

Document technique n° 36



**C. Brison – J.M. Perret – J.P. Canler**



**Département Ecotechnologies**

**Thème de recherche Technologie et procédés pour l'eau et les déchets**

Unité de recherche Milieux Aquatique, Ecologie et Pollutions

**Groupement de Lyon**

3 bis, Quai Chauveau - CP 220

69336 LYON cedex 09

Tél. 04 72 20 87 87 - Fax 04 78 47 78 75

L'élaboration de ce document de synthèse est le fruit d'un travail collectif dont une grande partie est le résultat du travail de fin d'étude de Mlle Camille BRISON (Elève ingénieur de l'INSA de Lyon). Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes que nous avons contactées et rencontrées lors de cette étude sur le séchage solaire en France pour leur disponibilité, leur accueil et les informations communiquées sur le sujet, avec en particulier :

- Pour les six constructeurs de serres solaires :

<b>Constructeurs</b>	<b>Personnes rencontrées</b>
Degrémont / France Assainissement	M. William KOBEL M. Claude TINANT M. Damien KUNTZ
Saur / Stereau	M. Fabrice NAULEAU M. Mathieu BOILLOT
Ternois	M. Olivier BERNAT M. Thierry POVEDA
Thermo System	M. Tilo CONRAD M Vianney LAROYENNE
OTV / MSE	M. Pierre GIRODET M. Jérôme PANNEJON
Vinci Construction France	M. Denis RAGUIN M. Jérémie DOUILLARD

- les nombreux exploitants rencontrés lors des visites et tous ceux ayant pris le temps de répondre à notre enquête ; avec plus particulièrement Mr Luc PATOIS (station d'épuration de Reignier) pour sa connaissance approfondie du système,
- les maîtres d'ouvrages des sites visités,
- Mr Didier COLIN de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse
- le bureau d'études LOREAT
- et Mr Cyril MANGIN du SDEA



<b>Chapitre 1 - Préambule .....</b>	<b>11</b>
1. Intérêt du procédé.....	11
2. Matériel et méthode.....	13
<b>Chapitre 2 - Le séchage solaire proprement dit .....</b>	<b>15</b>
1. Principe du séchage solaire .....	15
a. Les différentes étapes du séchage de la boue .....	15
b. Fonctionnement général d'une serre.....	16
2. Différents types de serres .....	18
a. Serre ouverte.....	18
b. Serre fermée .....	19
3. Eléments de conception à prendre en compte. ....	20
a. Choix des matériaux à utiliser .....	20
b. Ventilation .....	21
4. Principales bases de dimensionnement et performances escomptées .....	22
a. Rappel du principe .....	22
b. Dimensionnement .....	22
c. Performances et garanties .....	26
5. Différents mécanismes à contrôler .....	28
a. La fermentation : processus anaérobie .....	29
b. Le compostage : processus aérobie.....	29
c. La désodorisation .....	31
d. La sécurité du personnel.....	32
<b>Chapitre 3 - Etat du parc sur le plan national.....</b>	<b>35</b>
1. Implantation du séchage solaire en France.....	35
2. Evolution du séchage solaire en France.....	37
3. Créneau d'application du séchage solaire : .....	39
<b>Chapitre 4 - Etat de l'art.....</b>	<b>41</b>
1. Des systèmes différents disponibles sur le plan national.....	41
a. Présentation générale.....	41
b. Présentation des spécificités de chaque procédé .....	44
2. Fonctionnement des différents systèmes .....	46
a. Alimentation de la serre en boues .....	46

b. Caractéristiques et fonctionnement des retourneurs .....	47
c. Recommandations des constructeurs .....	49
<b>Chapitre 5 - Approche économique.....</b>	<b>50</b>
1. Coût d'investissement.....	51
2. Coût d'exploitation et de fonctionnement.....	52
a - Coûts d'exploitation. ....	52
b – Coûts de fonctionnement .....	53
<b>Chapitre 6 - Les retours d'expérience : résultats de l'enquête .....</b>	<b>57</b>
1. Représentativité de l'échantillon traité .....	57
2. Interprétation de l'enquête .....	59
3. Principaux avantages de cette filière exprimés par l'exploitant de l'installation .....	62
4. Principaux inconvénients de cette filière exprimés par l'exploitant de l'installation .....	63
5. Taux de satisfaction de la filière.....	64
a. Satisfaction générale.....	64
b. Satisfaction suivant le procédé : serres en fonctionnement au 1/01/2008.....	64
6. Solutions apportées avec efficacité.....	66
<b>Conclusion .....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>70</b>
<b>Annexe : Liste de références.....</b>	<b>73</b>



Lors du traitement des eaux usées, les stations d'épuration rejettent une eau conforme au respect de la qualité du milieu récepteur et produisent des boues dont l'élimination devra être étudiée. Du fait de l'augmentation continue de la population mais également de la réglementation qui se fait de plus en plus exigeante (loi sur l'eau du 3 janvier 1992 complétée par la loi du 30 décembre 2006), la production totale de boues en France croît d'années en années. Elle était de 1,3 millions de tonnes de matière sèche (MS) en 2005 et elle est estimée à 1,8 million de tonnes de MS en 2009, soit 38 % de plus en 5 ans. [1]

Sous produit de l'assainissement, les boues d'épuration urbaines sont considérées comme des

déchets sur le plan juridique. Leur devenir est encadré par les dispositions du décret n°97-133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées. La loi n°75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux institue que toute personne qui produit [...] des déchets est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination [...]. Il incombe par conséquent aux détenteurs de la compétence assainissement, c'est-à-dire les collectivités et les exploitants de stations d'épuration, de mettre en œuvre des filières de traitement des boues qu'ils produisent.

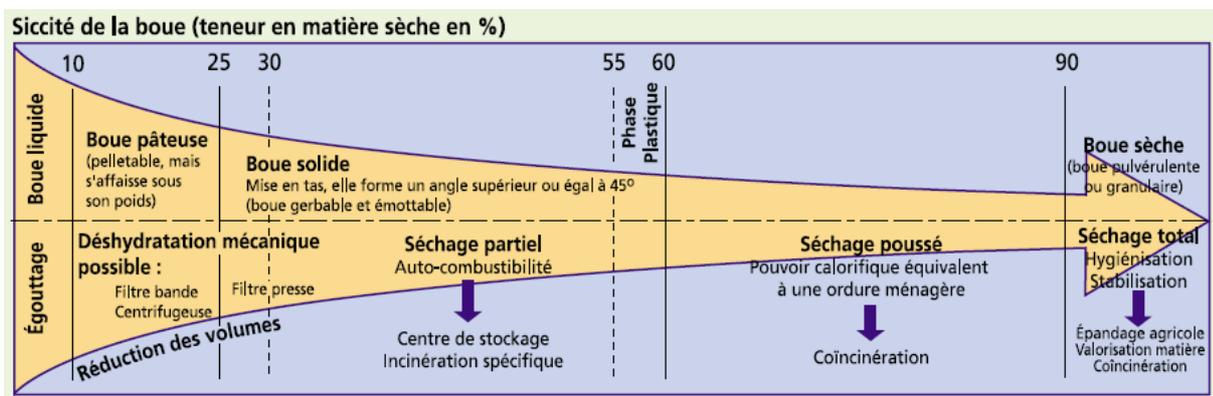


Schéma 1 : Evolution des caractéristiques des boues en fonction de leur siccité

Il existe trois principales destinations pour les boues d'épuration :

➤ **l'enfouissement technique :**

Dans le cadre de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, les boues ne devaient plus être admises en Centre de Stockage des Déchets Ultimes (CSDU, anciennement dénommés décharges ou Centre d'Enfouissement Technique) depuis juillet 2002 mais la circulaire européenne du 26 avril 1999 a repoussé cette échéance en planifiant la réduction progressive de la mise en décharge des déchets municipaux biodégradables (dont les boues d'épuration) avant interdiction totale en 2015. En effet, les boues ne constituent pas un déchet « ultime » puisqu'elles sont valorisables. [2]

➤ **l'incinération ou la co-incinération :**

Les boues séchées, grâce à leur fort PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) peuvent être utilisées comme combustible en valorisation thermique (chauffage de bâtiments ou autres).

➤ **l'épandage agricole :**

Il constitue une filière alternative aux précédentes solutions essentiellement éliminatrices : après éventuellement un traitement spécifique (chaux, ...), les boues sont notamment recyclées en agriculture en tant que matières fertilisantes dans une proportion qui atteignait 60% en 2000 en France (source : Institut Français de l'ENvironnement (IFEN)).

