et 10 m. Les boues sont soit stockées sur de faibles hauteurs, quelques dizaines de centimètres (entre 20 et 50 cm) compatibles avec la taille des retourneurs ou alors disposées en andains. La hauteur de la serre doit être conçue afin de permettre l'entrée et la circulation aisée d'un chargeur.

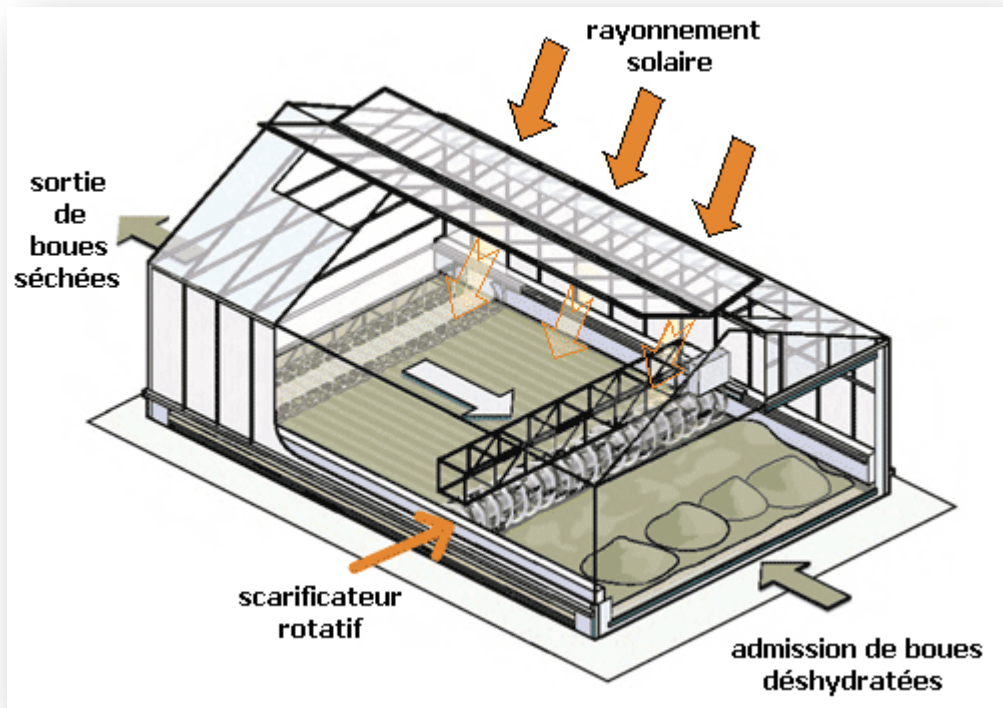


Figure IV.2 -Schéma d'un serre ouverte a convection libre [1]

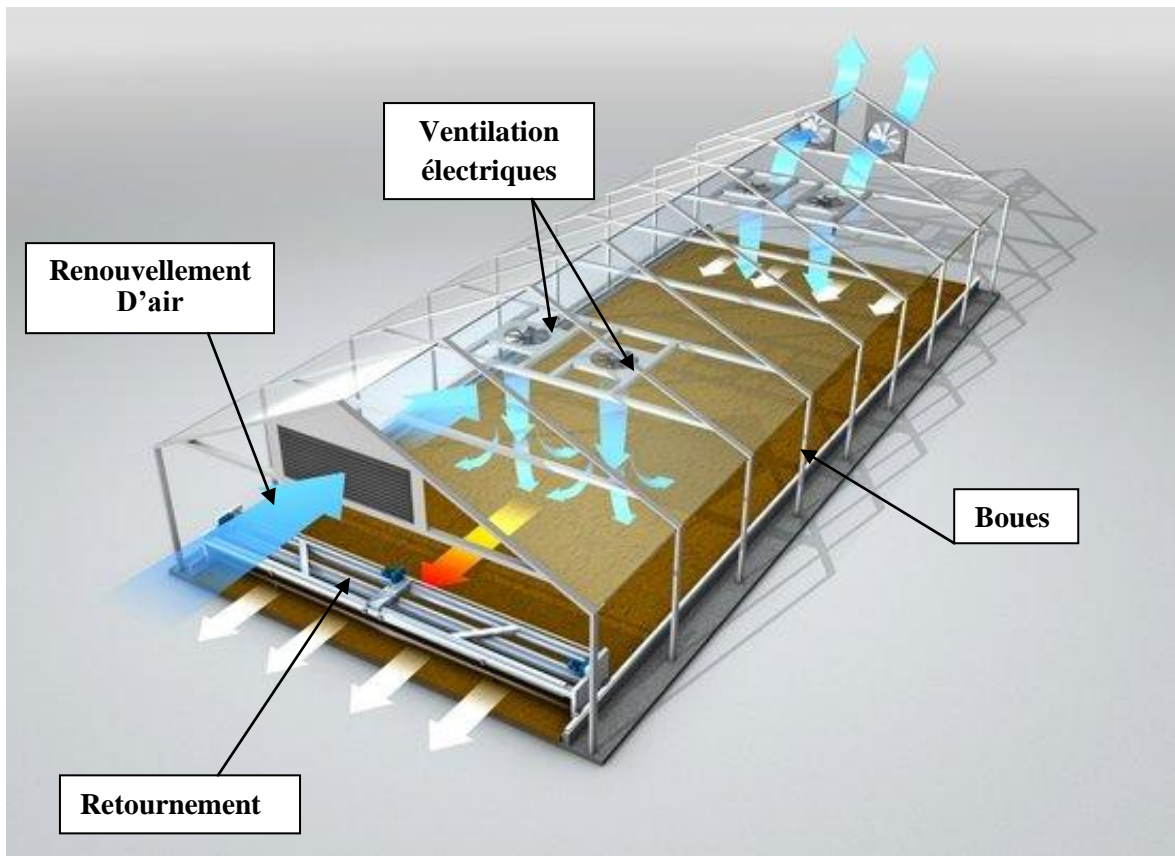


Figure IV.3- Schéma d'une serre fermée a convection forcé [1]

#### IV.2.2- Fixation des conditions opératoires :

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

Toutes nos expériences sont effectuées à une température et humidité de consigne constante.[2]

#### IV.2.3- L'obtention des courbes de séchage :

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

##### ➤ Calcul de la vitesse de séchage

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

Selon l'usage, ces données sont transformées afin de tracer soit la courbe de vitesse de séchage soit la courbe dite de Krischer (Kemp et al., 2001) selon que la vitesse de

séchage  $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$  est représentée en fonction du temps ou de la teneur en eau sur base sèche. [3]

#### IV.2.4- Méthode de détermination de la courbe caractéristique de séchage

Il suffit de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et d'équilibre pour pouvoir décrire la cinétique du séchage dans n'importe quelle condition de l'air.

