



HAL
open science

Le séchage solaire des boues : état actuel de l'art et retours d'expériences

C. Brison, Jean-Marc Perret, J.P. Canler

► To cite this version:

C. Brison, Jean-Marc Perret, J.P. Canler. Le séchage solaire des boues : état actuel de l'art et retours d'expériences. [Rapport Technique] irstea. 2010, pp.80. hal-02593906

HAL Id: hal-02593906

<https://hal.inrae.fr/hal-02593906v1>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le séchage solaire des boues : Etat actuel de l'art et retours d'expérience



C. Brison – J.M. Perret – J.P. Canler

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

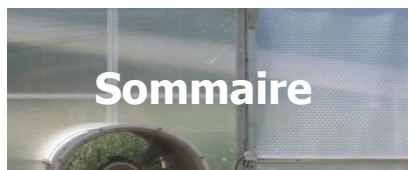
Tél. 04 72 20 87 87 - Fax 04 78 47 78 75

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 :

| Constructeurs | Personnes rencontrées |
|-----------------------------------|---|
| 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



| | |
|--|-----------|
| Chapitre 1 - Préambule | 11 |
| 1. Intérêt du procédé..... | 11 |
| 2. Matériel et méthode..... | 13 |
| Chapitre 2 - Le séchage solaire proprement dit | 15 |
| 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 |
| Chapitre 3 - Etat du parc sur le plan national..... | 35 |
| 1. Implantation du séchage solaire en France..... | 35 |
| 2. Evolution du séchage solaire en France..... | 37 |
| 3. Créneau d'application du séchage solaire : | 39 |
| Chapitre 4 - Etat de l'art..... | 41 |
| 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 |
| Chapitre 5 - Approche économique..... | 50 |
| 1. Coût d'investissement..... | 51 |
| 2. Coût d'exploitation et de fonctionnement..... | 52 |
| a - Coûts d'exploitation. | 52 |
| b – Coûts de fonctionnement | 53 |
| Chapitre 6 - Les retours d'expérience : résultats de l'enquête | 57 |
| 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 |
| Conclusion | 67 |
| Bibliographie..... | 70 |
| Annexe : Liste de références..... | 73 |



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.

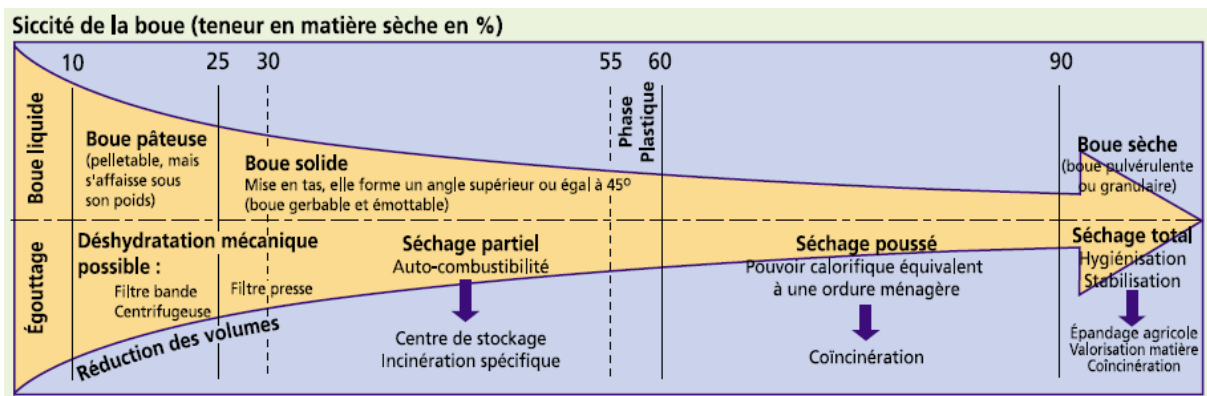


Schéma 1 : Evolution des caractéristiques des boues en fonction de leur siccité

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)).

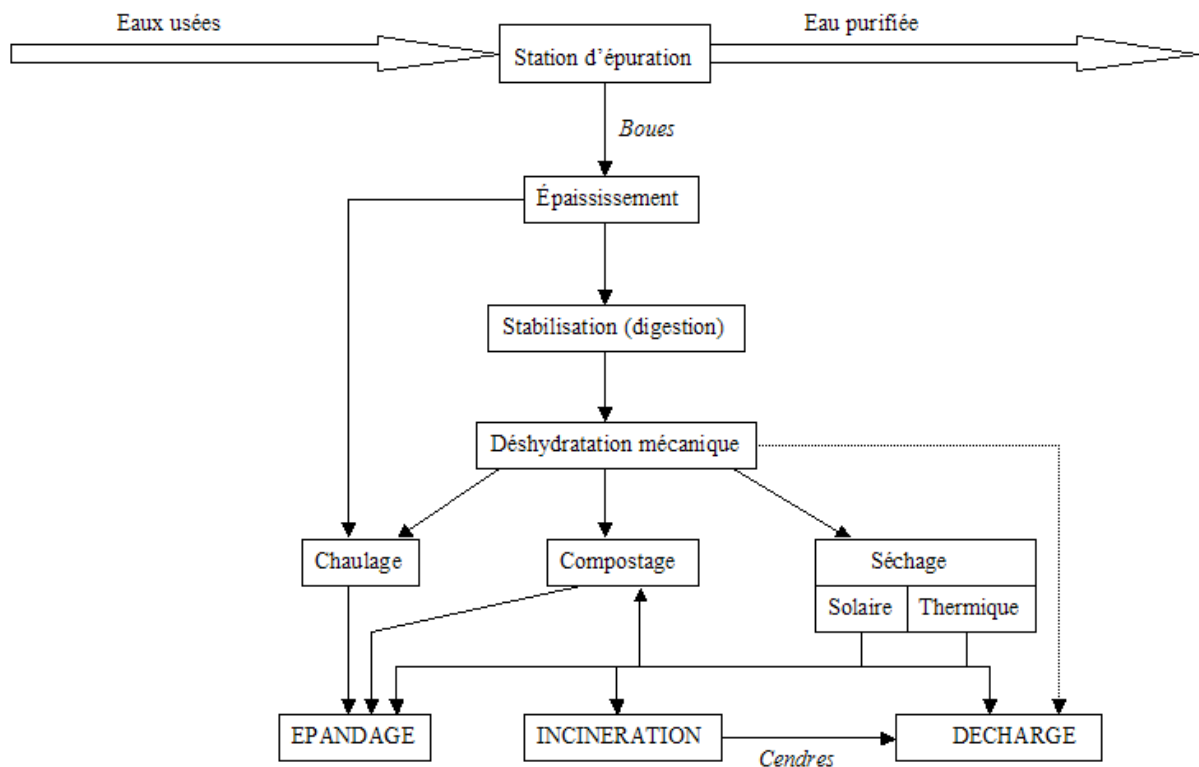


Schéma 2 : Les différentes filières possibles de traitement des boues urbaines

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 attrayant 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 CO₂. 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, Degrémont-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).

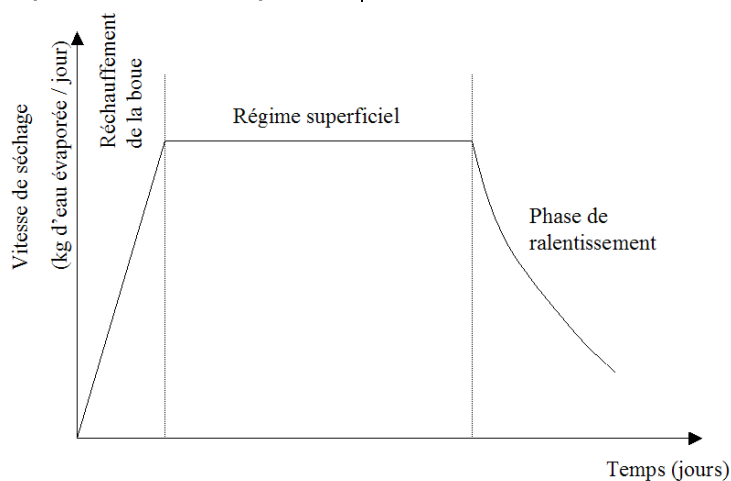


Schéma 3 : Evolution des cinétiques de séchage

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 ralentit.

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].

| 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.