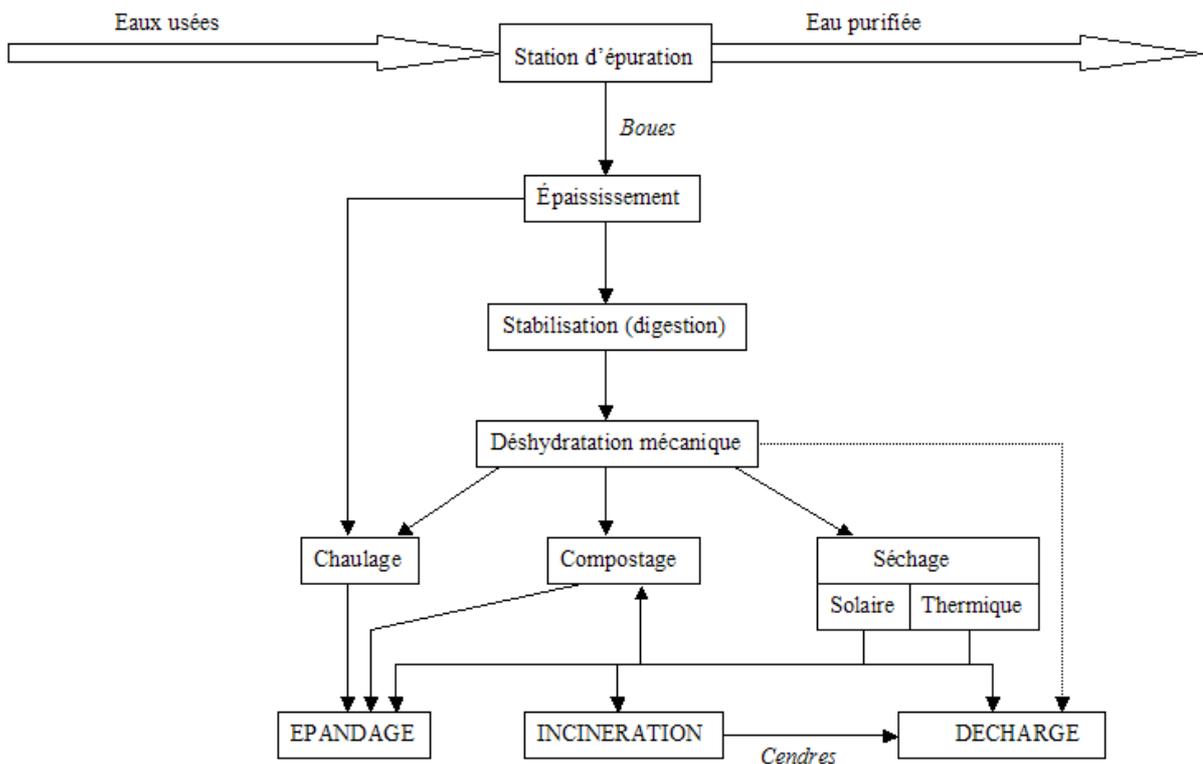


Schéma 2 : Les différentes filières possibles de traitement des boues urbaines

Actuellement, les collectivités disposent d'un grand nombre de procédés traditionnels, qui permettent de réduire puis de concentrer et/ou stocker les boues à différentes siccités. Bien que

l'essentiel de l'offre dans le domaine du traitement des boues concerne aujourd'hui les procédés traditionnels, on observe depuis une quinzaine d'années un engouement des décideurs pour des

techniques innovantes, plus écologiques, mais aussi plus économiques en exploitation car économes en énergie et en réactifs. Il peut notamment être cité les lits de séchage plantés de roseaux et le séchage solaire.

Ce dernier procédé fait appel à une énergie renouvelable, inépuisable et gratuite. Par son fonctionnement extensif, le séchage solaire est particulièrement adapté en France aux petites et moyennes stations. A l'étranger, des installations beaucoup plus importantes sont recensées (> 500 000 EH). Ce procédé permet de réduire le volume des boues afin de faciliter leur stockage et leur transport en éliminant une partie de l'eau qu'elles contiennent.

Les premières serres de séchages solaires ont été installées en France au début des années 2000. On dispose désormais de plusieurs références significatives et d'un recul de quelques années pour en apprécier les performances réelles et pour en préciser les limites. C'est pourquoi une étude nationale sur le séchage solaire des boues a été initiée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, ceci afin de faire le point sur cette technologie. Ce système étant récemment en plein essor, le Cemagref de Lyon a pris en charge cette étude dont le but est d'établir un document de synthèse comprenant un état actuel de l'art ainsi qu'un retour d'expériences.



**1. INTERET DU PROCEDE**

Différentes techniques de déshydratation sur station d'épuration sont disponibles pour la filière de traitement des boues avant leur exportation hors du site.

Principaux procédés	Siccités attendues en sortie du dispositif
Epaississeur (statique ou hersé)	2,5 - 5% pour des boues biologiques 5 - 10% pour des boues primaires
Table ou tambour d'égouttage avec conditionnement chimique	5 - 10%
Flottateur avec conditionnement chimique	4% environ
Filtre à bande avec conditionnement chimique	15 - 20%
Centrifugeuse avec conditionnement chimique	20% environ
Filtre-presse	25 - 28% pour un conditionnement avec des polymères de synthèse 30 - 35% pour des boues chaulées
Lits de séchage plantés de roseaux (séchage naturel)	15 - 25% dépendant des conditions météorologiques et des pratiques d'exploitation
Séchage solaire	Flexible* (60 - 90%) Normalement 70 -75%
Sécheur thermique	60 - 92%

\* : fonction de la disponibilité foncière, des objectifs de siccité recherchés

*Tableau 1 : Siccités finales attendues par type de traitement [3]*

Actuellement, la siccité la plus élevée est obtenue par le séchage thermique intensif. Les sècheurs industriels possèdent une grande capacité de traitement mais s'accompagnent pour cela de dépenses importantes d'énergie, et nécessitent une haute technicité pour son exploitation. De par les coûts d'investissement des modèles mis sur le marché et les contraintes d'exploitation qu'il génère, le séchage thermique reste adapté aux gisements de boues importants, de plusieurs milliers de tonnes par an, c'est-à-dire pour des stations d'épuration de plus de 50 000 EH de capacité.

La majorité des stations sont de taille inférieure au seuil de rentabilité de tels sècheurs. Le traitement des boues par lits de séchage plantés de roseaux quant à lui concerne les stations de taille inférieure à 2 000 EH, sauf quelques exceptions. Le séchage solaire, par son fonctionnement extensif, permet d'apporter une réponse pour les stations de tailles intermédiaires, comprises entre 2 000 et 50 000 EH. Certains constructeurs peuvent proposer le séchage solaire pour des stations de taille plus importante mais cette démarche correspond à du cas particulier. Il est alors nécessaire d'avoir une emprise au sol conséquente qui permette de satisfaire le dimensionnement requis. Dans certaines régions, le coût du foncier peut rapidement être très élevé, et d'autres technologies (séchage thermique) peuvent être en concurrence directe mais il conviendra d'étudier les coûts d'investissement et de fonctionnement.

L'objectif principal du séchage solaire est l'obtention d'une siccité élevée, de 70 à 80 % environ, afin de limiter les volumes et les masses de boues à transporter et donc les coûts d'évacuation (facteur de réduction compris entre 3 et 5).

#### **Les avantages du séchage solaire sont nombreux :**

- Les boues séchées peuvent être acceptées dans diverses filières d'élimination : CSDU (Centre de Stockage des Déchets Ultimes), compostage, valorisation agricole, ou valorisation thermique en incinération, co-incinération avec les ordures ménagères.

Ainsi, si les boues sont temporairement non conformes ou que le plan d'épandage est abandonné par exemple, elles peuvent alors être incinérées. Et si la filière d'élimination alternative est éloignée, le séchage aura permis de réduire considérablement les transports nécessaires et donc leurs coûts d'élimination.

- Ce procédé permet également de faire face à une éventuelle évolution de la législation dans le futur. La loi sur l'eau de 1992 prévoit déjà l'interdiction de mettre les boues de station d'épuration en décharge d'ici 2015, cependant, le séchage solaire permet l'utilisation des autres filières d'élimination citées ci-dessus.
- Les serres proposées peuvent être dimensionnées pour permettre le stockage d'une année de production de boues, point intéressant pour l'épandage agricole où leur évacuation n'est possible qu'une à deux fois par an.
- En optant pour une siccité élevée, on facilite leur manutention ainsi que leur stockage. En effet, elles peuvent être stockées temporairement sans risque d'évolution (fermentation ou compostage) en prenant de simples précautions.
- Le produit obtenu est souvent attractif pour le monde agricole autant pour son aspect que pour l'épandage, facilité par la structure granulée des boues séchées (utilisation de matériels agricoles classiques comme par exemple un épandeur d'engrais).
- Une serre est une structure imposante mais elle s'intègre plus facilement dans l'environnement et est donc généralement bien acceptée par le voisinage.
- En général, les serres ont été conçues pour fonctionner de façon la plus autonome possible : alimentation en boues, gestion de la ventilation, brassage quotidien des boues... sont souvent automatisées.
- De plus, cette technologie utilise une source d'énergie renouvelable, le soleil, et permet de diminuer les volumes de boues à transporter et donc les émissions de CO<sub>2</sub>. Elle s'inscrit donc tout à fait dans la démarche de développement durable et de protection de l'environnement, préoccupation d'actualité à l'échelle mondiale.

### Cependant, quelques limites existent à l'implantation d'un séchage solaire :

- Les performances de la serre dépendent du climat, il faut donc bien veiller à adapter le dimensionnement par rapport au lieu de l'implantation de la serre et notamment de sa capacité évaporatoire.
- Il s'agit d'un procédé consommateur de surface, il est donc nécessaire d'avoir une disponibilité foncière élevée, ce qui peut s'avérer onéreux, voire impossible.
- Le choix du site doit également tenir compte de son environnement compte tenu de l'éventuelle production d'odeurs à un moment donné, d'où une prise en compte des vents dominants et de la présence d'habitations proches. De plus, l'implantation de la serre

devra se situer dans un secteur sec où l'ensoleillement est maximum.

- Certains constructeurs proposent d'ailleurs l'installation d'une désodorisation continue, biologique ou physico-chimique. Cette technologie est coûteuse et ajoute une consommation d'énergie supplémentaire ce qui altère un peu l'image de « technologie propre » .
- Le séchage des boues fonctionne très bien en été alors qu'en hiver, la serre ne joue souvent qu'un rôle de stockage. De plus, la plus grande partie des boues sèches n'est disponible en sortie de serre que durant la période la plus favorable, soit 6 à 8 mois par an.
- Cette dernière remarque n'est pas valable pour toutes les serres commercialisées actuellement, en particulier les serres équipées d'un plancher chauffant.