Le principe de la courbe caractéristique de séchage est de réduire l'ensemble des données expérimentales de manière à pouvoir les mettre sous forme utilisable.[2]

Pour y parvenir, la démarche suivie consiste en une normalisation en représentant le rapport de la vitesse de séchage à un instant t  $\left(-\frac{dX}{dt}\right)$  à la vitesse de première phase  $\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1$ ,

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

Les cinétiques de séchage sont représentées sous la forme :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 f(X_r) \quad \text{Equation IV.1}$$

$X_r$  est la teneur en eau réduite définie par: 
$$X_r = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad \text{Equation IV.2}$$

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

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

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

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

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

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

$$f(X_r) = A_1 X_r + A_2 X_r^2 + A_3 X_r^3 \quad \text{Equation IV.3}$$

$A_1, A_2, A_3$  : Paramètre à déterminer expérimentalement

- La teneur en eau critique  $X_{cr}$  est généralement fonction des conditions de séchage, il est difficile de localiser une première phase de séchage même pour les produits dont l'humidité initiale est importants. On identifie la teneur en eau critique  $X_{cr}$  à la teneur initiale  $X_i$

L'explication réside dans le fait que les parois cellulaires perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits (Kouhila, 2001). Ainsi la phase à vitesse constante peut être déterminée en utilisant une corrélation qui inclut les conditions aérodynamiques externes et en prenant en compte le caractère déformable des produits biologiques ou en utilisant l'analogie des transferts de chaleur et de masse à travers la couche limite d'une surface totalement mouillée (Équation IV-3). [3]

### ➤ Formulation et résolution du système d'équations

Une fois le modèle conceptuel de la serre défini, il reste maintenant à lui donner une forme concrète de façon à rendre son utilisation effective. La résolution du système d'équation nécessite le développement d'un programme avec une méthodologie d'analyse rigoureuse capable de garantir la fiabilité du modèle et d'assurer sa souplesse.

➤ **Formulation du système d'équations [2]**

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

**Tableau IV.1 Formulation du système d'équation du modèle [2]**

<p><b>Bilan d'énergie sur la couverture</b></p> $Cc \frac{dT_c}{dt} = Rg a_c(1 + \tau_c \rho_b) + \sigma \varepsilon_c (T_v^4 - T_c^4) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_{ci}(T_{ai} - T_c) + h_{ce}(T_{ae} - T_c)$ <p><b>Equation III.37</b></p>
<p><b>Bilan d'énergie sur l'air</b></p> $\rho V Cp \frac{dT_{ai}}{dt} = h_b S_b (T_b - T_{ai}) - h_{ci} S_c (T_{ai} - T_c) - \rho Q Cp (T_{ai} - T_{ae})$ <p><b>Equation III. 38</b></p>
<p><b>Bilan d'énergie sur la boue</b></p> $m_b Cp_b \frac{dT_b}{dt} = Rg S_b a_b \tau_c - \frac{\sigma S_b}{\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} (T_b^4 - T_c^4) + h_b S_b (T_{ai} - T_b) - \dot{m} Lv$ <p><b>Equation III.39</b></p>
<p><b>Bilan massique sur la boue</b></p> $\dot{m} = Ms \left( -\frac{dX}{dt} \right)$ <p><b>Equation III.40</b></p>

### IV.3- Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle [2]

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

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

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

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

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

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

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

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

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



**Tableau IV.II- paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle**

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

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

#### **IV.4- Résolution du système d'équations**

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

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

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

Nous avons opté pour le développement d'un modèle de séchage unidimensionnel combinant les propriétés physiques de la boue et les différents transferts thermiques régissant le séchage. Une mise en équation assez simple des différents phénomènes complexes est effectuée.

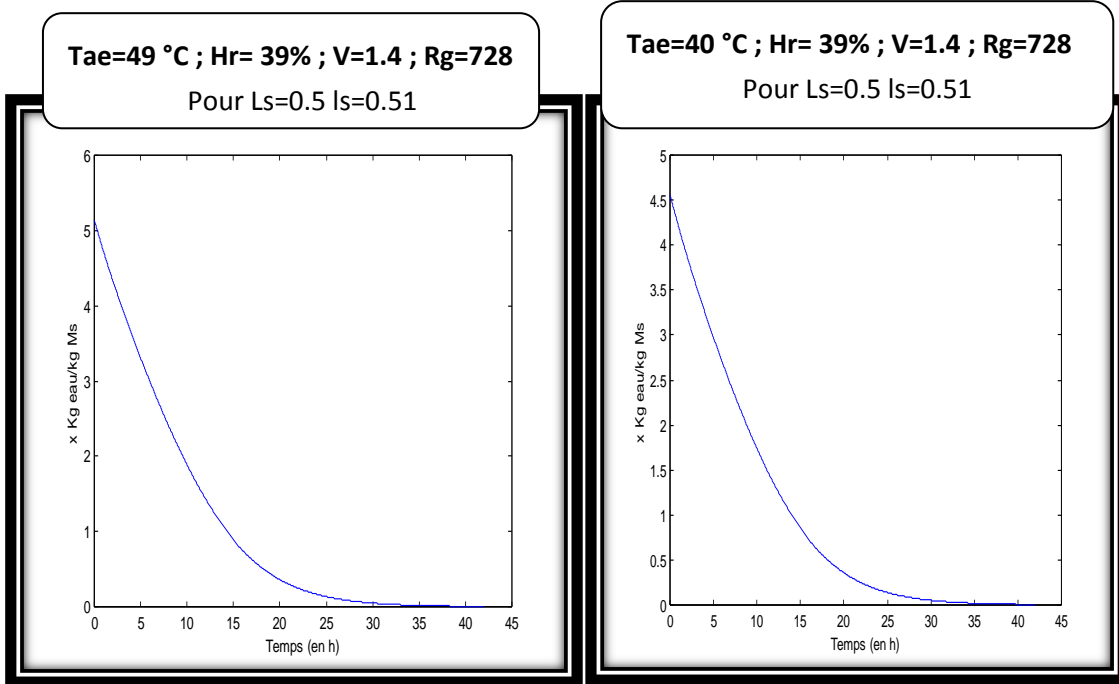
Nous obtenons ainsi trois équations de bilan d'énergie et une de transfert de matière couplées et non linéaires. Ces équations sont résolues par la méthode de Runge Kutta d'ordre 4.