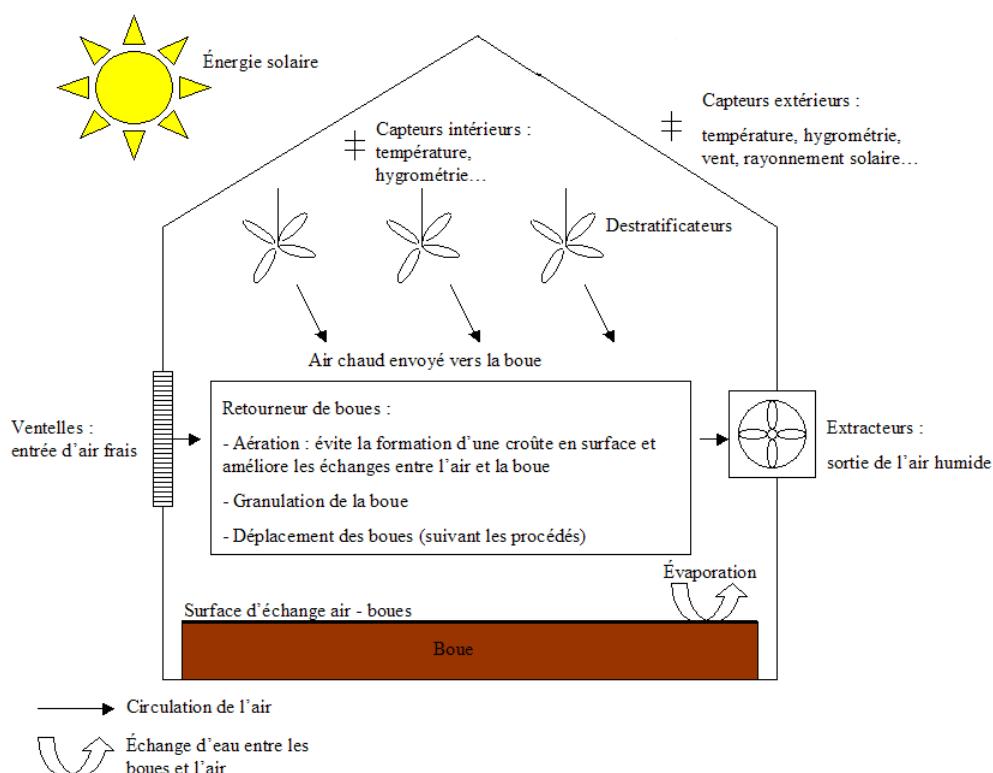


Schéma 4 : schéma du fonctionnement général d'une serre

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

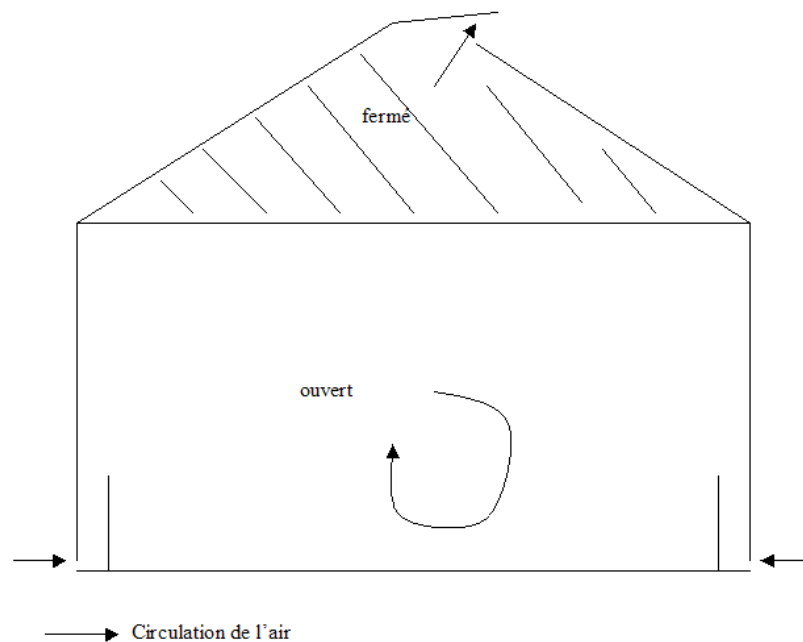


Schéma 5 : schéma de circulation de l'air dans une serre ouverte

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_3) et le sulfure d'hydrogène (H_2S) 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

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

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.

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).

| | Siccité de la boue | Tonne d'eau dans la boue | Tonnage de boue brute |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 Tonne de matière sèche (MS) | 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.

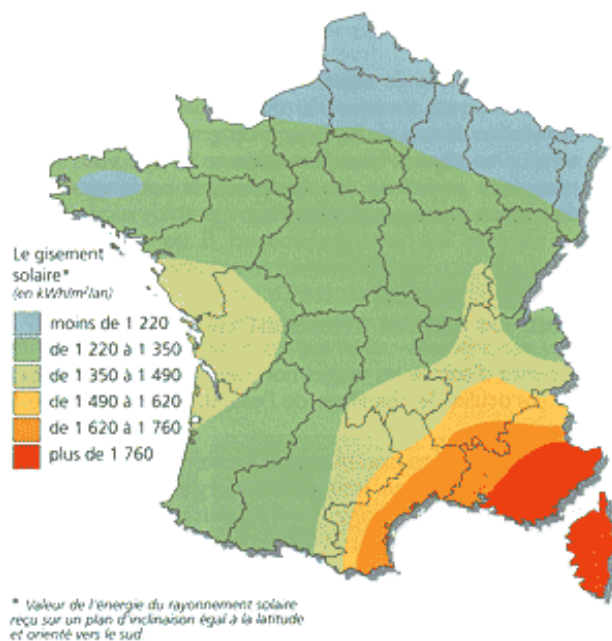
b. DIMENSIONNEMENT

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/m²/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/m²/an soit un potentiel de 2,74 kg d'eau évaporée par m² 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/m²/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⁻¹, 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).

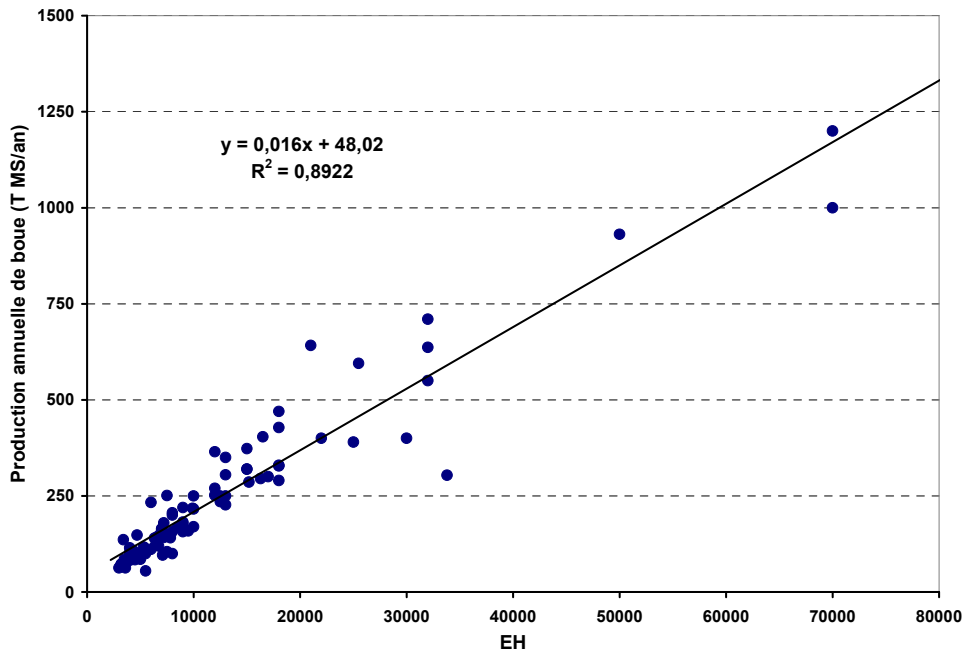


Figure 2 : Production de boues d'un Equivalent habitant en dimensionnement

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 DBO₅ 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 ² .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 m² pour du séchage solaire naturel et de 365 m² 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 :

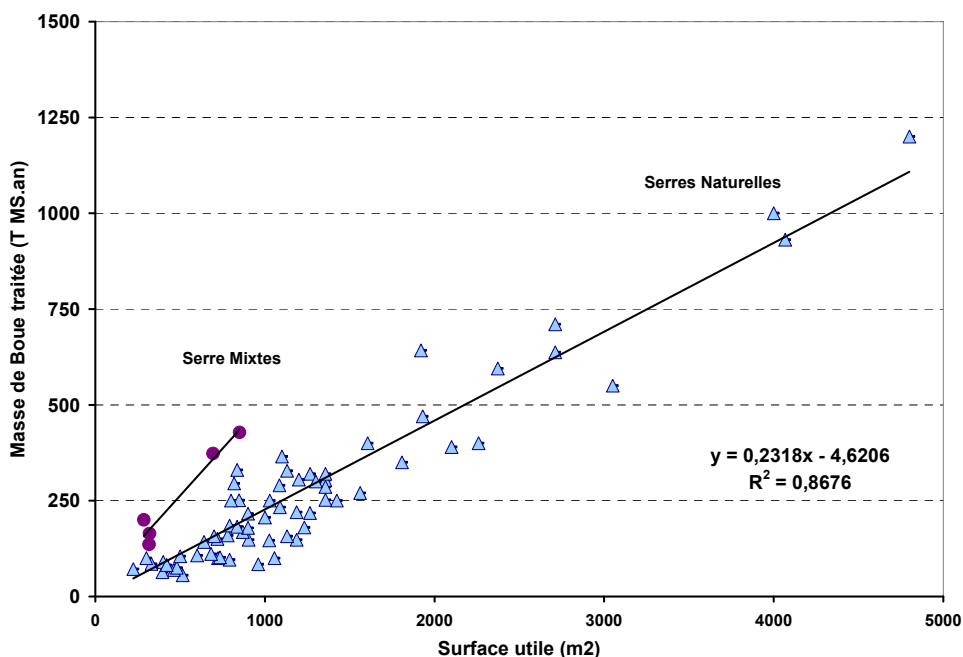


Figure 3 : Quantité annuelle de boues traitées en TMS par m² de surface utile en dimensionnement

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 m² de surface utile de serre et par an avec une différence selon le type de séchage retenue :

Séchage solaire naturel : 240 kg de MS/ m² et par an

Séchage solaire associé à un plancher chauffant : 490 kg de MS/ m² et par an.