## 2. MATERIEL ET METHODE

Cette étude sur le séchage solaire des boues a été initiée par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse et financée par cet organisme et le Cemagref. Ce système étant récemment en plein essor, le Cemagref de Lyon, en raison du thème de recherche « Evaluation de procédés nouveaux », s'est associé à ce sujet afin d'établir un document de synthèse comprenant un état actuel de l'art ainsi qu'un retour d'expériences.

### La démarche retenue pour cette étude a été la suivante :

- des recherches bibliographiques ainsi que des visites de stations d'épuration équipées de serre de séchage solaire des boues
- des rencontres avec les différents constructeurs de ce procédé. Ils sont au nombre de six sur le plan National : Thermo-System, Degremont-France Assainissement, Saur (Stereau), Ternois - Huber Technology, Veolia - MSE et Vinci - Sogea. Chacun nous a présenté son système plus ou moins en détails : le dimensionnement, le fonctionnement, les particularités de leurs installations et expliqué les différents choix

techniques qu'ils ont fait. Ces échanges avec les différents constructeurs nous ont permis d'acquérir une première base de connaissances techniques.

- Etablissement d'une liste complète des références de séchage solaire en France comprenant l'année de mise en service, la taille de la station en équivalent habitant (EH), les tonnes de matière sèche appliquées à la serre chaque année et d'autres particularités. Cette liste est présente en annexe de ce document.
- Une enquête a ensuite été envoyée à tous les exploitants des stations d'épuration munies de séchage solaire (une centaine). Cette enquête, relativement succincte, avait pour but de collecter des informations sur l'exploitation des serres ainsi que la position personnelle de l'exploitant sur son système : avantages, inconvénients et points améliorés depuis le démarrage de l'installation.
- Chaque constructeur nous a conseillé des sites à visiter, leurs références en matière de séchage solaire, mais également les sites où ils ont rencontré quelques problèmes. Nous avons alors visité vingt sites en prenant soin

d'aller voir au moins deux serres de chaque constructeur :

Thermo-System : Chazelles sur Lyon (42), Peyruis (04) et Naveil (41).

Degrémont - France Assainissement : Reignier (74), Vesoul (70), Brumath (67), Biesheim (67) et Folschwiller (57).

Saur (Stereau) : La Couture Boussey (27) et Saint Vallier (26).

Ternois - Huber Technology : Saint Maurice de Beynost (01), Bonneval (28), Rodemack-Evange (57), Gunstett (67) et Taradeau-Vidauban (83).

Veolia - MSE : Saint Paul trois Châteaux (26), Chateaulin (29) et Richemont (57).

Vinci – Sogea : La Bazoge (72) et Les Arcs Sur Argens (83).

Grâce aux discussions avec les exploitants, ces visites nous ont permis d'obtenir plus de détails sur le fonctionnement réel de ces systèmes.

- Après l'exploitation d'une cinquantaine de réponses à notre première enquête, une seconde enquête a été initiée pour une meilleure interprétation des réponses apportées lors de l'enquête précédente.

⇒ A partir des différents contacts avec les constructeurs, les exploitants et d'autres organismes plus spécialisés sur le sujet tels que l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et le Syndicat Des Eaux et de l'Assainissement du Bas-Rhin, cette synthèse sur le sujet a pu être réalisée.



## 1. PRINCIPE DU SECHAGE SOLAIRE

### a. LES DIFFERENTES ETAPES DU SECHAGE DE LA BOUE

L'eau contenue dans la boue présente trois principaux états pour lesquels l'énergie nécessaire à son élimination est croissante :

- **l'eau libre** : eau située entre les floccs.

Cet état représente environ les 2/3 de l'eau présente dans les boues extraites du fond du clarificateur. L'épaississement et la déshydratation suffisent à son élimination.

- **l'eau liée** : eau absorbée chimiquement ou physiquement au flocc (de l'ordre de 20 %).

- **l'eau interne** : eau intracellulaire.

Représentant moins de 10 % de l'eau initiale, cette eau demande une énergie particulièrement importante pour être évacuée.

Le séchage permet d'apporter cette énergie et permet l'évacuation d'une grande partie de l'eau liée et interne. Il vient donc compléter les procédés de déshydratation mécanique réalisés à l'amont (cf. tableau 1).

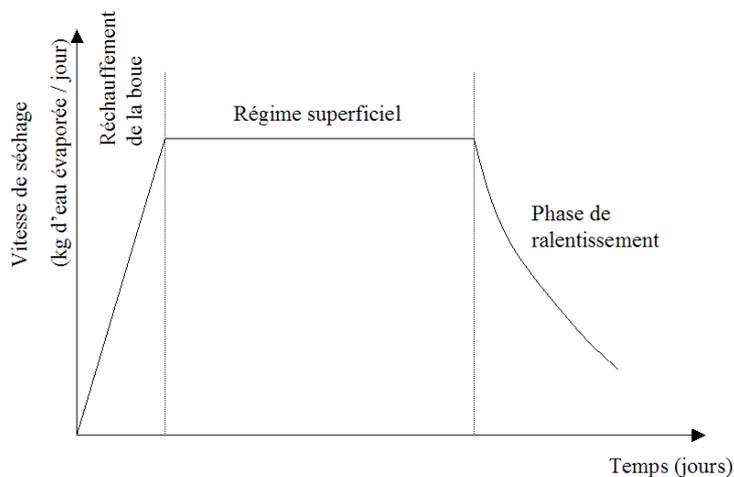


Schéma 3 : Evolution des cinétiques de séchage

Le schéma 3 ci-dessus représente l'allure de la courbe de séchage qui donne la vitesse de séchage (en kilogramme d'eau évaporée par jour) en fonction du temps.

Au début, les boues fraîches introduites dans la serre se réchauffent jusqu'à atteindre la température ambiante de la serre (température supérieure à l'air extérieur en raison de l'effet de serre et de l'activité biologique au sein de la boue). Cette période de mise en température est généralement très courte par rapport au temps total de séchage.

La deuxième phase de séchage se traduit par un régime dit « superficiel », le séchage s'effectue par évaporation de l'eau disponible en surface. Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur des boues.

Enfin, une phase de ralentissement commence quand les boues atteignent leur seuil d'hygroscopicité, c'est-à-dire que l'eau restante dans les boues ne peut plus remonter en surface. Le front de séchage qui se trouvait en surface

migre vers l'intérieur de la boue. Plus ce front de séchage se situe loin de la surface externe des boues, plus la vitesse de séchage ralentie.

C'est pourquoi, les constructeurs de serres solaires ont conçu différents systèmes de retournement du lit de boues dont l'objectif est de maintenir la boue dans la phase d'évaporation optimale. Pour cela, l'appareil casse la croûte de boue qui se forme en surface lorsque le front de séchage se déplace vers l'intérieur de la boue et renouvelle la surface de boue en contact avec l'air. En effet, la formation d'une croûte empêche les échanges thermiques d'avoir lieu. De plus, lors du séchage, les boues passent d'une texture plus ou moins pâteuse, aux alentours de 16 % de siccité ou plus, à une structure en granulés. La surface d'échange air-boue s'en trouve augmentée, ce qui peut compenser en partie la phase de ralentissement. [3] et [4].

## 16

Siccité (%)	Structure des boues	Risques
16 - 35	boues potentiellement pâteuses	fermentation anaérobie
35 - 70	boues granulées	compostage si la température augmente
> 70	boues sèches	-
> 80	boues sèches	poussières

Tableau 2 : Risques en fonction de la siccité et de la texture de la boue

Le retournement régulier des boues dans la serre permet également de maintenir des conditions aérobies au sein de la boue.

### b. FONCTIONNEMENT GENERAL D'UNE SERRE

L'objectif du séchage solaire est d'évaporer l'eau contenue dans la boue. Le taux d'évaporation est fonction de la quantité d'eau que l'air peut stocker ; Les possibilités de séchage diminuent lorsque l'humidité de l'air augmente.

Les facteurs météorologiques qui favorisent l'évaporation sont principalement les suivants : température élevée, humidité relative faible (air non saturé au voisinage de la surface évaporante), vitesse et mouvement du vent

(renouvellement de l'air à proximité de la zone d'évaporation). La structure même de la serre permet d'emmagasiner de la chaleur et d'avoir une température de l'air et des boues plus élevées que les températures ambiantes. Les boues elles mêmes emmagasinent de la chaleur grâce à leur masse et leur couleur foncée absorbant le rayonnement solaire (effet accumulateur).

L'installation de certains équipements augmente le séchage des boues :

Des extracteurs, en façade, assurent le renouvellement de l'air chargé d'eau dans la serre. Ainsi, dès que possible, l'air intérieur de la serre qui s'est chargé en eau est remplacé par l'air extérieur plus sec.

Des ventilateurs de déstratification sont positionnés tout au long de l'ouvrage au-dessus du lit de boues afin d'envoyer l'air chaud du haut de la serre vers les boues à sécher.

Un autre paramètre important à prendre en compte est la surface d'échange air-boues. Plus cette surface est grande, plus l'eau s'évapore de la boue. La disposition des boues dans la serre (lit, andains), leur hauteur et la structure de la boue (granulée ou non) sont les facteurs influençant la surface d'échange. Un

retournement efficace des boues permet de toujours avoir une surface d'échange optimale.