Ce programme ne peut acquérir son caractère prédictif qu'après avoir été confronté aux résultats observés et mesurés au niveau expérimental. Pour s'assurer de la validité du modèle numériques, une étude expérimentale s'impose. Un plan d'expérience à deux étapes est envisagé, de manière à mieux appréhender le couplage très complexe des différents transferts thermiques et massiques. [1]

#### IV.5-Résultats et discussion :

Cette partie présente les différents résultats obtenus par la simulation sous MATLAB, pour l'étude, du comportement du séchage des boues dans un séchoir solaire direct.

➤ **Distribution de la teneur en eau :**



**Figure IV.4.A**

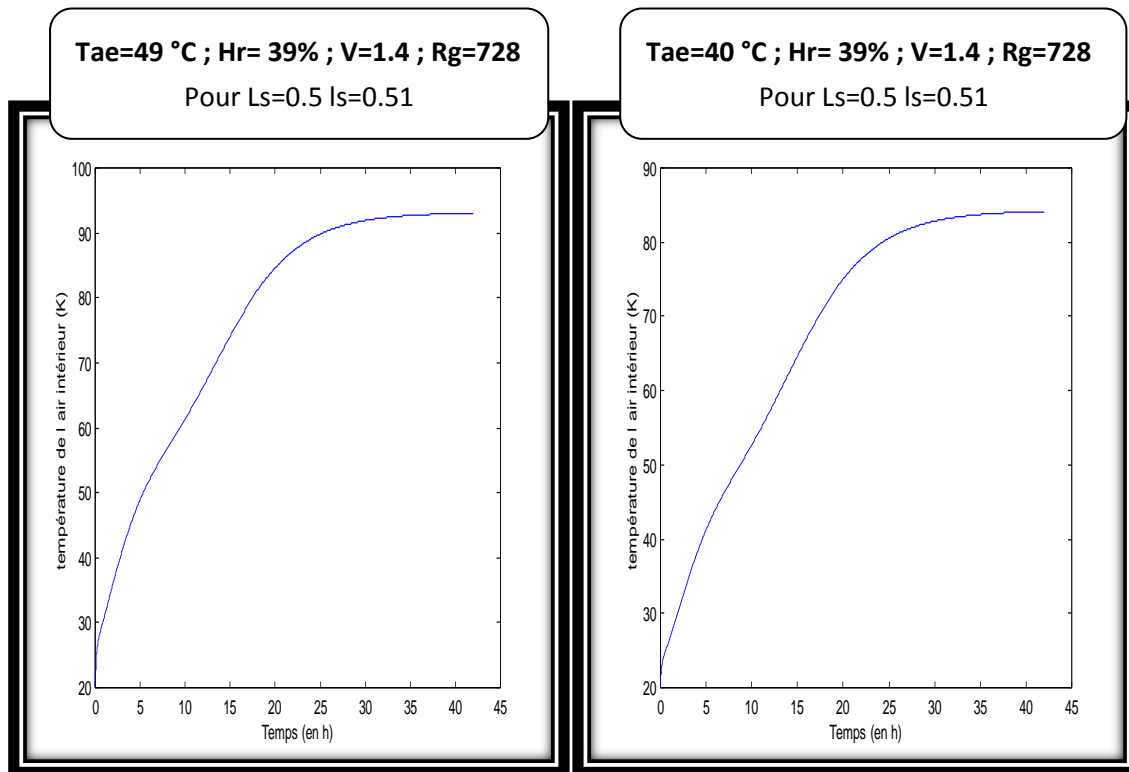
**Figure IV.4.B**

**Figure IV.4- Courbes de séchage représentant l'évolution des teneurs en eau sur base sèches, en fonction du temps.**

Les Figures (Figures IV.4.A et Figure IV.4.B) représentent, pour différentes conditions d'air asséchant, l'évolution des teneurs en eau base sèche en fonction du temps. La diminution attendue des temps de séchage est bien observée quand la température de l'air augmente.

Ceci se traduit par une augmentation de la vitesse de séchage. Nous constatons également que l'augmentation du rayonnement solaire globale  $R_g$  entraîne une diminution de l'humidité relative de l'air à l'intérieur de la serre. Par conséquent, un taux de séchage plus élevé est constaté.

➤ **La température de l'air intérieur :**



**Figure IV.5.A**

**Figure IV.5.B**

**Figure IV.5- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de l'air intérieur en fonction du temps.**

La température de l'air est l'un des paramètres les plus influents sur le processus de séchage. En effet, la température de l'air intérieur est couplée avec celle de la boue ainsi que celle de la couverture à travers le phénomène de convection. Les Figures (Figures IV.5.A et Figure IV.5.B) illustrent, pour différentes conditions d'air asséchant, l'évolution de la température de l'air intérieur en fonction du temps. De la même manière que les résultats précédents, il apparaît que temps de séchage est intimement lié au rayonnement solaire globale.

➤ La température de couverture :