3- Estimation de la hauteur de boue pour un séchage solaire naturel de 825 m²

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/m³ et une surface de serre de 825 m².

| | 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/m².an pour une serre naturelle sans chauffage complémentaire et entre 1,7 et 2 TEE/m².an pour une serre équipée d'un plancher chauffant.

Le potentiel évaporatoire (en TEE/m².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.

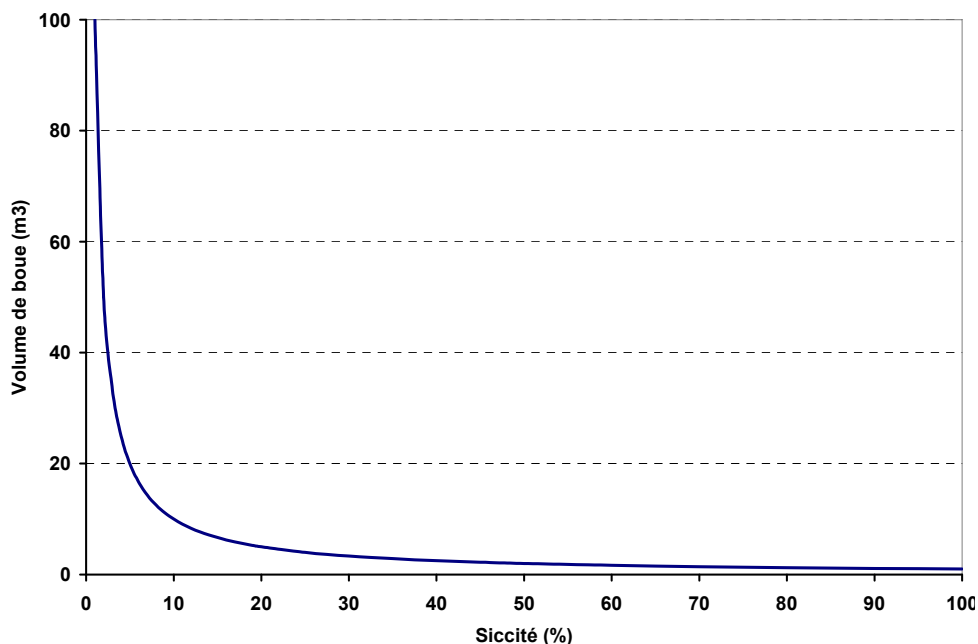


Figure 4 : Volume occupé par une tonne de matière sèche selon sa siccité et pour une densité apparente constante

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 :



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 (H₂S, 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'H₂S 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'O₂.
- **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'H₂S) 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 concernant 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.

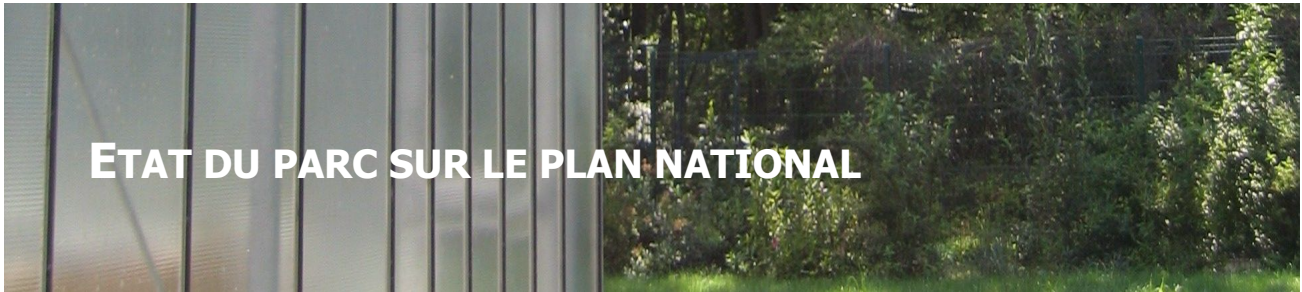
Gaz inflammables + poussières => risque d'auto-combustion

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.



1. IMPLANTATION DU SECHAGE SOLAIRE EN FRANCE.

Suite à notre recensement sur le plan national, six constructeurs commercialisent la technologie du séchage solaire des boues. L'implantation des différentes installations existantes est la suivante :

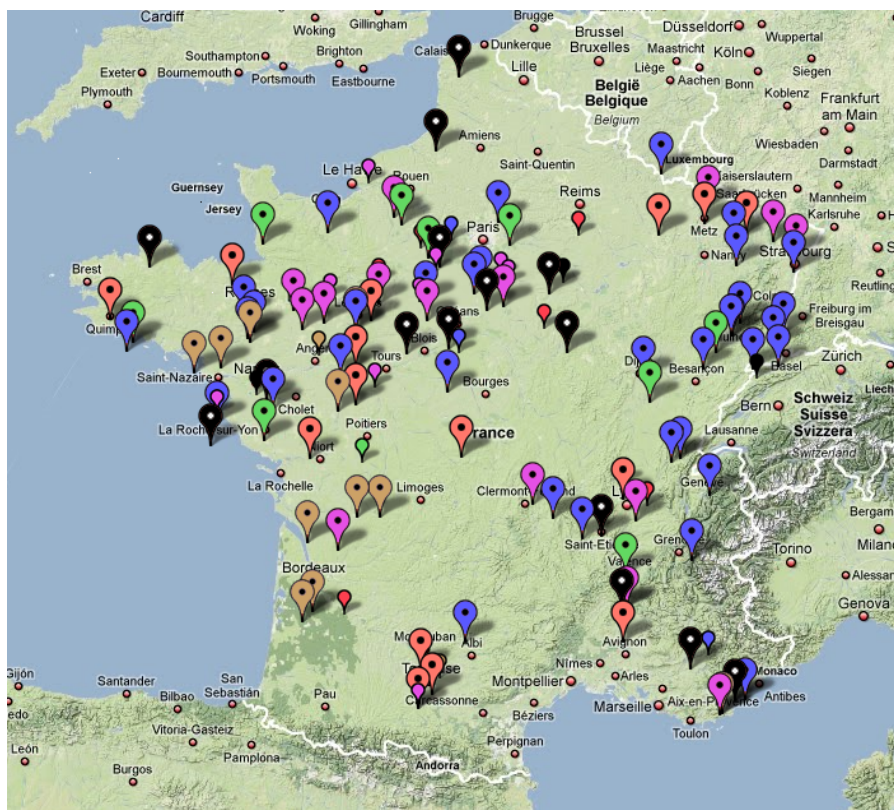


Figure 5 : Implantation du séchage solaire en France

La carte ci-dessus indique la répartition géographique des serres de séchage solaire, en fonctionnement et en construction, en France Métropolitaine en juin 2009.

94 serres sont actuellement exploitées en France auxquelles il faut ajouter 33 serres qui vont bientôt être mises en route ou qui sont en cours d'étude ou en construction. De plus, 2 serres se trouvent à La Réunion (Veolia et Saur) et une à la Martinique (Vinci - Sogea).

Au total, 130 serres étaient réparties sur le territoire Français en juin 2009.

Malgré un climat plus favorable dans le sud de la France, on observe une densité d'installations moins élevée qu'au nord. Rappelons que le dimensionnement d'une serre tient compte du taux d'évaporation du site. Ainsi, correctement dimensionné, le procédé de séchage solaire peut

fonctionner également dans le nord de la France mais avec une emprise au sol plus importante pour un même flux de boue comparé à une installation située dans la partie sud de la France.

On note un attrait du séchage solaire par certaines régions géographiques : Ouest, Est et Sud-Est.

Mis à part Vinci - Sogea, implanté principalement à l'ouest de la France, les autres constructeurs sont présents sur l'ensemble du territoire.