Ainsi, après un épaissement et une première déshydratation, les boues fraîches ne doivent pas être stockées mais doivent être directement introduites dans la serre afin d'éviter tout risque d'odeurs liées à la mise en place de processus anaérobies. La circulation de l'air dans la serre est contrôlée par des ventilateurs et des extracteurs dont le fonctionnement est asservi à des mesures de température et d'hygrométrie intérieures et extérieures. Des ouvrants permettent l'introduction de l'air extérieur dans la serre, celui-ci se charge en eau qui s'est évaporée de la boue grâce à l'effet de serre et est envoyé à l'extérieur grâce aux extracteurs. Afin d'homogénéiser la température au sein de la serre et d'améliorer le transfert d'eau, des déstratificateurs sont présents au-dessus du lit de boue. Les extracteurs peuvent être remplacés par une ventilation naturelle dans le cas de serres ouvertes.

Le fonctionnement général décrit ci-dessus est commun à l'ensemble des constructeurs qui ont par contre chacun leurs propres particularités.

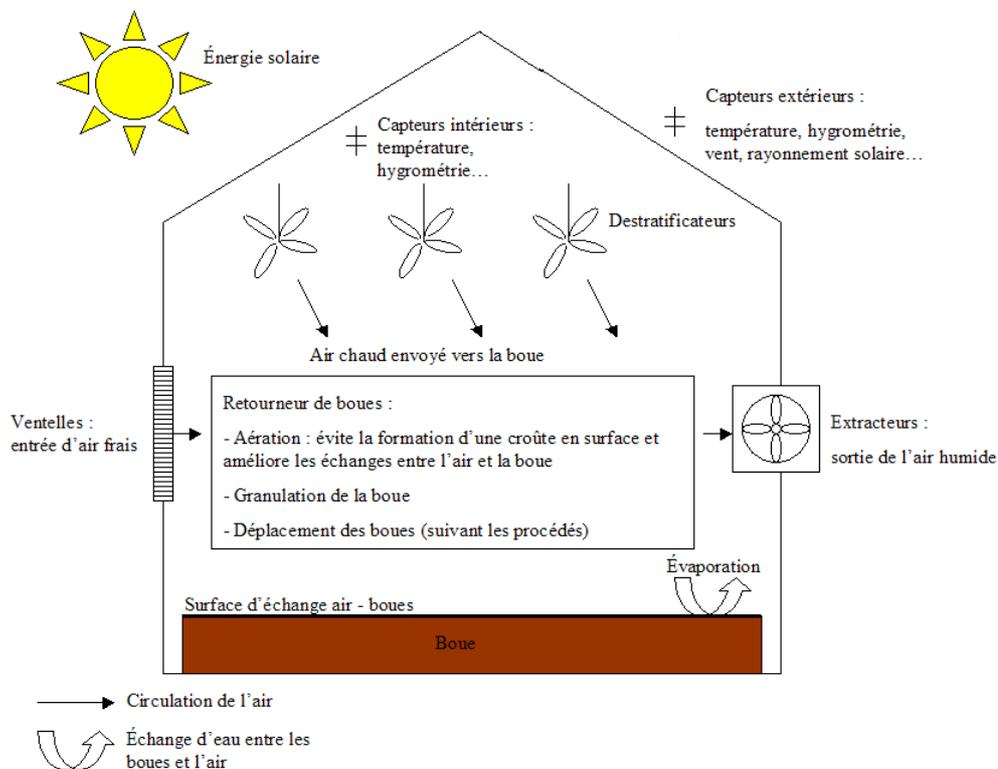


Schéma 4 : schéma du fonctionnement général d'une serre

## 2. DIFFERENTS TYPES DE SERRES

Sur le marché du séchage solaire, deux types de serres sont présentes :

### a. SERRE OUVERTE

La serre ouverte est équipée d'ouvertures en partie basse et en partie haute afin de favoriser la convection naturelle (cas typique des serres horticoles) et est démunie de porte. La gestion de l'atmosphère dans la serre est assurée par ventilation naturelle donc non contrôlée. Le taux de renouvellement de l'air dans la serre n'est pas maîtrisé car seule l'action sur l'ouvrant en toiture permet d'accentuer ou de réduire le débit de ventilation dans la serre.

➤ **Avantages :**

- conception simple

- limitation des dépenses énergétiques

- si ventilation suffisante, dilution constante des odeurs dans l'atmosphère

➤ **Inconvénients :**

- températures intérieures plus basses que dans une serre fermée

- performances de séchage sur l'année moindres et aléatoires

- impossibilité d'installer une désodorisation

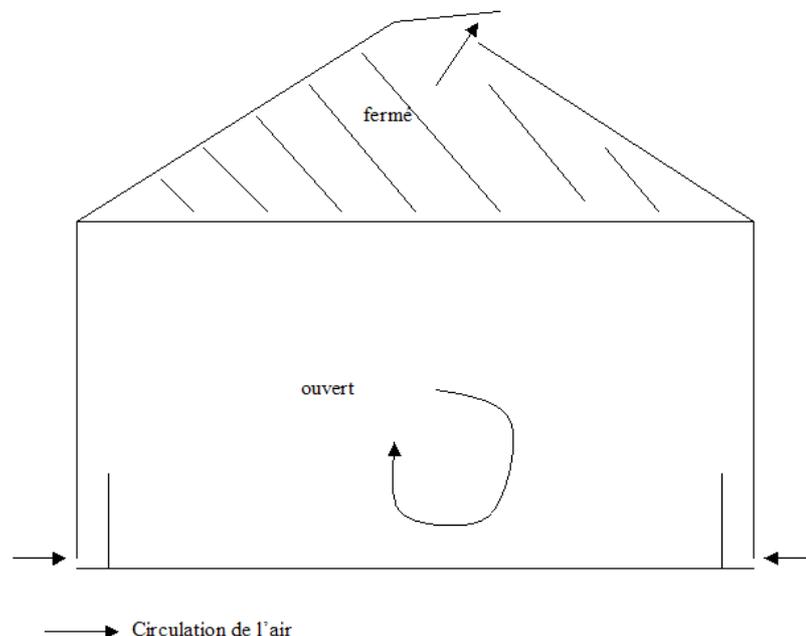


Schéma 5 : schéma de circulation de l'air dans une serre ouverte

Cette circulation d'air résulte du vent ou des phénomènes de convection naturelles induits par des différences de température et d'altitude (tirage naturel).



Photo 1 : Serres ouvertes à Brumath (67)

## b. SERRE FERMÉE

La serre fermée comporte des ventelles (de dimensions précises) sur les parois latérales ou sur un pignon, et des extracteurs pour la sortie d'air sur le pignon opposé.

### ➤ Avantages :

- maîtrise de la ventilation donc du taux de renouvellement
- possibilité d'installer une désodorisation

### ➤ Inconvénients :

- consommation énergétique plus importante



Photo 2 : Serre fermée à Folschwiller (57)

En option, pour les serres fermées, la mise en place d'un chauffage complémentaire.

Deux possibilités existent pour apporter de la chaleur supplémentaire en période où l'énergie solaire est réduite (période hivernale) : soit par la mise en place d'un plancher chauffant (une pompe à chaleur récupère les calories de l'eau de sortie de la station d'épuration par exemple), soit en chauffant l'air de la serre par le biais d'aérothermes.

➤ **Avantages :**

- surface au plancher de la serre plus petite
- performances de séchage « constantes » toute l'année

➤ **Inconvénients :**

- dépenses énergétiques plus importantes
- conception initiale plus compliquée et plus onéreuse

### 3. ELEMENTS DE CONCEPTION A PRENDRE EN COMPTE.

#### a. CHOIX DES MATERIAUX A UTILISER

Le choix des matériaux doit tenir compte de plusieurs critères : corrosion, transmission lumineuse, isolation...

En effet, l'atmosphère à l'intérieur de la serre peut être corrosive, notamment par l'émanation de gaz tels que l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) lors des phénomènes de fermentation (anaérobie) ou de compostage (aérobie) de la boue en milieu humide. Le matériel à l'intérieur de la serre est donc partiellement, voire totalement en acier inoxydable, les soudures sont passivées et la charpente de la serre est en acier galvanisé à chaud. Compte tenu du taux de renouvellement de l'air important, le phénomène de corrosion à l'intérieur de la serre est très rarement observé.

En ce qui concerne les parois de la serre, différents matériaux sont disponibles sur le marché tels que le plastique, le verre ou le polycarbonate. La serre peut être confrontée à des conditions climatiques difficiles : neige, vent, précipitations,... Il est donc préférable qu'elle soit résistante aux chocs extérieurs. Pour un séchage des boues efficace, il faut que l'effet de serre soit optimum. Le matériau doit donc à la fois transmettre suffisamment la lumière tout en conservant la chaleur à l'intérieur de la serre. Un compromis conciliant la transmission lumineuse, le pouvoir d'isolation et le coût doit alors être trouvé.

	Plastique ondulé	Verre	Polycarbonate
Résistance aux chocs	++	-	+++
Pouvoir d'isolation	++	+	+++
Transmission lumineuse	+	+++	++
Coût	+	+++	++

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques de différents matériaux

Le film plastique bullé est équivalent au polycarbonate double parois en ce qui concerne l'isolation de la serre. Le verre est un matériau très réactif lorsqu'il n'est pas isolé (simple vitrage), il favorise la cuisson des boues lors d'un fort ensoleillement ainsi que la condensation lorsque l'air est trop humide comme la nuit par exemple. Au bout de quelques années d'exposition, le polycarbonate devient opaque du fait de sa mauvaise résistance à l'ammoniac. Pour toutes les serres, il est nécessaire de prévoir un nettoyage intérieur et extérieur régulier de manière à ce que la transmission lumineuse ne soit pas altérée dans le temps. Cette fréquence d'intervention est fonction de l'encrassement différent du support selon les sites.

