

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MOULOUD MAMMERRI de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie mécanique

Option: Energétique

THÈME

*Etude théorique d'un séchoir
solaire à boues résiduaires
des stations d'épuration.*

Travail réalisé par

Mr. MEZINE Achour

Proposé et dirigé par:

Mr. LAMROUS Nacer

Promotion 2011

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à Allah de m'avoir permis d'accomplir ce travail; et de m'avoir donné des parents qui n'ont jamais cessé de m'apporter leur soutien et leur amour.

J'exprime mes remerciements et ma reconnaissance profonde à mon promoteur monsieur Nacer LAMROUS qui est à l'origine de ce travail. Son exigence de clarté et de rigueur m'a beaucoup apporté. Je lui en suis très reconnaissant.

Je traduis par la même occasion ma reconnaissance à monsieur Saïd MAKHLOUF pour l'échange permanent de vues et d'appréciables contributions et surtout pour ses précieux conseils qu'il n'a cessés de me prodiguer.

Que Mr TAACHACHT et Melle BELKAID trouvent ici l'expression de ma très vive gratitude surtout pour leur spontanéité à répondre à mes questions sans recul ni hésitation.

Je n'oublierai pas de remercier le personnel de la station d'épuration des eaux usées de Tizi-Ouzou pour sa disponibilité et les informations utiles qu'il m'a fourni.

Mes vifs remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté de lire, de critiquer et d'enrichir ce travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements aux enseignants du département de génie mécanique et en particulier à l'adjoint du chef de département, M. REZAOUI, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué à ma formation et à tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin dans mon parcours universitaire.

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

A_1, A_2, A_3	coefficients caractéristiques du séchage	(-)
a_b	coefficient d'absorption de la boue	(-)
a_c	coefficient d'absorption de la couverture	(-)
a_w	activité de l'eau	(-)
C	concentration	(kg.m^{-3})
C_c	capacité thermique surfacique de la couverture	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
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	($\text{J.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$)
E	énergie	(J)
$E.H$	équivalent habitant	(-)
$f(X_r)$	vitesse de séchage réduite	(-)
H_r	humidité relative de l'air	(%)
H_{re}	humidité relative de l'air extérieur	(%)
H_{ri}	humidité relative de l'air intérieur	(%)

h	coefficient de convection	(W/ m ² .K)
h_{ci}	coefficient d'échange convectif entre couverture et air intérieur	(W/ m ² .K)
h_{ce}	coefficient d'échange convectif entre couverture et air extérieur	(W/ m ² .K)
h_b	coefficient d'échange convectif entre boue et l'air asséchant	(W/ m ² .K)
L	longueur de la serre	(m)
l	largeur de la serre	(m)
l_v	chaleur latente de vaporisation d'eau	(J/kg)
m_b	masse de la boue	(kg)
M_s	masse sèche	(kg)
m_i	masse initiale	(kg)
m_e	masse d'eau	(kg)
\dot{m}	vitesse d'évaporation d'eau	(Kg eau/s)
Nu	nombre de Nusselt	(-)
P	pression atmosphérique	(Pa)
P_{cal}	puissance calorifique	(W)

P_v	pression partielle de vapeur	(Pa)
P_{vs}	pression de saturation	(Pa)
$P_{méca}$	puissance mécanique	(W)
Pr	nombre de Prandtl	(-)
Q	débit d'air de la serre	(m ³ /s)
R	renouvellement d'air de la serre	(m ³)
Re	nombre de Reynolds	(-)
R_g	intensité du rayonnement solaire	(W.m ⁻²)
S	surface d'échange	(m ²)
S_b	surface d'échange boue- air intérieur	(m ²)
S_c	surface d'échange couverture	(m ²)
T_{ae}	température de l'air extérieur	(°C)
T_{ai}	température de l'air intérieur	(°C)
T_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)
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)
V	volume d'air de la serre	(m ³)

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

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : Coordonnées géographiques de la station d'épuration Est de Tizi-Ouzou.....	4
Figure (I.2) : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées.....	6
Figure (I.3): Prétraitement (Source originale ONA, 2011)	7
Figure (I.4) : Le dégrillage grossier	7
Figure (I.5) : Le dégrillage fin	7
Figure (I.6): Le dégrillage et le dessablage	8
Figure (I.7): Traitement biologique (Source originale ONA, 2011).....	9
Figure (I.8) : Le clarificateur	10
Figure (I.9) : Épaississeur des boues et lits de séchage.....	11
Figure II-1 : Allure générale des isothermes de sorption	20
Figure II 2 : Différentes zones des isothermes de sorption	21
Figure II 3 : Différents types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC	22
Figure II.4 Courbe de la cinétique de séchage.....	24
Figure II.5 Courbe caractéristique de séchage.....	25
Figure II.6 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	26
Figure II.7 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L	27
Figure II.8 : Repérage de la position du Soleil	27
Figure II.9 : Equation du temps ET et déclinaison δ en fonction du jour de l'année.....	29
Figure II.10 : Densité de flux solaire global reçu par la serre (Journées du 10 Août et 5 Mars)	31
Figure III.1 Schéma des échanges thermiques et massiques pris en compte dans le modèle du séchoir solaire.....	35
Figure III.2 Schéma des flux solaires absorbés	39
Figure IV.1 Courbe d'évolution de la température de la couverture (journée du 10 Août) ...	59
Figure IV.2 Courbe d'évolution de la température de l'air intérieur (journée du 10 Août) ..	59
Figure IV.3 Courbe d'évolution de la température de la boue (journée du 10 Août).....	60
Figure IV.4 Courbe d'évolution de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Août).....	60
Figure IV.5 Courbe d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Août).....	60
Figure IV.6 Courbe d'évolution de la température simulée de la couverture (journée du 5 Mars)	61
Figure IV.7 Courbe d'évolution de la température simulée de l'air intérieur (journée du 5 Mars)	61

Figure IV.8 Courbe d'évolution de la température simulée de la boue (journée du 5 Mars) 62

Figure IV.9 Courbe d'évolution simulée de la teneur en eau base sèche (journée du 5 Mars)
..... 62

Figure IV.10 Courbe d'évolution de la vitesse de séchage simulée en fonction de la teneur en
eau base sèche (journée du 5 Mars) 63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1) : Mesure des MVS.....	16
Tableau (I.2) : Mesure des MS	16
Tableau (I.3) : Récapitulatif des résultats de la filière boue après calculs	17
Tableau II 1 : Modèles pour les isothermes de sorption.....	23
Tableau II.2 : Valeur des coefficients de trouble du ciel.....	30
Tableau III.1 Formulation du système d'équation du modèle	48
Tableau III.2 Récapitulatif des paramètres du modèle	50

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Présentation des stations d'épuration	
I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les stations d'épuration	4
I.2.1 Quelques mots sur la station d'épuration de Tizi-Ouzou Est	4
I.2.2 La collecte des eaux usées	5
1.2.2.1 Structure du réseau d'assainissement	5
1.2.2.2 Les deux principaux types de réseaux	5
I.2.3 Processus de traitement des eaux usées	5
1.2.3.1 Les procédés physiques	6
1.2.3.2 Le traitement biologique : (photo 5 :bassins d'aération)	8
1.2.3.3 Clarificateur et recirculation	9
I.2.4 Traitement des boues	10
1.2.4.1 Poste de pompage	10
1.2.4.2 Epaississeur	10
1.2.4.3 Les lits de séchage	11
I.3 Caractéristiques de l'eau usée urbaine et de la boue	11
I.3.1 Caractéristiques de l'eau usée urbaine	11
I.3.1.1 Définition des paramètres de pollution caractérisant une eau usée	11
I.3.2 Caractérisation des boues	13
I.3.2.1 Origine et caractéristiques des boues	13
I.3.2.2 Détermination des caractéristiques de la boue	15
I.4 Conclusion	17
Chapitre II : Rappels sur le sechage solaire	
II.1 Introduction	18
II.2 Teneur en eau	18
II.3 Activité de l'eau	19
II .4 Isothermes de désorption	20
II.4.1 Définition	20
1.1 II.4.2 Formes et modèles des isothermes de sorption	21
II.4.2.1 Forme générale des isothermes	21
II .5 La cinétique de séchage	23

II.6 Courbes caractéristiques de séchage	25
II.7 Gisement solaire	25
II.7.1 Mouvements de la Terre	26
II.7.2 Mouvement apparent du Soleil	27
II.7.3 Heures et temps	28
II.7.3.1 Durée du jour.....	28
II.7.3.2 Relation entre temps légal et temps solaire.....	28
II.7.4 Constante solaire	29
II.7.5 Angle d'incidence.....	30
II.7.6 Le flux solaire au sol.....	30
II.7.6.1 Calcul du rayonnement direct.....	30
II.7.6.2 Calcul du rayonnement diffus	31
II.7 Conclusion	32

Chapitre III : Modélisation de séchage solaire sous serre

III.1 Introduction	34
III.2 Bases physiques du modèle	34
III.3 Analyse physique du modèle.....	36
III.3.1 Représentation des composants de la serre	36
III.3.1.1 Géométrie globale de la serre	36
III.3.1.2 Représentation de la couverture	36
III.3.1.3 Représentation de l'air intérieur	36
III.3.1.4 Représentation de la boue	36
III.3.1.5 Représentation du plancher	37
III.3.1.6 Environnement extérieur.....	37
III.3.2 Ecriture des bilans thermiques et massiques	37
III.3.2.2 Bilans énergétiques	37
III.3.2.3 Bilans massiques.....	38
III.4 Expression des flux énergétiques.....	39
III.4.1 Flux radiatifs solaires	39
III.4.2 Flux radiatifs Infrarouges	40

III.4.2.1 Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture	41
III.4.2.2 Flux radiatif infrarouge au sein du modèle	41
III.4.3 Flux convectifs	42
III.4.3.1 Echange convectif milieu extérieur / couverture.....	42
III.4.3.2 Echange convectif au sein du modèle.....	43
III.4.4 Transfert de masse	45
III.4.5 Inertie thermique	46
III.5 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation	46
III.6 Formulation et résolution du système d'équations.....	47
III.6.1 Formulation du système d'équations.....	47
III.6.2 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle	49
III.6.3 Résolution du système d'équations	52
III.4 Validation.....	53
III.5 Conclusion	55

Chapitre IV : Structure du programme et simulations

IV .1 Introduction.....	56
IV. 2 Principe de la simulation	56
IV. 3 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle	57
IV. 4 Traitement informatique.....	58
IV.5 Résultats de la simulation.....	59
IV.6 Interprétation des résultats.....	63
IV.7 Conclusion	64
Conclusion générale et perspective	65
Références bibliographiques	
Annexes	

INTRODUCTION GENERALE

L'eau a toujours été synonyme de vie et de croissance. Cet 'or bleu' est tout d'abord essentiel à la survie de l'être humain, dont le corps en est lui-même constitué à plus de 60%. L'eau est également indispensable à l'agriculture et à l'élevage, principales sources de nourriture pour toute société. L'eau douce naturelle et potable se trouve en grande partie contenue dans les icebergs et les glaciers, le reste se trouvant dans les lacs, fleuves et réserves souterraines. Ces sources d'eaux douces cumulées ne représentent à peine que 2.5% des eaux terrestres. Pendant longtemps, nul ne s'est guère préoccupé de la manière de s'approvisionner en eau de qualité, la nature ayant toujours suffi à fournir cette précieuse ressource.

Suite à la révolution industrielle et à l'intensification de l'agriculture en réponse aux besoins d'une population croissante, la consommation mondiale d'eau douce n'a cessé d'augmenter depuis le début du 20^{ème} siècle. En l'espace d'un siècle, la population mondiale a triplé et la consommation d'eau douce a été multipliée par six. Cette augmentation est liée au degré de développement: plus le niveau de vie de la population est élevé, plus la consommation d'eau est importante. Si on additionne les usages domestiques et industriels, on peut considérer que les sociétés modernes utilisent en moyenne 1500 litres d'eau par habitant et par jour, contre respectivement 40 et 4000 litres pour les pays en voie de développement et les États-Unis (Frémy et al., 2002).

À une consommation d'eau croissante correspondent des rejets d'eaux usées croissants, avec pour conséquence une diminution conjointe de la quantité et de la qualité des eaux douces terrestres. Ce phénomène est aggravé par la diminution du pouvoir auto-épuration des cours d'eau (curages, dragages, canalisations artificielles des rivières). En outre, suite à l'urbanisation croissante, à l'érosion des sols et au déboisement, l'eau s'infiltrer de moins en moins profondément dans le sol et rejoint plus vite les fleuves et les mers. Aussi, partout dans le monde, l'eau douce et potable est un bien de plus en plus cher et de plus en plus rare.

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

Qui dit épuration des eaux dit également production de boues. Pourtant, dans un premier temps, l'objectif de ces stations a été essentiellement de garantir le rejet d'une eau de qualité définie en se préoccupant peu des boues engendrées par les procédés d'épuration. La tendance actuelle est différente dans le sens où 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. Les quantités de boues vont croître de manière drastique dans les prochaines années. Dès lors, la gestion des boues produites va devenir une question cruciale à court terme. Dans ce cadre, le séchage des boues constitue une des solutions envisageables en aval des stations, avant une valorisation agricole ou thermique.

La première partie de ce mémoire décrit le fonctionnement général des stations d'épuration, en expliquant le rôle des différents organes de la station ainsi que les traitements subis par les boues. L'inventaire des nombreuses filières de valorisation des boues est rappelé en soulignant l'importance de l'étape de séchage dans la chaîne de traitement. Le séchage solaire est introduit comme une solution efficace de déshydratation des boues permettant de répondre aux attentes des collectivités de petites et moyennes capacités.

Dans le chapitre deux, nous avons traité la théorie du séchage, en rappelant les définitions les plus utiles et ce qui permet la caractérisation de l'humidité dans les produits solides. Nous nous sommes intéressés notamment à la cinétique de séchage des boues résiduelles et aux courbes de sorption-désorption. Puis nous avons fait une évaluation des ressources énergétiques solaires disponibles sur le site d'implantation de la station d'épuration après avoir rappelé les relations usuelles d'astronomie.

Au chapitre suivant, le bilan des transferts thermiques et massiques dont la serre est le siège est dressé et aboutit à un système d'équations différentielles, du premier ordre, non linéaires. La résolution numérique est faite par la méthode de Newton dans l'environnement de Matlab, après discrétisation par différences finies en schéma implicite et linéarisation des équations.

Afin de valider le modèle, les résultats des simulations sont comparés à ceux des travaux expérimentaux réalisés au laboratoire des «Systèmes Hydrauliques Urbains» de l'ENGEES à Strasbourg (France).

Dans le dernier chapitre, nous présentons l'organigramme général du programme informatique que nous avons conçu ainsi que les résultats des simulations du séchoir que nous avons obtenus pour deux périodes différentes de l'année, en Août et Mars. Les courbes sont commentées et une conclusion générale est développée, ouvrant des perspectives d'amélioration des travaux effectués.

CHAPITRE I

PRESENTATION DES STATIONS D'EPURATION

I.1 Introduction :

Les eaux usées qu'elles soient domestiques ou industrielles, sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être traitées dans une station d'épuration avant leur rejet dans un milieu naturel. En station, les traitements varient en fonction de la nature de ces eaux usées et de la sensibilité à la pollution du milieu récepteur.

Parmi toutes les solutions de traitement des eaux envisageables, il en existe une qui fait intervenir les avantages naturels que nous offre la nature, par l'intermédiaire des microorganismes constituant le système écologique. Il s'agit d'un procédé permettant le développement et le contrôle de ces microorganismes, dont le principal rôle est l'élimination des matières organiques.

L'eau des rivières et de mer peut éliminer naturellement la pollution lorsque les agents polluants sont dégradables. Mais cette dégradation peut prendre beaucoup de temps suivant le type de pollution. Par exemple, les pesticides, le pétrole, le plastique et certains métaux (plomb, mercure, cadmium) peuvent rester plusieurs milliers d'années dans l'eau.

Dans les centrales d'assainissement ou stations d'épuration, le traitement de l'eau se fait par utilisation de produits chimiques ou encore de bactéries dépolluantes.

Dans le contexte de notre pays, il faut souligner le rôle de l'Office National de l'Assainissement, l'ONA, qui est chargé de l'exploitation et de la maintenance des ouvrages et infrastructures d'assainissement en Algérie. Il a pour missions d'assurer la protection et la sauvegarde des ressources et de l'environnement hydriques, et de diriger la lutte contre les sources de pollution hydrique.

L'ONA assure également pour le compte de l'état algérien, la maîtrise d'ouvrage et d'œuvre déléguée concernant les projets d'études, de réalisation, de réhabilitation, de diagnostics de stations d'épuration, de réseaux d'assainissement ainsi que des stations de relevage.

Dans ce qui suit, nous allons décrire, d'une manière générale, les différentes opérations de traitement subies par les eaux usées arrivant dans les stations d'épuration, en portant un regard particulier sur les caractéristiques de la station d'épuration nouvellement érigée dans la partie Est de la ville de Tizi-Ouzou. (Stage effectué en Juillet 2011).

I.2 Généralités sur les stations d'épuration:

I.2.1 Quelques mots sur la station d'épuration de Tizi-Ouzou Est:

La station d'épuration Est de la ville de Tizi-Ouzou, a été mise en marche au courant de l'année 2000. L'ONA s'était engagé dans une démarche de management de l'environnement selon la norme ISO 14001 version 2004.

Cette démarche volontaire a été couronnée par une certification du siège de la zone d'Alger, du laboratoire central, du système d'assainissement Est de la ville de TIZI OUZOU et du système d'assainissement de CHENOUA wilaya de TIPAZA. Elle est certifiée en 2007 par la norme ISO 14001. Cette distinction demeure la première à l'échelle nationale et Africaine dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des systèmes d'assainissement.

L'étude de ce projet a été effectuée par la direction de l'hydraulique de la wilaya de Tizi-Ouzou, en collaboration avec la société française DEGREMONT.

La station a pour but l'épuration des effluents de la partie Est de la ville de Tizi-Ouzou, selon le procédé "boues activées", pour un volume journalier théorique de 18000 m³/jour, et une capacité de 120.000 Equivalent/habitant. Les effluents arrivent par voie gravitaire à la station, par un réseau unitaire. Les eaux usées à traiter sont exclusivement domestiques.

La station d'épuration Est de Tizi-Ouzou est implantée sur la berge de l'oued Sebaou à l'endroit appelé "pont de bougie" situé à 3 Km à l'Est de la ville de Tizi-Ouzou .

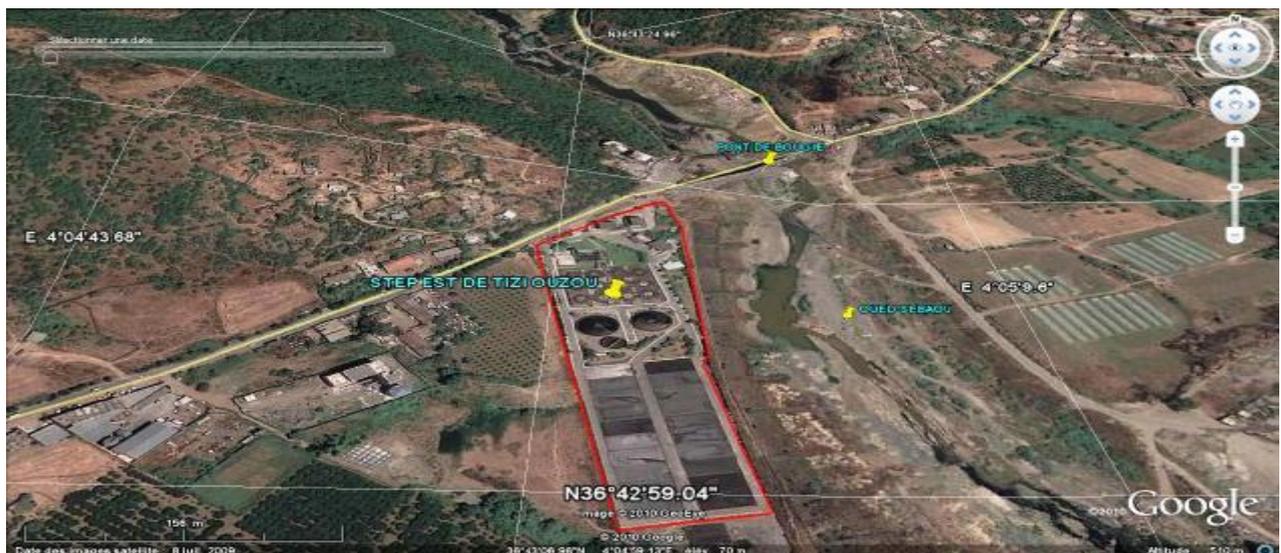


Figure (I.1) : Coordonnées géographiques de la station d'épuration Est de Tizi-Ouzou.