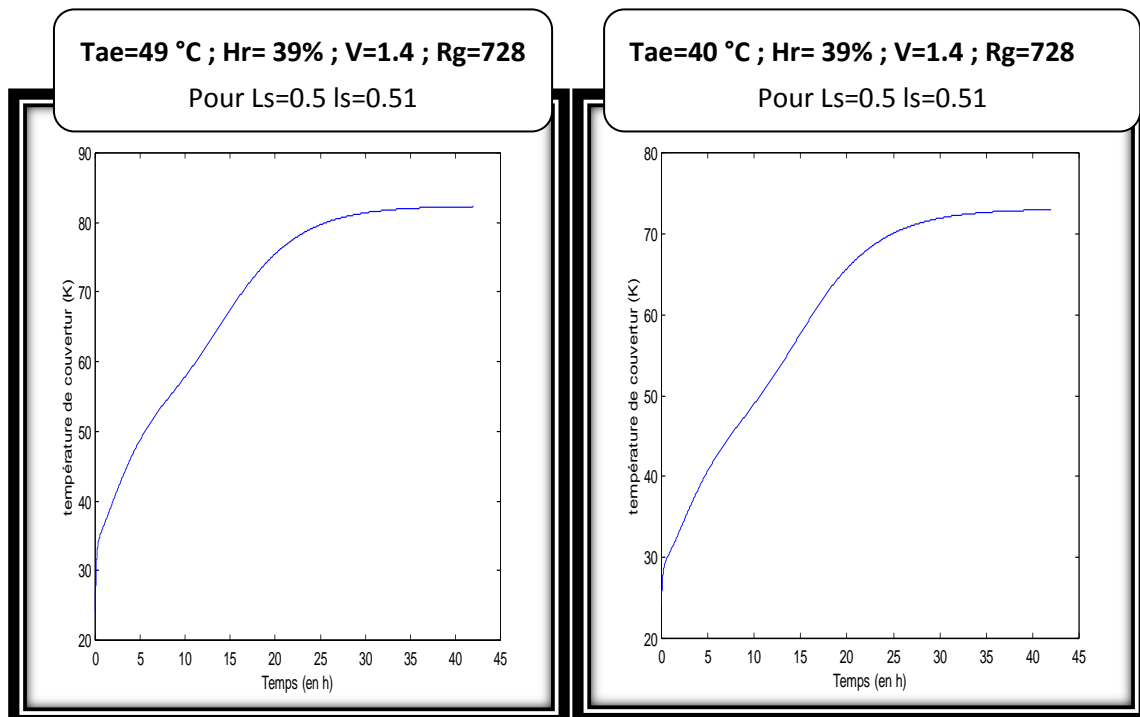


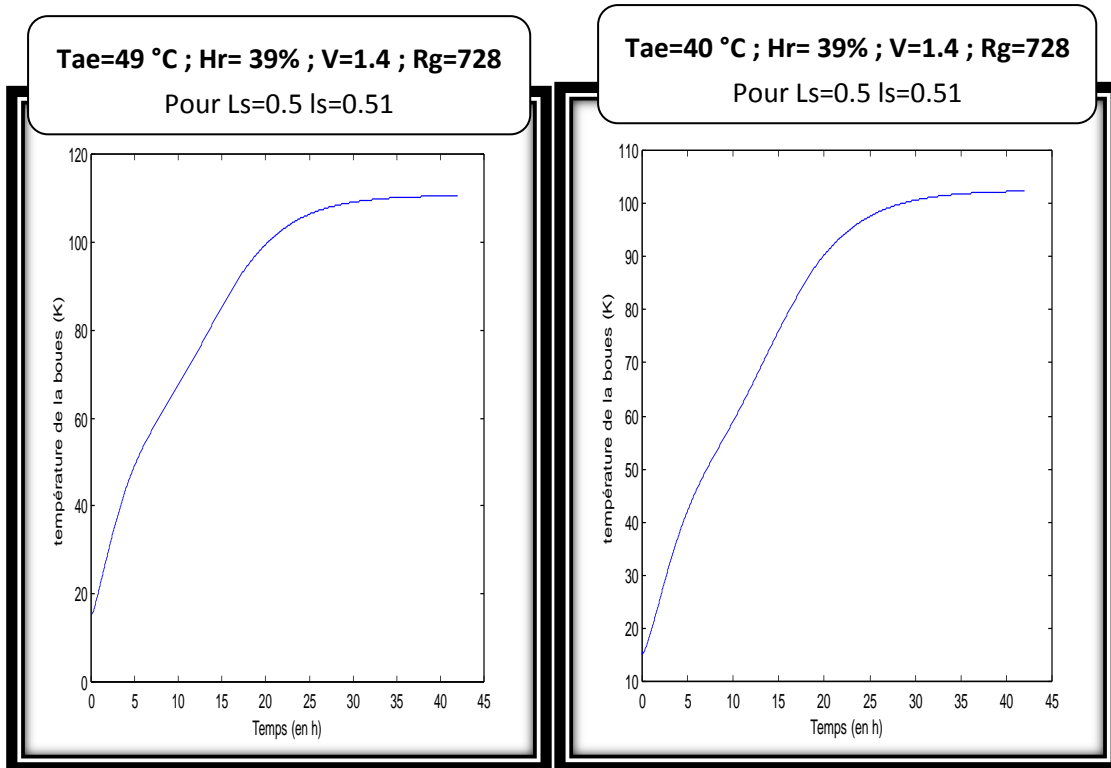
Figure IV.6.A

Figure IV.6.B

Figure IV.6- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de couverture en fonction du temps.

On remarque sur les Figures ( figure IV.6.A et Figure IV.6.B) que les températures de la couverture en contact avec le milieu extérieur et le milieu intérieur dépendent des conditions régnant dans ces deux milieux. De ce fait, elles dépendent du rayonnement global ainsi que de la vitesse de l'air à l'intérieur et surtout celle de l'extérieur.

➤ La température de la boue



**Figure IV.7.A**

**Figure IV.7.B**

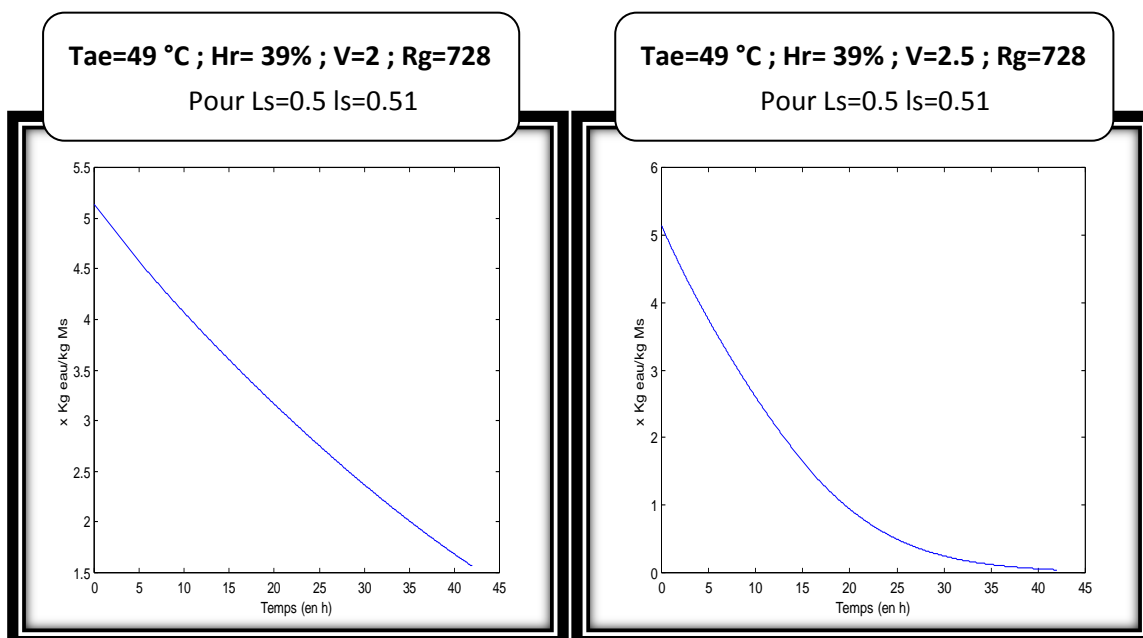
**Figure IV.7- Courbes de séchage représentant l'évolution de la température de boue en fonction du temps.**

On remarque sur les figures ( Figure IV.7.A et Figure IV.7.B) que pour différentes conditions d'air asséchant, l'évolution de la température de la boue en fonction du temps, augmente durant le temps de séchage et ceci grâce à l'échange convectif entre l'air intérieur et la boue.