Le toit de la serre peut avoir soit une forme arrondie qui facilite les écoulements de pluie extérieurs soit une forme de chapelle qui permet à la serre d'être moins haute et ainsi de mieux s'intégrer dans le paysage. Le toit peut être dans

le même matériau que les parois. Une autre possibilité est l'utilisation d'une double bâche plastique de 200 µm d'épaisseur entre lesquelles de l'air est insufflé pour une meilleure isolation de la serre. Il faut néanmoins tenir compte de la fragilité, la bâche peut être facilement percée et de l'eau peut alors s'introduire entre les deux bâches. Ce point a été souvent évoqué par les exploitants, percements liés à la chute de branches lors de leur transport par les oiseaux ou lors d'orages violents. De plus, ces structures ne sont garanties que 4 ans et sont difficiles à installer car elles nécessitent des conditions météorologiques idéales.

Au niveau des garanties, le constructeur peut proposer au client, suivant la serre, la norme bâtiment CM 66 avec une garantie décennale ou la norme serre de production NF EN 13031-1 (durée de vie variable 5 – 10 – 15 ans selon la classe choisie) avec une garantie contractuelle de 2 ans.

## b. VENTILATION

La ventilation est un paramètre essentiel du séchage sous serre des boues. En effet, l'objectif principal de ce système étant d'évaporer l'eau contenue dans la boue, il faut favoriser les échanges de chaleurs convectifs entre la boue et l'air à l'intérieur de la serre. Plus l'air intérieur est sec, et plus il pourra se charger en eau ; il est donc nécessaire de le renouveler régulièrement. L'entrée de l'air extérieur est assurée par des ouvrants situés sur les parois latérales, en pignon ou sur le toit.

**Deux types de ventilation sont rencontrés :**

➤ **Ventilation d'extraction** (intérieur vers l'extérieur) pour les serres fermées:

- Taux de renouvellement de l'air intérieur assuré entre 10 et 20 Volumes de serre / heure

- Puissance unitaire des ventilateurs très variable, fonction du volume d'air à renouveler et de la perte de charge en aval de cet équipement, plus élevée en cas de désodorisation, et comprise entre 1 et 22 kW. Un ou plusieurs extracteurs en parallèle peuvent être installés.

Un taux de renouvellement de l'air intérieur élevé permet d'une part, de remplacer l'air humide par

l'air extérieur plus sec et d'autre part d'évacuer les gaz émis dans la serre, sources d'odeurs. Ainsi, les gaz sont rapidement dilués dans l'atmosphère avec les odeurs qu'ils engendrent selon les conditions météo ou envoyées sur une unité de désodorisation.

➤ **Ventilation de déstratification** (intérieur de la serre):

- Homogénéisation de l'air intérieur : évite à l'air chaud de rester en hauteur

- Augmente les échanges convectifs à la surface des boues

- Puissance unitaire comprise entre 0,25 et 1 kW, le nombre de ventilateurs installés dépend de chaque constructeur et de la taille de la serre.

Leur présence permet d'augmenter considérablement les échanges thermiques.

=> L'asservissement de la ventilation (extracteurs et déstratificateurs) dépend des conditions climatiques extérieures et intérieures, renseignées par l'installation de différents capteurs : températures, hygrométrie (kg d'eau par kg d'air), rayonnement solaire, vitesse du vent.

Pour l'extraction de l'air, le paramètre principal est la différence d'hygrométrie entre l'intérieur et

l'extérieur de la serre. Pour la déstratification, il s'agit uniquement de la température intérieure de la serre et du fonctionnement du retourneur.

Chaque constructeur a développé son propre programme pour la régulation de la ventilation

dans la serre. La ventilation de la serre et plus particulièrement l'extraction est une source importante de consommation d'électricité.

#### 4. PRINCIPALES BASES DE DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES ESCOMPTEES

##### a. RAPPEL DU PRINCIPE

Le séchage solaire a pour but d'augmenter la siccité de la boue. Le passage d'une tonne de matière sèche de 20% à 70% de siccité permet

une réduction de volume d'un facteur 3,5 (sur la base d'une densité apparente constante).

1 Tonne de matière sèche (MS)	Siccité de la boue	Tonne d'eau dans la boue	Tonnage de boue brute
	10 %	9 T	10 T
	20 %	4 T	5 T
	40 %	1,5 T	2,5 T
	60 %	0,67 T	1,67 T
	70 %	0,43 T	1,43 T
	80 %	0,25 T	1,25 T
	90 %	0,11 T	1,11 T

Tableau 4 : Exemple de la Masse d'une tonne de MS suivant la siccité de la boue

En exemple, à partir de ce tableau, le passage d'une siccité de 20 à 70% permet un gain en tonnage de boue et donc en volume d'un facteur de 3,5 (ratio 5 T/1,43 T). Ce gain nécessite l'élimination de 3,57 tonnes d'eau par évaporation.

Ce tableau montre également qu'un gain de 10 points de siccité est beaucoup plus intéressant pour de faibles siccités que pour des boues déjà déshydratées : le passage d'une boue de 10 à 20 % de siccité permet une réduction de volume d'un facteur 2 alors que le passage de 80 à 90 % permet seulement un gain en volume d'un facteur de 1,12.

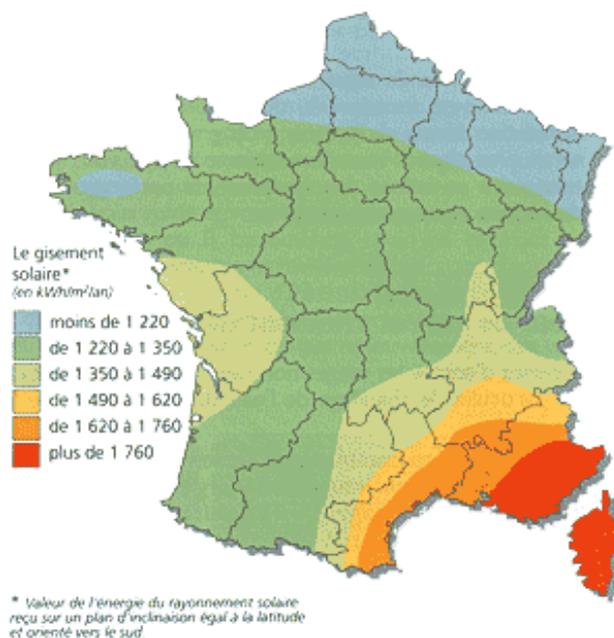
##### b. DIMENSIONNEMENT

Les données météorologiques telles que la température, le rayonnement solaire, le vent, l'hygrométrie de l'air et les précipitations, dont certains paramètres ont plus d'influence selon le type de serres (ouverte ou fermée), dépendent non seulement du lieu géographique considéré

mais également de la période de l'année. Ces informations permettent de déterminer une évaporation théorique exprimée en kilogramme d'eau évaporée par mètre carré et par an : kg EE/m<sup>2</sup>/an.

A cela, il faut ajouter les effets de la ventilation de déstratification qui peut permettre d'augmenter l'évaporation jusqu'à 30 %.

**En France, le potentiel évaporatoire annuel moyen (données statistiques) est compris entre 800 et 1 200 kg EE/m<sup>2</sup>/an soit un potentiel de 2,74 kg d'eau évaporée par m<sup>2</sup> et par jour (chiffre moyen annuel car certains jours d'hiver par exemple, aucune évaporation ne peut être mesurée).**



Source : ADEME

Figure 1 : Carte du gisement solaire en France (kWh/m<sup>2</sup>/an)

Les principaux autres paramètres d'entrée du dimensionnement sont les suivants :

- Siccité initiale de la boue
- Siccité finale
- Quantité de boue appliquée à la serre sur l'année
- Hauteur maximale du lit de boue à ne pas dépasser
- Filière d'évacuation des boues en sortie de serre (continue ou discontinue dans le cas d'épandage agricole).

#### Exemple d'approche de dimensionnement :

Une collectivité de 8 000 EH est équipée d'une station d'épuration de type boue activée aération

prolongée. La production de boue annuelle est de 180 tonnes de Matière Sèche par an. Les boues issues de la déshydratation sont à 20% de siccité (soit 900 tonnes de boues fraîches) et le séchage solaire doit permettre d'atteindre une siccité de 75% d'où 240 tonnes de boues séchées.

Cette production de boue (ici 62 g de MS/ EH.j<sup>-1</sup>, valeur relativement élevée) est fonction de nombreux facteurs comme le type de réseau (temps de pluie), les apports de boues extérieures, le type de traitement retenu en particulier pour le phosphore (traitement chimique ou non).

Pour information, le graphique suivant représente les tonnes de matières sèches retenues par an en fonction du nombre d'Equivalents habitant de la station (valeurs issues des différents projets de dimensionnement d'installation de séchage solaire).