I.2.2 La collecte des eaux usées :

1.2.2.1 Structure du réseau d'assainissement:

Le réseau d'assainissement des eaux usées d'une agglomération a pour fonction de collecter ces eaux pour les conduire à une station d'épuration.

La collecte s'effectue par l'évacuation des eaux usées domestiques, (et éventuellement industrielles ou pluviales) dans les canalisations d'un réseau d'assainissement appelés aussi collecteurs. Le transport des eaux usées dans les collecteurs se fait en général par gravité, c'est-à-dire sous l'effet de leur poids. Il peut parfois s'effectuer par refoulement, sous pression ou sous dépression. Les canalisations sont en ciment, parfois en fonte, plus rarement en grès ou en acier. Lorsque la configuration du terrain ne permet pas un écoulement satisfaisant des eaux collectées, on a recours à différents procédés (pompage et/ou stations de relèvement) pour faciliter leur acheminement.

La protection du réseau contre l'encrassement et la corrosion est assurée en premier lieu par le prétraitement de certaines eaux industrielles avant leur rejet dans le réseau.

1.2.2.2 Les deux principaux types de réseaux:

S'il est relativement facile de prévoir et de contrôler le volume des eaux usées domestiques, il en va tout autrement des eaux pluviales. Il existe deux types de réseaux de collecte :

Les réseaux unitaires : qui évacuent dans les mêmes canalisations les eaux usées domestiques et les eaux pluviales. Ils cumulent les avantages de l'économie (un seul réseau à construire et à gérer) et de la simplicité (toute erreur de branchement est exclue, par définition); mais nécessitent de tenir compte des brutales variations de débit des eaux pluviales dans la conception et le dimensionnement des collecteurs et des ouvrages de traitement.

Les réseaux séparatifs : qui collectent les eaux domestiques dans un réseau et les eaux pluviales dans un autre. Ce système a l'avantage d'éviter le risque de débordement d'eaux usées dans le milieu naturel lorsqu'il pleut. Il permet de mieux maîtriser le flux et sa concentration en pollution et de mieux adapter la capacité des stations d'épuration.

I.2.3 Processus de traitement des eaux usées :

Les traitements appliqués aux eaux usées dépendent bien sûr de leur degré de pollution, mais aussi des exigences de qualité du milieu naturel dans lequel l'eau épurée sera rejetée (zone de baignade, de pêche, d'aquaculture..).

CHAPITRE I _____ PRESENTATION DES STATIONS D'EPURATION

Il existe en général, trois niveaux de traitement :

- Ø **Le traitement primaire** : pour éliminer les gros déchets et les matières solides en suspension.
- Ø **Le traitement secondaire** : pour réduire les polluants dissous dans l'eau par des procédés biologiques ou physicochimiques.
- Ø **Le traitement tertiaire (traitement des boues)** : le plus poussé, pour désinfecter l'eau et éliminer l'azote et le phosphore. Ces deux composés sont extraits sous formes de boues, et peuvent être recyclés dans l'agriculture, comme fertilisant pour les cultures.

Les principaux procédés d'épuration peuvent être classés en trois catégories :

- procédés physiques,
- procédés physico-chimiques,
- procédés biologiques.



Figure (I .2) : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées .

1.2.3.1 Les procédés physiques :

Les traitements physiques visent essentiellement à conditionner l'eau en vue d'un traitement secondaire ou en vue d'un rejet dans le milieu naturel lorsque cela est toléré. Ils regroupent :

- les prétraitements,
- les traitements primaires.

Les dispositifs de prétraitement sont présents dans toutes les stations d'épuration, quels que soient les procédés mis en œuvre à l'aval. Ils ont pour but d'éliminer les éléments solides ou les grosses particules (bouteilles d'eaux, troncs d'arbres,...etc.) susceptibles de

gêner les traitements ultérieurs ou d'endommager les équipements : déchets volumineux (dégrillage), sables (dessablage) et corps gras (dégraissage-déshuilage).



Figure (I. 3): Prétraitement (Source originale ONA, 2011)

Le dégrillage :

Les dégrilleurs assurent la protection des équipements électromécaniques et réduisent les risques de colmatage des conduites mises en place dans la station d'épuration. Le plus souvent il s'agit de grilles qui récupèrent les déchets plus ou moins volumineux entraînés par les eaux s'écoulant dans les canalisations d'assainissement. Une grande diversité de grilles est disponible sur le marché (droite, courbe, nettoyage amont, aval, ...). Il existe deux types :

Le dégrillage grossier : il consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux sont plus ou moins espacés (50 à 100 mm). Il élimine les plus gros déchets.

Le dégrillage fin : (tamisage) est une grille de plus faible espacement (25 mm). Son rôle consiste à éliminer les déchets de plus petites tailles passés au travers du dégrillage grossier (ordures ménagères, plastiques,...). Il en existe deux types : l'un est automatique qui travaille 24h/24h et un autre manuel, utilisé en cas de panne.

Le dessablage :

Réalisé par décantation, le dessablage vise à éliminer les sables et les graviers. L'écoulement de l'eau à une vitesse réduite dans un bassin appelé « dessableur » entraîne leurs dépôts au fond de l'ouvrage. Ces particules sont ensuite aspirées par une pompe. Les sables récupérés sont essorés, puis lavés avant d'être mis en décharge. Ils vont être éliminés à l'extérieur à l'aide d'une pompe qui s'appelle : vis à sable.



Figure (I. 4): Le dégrillage grossier



Figure (I. 5) : Le dégrillage fin [1].



Figure (I. 6): Le dégrillage et le dessablage .

Le dégraissage-déshuilage : Ces opérations consistent à séparer de l'effluent brut, les huiles et les graisses par flottation, ces dernières étant des produits de densités légèrement inférieures à celle de l'eau. L'injection des micros bulle d'air permet d'accélérer la flottation des graisses. Souvent ces opérations sont combinées dans un même ouvrage ou la réduction de vitesse dépose les sables et laisse flotter les graisses.

1.2.3.2 Le traitement biologique : (photo 5 :bassins d'aération)

L'épuration par voie biologique (biodégradation) est réalisée par l'activité des micro-organismes capables de métaboliser la matière organique et donc de conduire à l'épuration des eaux résiduaires chargées en matières organiques biodégradables.

Les traitements des eaux résiduaires urbaines mettent en œuvre le processus du métabolisme. La pollution organique est retenue par les micro-organismes par action physique et physico - chimique. Elle est alors utilisée par ces derniers pour leurs croissances et leurs proliférations.

La biodégradation des matières organiques présentes dans l'eau usée peut se faire suivant deux voies : anaérobie et aérobie.

Dans les bassins d'aération, la culture bactérienne est maintenue en suspension dans le courant des eaux usées à traiter. Il s'agit des boues activées, qui est un procédé qui consiste à provoquer le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocons dans un bassin brassé et aéré, alimenté par l'eau usée à traiter. Les microorganismes épurateurs

CHAPITRE I PRESENTATION DES STATIONS D'EPURATION

utilisent beaucoup d'oxygène pour assimiler la pollution et pour leurs propres besoins ; plus les boues sont concentrées et plus il faudra d'oxygène pour la dégradation de la matière organique.

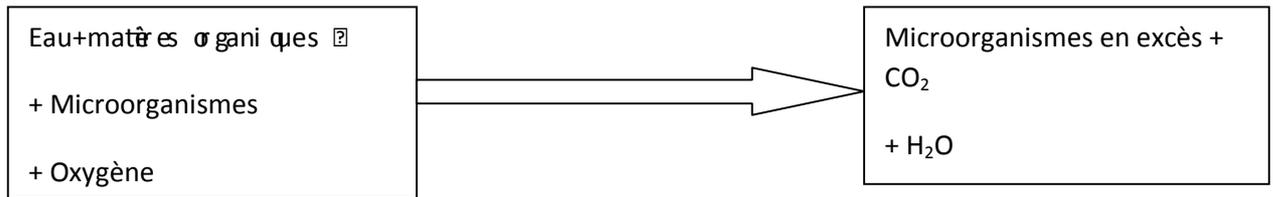


Figure (I. 7): Traitement biologique (Source originale ONA, 2011)

1.2.3.3 Clarificateur et recirculation:

Après un temps de contact avec l'air, suffisamment long, dans le bassin de traitement biologique, la liqueur mixte est envoyée dans un clarificateur appelé parfois décanteur secondaire, destiné à séparer l'eau des boues.

Ces dernières sont recyclées dans le bassin d'aération (boues de recirculation ou boues de retour) pour y maintenir une concentration suffisante en bactéries épuratrices. L'excédent (boues secondaires en excès) est extrait du système et évacué vers la stabilisation.

Les boues récupérées par le raclage de fond sont recirculées en tête de chaque bassin d'aération par l'intermédiaire de deux postes de pompage accolés aux bassins d'aération.

L'eau clarifiée transite dans un canal permettant la mesure du débit d'eau traitée par la mesure de la hauteur d'eau en canal de venturi puis rejetée vers l'oued. La boue est récupérée et envoyée vers l'épaisseur. (Voire photo 8)



Figure (I. 8) : Le clarificateur

I.2.4 Traitement des boues :

1.2.4.1 Poste de pompage :

Un poste de pompage des boues décantées est mis en place en vue de les recycler en partie dans les bassins de boues activées pour maintenir une activité biologique optimale dans le réacteur biologique. Ce poste assure également l'extraction des boues en excès vers les bassins de décantation puis de stabilisation aérobie dans lequel elles subissent un traitement physico-chimique afin de dégrader les matières organiques et éviter la fermentation des boues.

1.2.4.2 Epaississeur:

Les boues activées sont dirigées vers l'épaississeur, où elles subissent une décantation qui les rendra plus épaisses et plus denses. (Photo 9) Les buts visés sont :

- la réduction du volume de la boue.
- La production d'une boue plus concentrée en matière solide.
- Evacuation d'une eau claire, peu chargée, qui est recirculée en tête de la station.

1.2.4.3 Les lits de séchage :

Le séchage des boues se fait sur des lits de sable, c'est une filtration et évaporation naturelles de la boue sur une aire de séchage. A la station de Tizi-Ouzou, Ils sont au nombre de 20 lits. La durée de séchage dépend des conditions climatiques. L'extraction des boues se fait manuellement et sont destinées au monde agricole.



Figure (I. 9) : Epaisseur des boues et lits de séchage.

I.3 Caractéristiques de l'eau usée urbaine et de la boue:

I.3.1 Caractéristiques de l'eau usée urbaine :

I.3.1.1 Définition des paramètres de pollution caractérisant une eau usée:

Dans l'eau usée, on retrouvera des matières minérales et organiques en solution et en suspension. Une partie de ces substances seront biodégradables et d'autres non biodégradables.

- **La DBO :**

La première manifestation de la pollution des eaux usées domestiques est due aux matières organiques. Lors du traitement biologique, elles seront dissoutes par les microorganismes provoquant une consommation importante d'oxygène, On définit ainsi la Demande Biochimique en Oxygène (DBO) qui caractérise la quantité nécessaire d'oxygène. La demande biochimique en oxygène après n jours (DBOn) représente la quantité d'oxygène dissous qu'il faut fournir à un échantillon d'eau pour minéraliser par voie biochimique (oxydation bactérienne) les matières organiques et/ou inorganiques.

Il s'agit de la demande en oxygène pour oxyder la matière organique à l'aide d'une biomasse épuratrice (boues de microorganismes).

- **MES :**

Il est également intéressant de déterminer la quantité des particules en suspension et donc susceptible de décanter ou de flotter. On mesure, pour ce faire, les Matière En Suspension (MES). Les matières en suspension représente la quantité en particules non dissoutes dans l'effluent qu'elles soient décantables ou non (organiques et minérales : poussières, sables, graisses,..).

Les MES se subdivise en deux catégories : les matières fixes et les matières volatiles. En effet, une partie des MES se volatilise lorsqu'elles sont chauffées à haute température (600°C) ; cette partie constitue la fraction organique, principalement biodégradable et est appelé Matière Volatile Sèche (MVS). Ces MES sont séparables soit par décantation, soit par flottation.

- **La DCO :**

Parmi les éléments présents dans l'eau, deux sont très importants car indispensable à la synthèse des microorganismes et des végétaux dans les milieux aquatiques. Il s'agit de l'azote N et du phosphore P assimilés généralement par les plantes sous forme de nitrate (NO_3^-) et de phosphate (PO_4^{3-}). Appelée aussi « oxydabilité », la DCO représente la demande chimique en oxygène ; elle permet de mesurer le degré réducteur de l'eau (par mesure d'échange d'électrons). Ce paramètre donne une indication sur la pollution par les matières organiques. Elle concerne donc les composés biodégradables (DCO_{bd}) ou biotransformables (N-NH_4 , N-NO_2) en condition aérobie.

- **Azote :**

L'élimination de l'azote des eaux usées est nécessaire pour que la qualité du milieu récepteur soit préservée. L'azote peut se présenter sous quatre formes : NH_4^+ , NO_2^{2-} , NO_3^- , NH_3^- .

L'ammoniaque provoque, par son oxydation, une consommation de l'oxygène dissous présent dans le milieu aquatique.

- **Phosphore et ortho phosphates : PO_4^{3-}**

Dans les effluents urbains le phosphore provient des déjections humaines et des détergents.

I.3.2 Caractérisation des boues :

I.3.2.1 Origine et caractéristiques des boues :

Une boue est une suspension dans l'eau, de matières solides, individualisées ou colloïdales. Les boues fraîches présentent un aspect liquide, et peuvent contenir jusqu'à 97% d'eau sous forme de :

- Ü Eau libre séparable par décantation (plus ou moins 70%).
- Ü Eau d'hydratation séparable par filtration sous pression réduite. (plus ou moins 20%).
- Ü Eau capillaire séparable par filtration sous pression élevée (filtre presse). (plus ou moins de 20%).
- Ü 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 :

Exemple : matières fermentescibles, métaux lourds, produits chimiques, savons et détergent, germes pathogènes,....

a₁. Origine des boues :

Boues primaires : Ce sont des boues obtenues par simple décantation primaire des eaux usées. Elles sont constituées de matières minérales (sable, terre,...) et organiques. Ces boues présentent des concentrations élevées.

Boues biologiques ou secondaires : Ce sont des boues issues du traitement biologique. Elles sont essentiellement constituées de bactéries et sont très organiques et peu concentrées.

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.

Boues d'aération prolongée : Ces boues existent au niveau des STEP sans décantation primaire. Elles sont moins organiques et produisent donc moins de nuisances ultérieures.

a₂. Caractéristiques des boues :

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 sèche représente la Siccité.

$$\begin{aligned} \text{BOUES} &= \text{EAU} && + && \text{MATIERES SECHES} \\ 100\% &= \text{HUMIDITE (\%)} && + && \text{SICCITE (\%)} \end{aligned}$$

Concentration en matières sèches (MS) : La concentration en matière sèche est la masse de la matière sèche (g) par litre de boue.

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

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

Généralement, on exprime 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.

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 ». Donc, une boue présentant un taux de MVS inférieur ou égal à 40%, est dite « stable ».

I.3.2.2 Détermination des caractéristiques de la boue :

- Prélèvement et échantillonnage :

Les analyses sont effectuées au cours du traitement des boues afin d'évaluer ces caractéristiques et quantifier la production de boue. Les prélèvements sont faits à différents niveaux, à savoir : le bassin d'aération (BA_{1,2}), le bassin de stabilisation (BS_{1,2}), le bassin de recyclage ou au poste de recirculation (BR_{1,2}) ; et enfin dans les lits de séchage.

- Détermination de la MS : (filtration par gravité).

- peser le papier filtre (P₀).
- Placer le filtre dans un entonnoir.
- Placer l'entonnoir sur une éprouvette
- Verser une quantité d'échantillon (boue : de BA_{1,2}, BS_{1,2}, BR_{1,2}) et laisser filtrer.
- Après filtration, mettre le papier filtre dans une coupelle.
- Sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
- Peser la masse de ce filtre P₁.
- La concentration en matières sèches est obtenue selon la formule :

$$MS = (P_1 - P_0) \times 1000 / V \text{ (g/l)} \quad \text{Equation I-1}$$

- Test de décantation et détermination de l'indice de boue :

- Prélever un échantillon de boue dans les bassins d'aération (de préférence en sortie du bassin et après 15mn de fonctionnement de l'aérateur).
- Remplir une éprouvette de 1000ml avec 1L de boue, mélanger en retournant l'éprouvette pour bien agiter.
- Poser l'éprouvette sur un support stable.
- Après 30mn, noter le niveau de boue dans l'éprouvette, cette valeur est le V₃₀ exprimé en "ml/l".
- Le V₃₀ doit être impérativement inférieur à 300ml/l. Dans le cas contraire, procéder à une dilution avec de l'eau épurée (500ml de boue+500ml d'eau épurée).
- Le calcul de l'indice de boue est le suivant :

$$IB = V_{30} / MES \quad \text{Equation I-2}$$

Dans l'éprouvette après dilution

MES : c'est la concentration en matière en suspension dans l'éprouvette exprimée en "g/l".

V₃₀ : volume de boue décantée en 30mn exprimé en "ml/l".

- **Détermination de la Siccité et du taux de MVS :**

On introduit dans une coupelle de masse connue (P_0), une certaine quantité de boue et on pèse la coupelle : c'est la pesée P_1 . La différence ($P_1 - P_0$) correspond à la masse de boue humide.

On place alors la coupelle dans une étuve à 105°C jusqu'à évaporation totale de l'eau. Après refroidissement, la coupelle est pesée de nouveau : c'est la pesée P_2 . La différence ($P_2 - P_0$) détermine la masse de la Matière Sèche MS.

La Siccité est le pourcentage de masse MS par rapport à la masse de boue humide :

$$\text{Siccité} = 100 \times (P_2 - P_0) / (P_1 - P_0) \quad \text{Equation I-3}$$

Après la détermination de la Siccité, la coupelle est introduite dans un four à 550°C où les matières organiques brûlent et sont transformées en matières volatiles. La coupelle est à nouveau pesée après refroidissement : c'est la pesée P_3 .

La différence ($P_2 - P_3$) représente la masse de Matière Volatile S. Le taux de MVS est évalué par rapport à la masse de matière sèche :

$$\text{Taux de MVS} = 100 \times (P_2 - P_3) / (P_2 - P_0) \quad \text{Equation I-4}$$

- **Résultats des mesures :**

Tableau (I.1) : Mesure des MVS

	P_0	P_1	P_2	P_3
BA₁	8,2046	10,2806	8,2204	8,2126
BA₂	7,9691	10,9448	7,9929	7,9817
BS₁	7,9943	11,1849	8,0844	8,0445
BS₂	8,2231	10,1614	8,2697	8,2481

Tableau (I.2) : Mesure des MS [1].

	P_0	P_1	$(P_1-P_0)/100ml$	$MS = (P_1-P_0)/1L$
BA₁	3,12	3,8213	0,7013	7,013
BA₂	3,16	3,8462	0,6862	6,862
BS₁	3,15	5,9748	3,8248	38,248
BS₂	2,83	3,7850	0,995	9,95
BR₁	3,13	3,7799	0,6499	6,449
BR₂	3,34	5,8727	5,5327	55,327

Tableau (I.3) : Récapitulatif des résultats de la filière boue après calculs [1].