La diminution de temps de séchage est bien observée quand la température de l'air augmente, la conséquence de l'augmentation de rayonnement solaire globale. En conclusion, le temps de séchage diminue.

#### IV.5.2- Analyse de l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur le séchage :

➤ Distribution de la teneur en eau



**Figure IV.8.A**

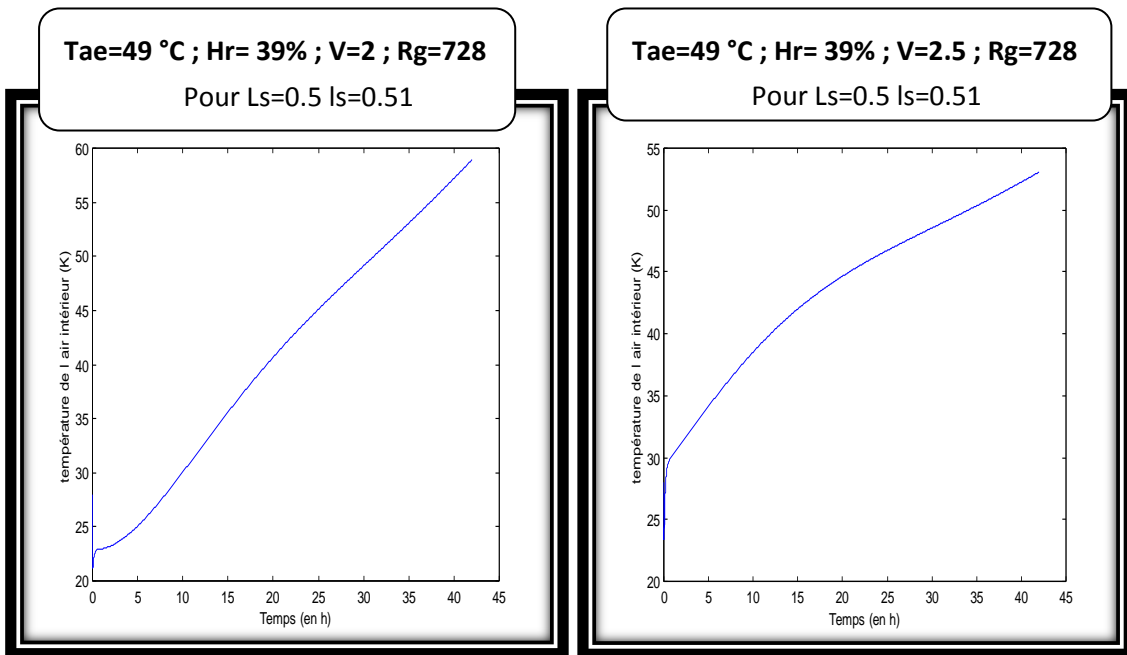
**Figure IV.8.B**

**Figure IV.8- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur les teneurs en eau en fonction du temps.**

Les figures ( Figure IV.8.A et Figure IV.8.B ) représentent, pour différents débits d'air séchant dans la serre, l'évolution des teneurs en eau base sèche en fonction du temps. La diminution attendue des temps de séchage est bien observée quand la débit d'air séchant dans la serre va changer, en conclusion que la débit d'air séchant de la serre influer sur le séchage des produits ( boues).



➤ La température de l'air intérieur



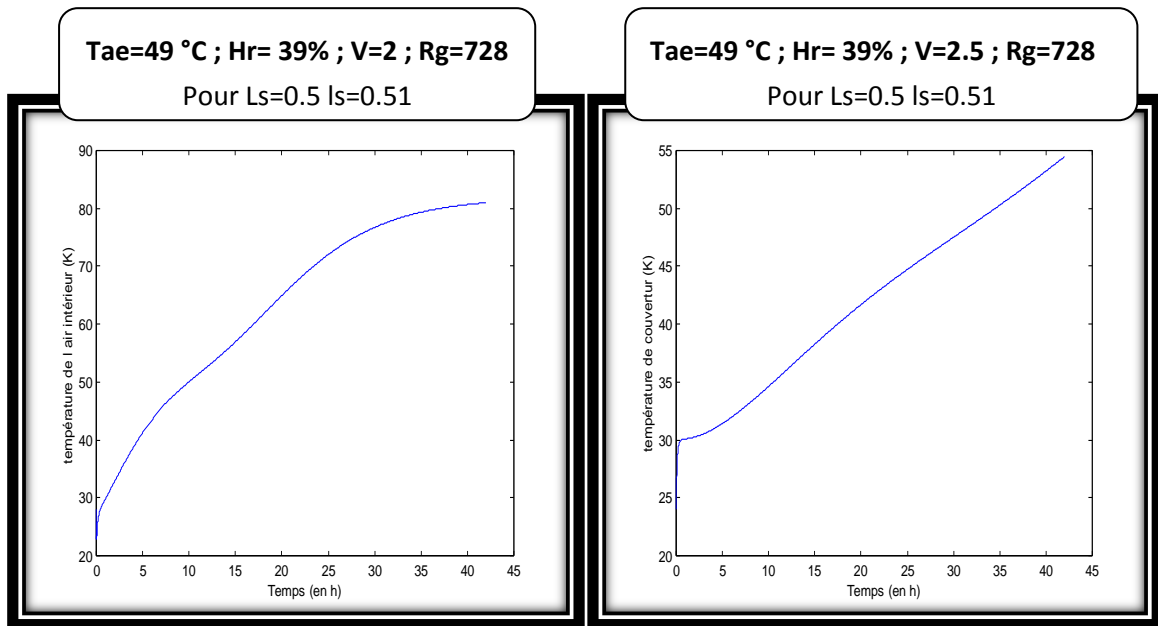
**Figure IV.9.A**

**Figure IV.9.B**

**Figure IV.9- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de l'air intérieur en fonction du temps**

La température de l'air est l'un des paramètres les plus influents sur le processus de séchage. En effet, la température de l'air intérieur est couplée avec celle de la boue ainsi que celle de la couverture à travers le phénomène de convection. Les figures (Figure IV.9.A et figure IV.9.B) illustrent, pour différents débits d'air séchant dans la serre, l'évolution de la température de l'air intérieur en fonction du temps. De même manière que les résultats précédents, il apparaît que le temps de séchage est intimement lié au débit d'air séchant dans la serre et au rayonnement global.