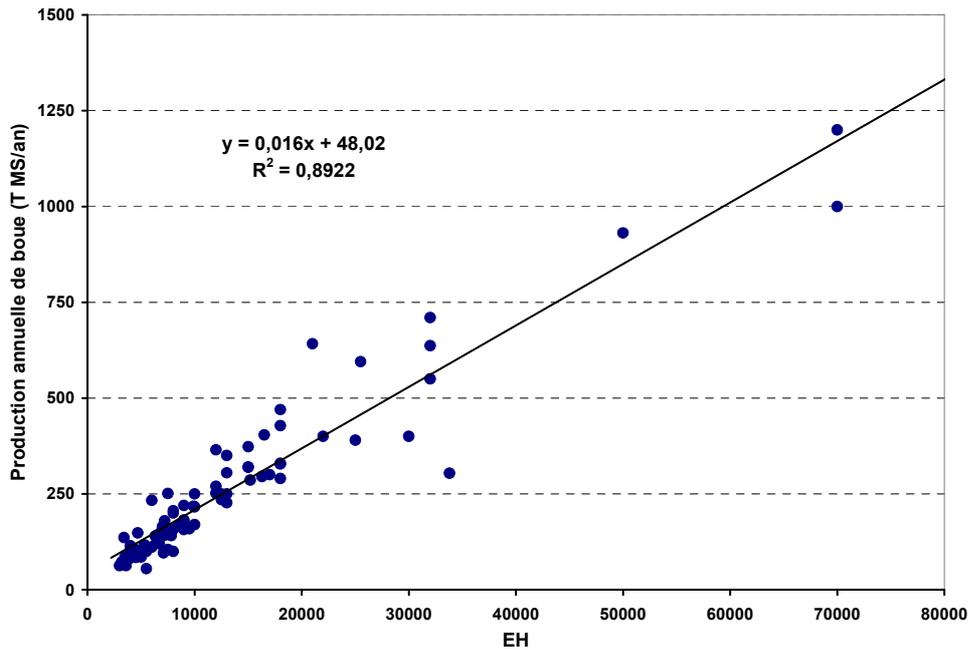


Figure 2 : Production de boues d'un Equivalent habitant en dimensionnement

La production de boue moyenne d'un équivalent habitant utilisée en dimensionnement du séchage solaire est de l'ordre de 16 kg de MS/EH et par an (ou 44 g de MS/EH et par jour). Ce qui donne en moyenne une production de 0,73 kg MS/kg DBO<sub>5</sub> appliquée.

Ces valeurs sont faibles (en temps sec de l'ordre de 0,85) et indiquent que les constructeurs intègrent souvent un coefficient minorateur pour évaluer la production de boue annuelle utile au dimensionnement du séchage. Ce coefficient se justifie par le fait que les stations d'épuration ne sont pas alimentées toute l'année à une charge maximale constante.

1- Calcul de la quantité d'eau à évaporer pour atteindre la siccité de 75 %

A partir d'une production annuelle de 180 tonnes de matières sèches, le passage d'une boue à 20% (soit 900 tonnes de boue fraîche) à une siccité de 75% (240 tonnes de boues séchées) nécessite d'éliminer par évaporation 660 tonnes d'eau sur l'année.

2- Calcul de la surface utile de séchage solaire à envisager ?

Sur la base des données communiquées par les constructeurs, on constate les valeurs moyennes suivantes :

	Séchage solaire naturel	Séchage avec plancher chauffant
Tonne d'eau évaporée / m <sup>2</sup> .an*	De l'ordre de 0,8	De l'ordre de 1,8

\* : valeur moyenne retenue dans les projets de dimensionnement

La surface utile de serre nécessaire est de l'ordre de 825 m<sup>2</sup> pour du séchage solaire naturel et de 365 m<sup>2</sup> pour des serres équipées d'un plancher chauffant.

A partir des données de dimensionnement collectées, la représentation de la relation entre le tonnage de matière sèche à traiter par an et la surface de serre retenue est la suivante :

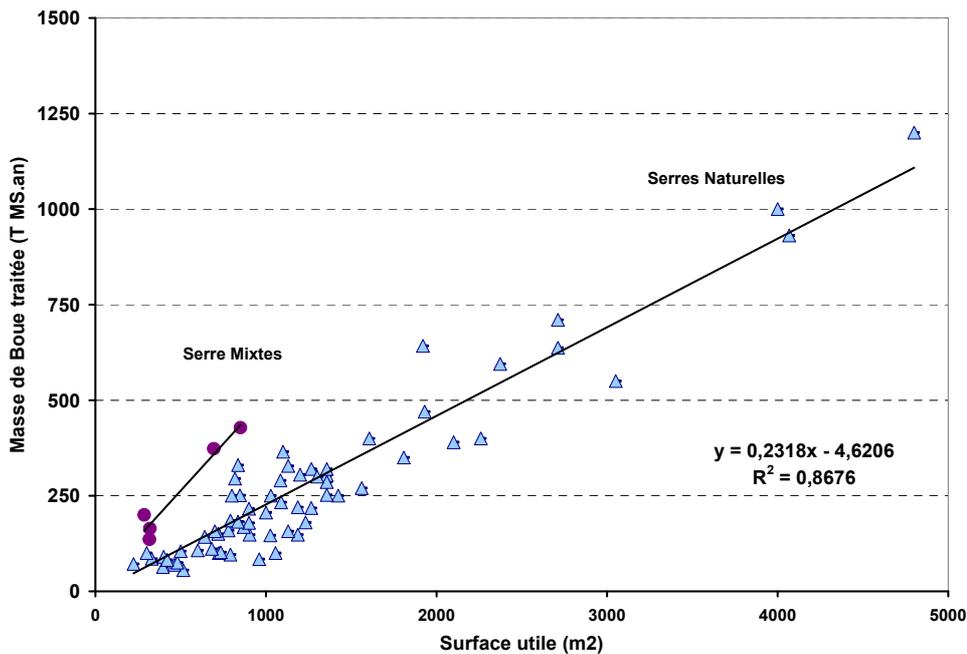


Figure 3 : Quantité annuelle de boues traitées en TMS par m<sup>2</sup> de surface utile en dimensionnement

Pour une même surface utile, les masses de boue appliquées varient suivant les siccités retenues en entrée et sortie.

Globalement, on observe que l'on peut traiter, en moyenne, de l'ordre de 230 kg de MS par m<sup>2</sup> de surface utile de serre et par an avec une différence selon le type de séchage retenue :

**Séchage solaire naturel : 240 kg de MS/ m<sup>2</sup> et par an**

**Séchage solaire associé à un plancher chauffant : 490 kg de MS/ m<sup>2</sup> et par an.**

### 3- Estimation de la hauteur de boue pour un séchage solaire naturel de 825 m<sup>2</sup>

Dans cette approche théorique rapide, la hauteur de boue maximale sur l'année est calculée pour les deux périodes extrêmes : boues fraîches et boues séchées, en prenant une masse volumique apparente des boues de l'ordre de 0,8 tonnes/m<sup>3</sup> et une surface de serre de 825 m<sup>2</sup>.

	Boues fraîches à 20%	Boues séchées à 75%
Hauteur du lit de boue cumulée théorique	1,36 m	0,36 m

Il est difficile d'estimer, en approche rapide, la hauteur maximale de boue obtenue sur l'année (point limitant du dimensionnement) car cette hauteur est fonction de nombreux facteurs dont l'évaporation naturelle réelle et le mode de fonctionnement de la serre, avec en particulier la surface réelle réservée au séchage et celle réservée au stockage.

Il conviendra donc de bien faire préciser au constructeur la hauteur maximale de boue que l'on va atteindre dans la serre et de comparer cette valeur aux données ci après.

Autre hypothèse pour l'estimation de la hauteur maximale du lit de boue :

Ce calcul théorique rapide peut se faire en supposant le scénario de fonctionnement de la serre suivant : 3 mois de séchage et 3 mois de non séchage

D'où une hauteur maximale de  $(300 \text{ m}^3 \text{ de boue sèche} / 12 \text{ mois} \times 3 \text{ mois} + 1125 \text{ m}^3 \text{ de boue fraîche} / 12 \text{ mois} \times 3 \text{ mois}) / 825 \text{ m}^2 = 0,43 \text{ m}$

Dans cette approche, la surface utile retenue est utilisée pour le séchage et pour le stockage.

Les hauteurs maximales de boue sont différentes suivant les procédé et sont imposées par les particularités de fonctionnement des retourneurs.

Les recommandations de fonctionnement des constructeurs, en terme de hauteur maximale de boue dans la serre, sont les suivantes:

Héliantis	Heliocycle®	Sanglier électrique®	Sogelios®	Solia	Ternois 3S
55 cm (20 / 25cm en dimensionnement)	40 / 50 cm	25 / 35 cm	60 cm	100 cm (en andains)	15 cm

Tableau 5 : hauteur maximale de boue dans la serre sur l'année suivant le procédé

La largeur des serres est souvent standard, le dimensionnement permet donc de déterminer les paramètres suivants :

- Longueur de la serre
- Débits d'air d'extraction
- Temps de fonctionnement de la ventilation.

Pour les serres prévues pour un fonctionnement sur l'année, il est possible de réduire la surface par l'installation d'une zone de stockage des boues sèches bien identifiée dans la serre ou dans un ouvrage extérieur.

Les serres munies de plancher chauffant ont un apport d'énergie supplémentaire, la capacité

d'évaporation de la serre s'en trouve largement augmentée. La surface de la serre est par conséquent bien plus petite et réduite d'un facteur 2 environ.

**En dimensionnement, il faut compter en moyenne 0,8 TEE/m<sup>2</sup>.an pour une serre naturelle sans chauffage complémentaire et entre 1,7 et 2 TEE/m<sup>2</sup>.an pour une serre équipée d'un plancher chauffant.**

Le potentiel évaporatoire (en TEE/m<sup>2</sup>.an) varie fortement en fonction des conditions climatiques, de la hauteur du lit de boue (taux de charge de la serre),....

Il est à noter que l'on observe dans le temps, une évolution à la baisse de ce potentiel depuis les premières installations.

### C. PERFORMANCES ET GARANTIES

Les performances et garanties du séchage solaire sont propres à chaque système et constructeur. Elles dépendent du fonctionnement de la serre et notamment de la fréquence d'évacuation des boues (sortie continue ou discontinue, fonctionnement en été seulement ou toute l'année) et de la présence ou non d'un apport complémentaire d'énergie. Les garanties

concernent en général la siccité des boues évacuées, le constructeur doit alors préciser :

une siccité minimale obtenue à n'importe quel moment de l'année, pour les serres avec plancher chauffant notamment,

une siccité minimale pour les serres où l'évacuation des boues est annuelle (en fonction du mois prévu pour l'épandage),

une siccité moyenne obtenue sur l'année avec en plus une siccité minimale pour les serres où l'évacuation des boues est continue.