Le marché du séchage solaire est partagé sur le plan national par 6 constructeurs dont le nombre d'équivalents habitants cumulés par constructeur et équipés de cette technologie est le suivant :

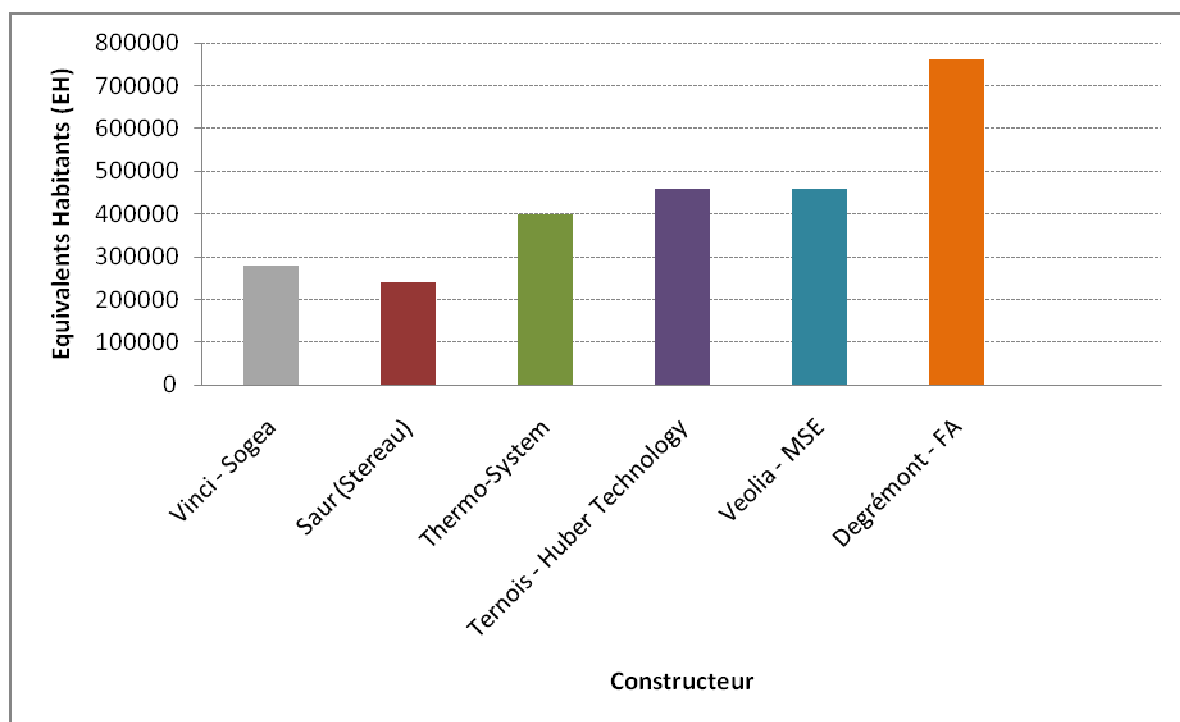


Figure 6 : Total d'équivalents habitant (EH nominal) traités par constructeur

Le tableau suivant renseigne le nombre d'installations pour chaque constructeur ainsi que la date de la première serre en service.

| Constructeur | Vinci - Sogea | Saur (Stereau) | Thermo-System | Ternois - Huber Technology | Veolia - MSE | Degrémont - FA | |
|----------------------------------|---------------|----------------|---------------|----------------------------|--------------|----------------|-------------|
| Date de première mise en service | 2005 | 2005 | 2002 | 2007 | 2004 | 2003 | |
| Nombre de stations | 14 | 12 | 20 | 23 | 23 | 38 | Total : 130 |

Tableau 9 : Date de première mise en service et nombre de stations pour chaque constructeur

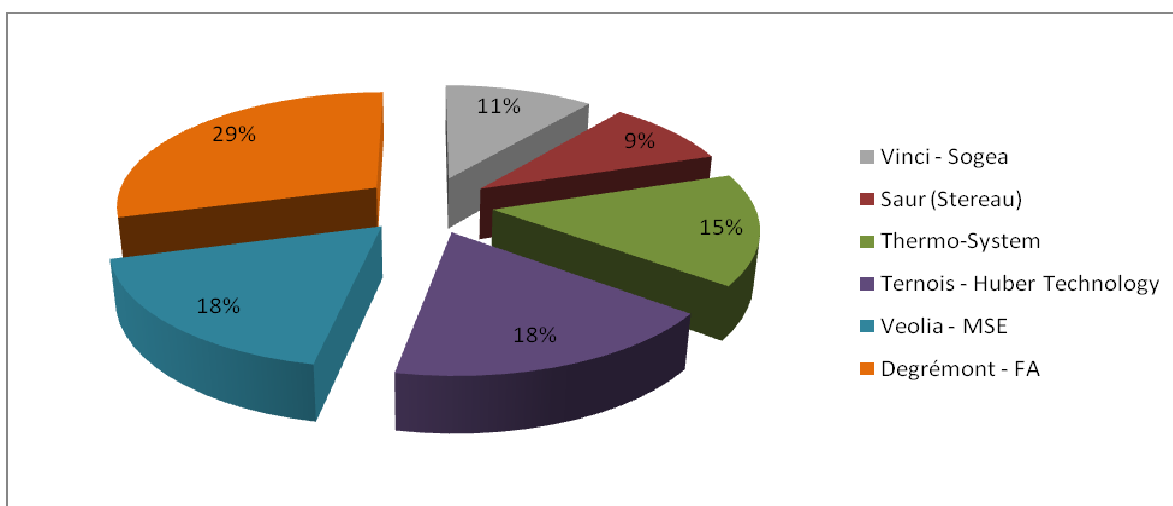


Figure 7 : Répartition du nombre de stations entre chaque constructeur (en %)

Mi-2009, Degrémont – France Assainissement était l'entreprise qui avait le plus de sites équipés (38) et qui traitait le plus d'équivalents habitants en nominal (724 100 EH) soit une moyenne de 19 000 EH/site. Ce constructeur et Thermo-System sont les deux qui ont démarré la commercialisation de cette technologie sur le plan national. Vinci - Sogea et Saur sont deux

constructeurs qui installent des serres depuis peu, 2005, et n'ont donc encore qu'une dizaine d'installations chacun. Ternois – Huber Technology est le dernier constructeur arrivé sur le marché mais il s'est implanté rapidement (plus d'une vingtaine d'installations) en raison de la technologie proposée spécifique qui combine séchage solaire et plancher chauffant.

2. EVOLUTION DU SECHAGE SOLAIRE EN FRANCE

Actuellement, tous les constructeurs sont présents sur le marché mais le séchage solaire est encore un procédé en développement et des améliorations sont toujours apportées.

L'évolution du nombre de serres au cours du temps est relativement constante comme le montre le graphique suivant :

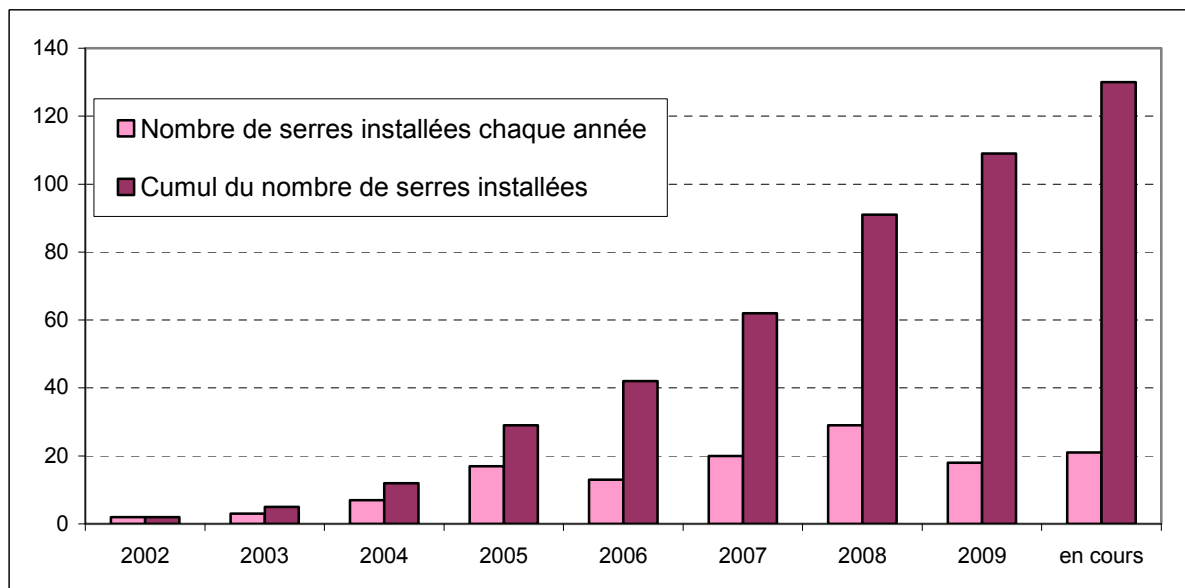


Figure 8 : Evolution du nombre de serres installées tous constructeurs confondus

On observe que, depuis 2005, un certain équilibre s'est établi avec une vingtaine de serres installées chaque année. A la mi 2009, cela correspondait à 94 serres en service pour un total de 130 serres vendues.