Paramètres	Boues de BA ₁	Boues de BA ₂	Boues de BS ₁	Boues de BS ₂	Boues de retour 1	Boues de retour 2	Boues épaisses	Boues séchées
MS (g/l)	7.11	6.86	28.24	29,55	26,49	25,53	54,59	-
MVS (%)	49,36	47,05	44,05	46,35	-	-	-	-
Siccité (%)	-	-	-	-	-	-	-	28,11

I.4 Conclusion:

Au terme de ce stage effectué au sein de la nouvelle station d'épuration de la ville de Tizi-Ouzou, la première constatation qui nous vient immédiatement à l'esprit est la contribution de cette STEP à la dépollution des rejets d'une grande partie de la population de la ville de Tizi-Ouzou, de sorte qu'on ne puisse imaginer l'avenir de la grande nappe alluviale du SEBAOU si cette station d'épuration n'avait pas été construite.

Nous avons mis à profit cette période pour mieux appréhender le fonctionnement de chacun de ses organes, et pour étudier les différentes étapes du traitement des eaux usées avant leur épuration et leur rejet dans l'Oued Sebaou.

Les boues résiduelles sont acheminées en fin de processus vers des lits de sable, une vingtaine est installée dans cette station, en vue de leur séchage à l'air libre avant leur stockage. Les filières de valorisation de ces boues sont nombreuses. On peut citer la

CHAPITRE I _____ PRESENTATION DES STATIONS D'EPURATION

valorisation énergétique par incinération, la transformation en bétons et tuiles, le compostage, et l'épandage agricole... Mais tous ces procédés de valorisation utilisent de la boue partiellement ou totalement déshydratée.

Le séchage des boues résiduaires est donc indispensable. Les techniques de séchage sont très diverses et bien souvent adaptées aux filières de valorisation des boues. On peut citer la déshydratation par filtration, centrifugation, oxydation thermique, par ajout de réactifs minéraux, thermique, etc....

Toutes ces techniques sont assez voraces en énergie et en termes de coûts d'investissement et de fonctionnement. La filière de valorisation agricole est la seule qui soit envisagée pour le moment pour les boues de la station de Tizi-Ouzou. Cette voie ne nécessite pas de disposer d'un produit final de très grande siccité, et au vu de la taille moyenne de la station, le séchage solaire sous serre est le mieux adapté des procédés de déshydratation.

C'est dans cette optique que s'inscrit l'objectif assigné à la suite de ce travail et qui consiste à développer un outil mathématique qui modélise les phénomènes physiques qui se déroulent dans la serre et prévoir ainsi l'évolution des vitesses de séchage en fonction de la configuration du système et des conditions extérieures, et par conséquent le temps de séchage et la quantité de boue produite.

CHAPITRE II

RAPPELS SUR LE SECHAGE SOLAIRE

II.1 Introduction:

Nous avons vu dans le chapitre précédent que pour toutes les filières de valorisation des boues résiduaires des stations d'épuration, leur déshydratation est indispensable. Le séchage, qu'il soit traditionnel ou moderne, a pour objet de réduire fortement les diverses réactions participant à la décomposition normale du produit. Pour ce faire il faut donc extraire une part importante de l'eau contenue dans le produit. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant. Pour cela il faut de l'énergie thermique (soleil, électricité, gaz ...). Grâce à cette énergie, l'eau migre au sein du produit, se transforme en vapeur d'eau et est entraînée vers l'extérieur dans le cas d'un séchoir fermé.

Bien sécher c'est donc maîtriser de nombreux paramètres : cela passe nécessairement par la connaissance de certaines caractéristiques du produit à sécher et par l'évaluation des ressources énergétiques disponibles. Pour cela, il conviendra de rappeler quelques notions générales sur la présence de l'eau dans les solides poreux et plus particulièrement dans les boues, des points de vue qualitatif et quantitatif, avant de nous intéresser à leur cinétique de séchage.

Comme il s'agit de séchage solaire, nous traiterons la question de l'évaluation du gisement solaire, donc, de l'énergie mise en jeu dans le séchoir.

II.2 Teneur en eau :

Tout produit qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse totale m :

- Une masse m_e d'eau
- La masse restante $m_s = m - m_e$ est appelée masse anhydre ou masse sèche.

Comme pour l'air humide, on définit l'humidité ou teneur en eau du produit (en base sèche) par :

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad \text{Equation II-1}$$

L'humidité d'un produit peut aussi être définie par la teneur en eau en base humide

$$X_h = \frac{m_e}{m} \quad \text{Equation II-2}$$

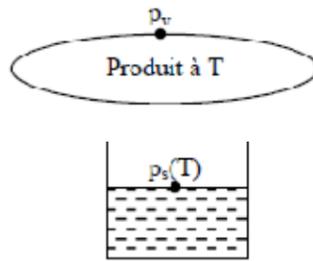
Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{X_h}{1-X_h} \quad \text{et} \quad X_h = \frac{X}{1+X} \quad \text{Equation II-3}$$

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche. Lorsque l'on parlera de teneur en eau sans autre précision, il s'agira donc de cette dernière [1].

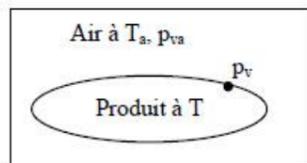
II.3 Activité de l'eau :

L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau p_v à la surface du produit et la pression de vapeur à la surface d'une nappe d'eau pure $p_s(T)$ portée à la température T du produit.



$$a_w = \frac{P_v}{P_s(T)} \quad \text{Equation II-4}$$

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre, p_v , T , p_{va} et T_a étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air :



L'équilibre impose: $T = T_a$ (pas de transfert de chaleur) et $p_v = p_{va}$ (pas de transfert de masse).

Or l'humidité relative de l'air s'écrit :

$$Hr_a = P_{va} / P_s(T_a) \quad \text{d'où l'on déduit :} \quad Hr_a = a_w.$$



L'activité de l'eau dans un produit est donc aussi l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit. L'intérêt de cette grandeur est qu'elle varie faiblement avec la température alors que la pression de vapeur d'eau p_v varie fortement [1].

II .4 Isothermes de désorption:

II.4.1 Définition:

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

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

Les deux courbes sont en général différentes (figure II-1) car le séchage d'un produit (passage de $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

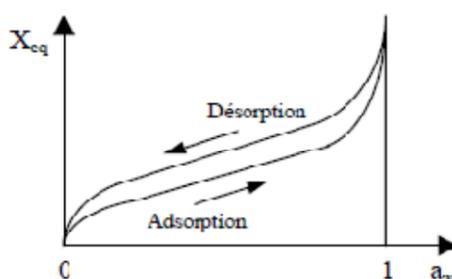


Figure II-1 : Allure générale des isothermes de sorption [1].

La connaissance de l'isotherme de désorption est particulièrement importante en vue du séchage d'un produit par entraînement, produit placé dans un courant d'air chaud et sec à température T_a , et humidité H_{ra} .

Elle permet de calculer la teneur en eau d'équilibre X_{eq} du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau X du produit en fin de séchage. Cette valeur est un paramètre qui apparaît en particulier dans les modèles permettant de prévoir l'évolution de la teneur en eau d'un produit au cours de son séchage. Les isothermes de



désorption peuvent présenter une variabilité selon le mode de préparation ou de fabrication du produit s'il n'est pas naturel ou selon le degré de maturité ou l'espèce du produit s'il s'agit d'un produit végétal. Ces variations sont toutefois peu importantes.

II.4.2 Formes et modèles des isothermes de sorption:

II.4.2.1 Forme générale des isothermes:

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones, chaque zone correspondant à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

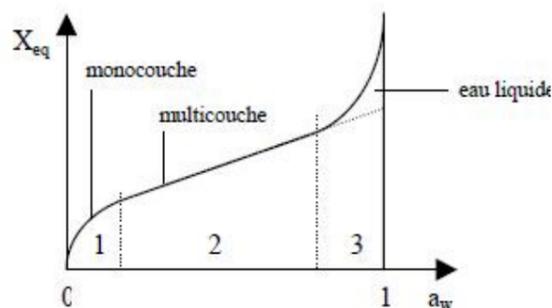


Figure II 2 : Différentes zones des isothermes de sorption [1].

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

Cette description très générale des isothermes d'adsorption a été reprise de manière plus précise par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) qui a établi six types différents d'isothermes correspondant chacune à un type différent d'interaction et de porosité.



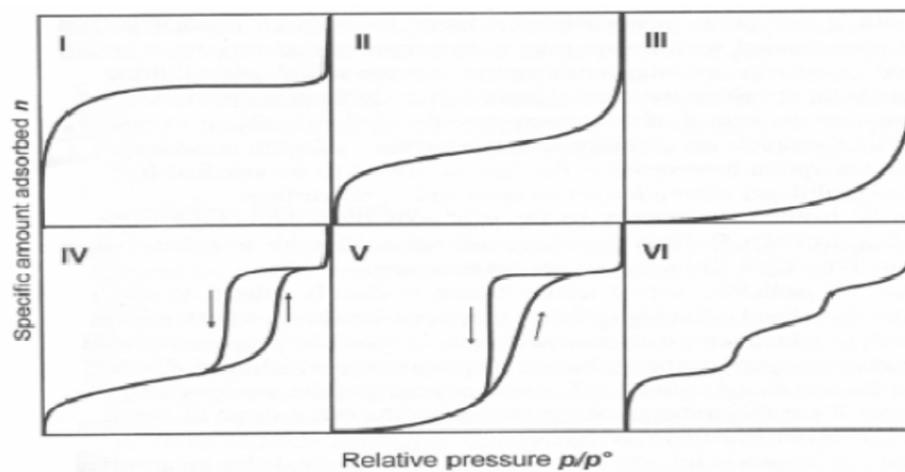


Figure II 3 : Différents types d'isothermes suivant la classification de l'IUPAC [1].

- **Type I** : Le milieu ne contient que des micropores saturés pour de faibles valeurs de P/P_s , il ne se produit ensuite aucune adsorption pour les valeurs plus élevées qui permettraient de remplir des méso pores.
- **Type II** : Le milieu est non poreux ou macroporeux, cette isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire : épaissement progressif de la couche adsorbée.
- **Type III** : Le milieu est du même type que pour les isothermes de type II mais les interactions milieu poreux -gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- **Type IV**: L'isotherme est identique à celle de type II aux basses pressions, un palier de saturation se développe aux hautes pressions. Elle correspond à un milieu méso poreux dans lequel se produit une condensation capillaire. Le phénomène n'est pas réversible, on observe en général une hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption.
- **Type V** : Le milieu est du même type que pour les isothermes de type IV mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isotherme est rarement rencontré.
- **Type VI**: Cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres. Les isothermes réelles obtenues expérimentalement ne correspondent que rarement de manière rigoureuse à l'un des types précités. Il faut donc interpréter chaque portion de l'isotherme en fonction des isothermes types pour interpréter une isotherme expérimentale.



Ces isothermes sont modélisées sous forme de fonctions polynomiales ou logarithmiques de la teneur et de la température, comme le montre le tableau ci-dessous :

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

Tableau II 1: Modèles pour les isothermes de sorption [1].

Pour les boues résiduaires, le modèle retenu est celui d'Oswin, avec les coefficients suivants :

à T= 30°C k = 0,112 n = 0,416
 T= 50°C k = 0,0938 n = 0,484

II .5 La cinétique de séchage:

Le séchage implique 2 types de transferts: le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite le passage en phase gazeuse. La vitesse du séchage est directement liée à ces 2 transferts.

L'examen de l'allure de la courbe ci-après permet une première approche macroscopique du comportement du produit pendant le séchage.



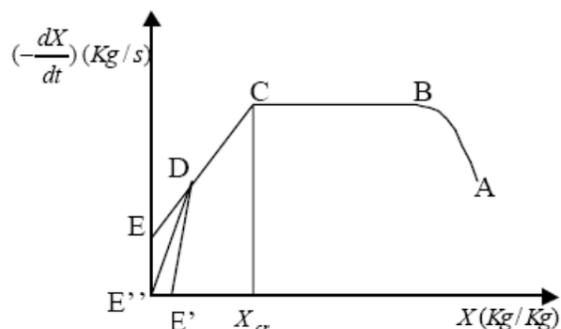


Figure II.4 Courbe de la cinétique de séchage [1].

On peut constater qu'il y a une première phase (AB) de mise en température du produit. Elle dure le temps d'amener le produit de la température T_a initiale à la température T_e résultant de l'équilibre entre le transfert de chaleur convectif air / produit et l'évaporation à la surface du produit. Suit 2 ou 3 phases selon les cas :

- **Phase de vitesse constante :**

La vitesse de séchage est constante et le liquide situé en surface du solide est évaporé. Pour cette phase, seules les conditions externes (surface de contact, pression partielle du liquide, température, volatilité du liquide) ont une influence primordiale. Le transfert thermique s'effectue entre la phase gazeuse et la surface liquide et le transfert massique se fait de la même manière, mais dans l'autre sens. Durant cette phase, la température de surface du produit reste constante et égale à la température humide de l'air [1].

- **Première phase de vitesse décroissante**

La vitesse diminue avec le temps, car la quantité de liquide a diminué à tel point que des zones sèches apparaissent à la surface du solide. Comme le transfert de masse et thermique ont lieu via la surface de contact gaz-liquide et que cette dernière diminue, la vitesse diminue de manière proportionnelle [1].

- **Deuxième phase de décroissance**

La vitesse de séchage diminue encore avec le temps, car la surface du solide est sèche et le liquide doit migrer de l'intérieur du solide jusqu'à sa surface. La chaleur passe par la surface du solide et est conduite par le solide jusqu'au liquide situé dans les interstices. Il n'y a plus d'eau libre dans le produit et l'eau se déplace du centre vers la surface sous forme de vapeur [3].

Le déplacement de cette vapeur est beaucoup plus lent. Le refroidissement de l'air du à l'évaporation devient moins important, la température du produit tend vers la température sèche de l'air.



II.6 Courbes caractéristiques de séchage:

Pour déterminer la vitesse de séchage de la boue après la teneur critique, c'est-à-dire dans la phase de vitesse décroissante, nous allons utiliser les courbes caractéristiques expérimentales de H. Amadou, qui a mené des expériences de séchage dans un séchoir à dimensions réduites, où la température, l'humidité et la vitesse de l'air asséchant sont maintenues constantes.

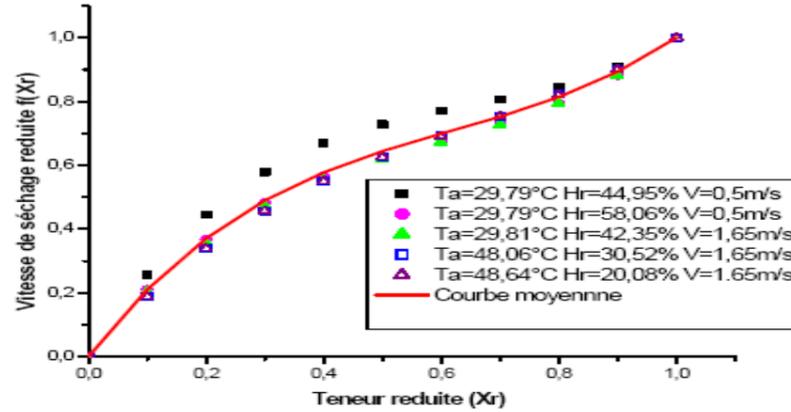


Figure II.5 Courbe caractéristique de séchage

La courbe moyenne est approchée par une relation polynomiale, en fonction de la teneur critique et de la vitesse de séchage initiale, et qui s'écrit :

$$\left(-\frac{dX}{dt}\right) = \left(-\frac{dX}{dt}\right)_1 f(X_r) \quad \text{avec} \quad f(X_r) = 2.37 X_r - 3.30 X_r^2 + 1.92 X_r^3$$

X_r est la teneur réduite calculée par la relation suivante : $X_r = \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e}$

La vitesse de séchage en phase initiale sera déterminée à partir des bilans massique et thermique dans la serre.



II.7 Gisement solaire :

Dans le but de calculer le flux reçu par la serre, nous allons nous intéresser aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre car la connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire.

II.7.1 Mouvements de la Terre :

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'*écliptique*. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.106 km [1].

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'*équateur*. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *inclinaison* et qui vaut $23^{\circ}27'$. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure ci-après [4].

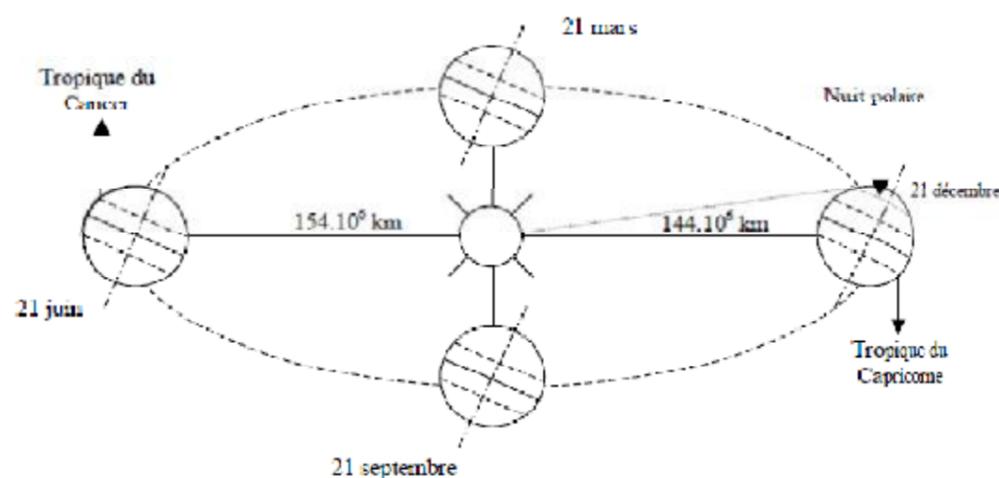


Figure II.6 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [1].

On appelle *déclinaison* δ , l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^{\circ}$ et $+23,45^{\circ}$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

$$\delta = 23,45 \sin[0,980 (j + 284)] \quad \text{Equation II-5}$$

Où j est le numéro du jour de l'année.



II.7.2 Mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure II-6. Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - \delta)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre [1].

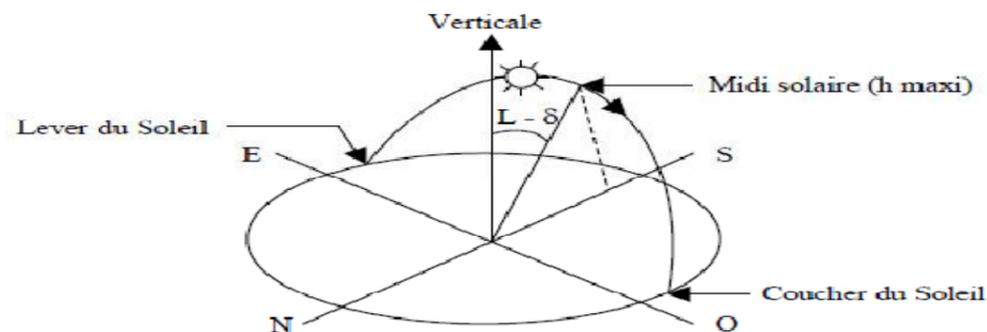


Figure II.7 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'*azimut a* : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La *hauteur h* du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

Ces deux angles sont représentés sur la figure II-8

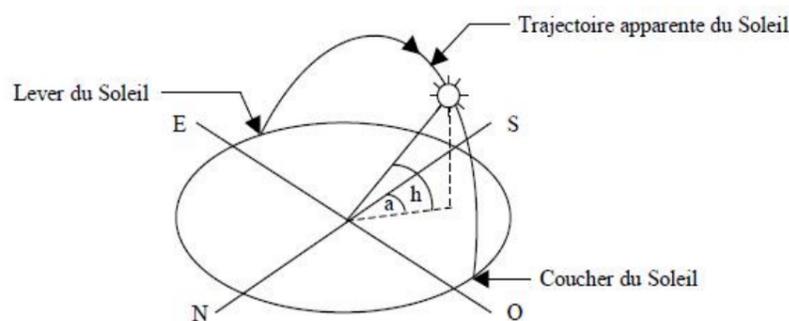


Figure II.8 : Repérage de la position du Soleil [1].