Remarque : Cette siccité moyenne n'est pas très intéressante car pour l'obtenir, certains constructeurs peuvent pousser à sécher les boues à plus de 90% de siccité ce qui entraîne d'important problèmes de poussières.

En général, il est préconisé d'atteindre au moins 75% de siccité pour éviter les redémarrages en fermentation ou compostage lors du stockage. Il n'est pas nécessaire d'aller au-delà de cette valeur car cela crée trop de poussières et plus de contraintes d'exploitation. De plus, un gain supplémentaire en siccité nécessite une importante quantité d'énergie solaire pour une très faible diminution de volume.

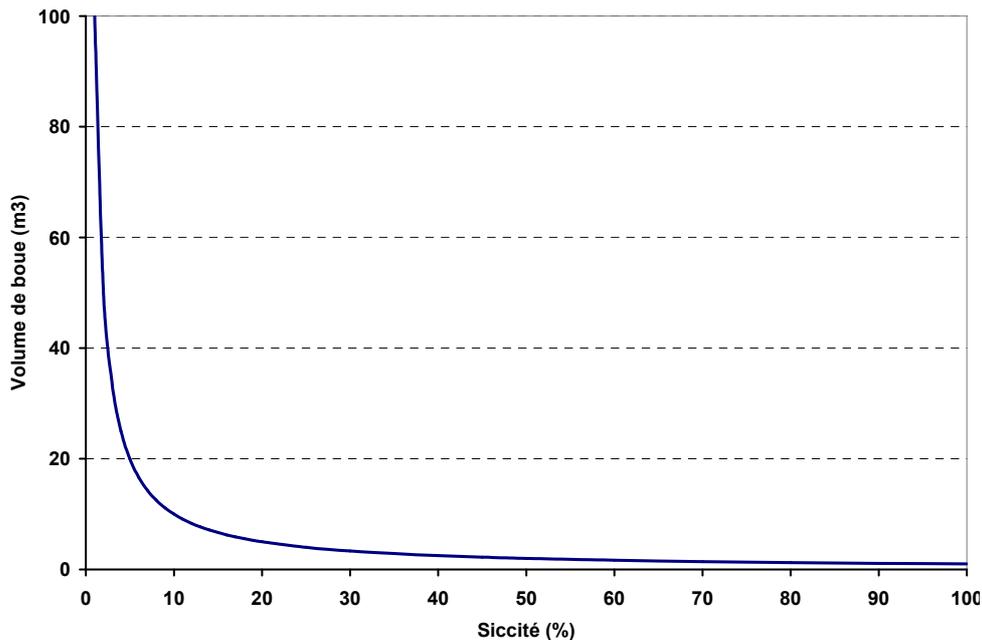


Figure 4 : Volume occupé par une tonne de matière sèche selon sa siccité et pour une densité apparente constante

Cette figure montre bien que la réduction du volume de boues est très importante pour des faibles siccités. L'obtention d'une siccité très élevée (> à 70%) nécessite une demande d'énergie conséquente pour une diminution de volume faible et donc pour un gain en coût de transport moindre.

Un gain en siccité important permet une réduction considérable du tonnage des boues à évacuer. Pour une même quantité de MS, le volume de boues à 80% de siccité est 4 fois plus faible qu'à 20% de siccité (Cf. § 4.a) pour une densité apparente constante. Compte tenu de la variation

de la densité apparente au cours du séchage (de l'ordre de 0,7 pour une siccité de 80% et de 0.9 à 20%), le gain en volume réel lors du passage de 20 à 80% de siccité est proche de 3. Cela ne constitue en général pas une garantie du constructeur mais il s'agit bien là d'une des performances principales du système qui permet de réduire d'un facteur 3 à 4 les coûts de transport, de faciliter l'épandage ce qui permet un gain de temps et donc de main d'œuvre.

De plus, l'ensemble des filières d'élimination des boues existantes sont accessibles à ces boues séchées : le compostage, l'incinération, la valorisation agricole.

Destination finale des boues	Siccités requises
Valorisation agricole	Boues liquides : 0,8 - 10 % Boues déshydratées : 15 - 40% Boues séchées : > 60 %
Compostage*	18 - 30 %
Incinération**	> 35 %
Co-incinération	> 25% 3 - 6 % si dispositif d'injection particulier
Centre de stockage	30 - 35 %

\* : Très variable, fonction des centres de compostage.

\*\* : Très variable, fonction des types d'incinérateurs

Tableau 6 : Siccités requises en entrée des filières de valorisation [3]

Etat des boues	Siccité (%)		
Liquide	< à 10%	fluide	< à 5%
		épais	de 5 à 10%
Pâteux	de 10 à 30%	pelletable	< 18%
		Gerbable (état plastique)	de 18 à 30%
Solide	> à 30%		

Tableau 7 : Etat des boues en fonction de la siccité

Le compostage et la valorisation agricole des boues nécessitent un contrôle préalable rigoureux des boues : norme NF U44-095 pour le compostage et norme NF U44-041 (1985) pour l'épandage. En cas de non-conformité pour une

de ces deux filières d'élimination, les boues peuvent alors être incinérées ou dirigées en CSDU et le séchage permet de diminuer les coûts de transport jusqu'au lieu de l'incinération ainsi que les coûts de traitement des boues.

## 5. DIFFERENTS MECANISMES A CONTROLER

La boue résiduaire est le résultat du traitement le plus souvent par voie biologique de tous les éléments polluants biodégradables des eaux usées. Plus précisément, la boue est un mélange hétérogène de particules minérales et organiques composé de micro-organismes, colloïdes, polymères organiques et cations, dont la composition dépend à la fois de l'origine des eaux à traiter, du type de traitement retenu et de l'âge de l'échantillon. Pour les stations de type boues activées faible charge, la matière organique représente 50 à 75 % de la matière sèche des

boues (des valeurs supérieures peuvent être rencontrées pour des effluents particuliers ou des installations confrontées à des dysfonctionnements biologiques). Les boues contiennent également une certaine proportion de matière minérale issue des effluents d'entrée station mais aussi de composés injectés lors de leur traitement (sels métalliques).

C'est donc un milieu vivant complexe et évolutif et des processus de fermentation et de compostage non recherchés peuvent s'enclencher et modifier

la composition chimique du produit. Ces deux processus sont décrits ci après afin de mieux les identifier et d'éviter leur démarrage.

Pour le procédé Solia, on parlera de bio-séchage. Celui-ci utilise l'élévation de température due à un

#### a. LA FERMENTATION : PROCESSUS ANAEROBIE

La boue est donc un milieu particulièrement fermentescible : sa composition chimique varie continuellement sous l'action des bactéries. Cette évolution chimique influence directement son comportement mécanique : la fermentation induit en effet une fluidification de la boue et limite les échanges gazeux donc l'aération du milieu. Durant la fermentation, l'activité des micro-organismes consommant de la matière organique conduit à la dégradation des macromolécules en molécules plus petites et en gaz. Plus la boue est minéralisée, moins elle contient de macromolécules lourdes et de chaînes ramifiées. » [5]

La réaction globale peut être schématisée ainsi :

$C_5H_7O_2N + 3 H_2O \rightarrow 5/2 CO_2 + 5/2 CH_4 + NH_3$   
(Matière volatile Biodégradable)

Cette réaction montre une production de biogaz, dont le méthane. De plus, d'autres composés tel que le soufre sont associés à cette matière organique et vont produire en phase anaérobie différents gaz ( $H_2S$ , mercaptan). Ces gaz, à faibles concentrations, sont responsables d'odeurs et peuvent être très dangereux pour le personnel exploitant.

#### B. LE COMPOSTAGE : PROCESSUS AEROBIE

« Le compostage est un procédé biologique de conversion et de valorisation des matières organiques (sous-produits de la biomasse, déchets organiques d'origine biologique...) en un produit stabilisé, hygiénisé, semblable à un terreau, riche en composés humiques : le compost.

Les micro organismes responsables du compostage ont besoin de plusieurs éléments:

processus biologique déclenché par l'épaisseur de la boue (andains) afin d'augmenter les capacités d'évaporation.

➤ **Détection** : Une odeur d'égouts permet de déterminer le manque d'oxygène. Une odeur forte d' $H_2S$  ou de méthane (œuf pourri) indique l'anaérobiose et donc le départ en fermentation des boues.

➤ **Conditions favorables** : Les risques de départ en fermentation concernent essentiellement les boues collantes (état plastique) ou pâteuses dont la siccité se trouve entre 15 et 35 %. Ce phénomène se déroule donc souvent en hiver, quand la boue a du mal à sécher. Du fait de la texture de la boue, l'air ne peut circuler et les conditions d'anaérobiose sont rassemblées. L'anaérobiose commence lorsque le taux d'oxygène de la boue est inférieur à 10% et elle prédomine au-dessous de 5% d' $O_2$ .

➤ **Points à maîtriser pour éviter ce phénomène** : Il est nécessaire d'aérer la boue en augmentant le nombre journalier de retournements et, si cela est possible, il faut essayer de diminuer la hauteur du lit de boues pour qu'il y ait d'avantage de contact direct avec l'air de la serre.

➤ de nourriture équilibrée, composée d'un mélange de matières carbonées et de matières azotées;

➤ d'humidité, contenue particulièrement dans les matières azotées ;

➤ et d'air, dont la circulation est favorisée par les matières carbonées structurantes (le plus souvent, ce sont des composés durs).