➤ **La température de couverture**



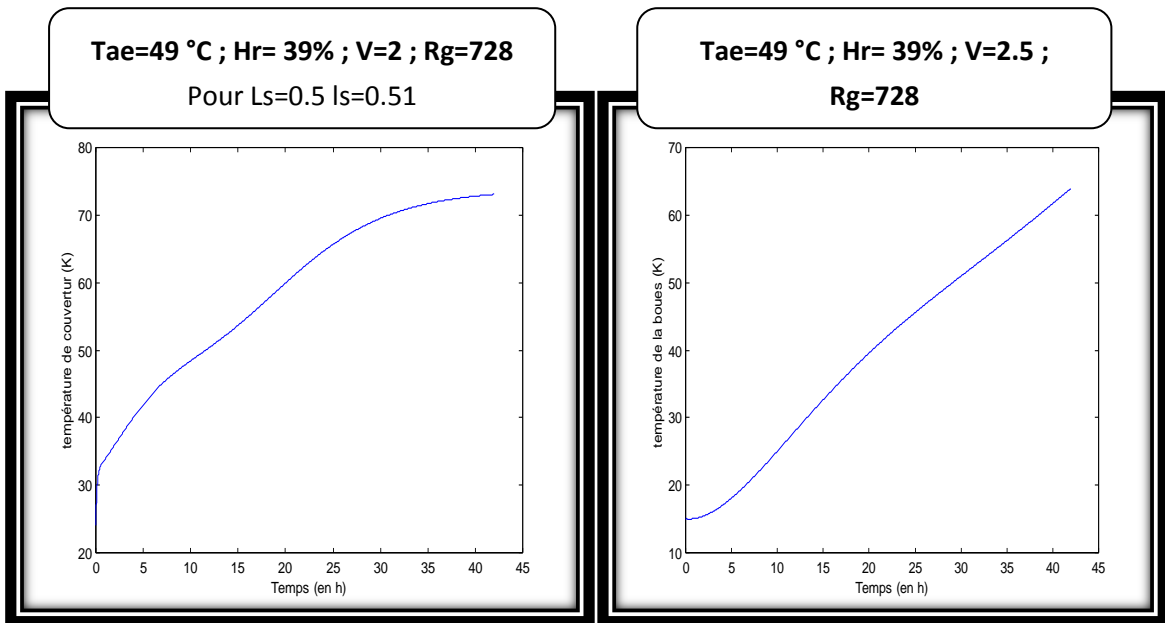
**Figure IV.10.A**

**Figure IV.10.B**

**Figure IV.10- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de couverture en fonction du temps**

On remarque sur les figures (figure IV.10.A et figure IV.10.B) que les températures de la couverture en contact avec le milieu extérieur et le milieu intérieur dépendent des conditions régnant dans ces deux milieux. De ce fait, elles dépendent de l'influence de débit d'air séchant dans la serre ainsi que le rayonnement global et du paramètre géométriques de la serre. Aussi la vitesse d'air extérieur .

➤ La température de la boue



**Figure IV.11.A**

**Figure IV.11.B**

**Figure IV.11- Courbes de séchage représentant l'influence de débit d'air séchant dans la serre sur la température de boue en fonction du temps.**

On remarque sur les figures (Figure IV.11.A et Figure IV.11.B) que l'évolution du débit d'air séchant dans la serre influencer sur le séchage et la température de boues. L'évolution de la température de la boue en fonction du temps, augmente durant le temps de séchage et ceci grâce à l'échange convectif entre l'air intérieur et le produit.

#### **IV.6- Conclusion :**

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés au séchage solaire, et plus particulièrement à l'étude de la cinétique du séchage et de certains aspects des séchoirs solaires tels que le rayonnement solaire global.

Pour se faire, nous avons procédé à la simulation mathématique de notre séchoir, en adoptant des modèles respectifs à la serre trouvés dans la littérature. Une tentative de résolution numérique basée sur la méthode de Range-Kutta a été appliquée sous MATLAB. Certains résultats ont pu être validés dans la littérature. En conclusion, il advient que la vitesse d'écoulement de l'air asséchant, de la température du milieu extérieur ainsi que le rayonnement solaire influent considérablement sur la quantité d'eau évaporée de la boue.

En perspective de notre travail, nous projetons d'étendre l'étude de la cinétique et du rendement, en concevant et réalisant un séchoir réel, sur la base des résultats de simulation obtenus par le présent travail.

## **Référence**

[1] - Document technique, ONA Office National d'assainissement pour la récupération et l'élimination des déchets. La valorisation agricole des boues de stations d'épurations urbaines, Laboratoire ONA – STEP -Tlemcen jour d'exploitation (2013)

[2]- Haoua Amadou « Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station dépuratation Urbains » Thèse de doctorat Université Louis Pasteur- Strasbourg I Discipline: Sciences pour l'ingénieur Soutenue 04/05 /2007.

[3]- Nadia Chalal « Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect » soutenu le 16/12/2007 Université Mentouri- Constantine

[4]- Melle KAROUNE Samira Effets des boues résiduelles sur le développement des semis du chêne liège (Quercus suber L) Université Mentouri Constantine. Soutenue en 2008

[5] Boussalia Amar « Contribution a l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux » Université mentouri-constantine .soutenu(27/06/2010)

[6] Valorisation agronomique des boues – JEAN Luc Martel –Suez environnement cirse octobre 2010.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Nous sommes intéressés dans ce travail à la valorisation par séchage des boues d'épuration des eaux usées gérées par l'Office National de l'assainissement, ONA – Tlemcen en remplaçant le séchage par lit par convection naturelle séchage envisagé dans cette station par le séchage solaire sous serre, et plus particulièrement à l'étude de la cinétique du séchage et de certains aspects des séchoirs solaires tels que le rayonnement solaire global.

Un séchoir solaire est un dispositif permettant se sécher la boue par circulation d'air chauffé, l'apport en énergie est fourni par le solaire.

Le séchage est caractérisé par plusieurs paramètres : la température de séchage, la vitesse de séchage, la durée d'exposition le dimensionnement du dispositif de séchage, le taux de siccité (taux d'humidité), les caractéristiques des matériaux absorbants, transparents et isolants.