Ces deux angles sont fonction de la latitude L du lieu, de la date j (numéro du jour de l'année) et de l'heure solaire TS dans la journée. La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne sa position instantanée sur cette trajectoire.



On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire TS en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

On définit également l'angle horaire ω par :

$$\omega = 15^\circ (\text{TS} - 12) \quad \text{Equation II-6}$$

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad \text{Equation II-7}$$

ω est compté positivement l'après-midi.

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(a) = \cos\delta \sin\omega / \cos h \quad \text{Equation II-8}$$

Des diagrammes solaires peuvent également permettre une détermination rapide, en un lieu de latitude L donnée, des valeurs de a et h pour chaque heure (solaire) de la journée et chaque mois de l'année [1].

II.7.3 Heures et temps :

II.7.3.1 Durée du jour:

Le module ω_L de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$ dans la formule (II.7), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_L) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad \text{Equation II-9}$$

L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(\text{Ts})_L = 12 - \frac{\omega_L}{15} \quad \text{Equation II-10}$$

L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_L$ et la durée du jour vaut :

$$d = 2 \frac{\omega_L}{15} \quad \text{Equation II-11}$$

II.7.3.2 Relation entre temps légal et temps solaire:

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel ce pays se trouve :

$$C = \text{TL} - \text{TCF} \quad \text{Equation II-12}$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire.

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET :

$$ET = \left[\begin{array}{l} 0,0002 - 0,4797 \cos('j) + 3,2295 \cos(2'j) + 0,0903 \cos(3'j) \\ + 7,3509 \sin('j) + 9,39112 \sin(2'j) + 0,3361 \sin(3'j) \end{array} \right] \quad \text{Equation II-13}$$

Où j est le numéro du jour de l'année et $\omega' = 0,984$. ET est l'équation du temps (terme correctif) exprimée en minutes.

- La différence de longitude ($L_{ref} - L$) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule :

$$TS = TL - C + ET + \frac{(L_{ref} - L)}{15} \quad \text{Equation II-14}$$

La correction maximale due à l'équation du temps est de l'ordre de 16 mn, on peut ne pas en tenir compte en première approximation. On trouvera les variations annuelles de la déclinaison et de l'équation du temps sur la figure ci-dessous.

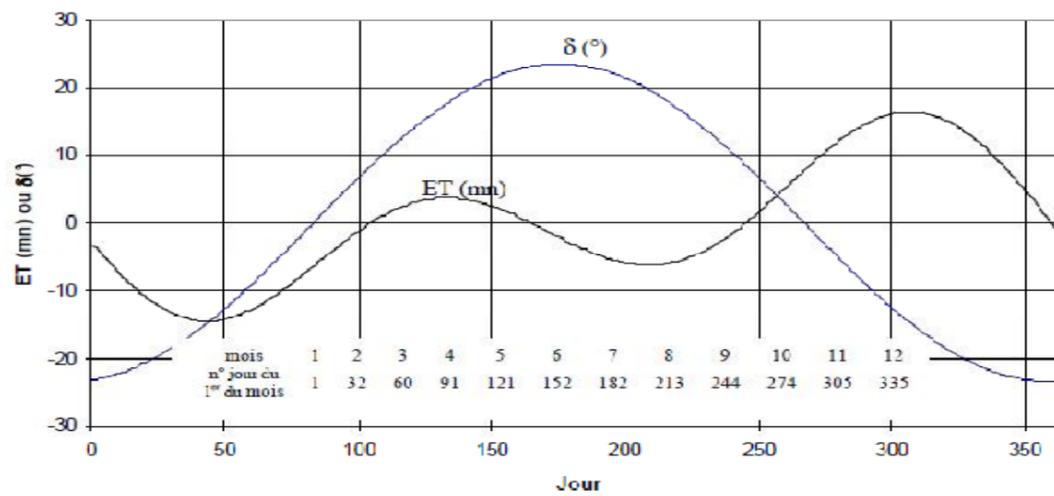


Figure II.9 : Equation du temps ET et déclinaison δ en fonction du jour de l'année [1].



II.7.4 Constante solaire

La puissance moyenne reçue par une surface plane unitaire, hors atmosphère, perpendiculaire aux rayons solaires est de 1367 w/m^2 ; elle varie au cours de l'année en raison de la variation de la distance terre-soleil. La constante solaire est donnée par:

$$I_0 = 1367 [1 + 0.034 \cos(0.986j - 2)] \quad \text{Equation II-15}$$

II.7.5 Angle d'incidence

C'est l'angle formé par le rayonnement incident et la normale à la surface du plan récepteur. Il est donné par la formule générale suivante :

$$\cos(\theta) = \cos(s) \cdot \sin(h) + \sin(s) \cdot \cos(h) \cdot \cos(a - \gamma) \quad \text{Equation II-16}$$

γ est l'orientation de la surface par rapport à la direction du sud (azimut de la surface) et s est son inclinaison par rapport à l'horizontale. Dans notre cas $\gamma = s = 0$.

II.7.6 Le flux solaire au sol :

Le flux énergétique qui parvient du soleil a subi plusieurs modifications et il est constitué de trois composantes :

- Le rayonnement direct, qui provient du disque solaire lui-même.
- Le rayonnement diffus, qui provient de l'ensemble de la voûte céleste.
- Le rayonnement réfléchi par le sol ou Albédo.

II.7.6.1 Calcul du rayonnement direct :

L'intensité du rayonnement direct mesurée sur un plan perpendiculaire à sa direction est liée à la hauteur du soleil sur l'horizon. Ce flux est donné par :

$$R_{\text{dir}} = I_0 \cdot C \cdot e \cdot \exp(-f / \sinh) \cdot S \quad \text{Equation II-17}$$

Pour un plan dont la normale fait un angle θ quelconque avec la direction du soleil :

$$R_{\text{dir}} = I_0 \cdot C \cdot e \cdot \exp(-f / \sinh) \cdot S \cdot \cos(\theta) \quad \text{Equation II-18}$$

e et f étant les coefficients de trouble de ciel dont les valeurs sont confinées dans le tableau ci-dessous :

	Ciel dégagé et très pur	Conditions normales	Zone industrielle
e	0.87	0.88	0.91
f	0.17	0.26	0.43

Tableau II.2 : Valeur des coefficients de trouble du ciel [1].

II.6.6.2 Calcul du rayonnement diffus:

Cette part du rayonnement solaire provient de toute la voute céleste et elle n'a pas d'orientation privilégiée. par ciel clair sa valeur est petite par rapport à la valeur du Direct, mais n'est pas négligeable. pour le plan horizontal on peut considérer, dans les mêmes conditions que précédemment, qu'il représente environ 15% de la valeur de l'éclairement direct sur ce même plan.

Le rayonnement solaire diffus est la somme de deux composantes : la première est émise par la voute céleste et la deuxième par le sol. Ce qui donne :

$$R_{dif} = (D_{f1} + D_{f2}) \cdot S \quad \text{Equation II-19}$$

D_{f1} : c'est le flux diffus reçu sur la serre provenant de la voute céleste

D_{f2} : c'est le flux diffus reçu sur la serre émis par le sol (albédo).

$$D_{f1} = \varphi_0 \cdot \frac{1 + \cos s}{2} \quad \text{Equation II-20}$$

$$D_{f2} = alb. (R_{dir} \sin h + \varphi_0) \quad \text{Equation II-21}$$

$$\varphi_0 = I_0 \cdot c \cdot \sinh[0.271 - 0.2939 \cdot e \cdot \exp(-f / \sinh)] \quad \text{Equation II-22}$$

Les courbes ci-dessous représentent les puissances globales estimées à partir des relations précédentes sur le site d'implantation de la station d'épuration étudiée.

Nous avons choisi deux journées, l'une favorable pour le séchage, en Août et la seconde au mois de Mars.

R_g (W/m²)

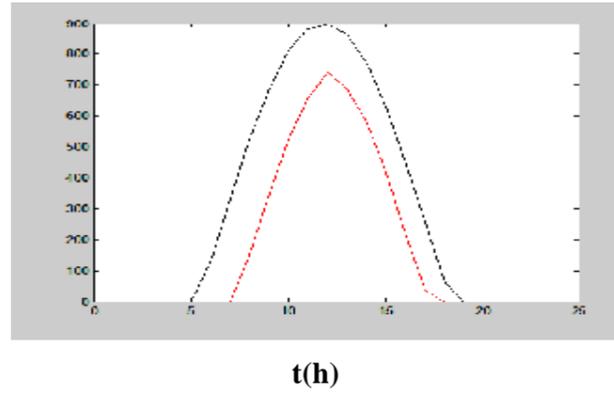


Figure II.10 : Densité de flux solaire global reçu par la serre (Journées du 10 Août et 5 mars)

II.7 Conclusion:

A partir des notions générales sur le séchage solaire qui ont été évoquées dans ce chapitre et du calcul des ressources énergétiques solaires, nous allons développer dans le chapitre suivant un modèle mathématique des transferts thermiques et massique dans le séchoir serre prévu pour les boues de la station.



CHAPITRE III

MODELISATION DE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE

III.1 Introduction :

Afin de cerner l'importance de chacun des paramètres tant internes qu'extérieurs qui interviennent dans le fonctionnement du séchoir et espérer aboutir à l'amélioration de ses performances, il apparaît indispensable de développer un modèle mathématique des phénomènes complexes de transferts massiques et thermiques qui ont lieu dans la serre.

Le modèle élaboré sera global, en ce sens qu'il sera établi à l'échelle macroscopique du procédé. Ainsi, on ne tiendra pas compte de la disparité de la température de l'air dans la serre ni encore des différences de teneur en eau de la boue. Ce modèle bien que simplifié, qui intègre les conditions climatiques locales du lieu d'implantation de la serre, a pour but de prévoir l'évolution de la vitesse de séchage et par conséquent la production de boues sèches ; on pourra ainsi agir sur la conception du séchoir.

Nous allons commencer par définir les bases physiques du modèle, et donner l'expression des différents flux thermique et massique intervenant dans le modèle puis définir les paramètres de la boue intervenant dans la modélisation. Après avoir écrit les équations, nous décrirons l'approche de la résolution numérique du problème.

III.2 Bases physiques du modèle :

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

- L'environnement extérieur
- La couverture
- L'air intérieur
- Le produit à sécher (la boue dans notre cas)

Le modèle 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 et qui sont :

- Les apports solaires au travers du matériau de la couverture ;
- Les échanges radiatifs de grande longueur d'onde entre les différents éléments;

- Les échanges de convection à la surface de la couverture et à celle de la boue;
- L'évaporation au niveau de la boue ;
- Le renouvellement d'air dû à la perméabilité de la serre ou à une ventilation mécanique.

La figure ci-après (Figure III.1) représente schématiquement l'ensemble des éléments à prendre en compte et les différents processus mis en jeu. 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 admettra les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La couverture de la serre est considérée comme une surface de faible épaisseur où l'échange par conduction entre la face extérieure et intérieure peut être négligé.
- Les apports énergétiques convectifs et solaires par les faces latérales sont négligés l'échange conductif entre la boue et son support est négligé.

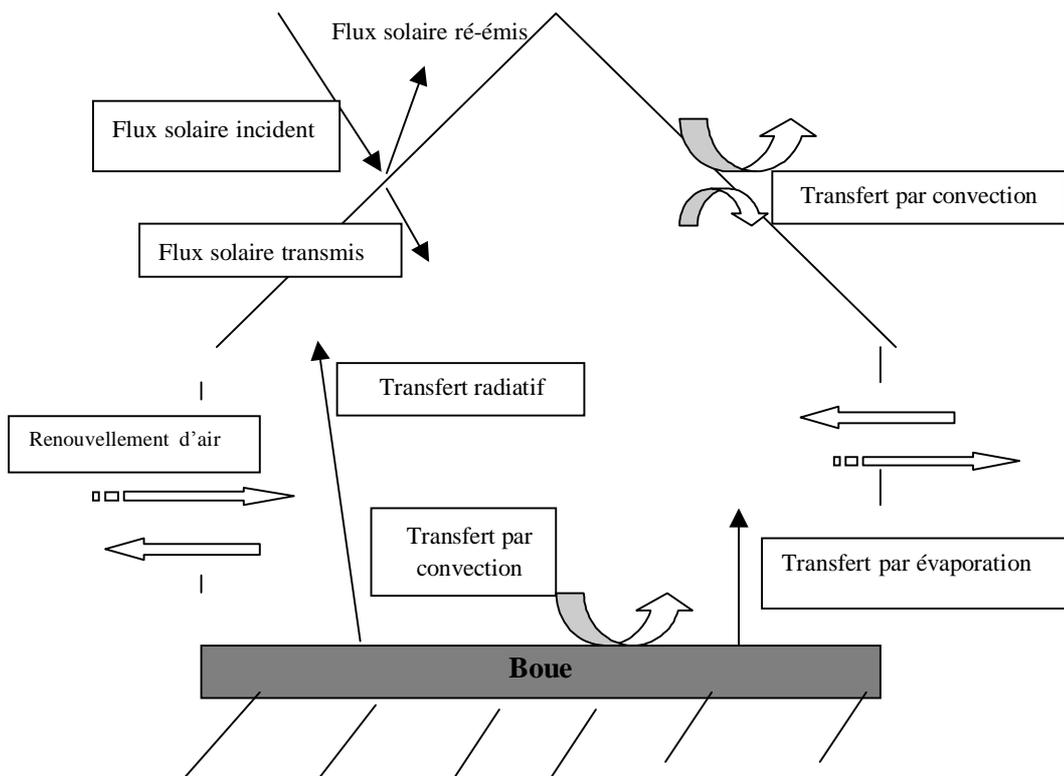


Figure III.1 Schéma des échanges thermiques et massiques pris en compte dans le modèle du séchoir solaire [4].

III.3 Analyse physique du modèle :

III.3.1 Représentation des composants de la serre :

III.3.1.1 Géométrie globale de la serre:

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

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

III.3.1.2 Représentation de la couverture:

Dans le cas de notre étude, la couverture est considérée comme simple paroi et sera caractérisée par sa surface, son épaisseur et ses caractéristiques optiques. Sa température sera considérée uniforme.

III.3.1.3 Représentation de l'air intérieur:

L'air intérieur est caractérisé par sa température et son humidité. L'hypothèse d'uniformité volumique de ces variables est admise par souci de simplification; il faut cependant garder à l'esprit le fait que, dans la réalité, un gradient de température et d'humidité 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. Les caractéristiques de l'air ainsi définies doivent être considérées comme des valeurs moyennes conduisant aux mêmes effets globaux.

III.3.1.4 Représentation de la boue:

Dans les serres industrielles les boues sont stockées à quelques dizaines de centimètres de hauteurs (30 à 40 cm), compatibles avec la taille des retourneurs quand ils existent. Dans le cas contraire, il faut considérer le séchage à couche mince d'environ 2 à 3 cm de hauteur de boue. L'état de la boue est caractérisé par sa température et la teneur en eau supposées uniformes sur l'ensemble de la couche.

III.3.1.5 Représentation du plancher:

Le support de laboue dans les serres industrielles est une dalle en béton (certains procédés intègrent à la dalle des plaques chauffantes). Le transfert thermique par conduction entre la boue et son support est ainsi négligé.

III.3.1.6 Environnement extérieur:

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

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

III.3.2 Ecriture des bilans thermiques et massiques :

III.3.2.2 Bilans énergétiques:

- **Bilan sur la couverture**

$$\Phi_{Rc} + \Phi_{Icv} + \Phi_{Icb} + \Phi_{Caic} - \Phi_{Ccae} = \Phi_{ic} \quad \text{Equation III-1}$$

Avec :

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

• **Bilan sur l'air intérieur**

$$\Phi_{Cbai} - \Phi_{Caiae} - \Phi_{Caic} = \Phi_{iai} \quad \text{Equation III-2}$$

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

• **Bilan thermique de la boue**

$$\Phi_{Rb} + \Phi_{Ibc} - \Phi_{Cbai} - \dot{m} L_v = \Phi_{ib} \quad \text{Equation III-3}$$

- Avec :
- Φ_{Rb} = Flux net de rayonnement solaire reçu par la boue
 - Φ_{Ibc} = Flux de rayonnement infrarouge émis vers la couverture
 - Φ_{Cbai} = Flux convectif de la boue vers l'air intérieur
 - Φ_{ib} = Flux d'accumulation d'inertie thermique de la boue
 - \dot{m} = Flux massique d'eau évaporée de la boue
 - L_v = Chaleur latente de vaporisation de l'eau

III.3.2.3 Bilans massiques:

• **Bilan massique en eau sur la boue**

$$\dot{m} = Ms \left(- \frac{dX}{dt} \right) \quad (\text{kgeau/s}) \quad \text{Équation III-4}$$

- Avec :
- Ms = Masse sèche de la boue
 - X = Teneur en eau de la boue en base sèche

III.4 Expression des flux énergétiques :

III.4.1 Flux radiatifs solaires :

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

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

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

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

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

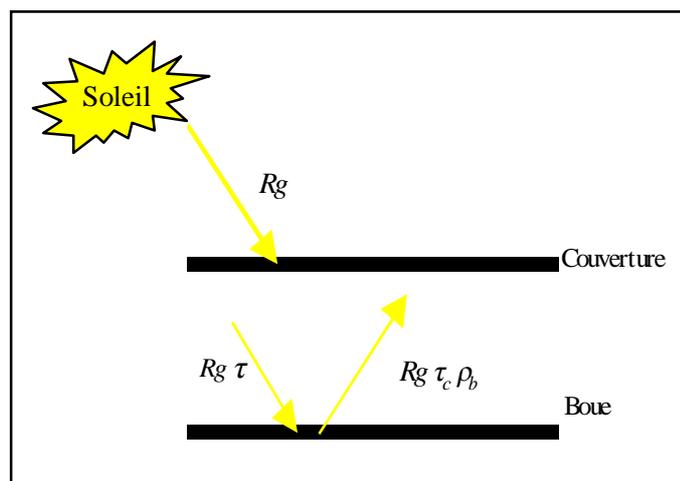


Figure III.2 Schéma des flux solaires absorbés [4].

• **Flux net absorbé par la couverture:**

$$\varphi_{Rc} = Rg \ a_c (1 + \tau_c \ \rho_b) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III-5}$$

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

• **Flux net absorbé par la boue**

$$\varphi_{Rb} = Rg \ \tau_c \ a_b \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III-6}$$

Avec : a_b = Coefficient d'absorption de la boue

III.4.2 Flux radiatifs Infrarouges:

Ils correspondent aux rayonnements émis par les différents éléments de la serre et dont le spectre se situe, compte tenu des températures de ces corps, dans le domaine de l'infrarouge de grande longueur d'onde.