Les conditions physiques nécessaires au déclenchement du processus de compostage sont les suivantes :

- **Aération**

Ce facteur est essentiel puisque le compostage est un processus aérobie. On estime que l'air devrait occuper au moins 50% du volume du tas à composter.

- **Humidité**

Comme pour un substrat de culture, l'aération et l'humidité du compost sont liées : un excès d'eau diminue la quantité d'air disponible dans le volume de compost. Un système d'aération plus efficace sera alors nécessaire afin de maintenir un taux d'aération et un taux d'humidité suffisants.

- **Température**

Par leur activité biologique (réaction exothermique), les micro-organismes dégagent une chaleur telle que les températures peuvent atteindre 70°C .

Dans le séchage solaire, les volumes de boue mis en jeu sont relativement faibles par rapport à la taille des andains de filière de compostage classique et les températures de 40 à 50°C ne sont que rarement dépassées. » [6]

« Les principales nuisances d'une installation de compostage étant les odeurs, l'arrêté relatif aux installations de compostage publié par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) le 17 mai 2008 instaure des obligations de moyens afin de limiter les nuisances olfactives. Les installations génératrices d'odeurs comme les aires de réception, de stockage et de traitement des déchets doivent ainsi être situées à plus de 200 mètres des habitations voisines. Cette distance est ramenée à 50 mètres pour les installations en milieu confiné équipées de traitements des effluents gazeux. L'arrêté fixe également des normes concernant les rejets gazeux et plus précisément leur concentration en hydrogène sulfuré et en ammoniac. »

Ces recommandations pourraient être aussi retenues pour l'implantation d'un séchage solaire.

➤ **Détection** : Deux sortes d'odeurs sont souvent constatées en compostage : odeur « d'œuf

pourri » (émanation d'H<sub>2</sub>S) et odeur d'ammoniac.

➤ **Points à maîtriser pour éviter ce phénomène :**

Dans le cas d'odeur « d'œuf pourri », ici processus d'anaérobiose dû à un excès d'humidité et d'un manque d'oxygène, il faut ajouter des matériaux secs et retourner plus fréquemment. Les odeurs d'ammoniac sont dues à un excès de matières azotées, et un ajout de matières riches en carbone (telles que la paille ou la sciure) permet d'éviter ces émanations.

➤ **Conditions favorables :** Puisque le compostage est un processus aérobie, les risques de départ en compostage concernent les boues de siccité comprises entre 40 et 60%. En effet, celles-ci sont déjà granulées, l'air circule donc plus facilement dans le lit de boues et la surface d'échange air-boues est plus importante.

Les deux autres conditions physiques propices au compostage sont également réunies, la température dans la serre peut rapidement augmenter et atteindre 50°C ou plus en été et si la ventilation n'est pas suffisante, l'air à l'intérieur de la serre est trop humide. Un dégagement d'ammoniac peut donc être observé, ce qui indique le départ en compostage. Il est donc alors nécessaire de diminuer la température à l'intérieur du lit de boue, en diminuant sa hauteur par exemple et en augmentant le nombre de retournements dans la zone concernée.

**Cas particulier :**

Certaines serres de séchage solaire ont été adaptées pour se rapprocher de la technique du compostage. En effet, les andains de compostage sont le plus souvent de forme triangulaire avec une hauteur comprise entre 1,5 et 3 m et une base mesurant de 3 à 6 m de large. Un retourneur soulève, retourne et aère les tas. De plus, un dispositif d'aspersion permet de réaliser un arrosage homogène afin de maintenir un taux d'humidité optimal pour le compostage. Il faut au minimum 2 retournements avant d'obtenir du compost et ceux ci doivent être réguliers, espacés au moins d'une dizaine de jours.

Par exemple à Verdun (55), une serre de séchage solaire est utilisée comme serre de compostage. En effet, les andains ont une taille plus importante que dans les autres serres de Veolia. Le retourneur utilisé est d'ailleurs un retourneur spécifique au compostage. Le but dans ce cas est de produire du compost normalisé. Les boues déshydratées sont issues d'un filtre à bandes et sont mélangées à du calcaire concassé (50 à 60 kg de CaO par tonne de boue brute). De la paille est également ajoutée, à raison de 10% de la masse de boues. De par sa forme, la paille permet une bonne oxygénation. De plus, c'est une matière riche en carbone, élément essentiel au

bon déroulement du processus de compostage. Le point délicat est de ne pas dépasser les 60% de siccité au risque qu'il y ait alors trop de phosphore et que le compost ne soit pas conforme. Il faut donc un suivi régulier et une bonne réactivité de l'exploitant afin d'évacuer les boues rapidement lorsque leur siccité se trouve entre 50 et 60 %. Si les analyses qui sont faites régulièrement ne sont pas conformes, la production de compost normalisé est impossible, la boue est alors séchée à une siccité plus importante afin de pouvoir être envoyée en CET de classe 2.

Les autres serres de séchage solaire des boues Solia, construites par Veolia, ne doivent pas être comparées à la technique du compostage mais on parlera plutôt de la technique de bioséchage en andains (activité biologique plus poussée en raison des températures élevées au sein de l'andain).

### C. LA DESODORISATION

Une odeur correspond à la perception par le sens de l'odorat d'une molécule chimique ou d'un composé volatil. Le caractère agréable, neutre ou désagréable associé à une odeur par chaque individu est pour partie d'origine innée, et pour partie acquis, mais il dépend aussi de la concentration du produit dans l'air et du fait qu'il soit ou non associé à sa source naturelle. Les odeurs sont difficilement mesurables et peuvent varier selon leurs caractéristiques et leur intensité. D'ailleurs, elles peuvent être perçues différemment d'un individu à l'autre selon sa sensibilité olfactive et sa tolérance.

Au départ, il n'était pas prévu que les serres de séchage solaire soient une source d'odeurs. Or, suite aux premiers retours d'expériences, les différents constructeurs ont tous remarqué qu'il s'agissait là d'un problème non négligeable.

Différentes approches de la problématique « odeurs » existent chez les constructeurs :

- garantir que l'installation ne générera aucune nuisance olfactive car les débits d'air extraits sont tellement importants que les odeurs sont rapidement diluées dans l'atmosphère,
- éviter d'installer une serre trop proche d'habitations et respecter une distance minimale de 100 à 200 mètres du voisinage,
- installer une désodorisation biologique sur support minéral ou organique,
- installer une désodorisation physico-chimique comprenant une à quatre tours de lavage en série (une tour pour chaque type de gaz à éliminer).

Photo 3 : Désodorisation biologique sur le site de Peyruis (04)



Photo 4 : Désodorisation biologique sur le site de Saint Paul 3 Châteaux (26)

32

Selon les constructeurs, la désodorisation peut être systématique ou étudiée au cas par cas. De plus, la totalité de l'air extrait peut être désodorisée ou seulement une partie. Ainsi, on rencontre des serres où le 1/3 du débit d'air est désodorisé en fonctionnement courant. Lors des périodes critiques d'émanation d'odeurs, les extracteurs d'air vers l'extérieur sont alors arrêtés temporairement et la totalité de l'air extrait passe par la désodorisation, permettant de palier aux pics d'odeurs. Le renouvellement de l'air à l'intérieur de la serre est alors divisé par trois mais ce fonctionnement est annoncé comme occasionnel et de faible durée (quelques jours par an, non systématique).

#### D. LA SECURITE DU PERSONNEL

Les phénomènes de fermentation et de compostage entraînent des dégagements gazeux tels que l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène, le méthane, le monoxyde de carbone et les

D'autres techniques pour éviter les problèmes d'odeurs existent mais sont plus rarement utilisées :

- la dissémination de l'air, associant la propulsion aérodynamique forcée et la dispersion par le vent, cette technique consiste à extraire l'air pollué de la serre et à le propulser en altitude où il se dilue dans l'air ambiant,
- l'utilisation de masquant d'odeurs au niveau de la serre.

composés organiques volatils. De par leurs caractères inflammable et toxique, ces gaz suivant leur concentration peuvent être à l'origine de problèmes de sécurité à l'intérieur de la serre.

Gaz	Toxique	Dangereux pour l'environnement	Inflammable
Ammoniac	X	X	
Sulfure d'hydrogène	X	X	X
Méthane			X
Monoxyde de carbone	X		X

Tableau 8 : Caractéristiques des gaz pouvant être produits lors du séchage des boues

De plus, les boues très sèches sont souvent génératrices de poussières, potentiellement inflammables voire explosives, et la température à l'intérieur de la serre peut s'élever drastiquement jusqu'à 60 voire 70°C. A cause de l'émanation de ces gaz et des températures élevées, il peut y avoir un risque d'auto-combustion des boues sèches, c'est-à-dire l'inflammation des boues en l'absence de flamme pilote.

#### **Gaz inflammables + poussières => risque d'auto-combustion**

Par conséquent, à l'intérieur des serres de séchage, il est conseillé de travailler équipé d'un masque anti-poussière et d'installer des capteurs de gaz ou d'en avoir un portatif indiquant la

possibilité ou non de rentrer dans la serre et d'y travailler pour les serres fermées. Il est également nécessaire d'avoir un extincteur de capacité suffisante à proximité de la serre où il doit d'ailleurs être interdit de stocker des matières combustibles.

Dans la plupart des serres, il est prévu un arrêt automatique du retourneur de boues ainsi que la mise en marche forcée des extracteurs dès l'ouverture des portes de la serre.

Afin d'éviter la création d'une quantité trop importante de poussières, il est conseillé de ne pas dépasser des siccités de 75 à 80%, d'autant plus que le gain de volume entre des boues à 80% et des boues à 90% est négligeable par rapport au passage de 20 à 80% de siccité déjà réalisé.