La caractérisation de la boue montre que le paramètre siccité est important car la capacité calorifique, ainsi que les isothermes de désorption sont liées à cette teneur en eau. Cette caractérisation montre aussi que l'origine de la boue ainsi que le type de traitement effectué en amont, éléments clés de la composition de la boue, joue un rôle important. Ainsi, l'on peut dégager pour une boue donnée des tendances et des valeurs caractéristiques. Un ordre de grandeur pour la capacité calorifique de la masse anhydre de la boue est donné et les valeurs de l'isotherme de désorption obtenue sur un domaine large de l'activité ont pu être ajustées par le modèle d'Oswin.

Pour se faire, nous avons procédé à la simulation mathématique de notre séchoir, en adoptant des modèles respectifs à la serre trouvés dans la littérature. Une tentative de résolution numérique basée sur la méthode de Range-Kutta a été appliquée sous MATLAB. Certains résultats ont pu être validés dans la littérature.

Certains résultats ont pu être validés dans la littérature. En conclusion, il advient que la vitesse d'écoulement de l'air asséchant, de la température du milieu extérieur ainsi que le rayonnement solaire influent considérablement sur la quantité d'eau évaporée de la boue.

En perspective de notre travail, nous projetons d'étendre l'étude de la cinétique et du rendement, en concevant et réalisant un séchoir réel, sur la base des résultats de simulation obtenus par le présent travail.

# **ANNEXES**



## Annexe I : Propriétés de l'air humide

### Pression de vapeur saturante (Pa)

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

### Humidité absolue (kg eau/kg air sec)

$$Has = \frac{6.622.Pvs}{P - Pvs}$$

### Humidité relative (%)

$$Hr = \frac{Pv}{Pvs}$$

### Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

$$\rho = \frac{353}{T + 273} \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

### Chaleur latente (J/kg)

$$lv = 4185,5.(597 - 0,56T) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

### Conductivité thermique de l'air (W/m<sup>-1</sup>.°C)

$$\lambda = 7,57.10^{-5}.T + 0,0242 \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

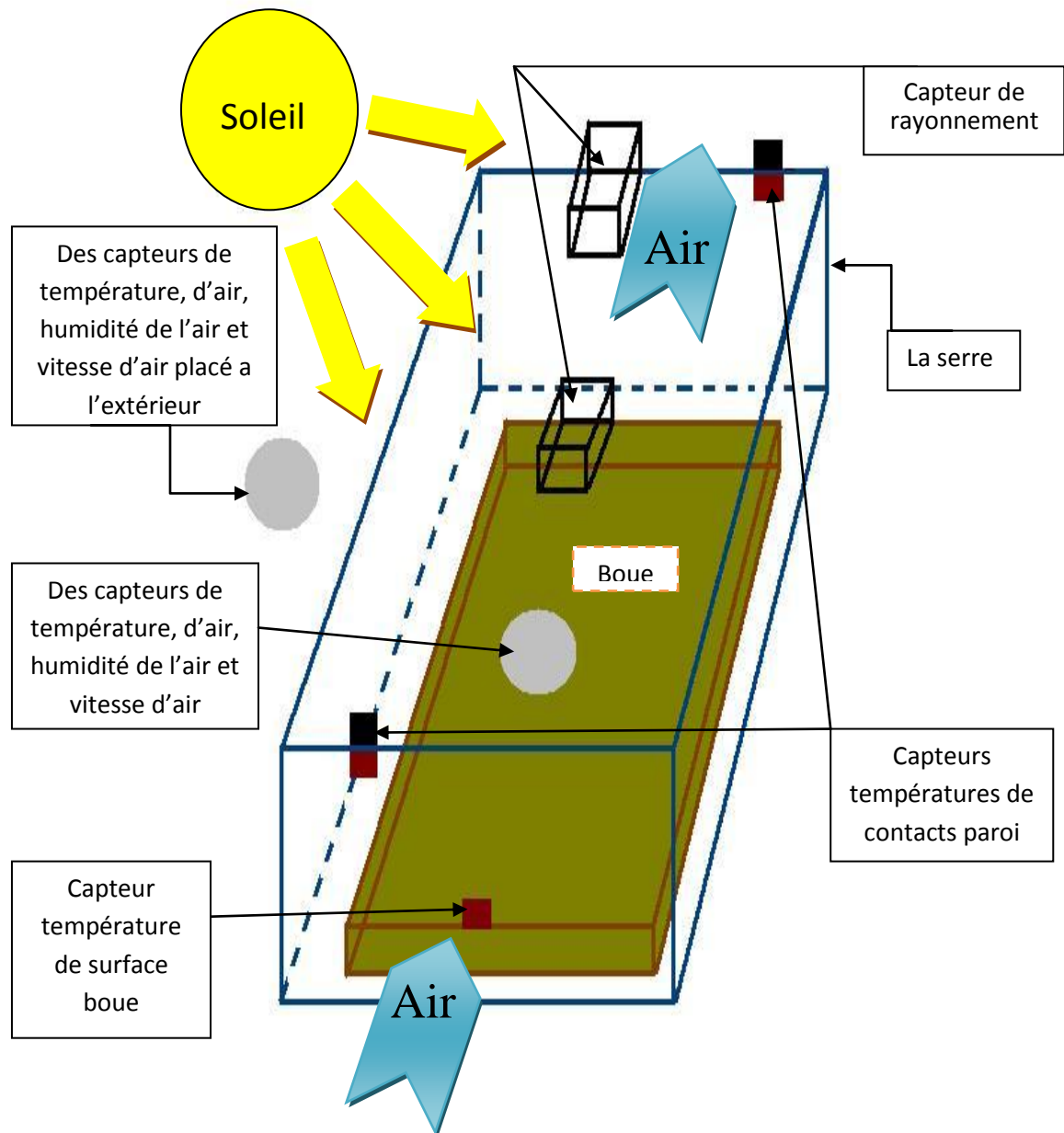
### viscosité dynamique de l'air (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

$$\mu = 10^{-5} (0,0046.T + 1,7176) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

### Référence

Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels,  
Technique et Documentation - Lavoisier : Paris (1995).