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

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

III.4.2.1 Flux radiatif infrarouge milieu extérieur/ couverture:

La puissance de rayonnement infrarouge atteignant par unité de surface la couverture extérieure, due à la voûte céleste s'écrit:

$$\varphi_{Icv} = F_{vc} S e_c (T_v^4 - T_c^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III-7}$$

- Avec :
- S = Constante de Stefan –Boltzmann $(\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$
 - e_c = Emissivité de la couverture $(-)$
 - F_{bc} = Facteur de forme boue-couverture $(-)$
 - T_v = Température de la voûte céleste (K)
 - T_c = Température de la couverture (K)

La température équivalente de la voûte céleste est donnée par la relation de Swinbank [5]

$$T_v = 0,0552 T_{ae}^{1,5} \quad (\text{K}) \quad \text{Equation III-8}$$

Où T_{ae} est la température de l'air extérieur (K)

III.4.2.2 Flux radiatif infrarouge au sein du modèle:

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

$$\varphi_{Ibc} = F_{bc} \frac{\sigma}{\frac{1}{e_b} + \frac{1}{e_c} - 1} (T_c^4 - T_b^4) \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equation III-9}$$

Avec :	ϵ_b	= Emissivité de la boue	
	F_{bc}	= Facteur de forme boue-couverture	(-)
	T_c	= Température de la couverture	(K)
	T_b	= Température de la boue	(K)

III.4.3 Flux convectifs:

Ils concernent principalement les transferts d'énergie entre la paroi d'un solide (S) et le fluide (f) qui se situe à son contact. 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 :

$$\phi_{csf} = hS (T_s - T_f) \quad (\text{W}) \quad \text{Équation III-10}$$

h = coefficient d'échange convectif ($\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$)

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

III.4.3.1 Echange convectif milieu extérieur / couverture:

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

$$h_e = a + b V_v \quad (\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}) \quad \text{Equation III-11}$$

Avec :	V_v	= vitesse du vent	(m/s)
	a	= 5,67	$\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$
	b	= 3,86	$\text{W.m}^{-3}.\text{s}.\text{°C}^{-1}$

III.4.3.2 Echange convectif au sein du modèle:

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

$$Nu = h \frac{L}{\lambda} \quad \text{d'où} \quad h = Nu \frac{\lambda}{L} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{°C)} \quad \text{Équation III-12}$$

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 :

$$Nu = a (\text{Pr})^m (\text{Re})^n \quad \text{Équation III-13}$$

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

Nombre de Reynolds : $Re = \frac{Ul}{\nu}$

Avec :	U	= vitesse moyenne de l'air	(m/s)
	C_p	= chaleur massique de l'air sec	(J/ kg .°C)
	L	= longueur caractéristique	(m)
	ρ	= massique volumique de l'air	(kg/m ³)
	ν	= viscosité cinématique de l'air	(m ² /s)
	λ	= conductivité thermique de l'air	(W/m .°C)

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

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) [4] pour un écoulement d'air sur une plaque plane:

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0,66 Re^{0,5} Pr^{1/2} & Re \leq 10^5 \text{ et } 0,6 \leq Pr \leq 15 \\
 Nu &= (0,0337 Re^{0,8} + 872) Pr^{1/3} & 5 \cdot 10^5 < Re \leq 10^7 \\
 Nu &= 0,0336 Re^{0,8} Pr^{1/3} & Re > 10^7 \text{ et } 0,5 \leq Pr \leq 50
 \end{aligned}$$

Équation III-14

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 :

$$\phi_{Caiae} = \rho Q C_p (T_{ai} - T_{ae}) \quad (W) \quad \text{Équation III-15}$$

Avec :

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

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

$$Q=RV \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{Équation III-16}$$

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

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

III.4.4 Transfert de masse :

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

$$Ms \left(-\frac{dX}{dt} \right) = \frac{KS}{rvT} (P_{sat} - P_v) \quad (\text{Kg}_{\text{eau}}/\text{s}) \quad \text{Équation III-17}$$

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 (m/s)

T = température de la boue (K)

rv = constante de la vapeur (=462 J/Kg.K)

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

$$K = \frac{h}{\rho C_p} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Équation III-18}$$

III.4.5 Inertie thermique :

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

$$\varphi_i = \rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (\text{w}) \quad \text{Équation III-19}$$

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

III.5 Paramètres de la boue intervenant dans la modélisation :

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

- Les isothermes de sorption, qui caractérisent l'interaction eau-solide dans les boues ;
- La chaleur massique, quantifie l'énergie emmagasinée par la boue pour augmenter sa température d'un degré.

Ces paramètres sont utiles pour le dimensionnement des séchoirs. En effet l'intérêt des isothermes est double: d'une part, elles permettent de connaître la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage définies (température et humidité), appelée teneur en eau d'équilibre, d'autre part, elles fournissent des informations quant aux conditions limites lors de la modélisation.

III.6 Formulation et résolution du système d'équations :

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

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

III.6.1 Formulation du système d'équations :

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

Tableau III.1 Formulation du système d'équation du modèle

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

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

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

- Les **paramètres primaires** constitués de paramètres d'entrée fixes et de paramètres d'entrée évolutifs.

Dans cette catégorie, les *paramètres d'entrée fixes* 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 simulation. Le critère d'arrêt de la simulation est fixé sur la condition de la teneur en eau finale choisie.

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

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

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

Tableau III.2 Récapitulatif des paramètres du modèle

PARAMETRES D'ENTREE FIXES	Dimensions de la serre <ul style="list-style-type: none"> • longueur • largeur • hauteur
	Paramètres liés à la couverture <ul style="list-style-type: none"> • émissivité infra rouge de la couverture • transmissivité infra rouge de la couverture • coefficient d'absorption solaire couverture • coefficient de transmission solaire couverture • capacité surfacique de la couverture
	Paramètres liés à la boue <ul style="list-style-type: none"> • masse initiale • siccité initiale • siccité finale • émissivité infrarouge de la boue • coefficient d'absorption solaire de la boue • coefficient de réflexion solaire de la boue • chaleur massique anhydre de la boue • vitesse de séchage réduite Données astronomiques <ul style="list-style-type: none"> • quantième de l'année initial • longitude • latitude • albédo • décalage horaire Autres paramètres <ul style="list-style-type: none"> • surface du support de la boue • constante de Stephan Boltzmann

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

III.6.3 Résolution du système d'équations :

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

Ce système d'équations sera linéarisé et discrétisé en schéma implicite puis écrit sous la forme suivante : $AX+B=0$

Soit:

$$A_{11}T_c + A_{12}T_{ai} + A_{13}T_b + B_1 = 0$$

$$A_{21}T_c + A_{22}T_{ai} + A_{23}T_b + B_2 = 0$$

$$A_{31}T_c + A_{32}T_{ai} + A_{33}T_b + B_3 = 0$$

Les coefficients A_{ij} et B_j sont calculés à l'instant (t) et donc par les températures du vecteur T(t). Le vecteur X contient les températures à l'instant d'après t+Δt, inconnues à déterminer.

Puis résolu par :

$$X = \text{inv}(A) \times (-B)$$

Les coefficients qui interviennent dans cette équation s'écrivent comme:

$$A_{11} = [(C_c/\Delta t) + h_{rvc} + h_{rbc} + h_{ci} + h_{ce}]$$

$$A_{12} = (-h_{ci});$$

$$A_{13} = (-h_{rbc});$$

$$B_1 = [-Rg (S_{sol}/S_c) a_c (1 + \tau_c \rho_b) - h_{rvc} T_v - h_{ce} T_{ae} + (-C_c/\Delta t) T_c]$$

$$A_{21} = (-h_{ci} S_c);$$

$$A_{22} = ((\rho V_c C_p / \Delta t) + h_b S_b + h_{ci} S_c + \rho Q C_p);$$

$$A_{23} = (-h_b S_b);$$

$$B_2 = [-\rho Q C_p T_{ae} + (-\rho V_c C_p / \Delta t) T_{ai}];$$

$$A_{31} = (-h_{rbc} S_b);$$

$$A_{32} = (-h_b S_b);$$

$$A_{33} = [(m_b C_p / \Delta t) + h_{rbc} S_b + h_b S_b];$$

$$B_3 = [-Rg S_b a_b \tau_c + L_v m_{eau} + (-m_b C_p / \Delta t) T_b];$$

Les coefficients d'échanges radiatifs linéarisés s'écrivent sous la forme :

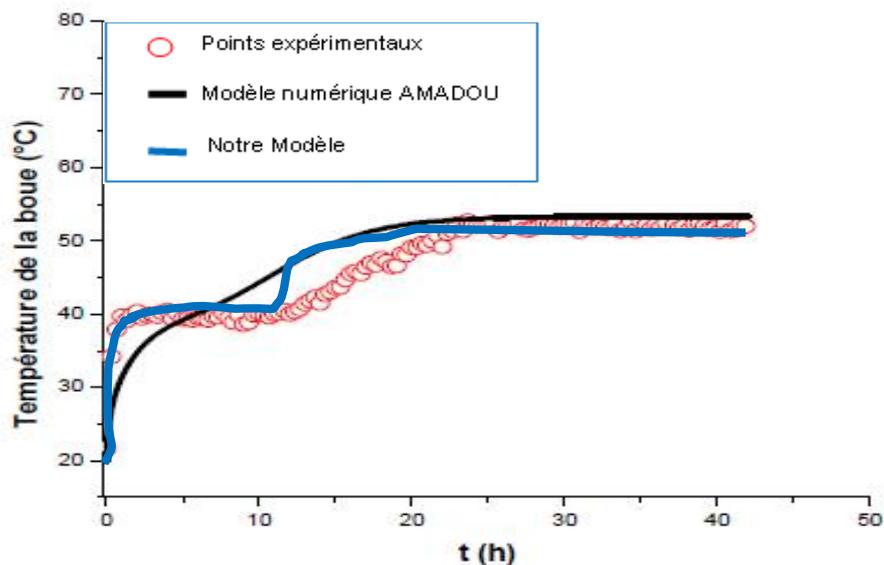
$$h_{rvc} = \sigma \epsilon_c [(T_v + 273) + (T_c + 273)] [(T_v + 273)^2 + (T_c + 273)^2];$$

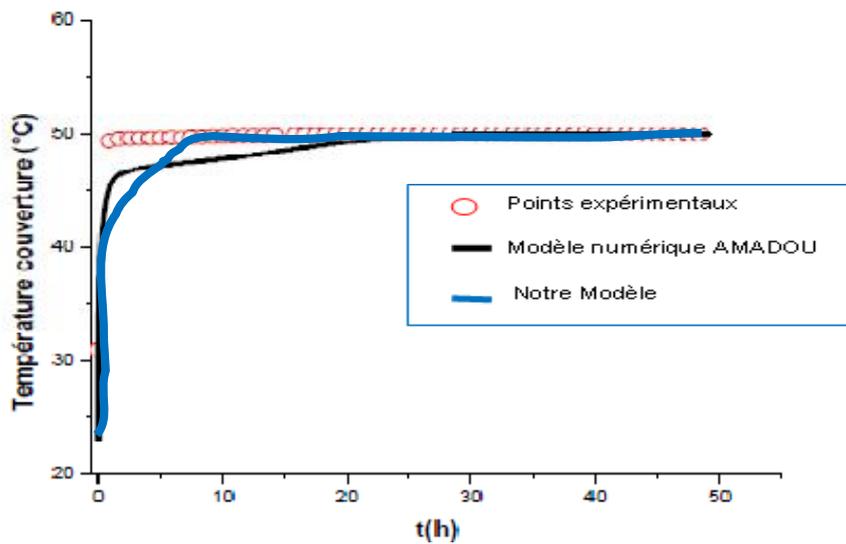
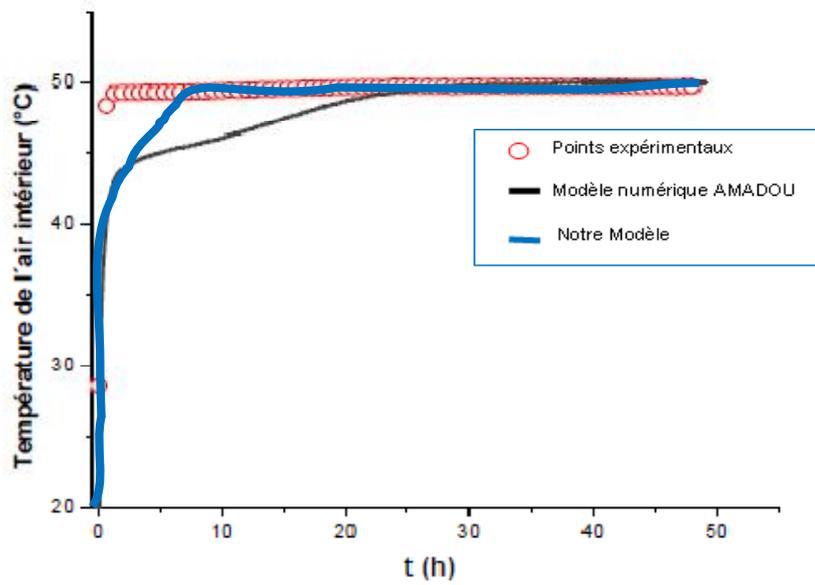
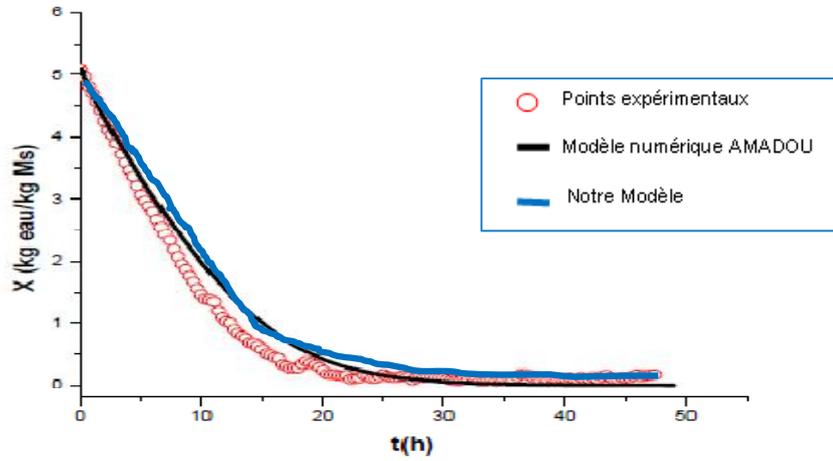
$$h_{rbc} = [\sigma / (1/\epsilon_b + 1/\epsilon_c - 1)] [(T_b + 273) + (T_c + 273)] [(T_b + 273)^2 + (T_c + 273)^2];$$

Ce système d'équations algébriques est résolu par la méthode de Newton.

III.4 Validation :

Ce programme ne peut être considéré valide et son caractère prédictif qu'après avoir été confronté aux résultats observés et mesurés au niveau expérimental. Pour s'assurer de sa validité, une comparaison avec l'étude expérimentale [4] citée en début de ce chapitre est effectuée. Ainsi les courbes obtenues par notre modèle pour les températures de la boue, de la couverture et de l'air ainsi que pour la teneur en eau sont reportées sur le graphe des courbes expérimentales disponibles comme le montrent les figures ci-dessous:





III.5 Conclusion:

On peut remarquer une assez bonne concordance des différentes courbes qui nous permettent de conclure que le modèle construit peut être étendu aux simulations des séquences de séchage sous les conditions réelles du séchage sous serre. C'est par conséquent l'objectif que nous nous sommes fixés au chapitre suivant.

CHAPITRE IV
PROGRAMME INFORMATIQUE ET SIMULATIONS

IV .1 Introduction :

La rapidité de calcul des ordinateurs permet d'entreprendre le traitement de gros problèmes qu'il aurait été impensable de résoudre sans leurs secours. la simulation par ordinateur des systèmes réels devient un travail amusant et captivant. Son importance réside dans les possibilités qu'elle offre pour l'étude et la simplification des systèmes complexes, et notamment pour voir l'influence d'un ou plusieurs paramètres sur le système complet. Le programme établi pour subir les tests de validation (au chapitre précédent) n'inclue pas les variations au cours de la journée de certains paramètres. Le programme de calcul, dont nous exposerons l'organigramme dans ce chapitre, tiendra compte de l'évolution des paramètres de température et d'ensoleillement.

En effet la durée de séchage est de l'ordre d'une dizaine de journées, pendant lesquelles les conditions changent d'une heure à une autre et d'une journée à l'autre. Le rayonnement solaire sera calculé d'heure en heure pour la durée du jour considéré. L'heure est découpée en pas de temps Δt que l'on choisit compris entre 1 et 3600s.

La température et l'humidité relative de l'air extérieur ainsi que la vitesse du vent sont considérées comme des variables au cours de la journée et leurs valeurs seront lues sur des fichiers météorologiques.

IV. 2 Principe de la simulation :

On choisira le quantième n de l'année du début de l'opération de séchage. Les équations des bilans thermiques et massiques dans la serre sont résolues à chaque intervalle de temps Δt , choisi inférieur à une heure, pendant lequel les paramètres externes sont supposés constants.

La durée du jour donc d'ensoleillement, est recalculée pour chacune des journées de séchage puis partagée en i intervalles d'une heure chacun.

Enfin, pour chaque pas de temps, un calcul itératif comprenant un test de convergence du vecteur des inconnues du problème, permet d'obtenir la valeur des températures dans la serre, celles de la couverture, de la boue et de l'air intérieur ainsi que la teneur en eau de la boue.

IV. 3 Les paramètres mis en jeu lors de la procédure de simulation du modèle:

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

- Les **paramètres primaires** sont constitués de paramètres d'entrée fixes et de paramètres d'entrée évolutifs.

Dans cette catégorie, les paramètres d'entrée fixes sont ceux qui sont liés aux caractéristiques géométriques et physiques de la serre et de ses éléments. Ces données demeureront constantes au cours d'une simulation donnée du 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** sont calculés par le modèle à partir des paramètres primaires.

Le programme fournit à chaque pas de temps les résultats de la simulation. Le critère d'arrêt de la simulation est fixé sur la seule condition : la teneur en eau d'équilibre est atteinte.

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 permet notamment d'évaluer l'évolution de la vitesse de séchage et donc l'évolution du flux d'évaporation pour des conditions climatiques données. L'estimation de la température de la couverture, peut conduire éventuellement au calcul des besoins de chauffage de la serre compensant les déperditions. L'estimation de la température de l'air intérieur permettra d'estimer les besoins de quantité d'air à injecter dans le système donc d'estimer les besoins de ventilation.

IV. 4 Traitement informatique:

La résolution numérique du problème consiste à établir un code de calcul informatique se basant sur la méthode dite des déterminants (méthode de Newton) dans l'environnement MATLAB.

Le système d'équation à résoudre à chaque étape est non linéaire à paramètres variables. Le système est d'abord linéarisé sous la forme d'une équation de type : $\bar{A} \vec{X} = \vec{B}$ puis résolu. Les résultats obtenus sont soumis à un test de convergence avant de passer au pas de temps suivant. Par souci de clarté, le programme est organisé en procédures suivantes :

Procédure Djour: C'est un sous programme qui calcule la durée de jour.

Procédure Astronomie: Celle-ci permet de faire le calcul astronomique.

Procédure TMPvoute: Elle se charge d'évaluer la température de la voute céleste.

Procédure COEradia: Elle permet le calcul des coefficients d'échange radiatifs.

Procédure EV: Celle-ci permet de calculer le coefficient d'échange évaporatif.

Procédure MAT: Qui détermine les différents éléments de la matrice des coefficients A et les composantes du vecteur B.

Procédure RESOL : elle permet de calculer le vecteur T1 dont les composantes sont les températures des éléments du système à l'instant $t + \Delta t$.

Programme Séchage: C'est le programme principal dans lequel on trouve une suite de procédures agencées selon l'ordre de déroulement des différentes étapes de calcul après avoir introduit les paramètres d'entrée. Ce programme permet d'afficher et d'imprimer sous forme de tableaux et courbes tous les résultats demandés.

IV.5 Résultats de la simulation:

Les simulations ont porté sur une séquence de séchage menée en période estivale, la première journée ayant été fixée au 221ème quantième de l'année correspondant au 10 du mois d'Août et deuxième journée ayant été fixée au 65^{ème} quantième de l'année correspondant au 5 du mois de Mars.

Nous présentons ci-dessous les courbes évolutives des températures de la couverture, de l'air intérieur et de la boue ainsi que celle de la teneur en eau de la boue. La courbe de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau est également représentée.

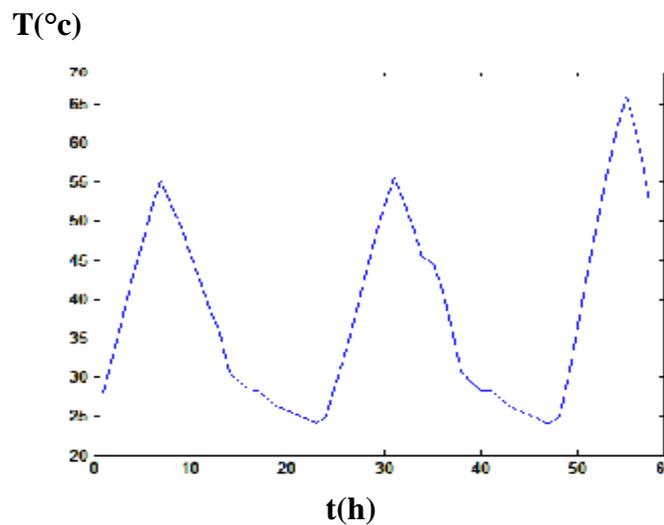


Figure IV.1 Courbe d'évolution de la température de la couverture (journée du 10 Août).