Cette commercialisation au cours du temps est répartie entre les constructeurs de la façon suivante :

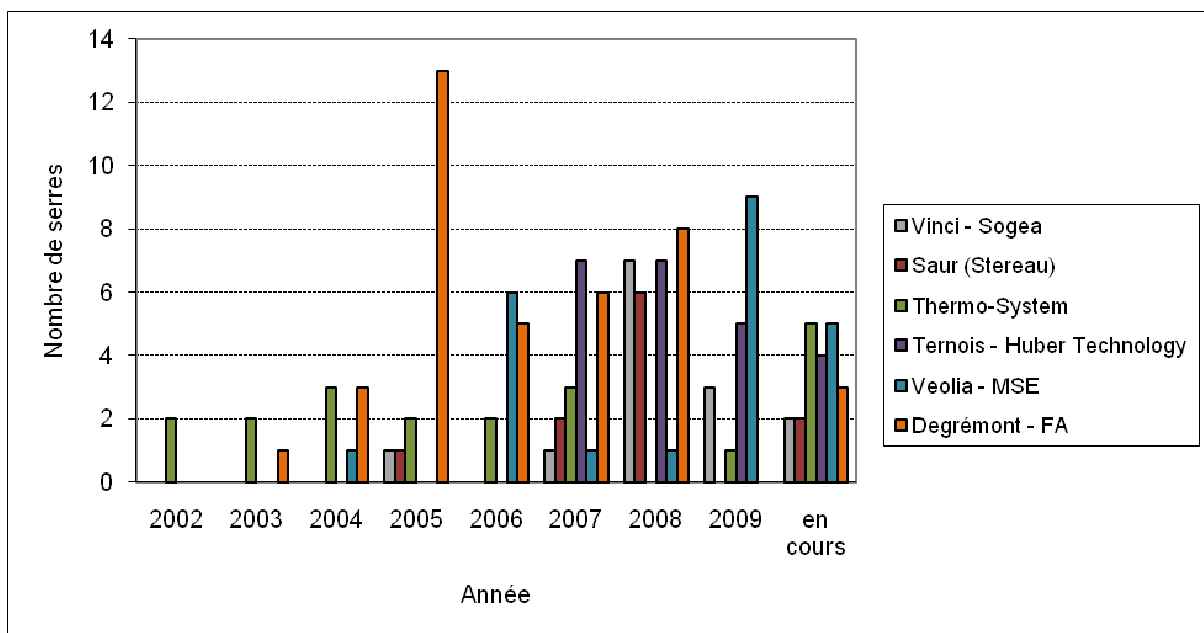


Figure 9 : Nombre de serres installées par an et par constructeur

La première serre a été installée par Thermo-System en 2002. Il s'agit donc d'un procédé relativement récent. En 2003, Degrémont - France assainissement équipe également son

premier site. Cette entreprise connaît un pic en 2005 avec l'installation de 13 serres, maximum pour un constructeur sur une année. Puis, les autres constructeurs ont fait leur entrée sur le

marché avec Ternois - Huber Technology qui a été le dernier constructeur à s'implanter avec cette technologie (à partir de 2007) avec une commercialisation très rapide (19 serres installées en 2009).

L'entreprise allemande Thermo-System est la seule des 6 sociétés à être spécialisée uniquement dans le séchage solaire. Il s'agit de la première entreprise mondiale en nombre de références dans le domaine du séchage solaire.

3. CRENEAU D'APPLICATION DU SECHAGE SOLAIRE :

1. Taille des stations concernées

Le procédé séchage solaire est présenté comme adapté aux stations de taille comprises entre 2 000 et 50 000 EH. Les figures ci-dessous indiquent que 6 % des installations sont de taille supérieure à 50 000 EH, c'est-à-dire 8 serres sur 130 au total, alors que pour de telles installations,

le séchage thermique peut être également intéressant. Le créneau d'application majeur se situe entre 2 000 et 10 000 EH puisque 55 % des installations, soit 72 serres, ont une taille inférieure à 10 000 EH.

| de 2 000 à 5 000 EH | de 5 à 10 000 EH | de 10 à 20 000 EH | de 20 à 50 000 EH | > 50 000 EH | |
|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| 27 | 44 | 35 | 16 | 8 | TOTAL : 130 |

Tableau 10 : Nombre de serre par taille de station

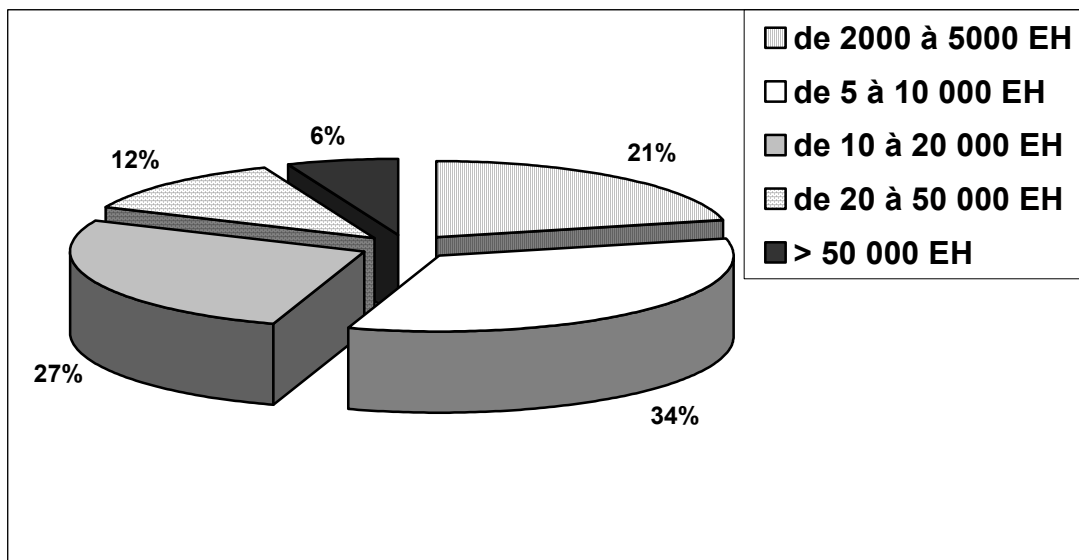


Figure 10 : Pourcentage de serres par taille de station

2. Filières concernées

Le séchage solaire peut traiter des boues issues de différentes filières de traitement des eaux mais la majorité des filières équipées de serres sont des installations de type boue activée fonctionnant dans le domaine de charge de l'aération prolongée.

A partir des discussions avec l'ensemble de la profession, il conviendra d'être très vigilant lorsque les boues à traiter ont les caractéristiques ou origines suivantes :

Boues très riches en matière organique (Taux de MVS élevé) : effluents industriels, domaine de

charge de la boue activée plus élevé ce qui leur donne un caractère très fermentescible,

Lorsqu'une partie des boues provient d'apports extérieurs au site dont la qualité est difficilement maîtrisable,

Eviter les filières de traitement où des risques d'anaérobiose sur la file boue à l'amont des serres peuvent être possibles (ouvrage de stockage à temps de séjour élevé),

Et la proximité ou non des habitations par rapport aux risques d'odeurs.



1. DES SYSTEMES DIFFERENTS DISPONIBLES SUR LE PLAN NATIONAL

a. PRESENTATION GENERALE

Parmi les différents systèmes disponibles, on note trois grandes particularités :

- les systèmes équipés d'un chauffage complémentaire: Système Helioplus® de la Saur, système Ternois 3S de Ternois - Huber et éventuellement le système de Thermo-System.
- les serres ouvertes (qui représentent 11% des serres construites) ou fermées, fonction des choix retenus par le constructeur : uniquement pour le système Héliantis de Degrémont.

- et le mode de déplacement de la boue dans la serre : les boues sont transportées au fur et à mesure du séchage (serres couloirs) ou les boues sont systématiquement mélangées avec les boues sèches ou en cours de séchage.

Cas des serres dites couloirs : Quatre procédés présentés ci-dessous fonctionnent sur ce principe. Les boues épaissies et déshydratées sont introduites à une extrémité de la serre et le pont retourneur les déplace lentement à chacun de ses passages. Ainsi, un gradient de siccité est observé le long de la serre et à l'autre extrémité se trouvent les boues séchées. Les boues fraîches sont par conséquent très peu mélangées à des boues plus sèches.