## Annexe II : Le pilote de laboratoire « la serre »



Répartition des capteurs sur la serre

### Annexe III : le programme de simulation d'un séchoir des boues d'épuration sous serre « résolution des équations par la méthode de Range-Kutta » « MATLAB »

```
function [x1,y1,q1,z1,r1,dr]= syskutta (x0);
%Parametre d'entrees fixex%
%Dimension et caractiristiques de la serre%
Lc=0.610;
lc=0.51;
Sc=Lc*lc;
%chaleur surfacique de la couverture
cc=8000;
%température de l'air intérieur
Tai0=28;
%température initiale de la couverture
Tc0=24.00;
%coefficient d'absorption solaire
ace=0.2;
%coefficient de transmission solaire
Tau_C=0.7;
%emissivité de la couverture
epsilon_C=0.90;
%Chaleur massique de l'air
Cp=1008;
%Chaleur massique de l'eau
Cpe=4180;
%constante de Boltzmann
sigma=5.67*10^(-8);
%Dimension du support boue
Ls=0.40;
ls=0.47*6;
Sb=Ls*ls;
% Caractéristiques des boues
%Masse initiale
mb0=2.03;
%sicité initiale;
Sicite1=0.163;
%teneur initiale;
Xi=(1-Sicite1)/Sicite1;
%Masse sèche
Ms=mb0*Sicite1;
%température initiale de la boue
Tb0=15;
%Caractéristique boue par rapport aux rayonnements
%coefficient d'absorption solaire
ab=0.8;
%coefficient de réflexion solaire
rb=1-ab;
%emissivité de la boue
epsilon_b=0.9;
%emisisivité de la couverture
epsilon_c=0.9;
%capacité anhydre
Cpsec=1182 ;
```

```

%courbe caractéristique%B1*Xr + B2*Xr^2 + B3*Xr^3%%
B1=2.37;
B2= -3.30 ;
B3= 1.92 ;
%Conditions opératoires de séchage%
%Température de l'air asséchant:
Tae= 50.53 ;
%humidité relative de l'air asséchant:
Hr=63.59;
%vitesse de l'air asséchant:
Ui=1.79 ;
%vitesse de vent:
Uv =1.22 ;
%Rayonnement solaire global:
Rg=728 ;
%Paramètres secondaires%
%masse volumique de l'air à Tae
Rho= 353/(Tae+273);
%volume de l'air intérieur%
Vc=0.105;
%débit volumique de l'air%
Q=0.1340;
%viscosité de l'air cinématique
nu=10^-5*(0.0046*Tae+1.7176);
%conductivité thermique de l'air
lamb_air=7.57*10^-5*Tae+0.0242;
% température humide de l'air
Th=(-0.4911*Tae+8.2385)*(Hr)^2 +(1.0248*Tae-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tae -2.5987);

%Chaleur latente de vaporisation d'eau
Lv=4185.5*(597-0.56*Th);
%Coefficient de convection air-boue
hb=lamb_air*0.049*(Ui*Rho*Lc/nu)^(0.8)*((0.7)^(1/3))/Lc;
%Coefficient de convection couverture-vent
hccv=5.67+3.86*Uv;
%Coefficient de convection couverture-vent
hc=lamb_air*0.0336*(Ui*Rho*Lc/nu)^(0.8)*(0.7)^(1/3)/Lc;
%vitesse à phase constante
divX1 = Sb*3600*(hb*(Tae-Th)+Rg*ab*Tau_C)/(4185.5*(597-0.56*Th)*Ms);

```

#### %Coefficient A%

```
A(1,1)=Rg*ace*Sc*(1+Tau_C*rb)*3600;  
A(1,2)=Sc*sigma*epsilon_C*3600;  
A(1,3)= 0.055*(Tae)^1.5;  
A(1,4)=Sc*sigma*3600/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1);  
A(1,5)= hc*Sc*3600;  
A(1,6)=hccv*3600*Sc;  
A(1,7)=Sc*cc;  
A(1,8)=Ms;  
A(1,9)=Cpsec;  
A(1,10)= Cpe;  
A(1,11)=hb*Sb*3600;  
A(1,12)=4186.8*597;  
A(1,13)=4186.8*0.56;  
A(1,14)=Sb*sigma*3600/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1);  
A(1,15)=Rho*Vc*Cp;  
A(1,16)= B3*divX1;  
A(1,17)= B2*divX1;  
A(1,18)= B1*divX1;  
A(2,2)=Xi;  
A(2,3)=Tae;  
A(2,4)=Rg*ab*Sb*Tau_C*3600;  
A(2,5)=Rho*Q*Cp*3600;  
A
```

#### %Conditions initiales%

```
x0=0;  
y0=Tai0;  
q0=Tc0;  
z0=Tb0;  
r0=Xi;  
dr0=0;
```

#### %paramètres de résolution %

```
x0=0;  
xf=42;  
h=0.01;
```

%résolution du système d'équation par la méthode de Runge-Kutta d'ordre4%

```
x1=x0:h:xf;  
y1(1)=y0;  
q1(1)=q0;  
z1(1)=z0;  
r1(1)=r0;  
dr(1)=dr0;
```

```
for n=1:floor((xf-x0)/h)
```

```
K11= fsys3(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
K21= fsys1(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
K31= fsys2(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
K41= fsys4(x1(n),y1(n),q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
    K12= fsys3(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n)+K11*h/2,z1(n),r1(n),dr(n));  
    K22= fsys1(x1(n)+h/2,y1(n)+K21*h/2,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
    K32= fsys2(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n)+K31*h/2, r1(n),dr(n));  
    K42= fsys4(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K41*h/2,dr(n));  
    K13= fsys3(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n)+K12*h/2,z1(n),r1(n),dr(n));  
    K23= fsys1(x1(n)+h/2,y1(n)+K22*h/2,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
    K33= fsys2(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n)+K32*h/2,r1(n),dr(n));  
K43= fsys4(x1(n)+h/2,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K42*h/2,dr(n));  
K14= fsys3(x1(n)+h,y1(n),q1(n)+K13*h,z1(n),r1(n),dr(n));  
K24= fsys1(x1(n)+h,y1(n)+K23*h,q1(n),z1(n),r1(n),dr(n));  
K34= fsys2(x1(n)+h,y1(n),q1(n),z1(n)+K33*h,r1(n),dr(n));  
K44= fsys4(x1(n)+h,y1(n),q1(n),z1(n),r1(n)+K43*h,dr(n));  
y1(n+1)=y1(n)+h*(K21+2*K22+2*K23+K24)/6;  
q1(n+1)=q1(n)+h*(K11+2*K12+2*K13+K14)/6;  
z1(n+1)=z1(n)+h*(K31+2*K32+2*K33+K34)/6;  
r1(n+1)=r1(n)+h*(K41+2*K42+2*K43+K44)/6;  
dr(n+1)=-A(1,8)*(r1(n+1)-r1(n))/h;
```

```
end
```

```
plot(x1,r1);grid on;xlabel('Température (en °K)');  
ylabel('Humidité (%)');
```

```
%plot(x1,y1);grid on;xlabel('Température (en °K)');  
%ylabel('Humidité (%)');
```

```
%plot(x1,q1);grid on;xlabel('Température (en °K)');  
%ylabel('Humidité (%)');
```

```
%plot(x1,z1);grid on;xlabel('Température (en °K)');  
%ylabel('Humidité (%)');
```