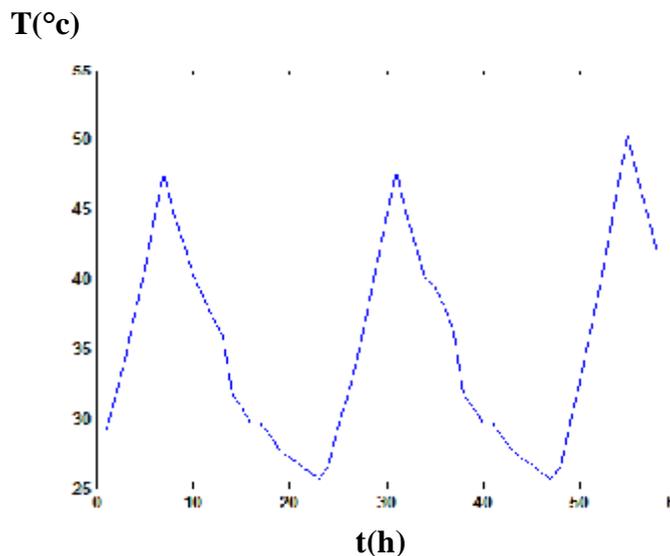


Figure IV.2 Courbe d'évolution de la température de l'air intérieur (journée du 10 Août).

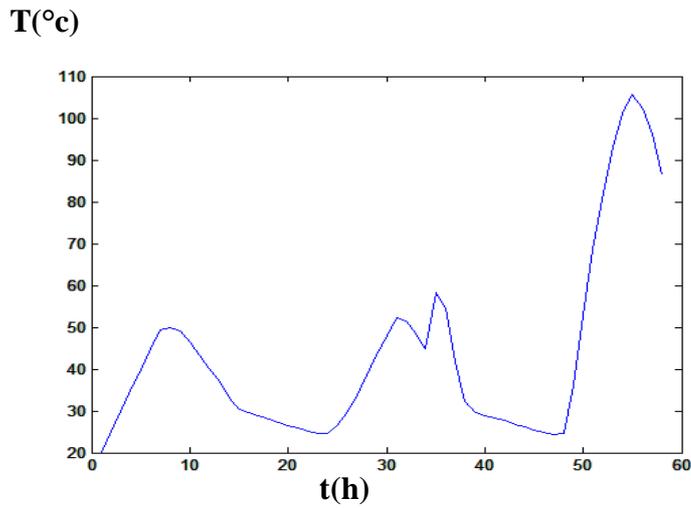


Figure IV.3 Courbe d'évolution de la température de la boue (journée du 10 Août).

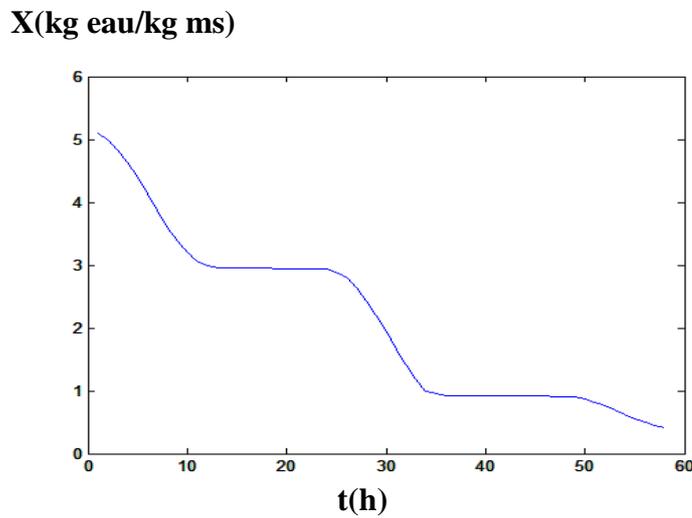


Figure IV.4 Courbe d'évolution de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Août).

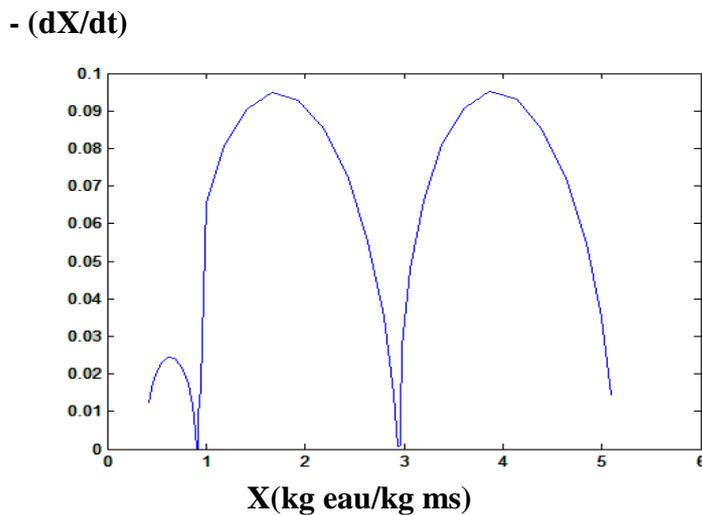


Figure IV.5 Courbe d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Août).

T(°c)

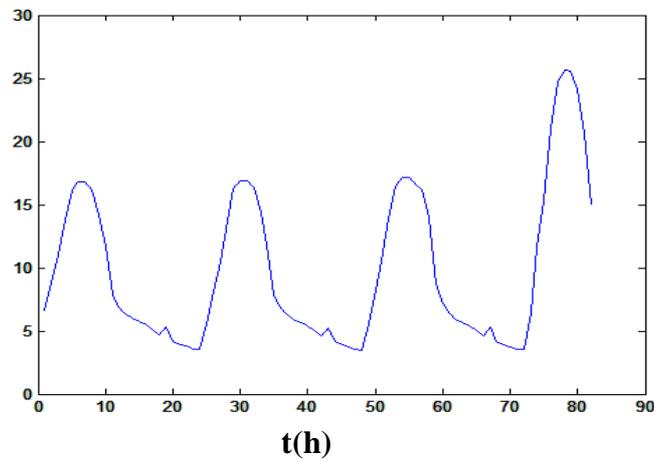


Figure IV.6 Courbe d'évolution de la température simulée de la couverture (journée du 5 Mars).

T(°c)

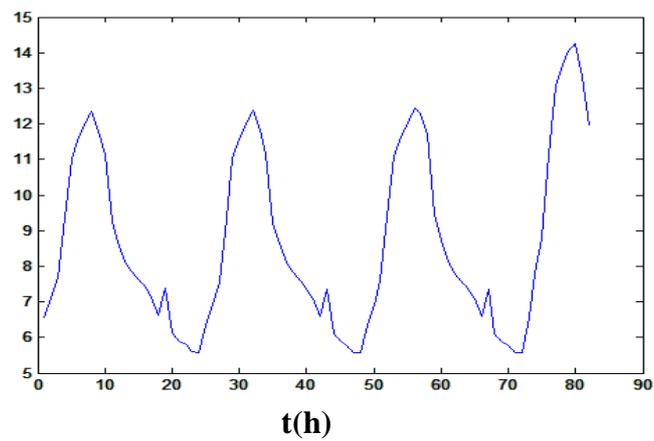


Figure IV.7 Courbe d'évolution de la température simulée de l'air intérieur (journée du 5 Mars).

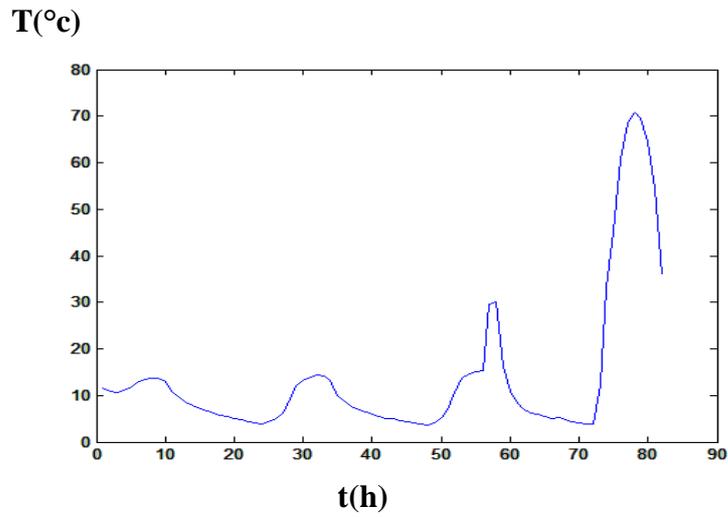


Figure IV.8 Courbe d'évolution de la température simulée de la boue (journée du 5 Mars).

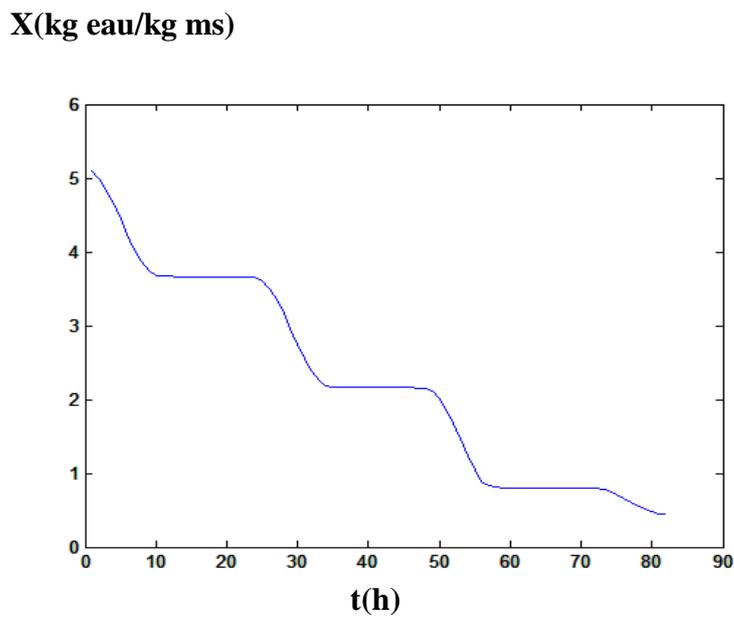


Figure IV.9 Courbe d'évolution simulée de la teneur en eau base sèche (journée du 5 Mars).

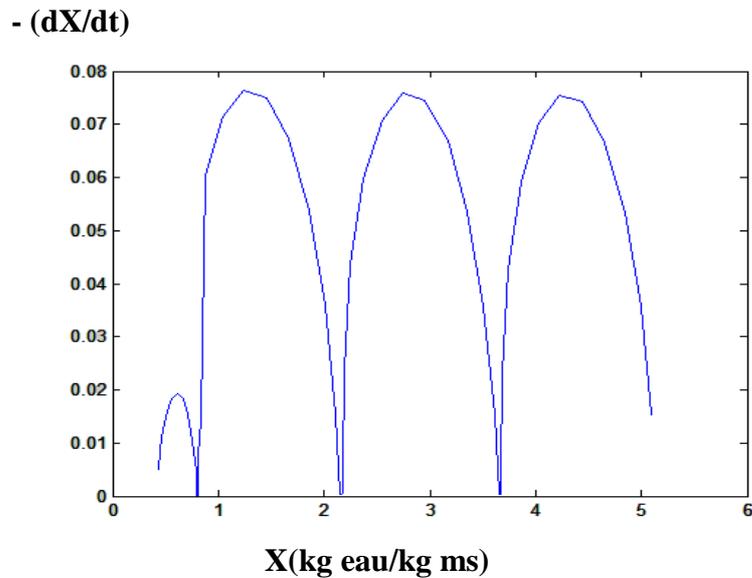


Figure IV.10 Courbe d'évolution de la vitesse de séchage simulée en fonction de la teneur en eau base sèche (journée du 5 Mars).

IV.6 Interprétation des résultats :

Les fluctuations observées dans toutes les courbes représentent la succession du jour et de la nuit où le rayonnement solaire, donc la seule source de chaleur, s'annule au coucher du soleil. Si on joint les sommets atteints dans la journée par les températures ou encore par la vitesse de séchage, on obtient les allures classiques observées lorsque les conditions de séchage sont maintenues constantes, comme dans le chapitre précédent.

On peut remarquer l'existence de deux phases de séchage : une première phase à vitesse constante et qui dure jusqu'à une teneur en eau d'environ 1,25 Kg d'eau par Kg de matière sèche. Au cours de cette période, la température maximale de la boue, ainsi que celles de l'air asséchant et de la couverture restent constantes. A la fin de cette phase, commence une seconde phase de vitesse décroissante qui traduit le caractère hygroscopique de la boue. Dans cette zone, les températures s'accroissent pour tous les éléments de la serre mais de manière plus marquée pour la boue. En effet, l'énergie solaire disponible sert plus à chauffer les éléments de la serre qu'à vaporiser l'eau, arrivant de plus en plus difficilement au niveau de la couche superficielle de la boue. D'où l'intérêt de prévoir dans l'installation des séchoirs à boues un retourneur pour améliorer les performances du séchoir.

On peut noter que les valeurs des températures obtenues en Août sont largement supérieures à celles du mois de Mars. Par conséquent, les vitesses de séchage en période estivale sont plus fortes, et les durées de séchage réduites. C'est peu être le seul inconvénient de ce procédé de séchage et ses limites. D'où la nécessité de prévoir un système de chauffage d'appoint pour espérer une utilisation continue de ce type de séchoir.

IV.7 Conclusion:

Les simulations du code sont avérées souvent très logiques et satisfaisantes. Les conditions de séchage réelles ont été entrées dans le code de simulation.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans le contexte actuel de l'épuration des eaux usées dans le Monde en général mais également dans notre pays, l'opération de séchage solaire des boues résiduaire sous serre est amenée à se développer dans un avenir proche. Elle constitue une étape nécessaire et essentielle après la déshydratation primaire, tant en amont de la valorisation agricole que de la valorisation thermique, les deux principales filières d'élimination.

Ce travail se veut comme une contribution à l'amélioration des connaissances dans le domaine du séchage solaire des boues d'épuration. Nous avons développé un modèle numérique de la serre- séchoir, pour la prévision de l'évolution de la température de la boue, de celle de l'air intérieur de la serre et surtout de la teneur en eau de la boue. Ce modèle est basé sur les équations traditionnelles régissant les transferts de masse et de chaleur en faisant l'hypothèse simplificatrice de l'uniformité des profils de température des éléments de la serre et de la teneur en eau dans la boue. Nous obtenons ainsi un problème global régi par trois équations de bilans d'énergie et une de transfert de matière, formant un système d'équations différentielles couplées et non linéaires.

A ces équations, nous avons associé un modèle empirique qui permet de calculer à chaque instant du séchage, la vitesse de séchage de la boue en fonction de sa teneur en eau. L'isotherme de désorption de la boue, dérivée du modèle d'Oswin, est utilisée pour déterminer l'activité de l'eau dans la boue dans le domaine du comportement hygroscopique.

Nous avons confronté dans une première étape, les résultats de ce modèle à ceux des expériences, obtenus dans un séchoir du laboratoire de l'INSA de Strasbourg en adoptant les mêmes paramètres d'entrées. En dehors de la première phase de séchage, où on peut remarquer quelques écarts, que l'on s'explique par les approximations dans les évaluations théoriques des facteurs d'échanges de chaleur et de masse, les résultats des simulations sont très voisins des valeurs de ces mesures. Ce qui nous laisse penser que le code de calcul élaboré, bien que simplifié, est valide et peut ainsi servir à simuler le comportement du séchoir sous toutes conditions.

Pour tester la sensibilité du système à la variabilité des conditions climatiques externes, nous avons choisi de simuler deux opérations de séchage effectuées à deux périodes différentes: une première opération en Mars et une seconde en Août, plus favorable au séchage. Les résultats obtenus semblent tout à fait satisfaisants; ainsi les températures des éléments de la serre et la teneur en eau de la boue évoluent conformément à ce qui est attendu. Il ne demeure pas moins qu'une confrontation avec la réalité en grandeur nature serait intéressante et reste à faire. Elle permettrait à coup sûr d'avoir un avis définitif sur le domaine de validité des simulations.

D'autre part, il conviendra d'intégrer dans le code certaines hypothèses négligées, comme les variations spatiales des températures. Un sujet délicat encore à aborder serait également de développer et d'intégrer dans le modèle la prise en compte de la gestion des ouvrants, du fonctionnement des ventilateurs quand ils existent et plus généralement de l'aérodynamique globale de la serre.

Il serait également intéressant de modéliser les cinétiques de séchage en tenant compte du retrait de la boue, ou des modifications de structure lors du séchage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] NADEAU J.-P., PUIGGALI J.-R., Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, 307p. Tec et Doc, Paris, 1995.

[2] AHOUANNOU C., JANNOT Y., LIPS B., LALLEMAND A., Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux : manioc, gingembre et gombo, Science des aliments, 20 (4/5), pp.413-432, 2000.

[3] <http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/servlet/com.jsbsoft.jtf.core.SG>

[4] Botramamy, P-A., Modélisation d'un séchoir-serre pour boue d'épandage. Thèse de doctorat, Université de Perpignan (2006).

Propriétés de l'air humide

Pression de vapeur saturante (Pa)

$$P_{vs} = 288,68(1,098 + T/100)^{8,02} \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Humidité absolue (kg eau/kg air sec)

$$H_{as} = (6,622P_{vs}) / (P - P_{vs})$$

Humidité relative (%)

$$H_r = P_v / P_{vs}$$

Masse volumique (kg/m³)

$$\rho = 353 / (T + 273) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Chaleur latente (J/kg)

$$L_v = 4185,5(597 - 0,56T) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Conductivité thermique de l'air (W.m⁻¹.°C⁻¹)

$$\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0242 \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

viscosité dynamique de l'air (m².s⁻¹)

$$\mu = 10^{-5} (0,0046 \cdot T + 1,7176) \quad T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

Référence

Nadeau, J.-P., et Puiggali, J. R., *Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels*,
Technique et Documentation - Lavoisier : Paris (1995).

ANNEXE

Nous présentons ci-dessous les courbes évolutives des températures de la couverture, de l'air intérieur et de la boue ainsi que celle de la teneur en eau de la boue. La courbe de l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau est également représentée une grande épaisseur de boue et une siccité finale de 97 %.

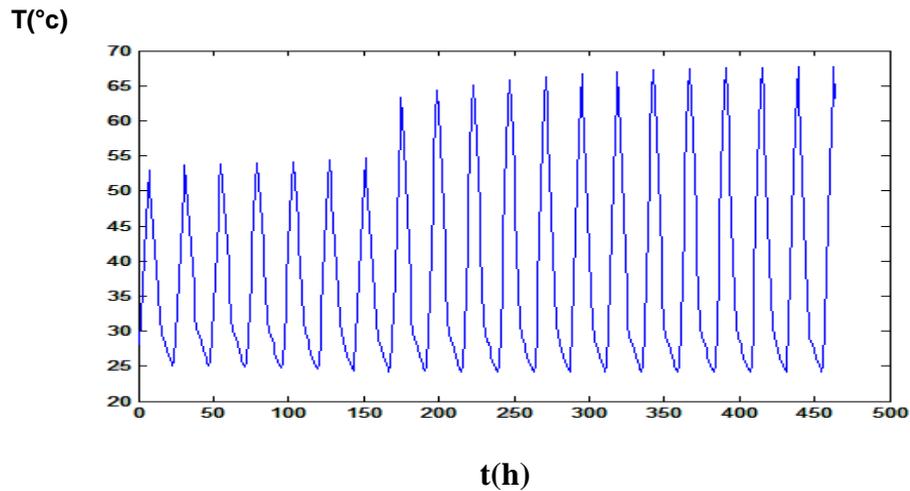


Figure Courbe d'évolution de la température de la couverture (journée du 10 Aout).