- Héliantis proposé par Degrémont - France Assainissement :



- Heliocycle® et Helioplus® proposés par Saur (Stereau)



- Ternois 3S (Système de Séchage Solaire) proposé par Ternois - Huber Technology



42

- Manager de boue® proposés par Thermo-System



Cas des serres à mélange de boue : Trois autres procédés fonctionnent sur ce principe : Ils ne déplacent pas les boues d'une extrémité à l'autre de la serre mais ont la particularité de mélanger les boues fraîches aux boues en cours de séchage.

- Sogelios proposé par Vinci - Sogea



- Sanglier électrique® proposé par Thermo-System



- Solia proposé par Veolia – MSE



B. PRESENTATION DES SPECIFICITES DE CHAQUE PROCEDE

| Nom du procédé | Serre couloir | Stockage annuel des boues | Chauffage d'appoint | | Désodorisation | | Spécificités |
|----------------------|---------------|--|---------------------|---------------------|---|---------------------------------------|--|
| | | | Plancher | Air Ventilé | Option | Obligatoire | |
| Heliantis | X | X (si évacuation discontinue) | (possible) | (possible) | X (si habitations trop proches (200 à 300 m)) | | - Serre ouverte ou serre fermée (voir II. 2.) - Evacuation continue (boues extraites tout au long de l'année) ou évacuation discontinue (boues extraites uniquement à certaines périodes de l'année, actuellement majoritaires sur le marché) - Fonctionnement toute l'année ou en période favorable uniquement avec une autre solution pour les boues lors du by-pass de la serre |
| Heliocycle® | X | X | | | X (biologique, physico-chimique ou par éolage si habitations trop proches) | | |
| Helioplus® | | Prévu par un ouvrage spécifique à l'extérieur | X (systématique) | X (systématique) | | X (physico-chimique) | |
| Sanglier électrique® | | X | X (possible) | X (possible) | X (Fréquent pour seulement 1/3 du débit d'extraction) | | - Séchage de boues liquides à 2 % de siccité (uniquement en Allemagne pour le moment) |
| Manager de boue® | X | X | X (possible) | X (possible) | X (Fréquent pour seulement 1/3 du débit d'extraction) | | - Alimentation et extraction du même coté ou à l'opposé |
| Sogelios | | X | | | X (biologique si habitations à proximité immédiate 100 m) | | - Insufflation d'air en pied du lit de boues |
| Solia | | X | | | | X (biologique ou physico-chimique) | - Fonctionnement en andains - Le bio-séchage (oxydation aérobie de la matière organique) est recherché |
| Ternois 3S | X | X (présence d'une fosse de stockage en bout de serre) | X (systématique) | | X (biologique, à la demande du client) | | |

Le séchage solaire des boues :

Etat actuel de l'art et retours d'expérience

Remarque :

Le Manager de boue[®] de Thermo-System et le système Helioplus[®] de Saur sont deux procédés récents qui sont encore à leur début de commercialisation en France. C'est pour cela que nous ne les mentionnerons pas dans les prochains tableaux comparatifs. Ils sont décrits de manière succincte ci-dessous.

➤ *Manager de boue[®]*

Le Manager de boue[®], complètement automatisé, fonctionne différemment du Sanglier électrique[®] par le fait que celui-ci peut transporter les boues d'un point à un autre de la serre. Il n'y a donc qu'un seul point d'alimentation, automatique ou non. Il s'agit d'un pont sur lequel se déplace le retourneur transversalement. Cette conception permet d'éviter de laisser une couche de boue de quelques centimètres au niveau du radier, couche dans laquelle les boues peuvent entrer en anaérobiose et dégager des odeurs. En effet, le Manager de boue[®] effectue une carte de la serre afin de compenser les inégalités au sol et ne laisser que le minimum de boue au niveau du radier. Cette carte peut être refaite régulièrement.

Deux stations Autrichiennes sont équipées de ce procédé. En France, la station de Le Pouzin (07, 13 000 EH) est en construction et va être équipée de ce système de retournement des boues.

➤ *Helioplus[®]*

Le procédé Helioplus[®] associe la chaleur solaire d'une serre et des pompes à chaleur alimentées par récupération d'énergie. A l'intérieur de la serre, les boues sont maintenues à 30 C environ au moyen de la chaleur solaire, de la dalle chauffante et de l'air ventilé préchauffé. Les pompes à chaleur s'adaptent automatiquement à l'apport solaire. Ce complément énergétique garantit des performances de séchage constantes sur l'année.

Avec ce procédé, une désodorisation physico-chimique classique, avec une tour basique et une tour acide, est systématiquement proposée.

Les pompes à chaleur récupèrent les calories de l'eau en sortie de station pour la dalle chauffante et de l'air désodorisé pour l'air ventilé.

Deux stations sont équipées de ce procédé : site pilote de Carnac (56) et Genlis (21).

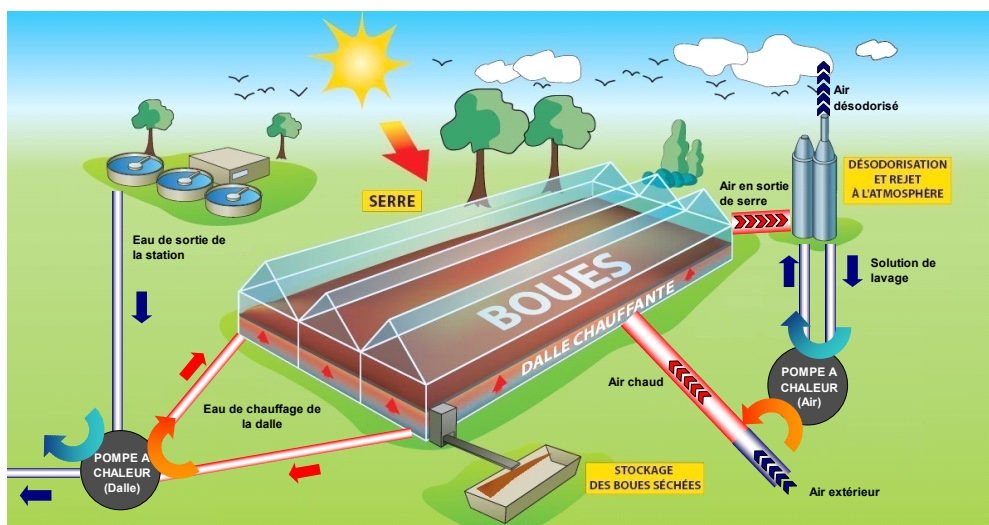


Figure 11 : Fonctionnement de la serre Helioplus[®]

2. FONCTIONNEMENT DES DIFFERENTS SYSTEMES

A. ALIMENTATION DE LA SERRE EN BOUES

La boue provenant de l'atelier de déshydratation de la station d'épuration doit être amenée jusqu'à la serre. La distance doit être la plus courte possible afin d'éviter le stockage des boues lors de leur transfert,

tout bouchage ou excès de polymères très souvent injectés pour faciliter le transport dans la conduite. Pour cela, les constructeurs utilisent différents systèmes dont les particularités sont détaillées ci-dessous

| Procédé | Alimentation automatique des boues | | Mélange de boues fraîches et en cours de séchage | Modification régulière du point d'alimentation | Particularités de l'alimentation |
|----------------------|------------------------------------|---|--|--|--|
| | Par pompe gaveuse | Par vis convoyeuse + vis de répartition | | | |
| Heliantis | | X | possible | | <ul style="list-style-type: none"> - La vis de répartition, située en hauteur, comporte plusieurs trappes (3 à 4). - La pompe gaveuse est proscrite en raison de la déstructuration de la boue liée aux pressions appliquées - Etalement homogène des boues sur la largeur recherché. - Alimentation manuelle possible : point de décharge extérieur à la serre avec reprise au godet afin de faire des tas sur toute la largeur de la serre |
| Heliocycle® | X | | | X | <ul style="list-style-type: none"> - Soit en hauteur par le biais d'un bras à déplacement manuel, soit par des trappes situées dans le sol et réparties sur la largeur de la serre. |
| Sanglier électrique® | X | | X | X | <ul style="list-style-type: none"> -- Généralement 3 trappes d'alimentation situées dans le sol et réparties au centre sur la longueur de la serre. |
| Manager de boue® | X | ou X | possible | | <ul style="list-style-type: none"> - Un point d'alimentation – déplacement de la boue possible latéralement et sur la longueur |
| Sogelios | X | | X | X | <ul style="list-style-type: none"> - 3 à 6 vannes d'alimentations réparties régulièrement d'un côté sur la longueur de la serre. - Le tas de boues fraîches formé à la sortie de la conduite est étalé au fur et à mesure du passage du retourneur. |
| Solia | X | | X | | <ul style="list-style-type: none"> - Répartition uniforme de boues fraîches à l'aide d'une trémie embarquée sur le retourneur. - Les boues sont disposées en andains - Choix des andains alimentés, tracabilité possible - 2 autres types d'alimentation, également automatiques, existent : convoyeur à bandes et vis sans fin |
| Ternois 3S | | X | | | <ul style="list-style-type: none"> - Boues déversées sur toute la largeur de la serre - Une épaisseur de boue constante et homogène de 15 cm maximale est déposée. |

B. CARACTERISTIQUES ET FONCTIONNEMENT DES RETOURNEURS

Malgré leurs conceptions différentes, tous les systèmes de retournement ont le même objectif : favoriser le séchage des boues et ce dans les meilleures conditions possibles.