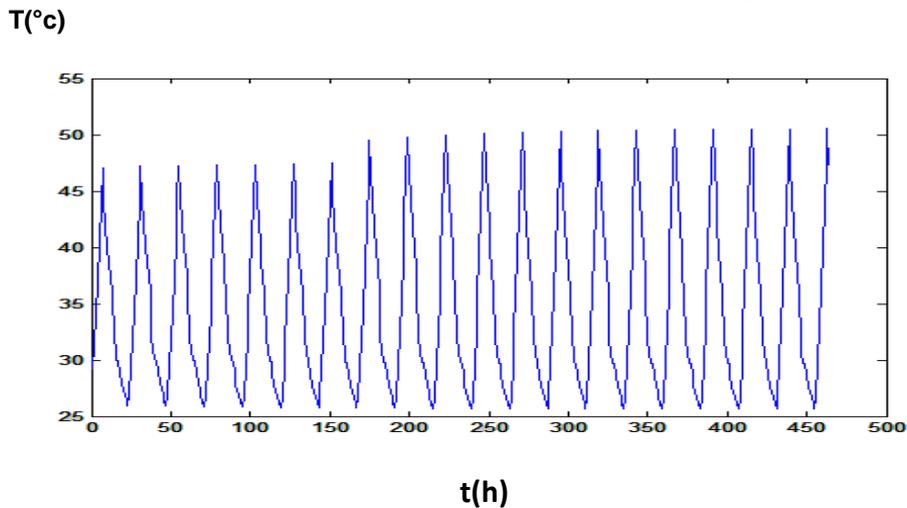


Figure Courbe d'évolution de la température de l'air intérieur (journée du 10 Aout).

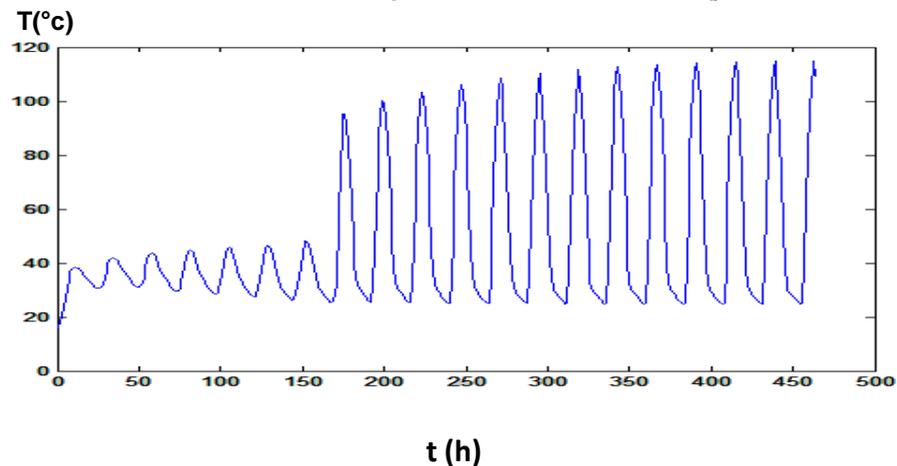


Figure Courbe d'évolution de la température de la boue (journée du 10 Aout).

ANNEXE

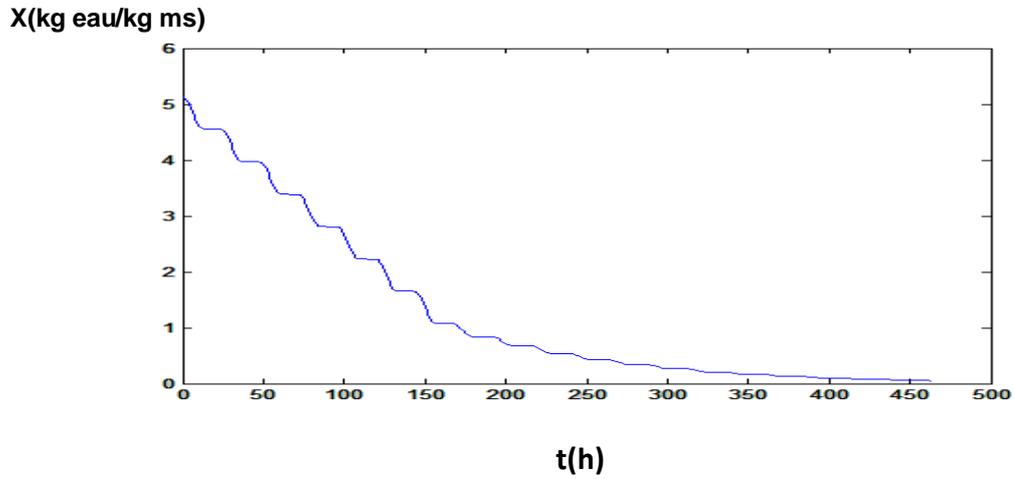


Figure Courbe d'évolution de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Aout).

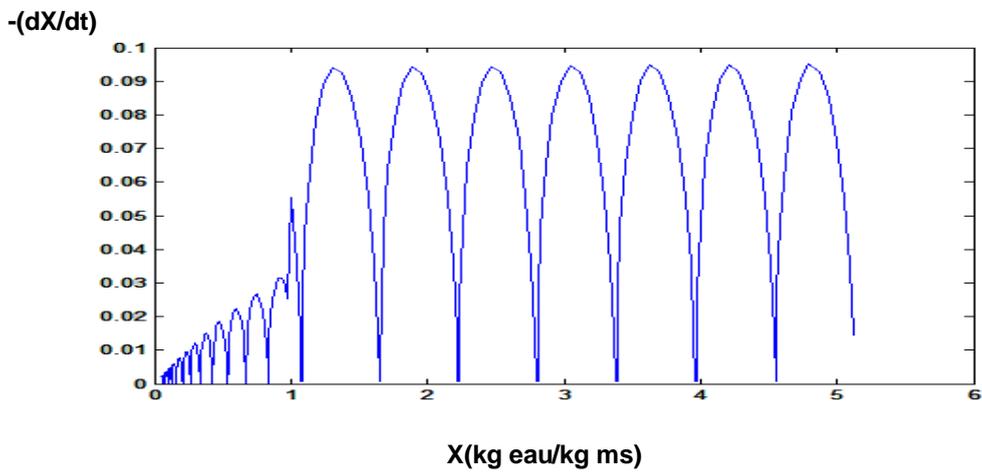


Figure Courbe d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau base sèche (journée du 10 Aout).

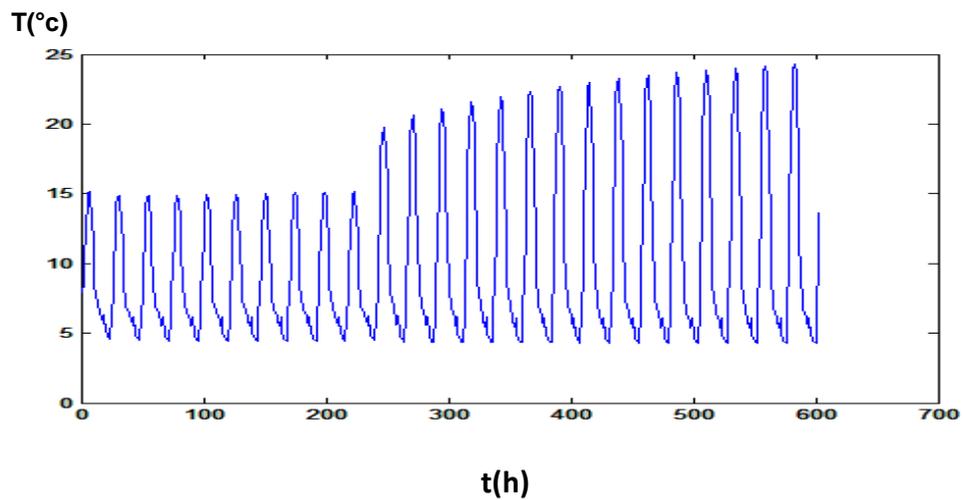


Figure Courbe d'évolution de la température de la couverture (journée du 5 Mars).

ANNEXE

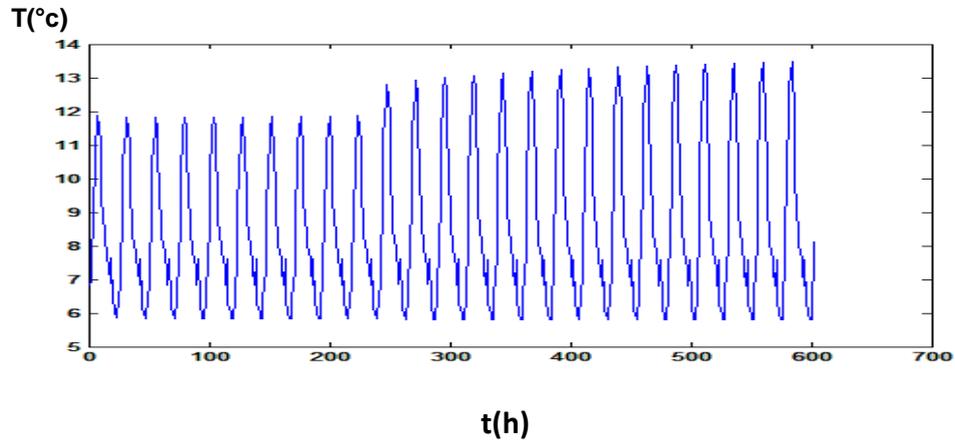


Figure Courbe d'évolution de la température de l'air intérieur (journée du 5 Mars).

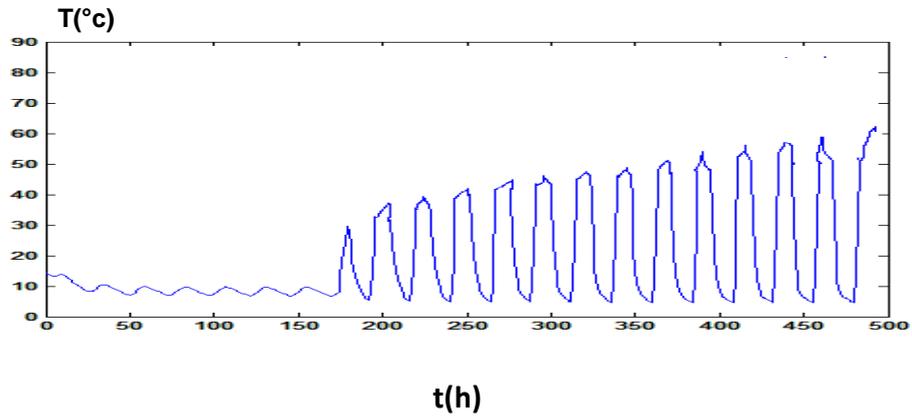


Figure Courbe d'évolution de la température simulée de la boue (journée du 5 Mars).

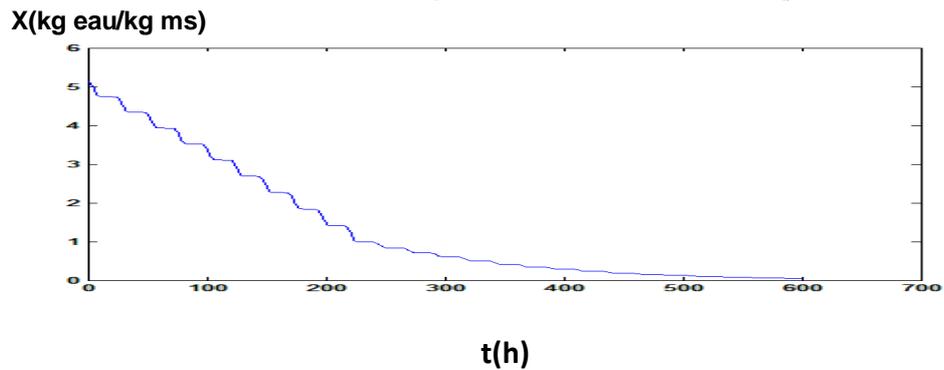


Figure Courbe d'évolution simulée de la teneur en eau base sèche (journée du 5 Mars).

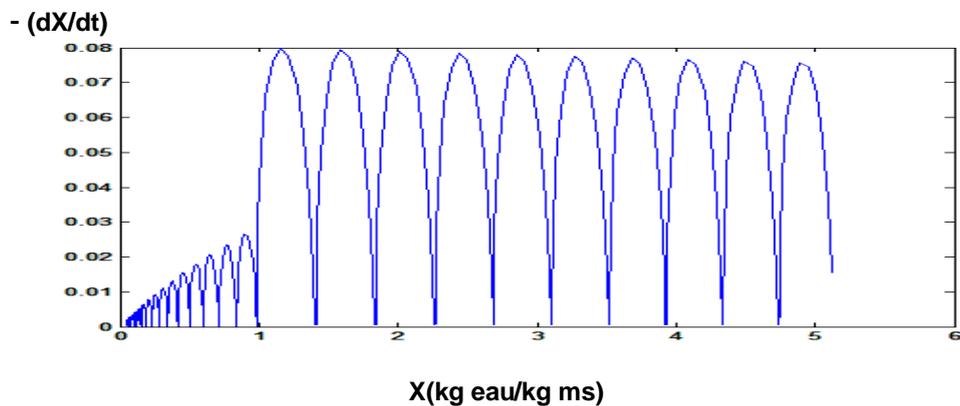


Figure Courbe d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau base sèche (journée du 5 Mars).

Listing du programme informatique

```

clc
clear all
%%%%%%%%%%%%% Données de base%%%%%%%%%%%%%
F=[]
D=[]
%%%%%%%%%le Rayonnement solaire global Rg%%%%%%%%%
n=input('donner le quantième de l'année n ');
alpha=input('donner la valeur de l'angle d'inclinaison de la paroi réceptrice
par rapport au plan horizontal ');
long=input('donner la valeur de la longitude du site');
lat=input('donner la valeur de la latitude du site');
alb=input('donner la valeur de l'albédo');
decalage=input('donner la valeur du décalage horaire');
q=input('donner la qualité du ciel : pur=1 ;moyen=2; pollue=3 ');
Xfinale=input('donner la teneur finale Xfinale ');
%%%%%%%%%%%%%ESSAYER%%%%%%%%%%%%%
n=65
ledebut=n;
alpha=0;long=4.035;lat=36.71;alb=0;decalage=1;q=1;Xfinale=0.45;
if q==1
e=0.87;
ff=0.17;
elseif q==2
e=0.88;
ff=0.26;
elseif q==3
e=0.91;
ff=0.43;
end

%%%%%%%%%%%%% Paramètres d'entrées fixes %%%%%%%%%%%%%%

%%% dimension et caractéristiques de la serre %%%%%%%%%%%%%%
Lc=25; %longueur de la serre
lc=18; %largeur de la serre
hc=3; %Hauteur de la serre
Sc=Lc*hc*pi; %surface de la couverture ensoliée
Vc=((pi*hc^2)/2)*Lc; %volume de la serre
So=10 %section de l'ouverture
Cc=8000; %chaleur surfacique de la couverture
ac=0.2; %coefficient d'absorption solaire
Tau_c=0.7; %coefficient de transmission solaire
epsilon_c=0.90; %emissivité de la couverture
Cp=1008; %Chaleur massique de l'air
Cpe=4180; %Chaleur massique de l'eau
sigma=5.67*10^(-8); %constante de Boltzmann

%Dimension du support boue
Lb=25; %longueur de la boue
lb=18; %largeur de la boue
Sb=Lb*lb; %surface de la boue
Ssol=Sb;

```

ANNEXE

```

% Caractéristiques des boues
mb0=4893.8*1.6;           %Masse initiale
Sicitel=0.163;           %siccité initiale
X0=(1-Sicitel)/Sicitel;  %teneur initiale
Xi=X0
Ms=mb0*Sicitel;         %Masse sèche
Tb0=15;                  %température initiale de la boue

%Caractéristique boue par rapport aux rayonnements
ab=0.8;                  %coefficient d'absorption solaire
rb=1-ab;                 %coefficient de réflexion solaire
epsilon_b=0.9;          %émissivité de la boue
Cpanhydre=1182 ;        %capacité anhydre
dt=3600;                 % pas de temps

%%les variables que doit calculer ce programme sont: Tc,Tai,Tb,X %%%%%%%%%%
%%Conditions opératoires de séchage%%

Tae=[6.5;6.7;7;8.5;10;10.5;11;11.6;11.3;11;9.5;9;8.5;8.2;8;7.8;7.5;7;7.8;6.5;
6.3;6.2;6;6];           %Température de l'air asséchant
Q=Ui*So;                 %Débit volumique de l'air
hce=5.67+3.86*Uv ;      %Coefficient de convection couverture-air
extérieur

%%%%%%%%%%Paramètres variables secondaires%%%%%%%%%%
R_gaz_parfait=8.134 ;    % j/mol*K
M_masse_molaire_de_lavapeur=18.016*10^-3; % kg/mol
Rv=R_gaz_parfait/M_masse_molaire_de_lavapeur;
mb=Ms*(X0+1);           %masse de la boue
Cpb=(1/(1+X0))*Cpanhydre+(X0/(1+X0))*Cpe; %capacité calorifique massique de
la boue

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T=[Tc0;Tai0;Tb0];
while X0>Xfinale

%Calcul astronomique et durée du jour
B=2*pi*(n-81)/365;
delta=23.45*sin(B);
x=-((sin(delta*pi/180)*sin(lat*pi/180))/(cos(delta*pi/180)*cos(lat*pi/180)));
wl=(pi/2)-x-(1/6)*x^3+(1/16)*x^4;
dj=(2/15)*wl*180/pi;
mm=floor(dj);
tsvl=12-(1/15)*wl*180/pi;
ET=9.87*sin(2*B)-7.53*cos(B)-1.5*sin(B);
TLL=tsvl+decalage-(4*long+ET)/60;
c=1+0.034*cos((2*pi/365)*(n-3));
I0=1353*(1+0.033*cos(n*pi/180));

for i=1:mm
TL(i)=TLL+i;
TSV(i)=TL(i)-decalage+(4*long+ET)/60;
w(i)=(1-TSV(i)/12)*pi;
sh(i)=sin(lat*pi/180)*sin(delta*pi/180)+cos(lat*pi/180)*cos(delta*pi/180)*cos
(w(i));
ch(i)=sqrt(1-sh(i)*sh(i));
azz(i)=cos(delta*pi/180)*cos(w(i))/ch(i);
az(i)=asin(azz(i))*pi/180;
OM(i)=ch(i)*sin(alpha*pi/180)*cos(az(i))+sh(i)*cos(alpha*pi/180);
OMEGA(i)=(pi/2)-OM(i)-(1/6)*OM(i)*OM(i)*OM(i)+(1/16)*OM(i)*OM(i)*OM(i)*OM(i);
bet(i)=cos(alpha*pi/180)*OM(i);

```

ANNEXE

```

beta(i)=(pi/2)-bet(i)-
(1/6)*bet(i)*bet(i)*bet(i)+(1/16)*bet(i)*bet(i)*bet(i)*bet(i);
teta(i)=atan((3/4)*sin(beta(i))/sqrt(1-sqrt((3/4)*sin(beta(i)))));
ro2d(i)=0.5*(sqrt(sin(beta(i)-teta(i))/sqrt(sin(beta(i)+teta(i))))*(1-
sqrt(cos(beta(i)+teta(i)))/sqrt(cos(beta(i)-teta(i))));
phi0(i)=I0*c*sh(i)*(0.271-0.2939*exp(-ff/sh(i)));
phil(i)=phi0(i)*(1+cos(alpha*pi/180))/2;
phidir(i)=I0*c*e*exp(-ff/sh(i))*OM(i);
% phidirm(i)=(phidir(i-1)+phidir(i))/2;
phi2(i)=alb*(phidir(i)*sh(i)/OM(i)+phi0(i))*(1-cos(alpha*pi/180))/2;
phidif(i)=(phil(i)+phi2(i));
% phidifm(i)=(phidif(i-1)+phidif(i))/2;
Rg(i)=phidir(i)+phidif(i)
end

i=0;
while i<24 & X0>Xfinale

if i<length(Rg) %%%%%% partie jour Rg#0 %%%%%%%%%%
k=0;
while k<3600 & X0>Xfinale

Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Rho= 353/(Tai+273); %masse volumique de l'air à Tae
nu=10^-5*(0.0046*Tai+1.7176); %viscosité cinématique de l'air
lamb_air=7.57*10^-5*Tai+0.0242; %conductivité thermique de l'air
Tv=0.0552*(Tae(i+1)+273)^1.5-273; %température équivalente de la route
céleste

%%% Pour le calcul de hci : coefficient d'échange convectif entre l'air
intérieur et la couverture
Pr=nu*Cp*Rho/lamb_air; % Nombre de Prandtl
Re=Ui*hc/nu; % Nombre de Reynolds
% Nombre de Nusselt

if Re<=10^5 && 0.6<=Pr<=15;
Nu=0.66*Re^0.5*Pr^1/2;
elseif 5*10^5<Re<=10^7 ;
Nu=(0.0337*Re^0.8+872)*Pr^1/3;
else Re>=10^7 && 0.5<=Pr<=50;
Nu=(0.0336*Re^0.8)*(Pr^1/3);
end

hci=lamb_air*Nu/2*hc ; %hci : coefficient d'échange convectif
entre l'air intérieur et la couverture
hb=lamb_air*Nu/lb; %Coefficient de convection air-boue

Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th);
%Chaleur latente de vaporisation d'eau

if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);