Pour cela, les systèmes de retournement :

- étalent les boues fraîches
 - homogénéisent la température du lit de boues qui a tendance à être plus élevée en surface
 - empêchent la formation d'une croûte à la surface du lit de boues qui limiterait les échanges et donc le séchage
- retournent les boues pour renouveler les surfaces d'échanges entre l'air et la boue
 - aèrent la boue afin de maintenir le lit en condition aérobie et d'éviter les départs en fermentation
 - permettent de donner à la boue une structure granulée au cours du séchage
 - déplacent les boues pour les trois procédés munis de pont mobile se déplaçant à vitesse constante
 - mélangent les boues fraîches aux boues en cours de séchage pour les 3 autres procédés

| Procédé | Principe du système de retournement des boues | Système de retournement | | Pont mobile se déplaçant à vitesse constante sur la longueur de la serre | Caractéristiques |
|----------------------|---|-------------------------|---------|--|--|
| | | Pont r | Robot r | | |
| Heliantis | Pont scarificateur | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> - Des couteaux découpent les tranches de boue et interviennent surtout lors de la phase pâteuse. - Des peignes gratteurs déplacent et font granuler la boue. - vitesse de déplacement du pont programmable et réglée en fonction de la résistance appliquée par le lit de boue |
| Heliocycle® | Retourneur hélicoïdal | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> - Doubles spires inversées qui produisent de fines tranches de toute la hauteur du lit de boue. |
| Sanglier électrique® | Robot retourneur | | X | | <ul style="list-style-type: none"> - Robot à 4 roues dont les axes sont munis de pâles en rotation - Déplacement aléatoire recouvrant l'ensemble de la serre |
| Manager de boue® | Retourneur de boues | X | | | <ul style="list-style-type: none"> - Retourneur mobile sur pont |
| Sogelios | Retourneur de boues | X | | | <ul style="list-style-type: none"> - Pont roulant se déplaçant par "à-coups" sur la longueur de la serre et sur lequel un chariot, muni de deux fraises verticales, se déplace sur toute la largeur de la serre - Insufflation d'air en pied du lit de boues grâce à des buses d'injection à l'extrémité des fraises |
| Solia | Retourneur filoguidé Soliamix® | | X | | <ul style="list-style-type: none"> - Guidage automatique par filoguidage - Capteurs à ultra sons embarqués anti-collision - Fonction d'alimentation en boues (trémie embarquée de 1 m³) et de retournement des andains |
| Ternois 3S | Pont de retournement et de transport | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> - Rotation d'augets décalés afin de limiter les efforts sur le pont le plus large (un seul auget sur les 2 autres ponts plus petits) - Abaissement d'un bouclier durant les phases de répartition et de déchargement des boues |

C. RECOMMANDATIONS DES CONSTRUCTEURS

Le dimensionnement de chaque constructeur prend en compte des conditions de fonctionnement bien précises. Par exemple, les serres « couloirs » nécessitent un nombre de retournement quotidien minimum afin de laisser de la place libre pour l'arrivée régulière des boues fraîches. Pour le procédé Solia, le nombre de retournement et l'épaisseur de boues

n'est pas déterminé de la même façon puisque dans ce cas, le bio-séchage est recherché.

Le tableau ci-dessous recense donc les différentes recommandations de fonctionnement des constructeurs, recommandations provenant du dimensionnement mais aussi des premiers retours d'expériences.

| Procédé | Epaisseur du lit de boues | Nombre de retournements journaliers préconisé |
|----------------------|--|---|
| Heliantis | - la plus faible possible - 20 à 25 cm au maximum en dimensionnement - 55 cm maximum retournable | - 12 (6 à 16): compromis entre la vitesse d'avancement du lit de boue et la durée moyenne de séchage - Le nombre de retournements optimum par jour dépend des conditions météo, de la qualité de la boue, de l'épaisseur du lit de boue, de la place à libérer en entrée de serre et de la vitesse de séchage des boues. |
| Heliocycle® | 40 à 50 cm | - un retournement par jour au minimum - en général : un en hiver et 2 l'été |
| Sanglier électrique® | 25 cm maximum | - un retournement par jour au minimum - 8 à 10 retournements maximum par jour |
| Manager de boue® | 35 cm maximum | - un retournement par jour au minimum - 8 à 10 retournements maximum par jour |
| Sogelios | 40 à 45 cm avec un maximum de 60 cm | - 2 retournements par jour |
| Solia | - Andain de 1 m* au maximum (imposé par la géométrie du robot) | - au moins un aller-retour par jour sur chaque andain - en été, le nombre de retournements est plus important |
| Ternois 3S | - idéalement 10 à 15 cm - 20 cm au maximum | - entre 12 et 16 retournements par jour |

* : Cette hauteur de boues favorise l'élévation de température (activité biologique augmentée) et peut contribuer en partie à l'hygiénisation du produit et fournit un apport d'énergie endogène supplémentaire.



Les chiffres annoncés dans cette partie doivent être pris comme des ordres de grandeur. En effet, les prix des stations d'épuration ramenés à l'équivalent habitant sont très variables d'un site à un autre car fonction de nombreux critères dont le type de filière, la taille de l'installation, le degré d'équipements, la nature du sol, les niveaux de traitement, la localisation de l'installation....

Les prix annoncés sont pour une installation traitant la production annuelle de boues par séchage solaire.

L'approche économique du choix du séchage solaire doit toujours intégrer les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation annuels sur plusieurs années.

1. COUT D'INVESTISSEMENT

Le coût d'investissement d'un séchage solaire, hors déshydratation amont, est en moyenne de l'ordre de 50 Euros HT / EH avec des variations importantes en fonction de la conception de la serre (ouverte / fermée, désodorisation, plancher chauffant). Sur une filière globale, il peut représenter 20% du coût total de la station.

Si l'on compare l'investissement du séchage solaire (référence 100) pour des tailles d'installations comprises dans la gamme de 3 000 à 15 000 EH avec d'autres filières de déshydratation des boues aux siccités finales très différentes, on note le positionnement du séchage solaire par rapport à d'autres procédés suivant :

| | Investissement | Siccité finale |
|--|----------------|----------------|
| Séchage solaire (serre fermée, sans désodorisation, sans plancher chauffant) | 100 | > 70% |
| Boues liquides (table d'égouttage + silo de stockage 1 an) | 85/90 | 7% |
| Lits de séchage plantés de roseaux (LSPR) avec géomembrane (base de 50 kg MS/m ² .an) | 80/85 | 20% |
| LSPR en béton | 100 | 20% |
| Centrifugeuse + chaux + stockage 1 an couvert | 100/105 | 30% |

(données Vinci)

Tableau 11 : Comparaison des investissements des différents systèmes de déshydratation par rapport au séchage solaire (base 100)

Il convient d'être prudent sur l'utilisation de ces valeurs, car le positionnement du séchage solaire est fonction de son degré d'équipement (serre ouverte, désodorisation, plancher chauffant...)

De plus, compte tenu des siccités finales différentes, un sur-investissement lié à du séchage solaire peut être retenu compte tenu d'un retour de cet investissement relativement rapide qui s'explique en particulier par les coûts d'évacuation de la boue hors du site.

Sur un scénario pour lequel la destination finale de la boue est l'épandage agricole estimé à un coût de 35 € par m³ (transport et épandage – valeur haute rencontrée dans certaines régions de France), la comparaison du séchage solaire par rapport à une filière boue chaulées permet de réduire de 75 % la facture transport et épandage

de boues séchées par rapport à la filière boues chaulées.

Ce pourcentage est plus faible (35 à 40%) si on intègre les consommations énergétiques (plus importantes dans le cas du séchage solaire) et les réactifs (plus élevés pour le chaulage).

Ce gain est accentué dès que le coût du débouché est plus élevé (ordre de grandeur moyen des coûts des différents débouchés avec transport et traitement ou évacuation : épandage agricole 35 €/m³ - compostage 75 €/m³ - incinération 150 €/m³).

Ainsi, le séchage solaire, dans son créneau d'application (taille < à 50 000 EH), est une réelle alternative au chaulage pour répondre à la siccité et à la stabilisation du produit.

2. COUT D'EXPLOITATION ET DE FONCTIONNEMENT

A - COÛTS D'EXPLOITATION.