```

ANNEXE

```

m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab* Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
end
hrvc=sigma*epsilon_c*((Tv+273)+(Tc+273))*((Tv+273)^2)+((Tc+273)^2));
hrbc=(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-
1))*((Tb+273)+(Tc+273))*((Tb+273)^2)+((Tc+273)^2));

%%%%%%%%%%%%% mettre sous forme AX+B=0 %%%%%%%%%%%
%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+(-Cc/dt)*Tc(i)+(-
hrbc(i))*Tb(i+1)*(-hci(i))*Tai(i+1)+(-Rg(i))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-
hrvc(i))*Tv(i)-hce(i))*Tae(i))=0%
%((rho*V*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+rho*Q*Cp)*Tai(i+1)+(-hb*Sb)*Tb(i+1)+(-
hci*Sc)*Tc(i+1)+(-rho*Q*Cp*Tae)=0%
%((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb)*Tb(i+1)+(-mb*Cpb/dt)*Tb(i)+(-hrbc*Sb)*Tc(i+1)+(-
hb*Sb)*Tai(i+1)+(-Rg*Sb*ab* Tau_c+Lv(Tb))*K*Sb*(Psat(Tb)-Pv(air)))=0%

%%%%%%%%%%%%%mettre sous forme: A1*Tc + A2*Tai + A3*Tb + B =0 %%%%%%%%%%%

%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+
(-hci(i))*Tai(i+1)+ (-hrbc(i))*Tb(i+1)+ (-
Rg(i))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc(i))*Tv(i)-hce(i))*Tae(i)+(-Cc/dt)*Tc(i))
=0%
%
%(-hci(i)*Sc)*Tc(i+1)+
((rho(i))*V*Cp/dt)+hb(i))*Sb+hci(i))*Sc+rho(i))*Q*Cp)*Tai(i+1)+
(-hb(i))*Sb)*Tb(i+1)+ (-rho(i))*Q*Cp*Tae(i)+(-rho(i))*V*Cp/dt)*Tai(i))
=0%
%
%(-hrbc(i))*Sb)*Tc(i+1)+
(-hb(i))*Sb)*Tai(i+1)+ ((mb(i))*Cpb(i)/dt)+hrbc(i))*Sb+hb(i))*Sb)*Tb(i+1)+ (-
Rg(i))*Sb*ab* Tau_c+Lv(i))*K(i))*Sb*(Psat(i)-Pv(i))+(-mb(i))*Cpb(i)/dt)*Tb(i))
=0%

A11=((Cc/dt)+hrvc+hrbc+hci+hce);
A12=(-hci);
A13=(-hrbc);
B1=(-Rg(i+1))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc*Tv-hce*Tae(i+1)+(-Cc/dt)*Tc);

A21=(-hci*Sc);
A22=((Rho*Vc*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+Rho*Q*Cp);
A23=(-hb*Sb);
B2=(-Rho*Q*Cp*Tae(i+1)+(-Rho*Vc*Cp/dt)*Tai);

A31=(-hrbc*Sb);
A32=(-hb*Sb);
A33=((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb);
B3=(-Rg(i+1))*Sb*ab* Tau_c+Lv*m_eau+(-mb*Cpb/dt)*Tb);

A=[A11 A12 A13;
A21 A22 A23;
A31 A32 A33];

% T=[Tc(i+1);
% Tai(i+1);
% Tb(i+1)];
B=[B1;
B2;
B3];
T1=inv(A)*(-B);

while (abs(T1(1,1)-T(1,1))>1)&&(abs(T1(2,1)-T(2,1))>1)&&(abs(T1(3,1)-
T(3,1))>1)

```

ANNEXE

```

T=T1;
Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Rho= 353/(Tai+273); %masse volumique de l'air à Tae
nu=10^-5*(0.0046*Tai+1.7176); %viscosité cinématique de l'air
lamb_air=7.57*10^-5*Tai+0.0242; %conductivité thermique de l'air
Tv=0.0552*(Tae(i+1)+273)^1.5-273; %température équivalente de la route
céleste
%%% Pour le calcul de hci : coefficient d'échange convectif entre l'air
intérieur et la couverture
Pr=nu*Cp*Rho/lamb_air; % Nombre de Prandtl
Re=Ui*hc/nu; % Nombre de Reynolds
% Nombre de Nusselt

if Re<=10^5 && 0.6<=Pr<=15;
Nu=0.66*Re^0.5*Pr^1/2;
elseif 5*10^5<Re<=10^7 ;
Nu=(0.0337*Re^0.8+872)*Pr^1/3;
else Re>=10^7 && 0.5<=Pr<=50;
Nu=(0.0336*Re^0.8)*(Pr^1/3);
end
hci=lamb_air*Nu/2*hc ; %hci : coefficient d'échange convectif
entre l'air intérieur et la couverture
hb=lamb_air*Nu/lb; %Coefficient de convection air-boue

Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th); %Chaleur latente de vaporisation d'eau
if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);
m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
end
hrvc=sigma*epsilon_c*((Tv+273)+(Tc+273))*(((Tv+273)^2)+((Tc+273)^2));
hrbc=(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Tb+273)+(Tc+273))*
(((Tb+273)^2)+((Tc+273)^2));

mb=Ms*(X0+1); %masse de la boue
Cpb=(1/(1+X0))*Cpanhydre+(X0/(1+X0))*Cpe; %capacité calorifique massique de
la boue

%%%%%%%%%%%%% mettre sous forme AX+B=0 %%%%%%%%%%%%%%
%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+(-Cc/dt)*Tc(i)+(-
hrbc(i))*Tb(i+1)*(-hci(i))*Tai(i+1)+(-Rg(i))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-
hrvc(i)*Tv(i)-hce(i)*Tae(i))=0%
%((rho*V*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+rho*Q*Cp)*Tai(i+1)+(-hb*Sb)*Tb(i+1)+(-
hci*Sc)*Tc(i+1)+(-rho*Q*Cp*Tae)=0%
%((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb)*Tb(i+1)+(-mb*Cpb/dt)*Tb(i)+(-hrbc*Sb)*Tc(i+1)+(-
hb*Sb)*Tai(i+1)+(-Rg*Sb*ab*Tau_c+Lv(Tb))*K*Sb*(Psat(Tb)-Pv(air)))=0%

%%%%%%%%%%%%%mettre sous forme: A1*Tc + A2*Tai + A3*Tb + B =0 %%%%%%%%%%%%%%

%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+
(-hci(i))*Tai(i+1)+ (-hrbc(i))*Tb(i+1)+ (-
Rg(i))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc(i)*Tv(i)-hce(i)*Tae(i)+(-Cc/dt)*Tc(i)
=0%
%
(-hci(i)*Sc)*Tc(i+1)+
((rho(i))*V*Cp/dt)+hb(i)*Sb+hci(i)*Sc+rho(i)*Q*Cp)*Tai(i+1)+

```

ANNEXE

```

(-hb(i)*Sb)*Tb(i+1)+ (-rho(i)*Q*Cp*Tae(i)+(-rho(i)*V*Cp/dt)*Tai(i))
=0%
%
(-hrbc(i)*Sb)*Tc(i+1)+
(-hb(i)*Sb)*Tai(i+1)+ ((mb(i)*Cpb(i)/dt)+hrbc(i)*Sb+hb(i)*Sb)*Tb(i+1)+ (-
Rg(i)*Sb*ab*Tau_c+Lv(i)*K(i)*Sb*(Psat(i)-Pv(i))+(-mb(i)*Cpb(i)/dt)*Tb(i))
=0%

A11=((Cc/dt)+hrvc+hrbc+hci+hce);
A12=(-hci);
A13=(-hrbc);
B1=(-Rg(i+1)*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc*Tv-hce*Tae(i+1)+(-Cc/dt)*Tc);

A21=(-hci*Sc);
A22=((Rho*Vc*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+Rho*Q*Cp);
A23=(-hb*Sb);
B2=(-Rho*Q*Cp*Tae(i+1)+(-Rho*Vc*Cp/dt)*Tai);

A31=(-hrbc*Sb);
A32=(-hb*Sb);
A33=((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb);
B3=(-Rg(i+1)*Sb*ab*Tau_c+Lv*m_eau+(-mb*Cpb/dt)*Tb);

A=[A11 A12 A13;
A21 A22 A23;
A31 A32 A33];

% T=[Tc(i+1);
% Tai(i+1);
% Tb(i+1)];
B=[B1;
B2;
B3];

T1=inv(A)*(-B);

end
%%%%%%%%%% ces paramètre sont calculés pour un pas de temps dt a partir du
lever de jour Rg#0 %%%%%%%%%%
T=T1;
Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th);
%Chaleur latente de vaporisation d'eau
if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);
m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(Rg(i+1)*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
end
X0=X0-((dt*m_eau)/Ms);
k=k+dt;
end
%%%%%%%%%% ces paramètre sont calculés pour chaque heure a partir du lever de
jour Rg#0 %%%%%%%%%%

```

ANNEXE

```

tempslocal=TL(i+1);
ray=Rg(i+1);
else %%%%%%%%%%% partie nuit Rg=0

k=0;
while k<3600 & X0>Xfinale

Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Rho= 353/(Tai+273); %masse volumique de l'air à Tae
nu=10^-5*(0.0046*Tai+1.7176); %viscosité cinématique de l'air
lamb_air=7.57*10^-5*Tai+0.0242; %conductivité thermique de l'air
Tv=0.0552*(Tae(i+1)+273)^1.5-273; %température équivalente de la route
céleste

%%%%%%%% Pour le calcul de hci : coefficient d'echange convectif entre l'air
intérieur et la couverture
Pr=nu*Cp*Rho/lamb_air; % Nombre de Prandtl
Re=Ui*hc/nu; % Nombre de Reynolds
% Nombre de Nusselt

if Re<=10^5 && 0.6<=Pr<=15;
Nu=0.66*Re^0.5*Pr^1/2;
elseif 5*10^5<Re<=10^7 ;
Nu=(0.0337*Re^0.8+872)*Pr^1/3;
else Re>=10^7 && 0.5<=Pr<=50;
Nu=(0.0336*Re^0.8)*(Pr^1/3);
end

hci=lamb_air*Nu/2*hc ; %hci : coefficient d'échange convectif
entre l'air intérieur et la couverture
hb=lamb_air*Nu/lb; %Coefficient de convection air-boue

Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th);
%Chaleur latente de vaporisation d'eau

if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-
1))*(Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);
m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*(Th^4)-(Tc^4)));
end
hrvc=sigma*epsilon_c*((Tv+273)+(Tc+273))*(((Tv+273)^2)+((Tc+273)^2));
hrbc=(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Tb+273)+(Tc+273))*
(((Tb+273)^2)+((Tc+273)^2));

%%%%%%%%%% mettre sous forme AX+B=0 %%%%%%%%%%%
%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+(-Cc/dt)*Tc(i)+(-
hrbc(i))*Tb(i+1)*(-hci(i))*Tai(i+1)+(-Rg(i))*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-
hrvc(i)*Tv(i)-hce(i)*Tae(i))=0%
%((rho*V*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+rho*Q*Cp)*Tai(i+1)+(-hb*Sb)*Tb(i+1)+(-
hci*Sc)*Tc(i+1)+(-rho*Q*Cp*Tae)=0%
%((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb)*Tb(i+1)+(-mb*Cpb/dt)*Tb(i)+(-hrbc*Sb)*Tc(i+1)+(-
hb*Sb)*Tai(i+1)+(-Rg*Sb*ab*Tau_c+Lv(Tb))*K*Sb*(Psat(Tb)-Pv(air)))=0%

%%%%%%%%%%mettre sous forme: A1*Tc + A2*Tai + A3*Tb + B =0 %%%%%%%%%%%

```

ANNEXE

```

%((Cc/dt)+hrvc(i)+hrbc(i)+hci(i)+hce(i))*Tc(i+1)+
(-hci(i))*Tai(i+1)+ (-hrbc(i))*Tb(i+1)+ (-
Rg(i)*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc(i)*Tv(i)-hce(i)*Tae(i)+(-Cc/dt)*Tc(i))
=0%
%
% (-hci(i)*Sc)*Tc(i+1)+
((rho(i)*V*Cp/dt)+hb(i)*Sb+hci(i)*Sc+rho(i)*Q*Cp)*Tai(i+1)+
(-hb(i)*Sb)*Tb(i+1)+ (-rho(i)*Q*Cp*Tae(i)+(-rho(i)*V*Cp/dt)*Tai(i))
=0%
%
% (-hrbc(i)*Sb)*Tc(i+1)+
(-hb(i)*Sb)*Tai(i+1)+ ((mb(i)*Cpb(i)/dt)+hrbc(i)*Sb+hb(i)*Sb)*Tb(i+1)+ (-
Rg(i)*Sb*ab*Tau_c+Lv(i)*K(i)*Sb*(Psat(i)-Pv(i))+(-mb(i)*Cpb(i)/dt)*Tb(i))
=0%

A11=((Cc/dt)+hrvc+hrbc+hci+hce);
A12=(-hci);
A13=(-hrbc);
B1=(-0*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc*Tv-hce*Tae(i+1)+(-Cc/dt)*Tc);

A21=(-hci*Sc);
A22=((Rho*Vc*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+Rho*Q*Cp);
A23=(-hb*Sb);
B2=(-Rho*Q*Cp*Tae(i+1)+(-Rho*Vc*Cp/dt)*Tai);

A31=(-hrbc*Sb);
A32=(-hb*Sb);
A33=((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb);
B3=(-0*Sb*ab*Tau_c+Lv*m_eau+(-mb*Cpb/dt)*Tb);

A=[A11 A12 A13;
A21 A22 A23;
A31 A32 A33];

% T=[Tc(i+1);
% Tai(i+1);
% Tb(i+1)];
B=[B1;
B2;
B3];
T1=inv(A)*(-B);

while (abs(T1(1,1)-T(1,1))>1)&&(abs(T1(2,1)-T(2,1))>1)&&(abs(T1(3,1)-
T(3,1))>1)

T=T1;
Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Rho= 353/(Tai+273); %masse volumique de l'air à Tae
nu=10^-5*(0.0046*Tai+1.7176); %viscosité cinématique de l'air
lamb_air=7.57*10^-5*Tai+0.0242; %conductivité thermique de l'air
Tv=0.0552*(Tae(i+1)+273)^1.5-273; %température équivalente de la route
céleste

%%% Pour le calcul de hci : coefficient d'échange convectif entre l'air
intérieur et la couverture
Pr=nu*Cp*Rho/lamb_air; % Nombre de Prandtl
Re=Ui*hc/nu; % Nombre de Reynolds
% Nombre de Nusselt

if Re<=10^5 && 0.6<=Pr<=15;
Nu=0.66*Re^0.5*Pr^1/2;
elseif 5*10^5<Re<=10^7 ;

```

ANNEXE

```

Nu=(0.0337*Re^0.8+872)*Pr^1/3;
else Re>=10^7 && 0.5<=Pr<=50;
Nu=(0.0336*Re^0.8)*(Pr^1/3);
end
hci=lamb_air*Nu/2*hc ; %hci : coefficient d'echange convectif
entre l'air intérieur et la couverture
hb=lamb_air*Nu/lb; %Coefficient de convection air-boue

Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th); %Chaleur latente de vaporisation d'eau
if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-
1))*((Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);
m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*((Th^4)-(Tc^4)));
end
hrvc=sigma*epsilon_c*((Tv+273)+(Tc+273))*(((Tv+273)^2)+((Tc+273)^2));
hrbc=(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-
1))*((Tb+273)+(Tc+273))*(((Tb+273)^2)+((Tc+273)^2));

mb=Ms*(X0+1); %masse de la boue
Cpb=(1/(1+X0))*Cpanhydre+(X0/(1+X0))*Cpe; %capacité calorifique massique de
la boue

%%%%%% mettre sous forme AX+B=0 %%%%%%%%%

A11=((Cc/dt)+hrvc+hrbc+hci+hce);
A12=(-hci);
A13=(-hrbc);
B1=(-0*(Ssol/Sc)*ac*(1+Tau_c*rb)-hrvc*Tv-hce*Tae(i+1)+(-Cc/dt)*Tc);

A21=(-hci*Sc);
A22=((Rho*Vc*Cp/dt)+hb*Sb+hci*Sc+Rho*Q*Cp);
A23=(-hb*Sb);
B2=(-Rho*Q*Cp*Tae(i+1)+(-Rho*Vc*Cp/dt)*Tai);

A31=(-hrbc*Sb);
A32=(-hb*Sb);
A33=((mb*Cpb/dt)+hrbc*Sb+hb*Sb);
B3=(-0*Sb*ab*Tau_c+Lv*m_eau+(-mb*Cpb/dt)*Tb);

A=[A11 A12 A13;
A21 A22 A23;
A31 A32 A33];

% T=[Tc(i+1);
% Tai(i+1);
% Tb(i+1)];
B=[B1;
B2;
B3];

T1=inv(A)*(-B);

end

```

ANNEXE

```
%%%%%%%%%% ces paramètre sont calculés pour un pas de temps dt a partir du
coucher du soleil Rg=0 %%%%%%%%%%
T=T1;
Tc=T(1,1);
Tai=T(2,1);
Tb=T(3,1);
Th=(-0.4911*Tai+8.2385)*((Hr)^2)+(1.0248*Tai-5.25)*(Hr)+(0.4501*Tai-2.5987);
% température humide de l'air
Lv=4185.5*(597-0.56*Th);
%Chaleur latente de vaporisation d'eau

if X0>1
m_eau=(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-
1))*(Th^4)-(Tc^4)));
else
Xr=X0/Xi;
f_Xr=(2.37)*Xr-(3.30)*(Xr^2)+1.92*(Xr^3);
m_eau=f_Xr*(Sb/Lv)*(0*ab*Tau_c+(hb*(Tai-Th))-
(sigma/((1/epsilon_b)+(1/epsilon_c)-1))*(Th^4)-(Tc^4)));
end
X0=X0-((dt*m_eau)/Ms);
k=k+dt;

end
%%%%%%%%%% ces paramètre sont calculés pour chaque heure a partir du coucher
du soleil Rg=0 %%%%%%%%%%

tempsloca=0;
if tempslocal<=23
tempslocal=TL(length(Rg))+i-length(Rg)+1;
else
tempsloca=TL(length(Rg))+i-length(Rg)+1-24;
end
ray=0;
end
%%%%%%%%%% ces paramètre sont calculés pour chaque heure a partir du lever du
soliel pour 24h dans jour et nuit Rg#0 et Rg=0 %%%%%%%%%%
i=i+1;
T=T1;

F=[F;m_eau];
D=[D;X0];

end

n=n+1

end
duree_de_sechage=n-ledebut
teneur_en_eau_finale=X0
Sicite_finale=1/(X0+1)
Tc=T(1,1)
Tai=T(2,1)
Tb=T(3,1)
```