Le procédé séchage solaire a très souvent été décrit comme une technologie rustique nécessitant un temps d'exploitation très limité, voir négligeable, à l'exception des apports de boue dans la serre (dans le cas où l'introduction

n'est pas automatisée) et de l'évacuation des boues séchées. Suite à cette étude, il convient de préciser que cette filière nécessite un suivi minimal représentant environ 1/2 journée par semaine. Ce temps est incompressible et

primordial car l'exploitation des serres demande un suivi régulier de l'exploitant par une visualisation journalière de la boue en cours de séchage afin de détecter le plus tôt possible une anomalie dans son évolution : début d'anaérobiose ou de compostage.

En dehors de cette visualisation régulière de l'état de la boue dans la serre, le temps moyen d'exploitation varie beaucoup en fonction du type de serre, de son degré d'équipement, de son taux de charge et de l'implication personnelle de l'exploitant. Ce temps passé correspond aux tâches courantes suivantes, l'alimentation manuelle au chargeur n'étant pas prise en compte :

B – COÛTS DE FONCTIONNEMENT

Les coûts de fonctionnement sont principalement liés à la consommation électrique des équipements. A partir d'une filière standard (serre fermée avec ventilation et sans désodorisation), les grandes différences en terme de consommations électrique vont s'expliquer par l'installation des équipements supplémentaires suivants : un plancher chauffant et une désodorisation (et de son type, biologique ou physico-chimique).

Pour la filière standard, les moteurs incontournables sont :

- Le retourneur de boues (avancée, rotation, mouvement du bouclier...)
- Les extracteurs d'air - la puissance installée des extracteurs varie de façon importante avec la présence d'une désodorisation (pertes de charge supplémentaires).
- Les déstratificateurs
- Les systèmes d'alimentation en boues.

- Surveillance du bon fonctionnement du retourneur
- Modifications des réglages de l'automate suite à la visualisation journalière de l'état de la boue,
- Maintenance des moteurs (graissage, changement des pièces d'usure,),
- Dépoussiérage relativement fréquent de certains équipements, en particulier les filtres des armoires électriques,
- - Et prélèvements de boues pour analyses (mesure de la siccité).

L'ensemble des constructeurs essaie de réduire la consommation énergétique du système par l'optimisation de son automatisation et asservissement.

A titre d'information, le tableau 12 suivant présente des ordres de grandeur des consommations électriques par tonne d'eau évaporée (kWh / T EE) en fonction du type de serre.

| Type de séchage | Type de serres | | kWh / T EE |
|-------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| Séchage solaire | Serre ouverte | Sans ventilation et sans désodorisation | 30 à 70 |
| | Serre fermée | avec ventilation et sans désodorisation | 70 à 100 |
| | | avec ventilation et désodorisation biologique | 100 à 200 |
| | | avec ventilation et désodorisation chimique | Jusqu'à 1000 |
| | Serre fermée avec plancher chauffant | avec ventilation et sans désodorisation | 150 à 250 |
| | | avec ventilation et désodorisation | 250 à 1100 |
| Séchage thermique | (combustible + électricité) | | 1000 [700 mini théo à 1200] |

Tableau 12 : Comparaison des consommations énergétiques des différentes serres avec le séchage thermique, en kWh nécessaire pour évaporer une tonne d'eau

La consommation d'énergie par tonne d'eau évaporée peut être jusqu'à 10 fois plus importante pour le séchage thermique que pour le séchage solaire. Lorsqu'il y a présence d'une désodorisation, cette consommation électrique peut facilement doubler voire beaucoup plus en fonction du système de désodorisation retenue car les extracteurs d'air sont nettement plus puissants du fait des pertes de charges et des nombreux équipements pour le système chimique.

Enfin, des variations importantes de temps de fonctionnement des moteurs sont observées sur

l'année en fonction de la période (été/hiver), du site, des données entrées dans l'automate, du procédé et du taux de charge de la serre.

Une étude sur un an d'une station d'épuration d'une capacité de 21 000 EH, équipée de 2 serres ouvertes (sans extracteur d'air) a montré que la consommation électrique du séchage solaire représente 5% de la consommation totale de la station.

Exemple d'une installation équipée d'une serre fermée :

A partir de notre exemple précédent : Une collectivité de 8 000 EH 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 sèches.

Calcul de la consommation électrique totale de la station :

Sur la base d'une consommation de 2,5 kWh /kg de DBO₅ éliminée, la consommation totale annuelle de l'installation est de 480 kg de DBO₅/j x 365 jours x 0,95 (Rendement en DBO₅ de la station) x 2,5 kWh soit 416 100 kWh/an

Calcul de la consommation liée au séchage solaire :

Sur cette installation, on note une production de boue de 62 g de MS /EH, soit une production spécifique des boues de 1,08 kg de MS / kg de DBO₅ éliminée.

Cette valeur est très élevée et peut s'expliquer par des apports de boues extérieures.

Le volume d'eau à évaporée est de 660 tonnes d'eau à évaporer sur l'année.

Sur la base d'une consommation de 85 kWh par tonne d'eau évaporée (cas d'une serre ouverte sans désodorisation), la consommation annuelle est de 56 100 kWh/an.

Dans cet exemple, le séchage solaire représente 13.5% de la consommation totale de la station. Dans le cas d'une production de boue plus représentative (45 g de MS/EH), le séchage solaire peut représenter 10 % de la consommation totale de la station.

Cas des installations équipées d'un plancher chauffant :

- Deux suivis hebdomadaires des consommations énergétiques par poste sur une année sur des stations équipées de serre avec plancher chauffant, réalisés par le bureau d'études Loreat et le SDEA, montrent :
- Sur un premier site, la consommation électrique mesurée était de 280 kWh /Tonne d'eau évaporée par an., pour une installation à 60% de sa charge nominale.
- Sur la seconde installation, fonctionnant à 40% de sa charge, l'évolution de la consommation électrique totale sur l'année est illustrée par la figure 12 suivante :

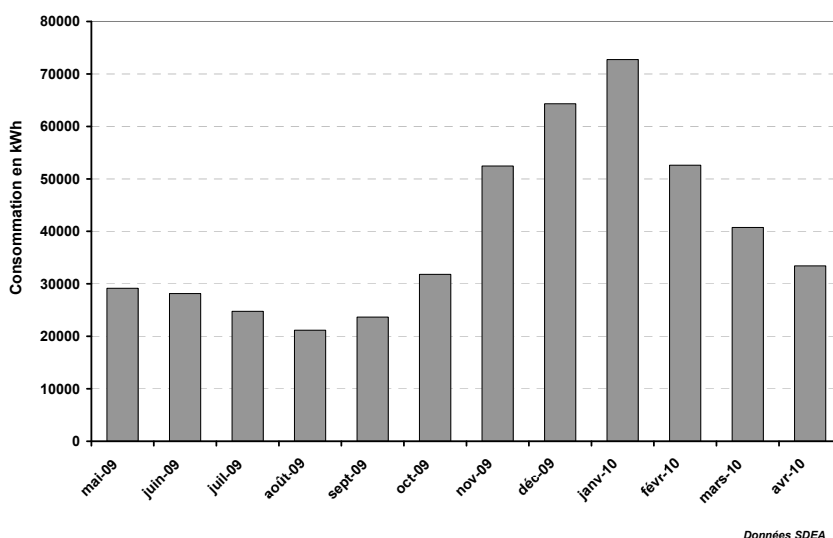


Figure 12 : Evolution de la consommation électrique annuelle

On observe que la consommation énergétique moyenne de l'installation hors période hivernale (pompes à chaleur à l'arrêt) est de l'ordre de 28000 kWh par mois (files eau et boue). En période de fonctionnement des pompes à chaleur (et circulateurs), cette consommation augmente et représente à l'échelle de l'année 35% de la consommation totale de la station.

En terme de coût, le fonctionnement des pompes à chaleur est plus important compte tenu du tarif du kWh plus élevé en période hivernale.

Il convient d'être prudent dans l'utilisation de ces données en raison d'installations généralement sous chargées, et pour certaines peu optimisées soit sur la filière boue soit sur l'ensemble de la station.

Enfin, les objectifs de séchage sont à optimiser au cas par cas ; Rechercher une siccité de 80% toute l'année n'est pas nécessairement le meilleur choix technico-économique.

LES RETOURS D'EXPERIENCE : RESULTATS DE L'ENQUETE

A partir d'un recensement auprès des constructeurs, le parc total de serres construites ou en projet était de 130 installations pour l'année 2009. Une enquête a été systématiquement envoyée à toutes les stations équipées d'un séchage solaire en fonctionnement, ce qui a permis d'enquêter 92 installations. Le taux de réponse global a été de 78 % (72 réponses), valeur très satisfaisante.

L'étude du retour d'expériences a nécessité une exploitation plus restreinte de l'enquête car seules les installations en fonctionnement avant 2008, au nombre de 62 serres, ont été retenues. Cette sélection sur l'ancienneté de la serre avait pour objectif de collecter un maximum d'information sur des installations pour lesquelles l'expérience acquise par l'exploitant était importante. Sur cet échantillon, le taux de réponse de 72%, (45 retours) a aussi été très satisfaisant.

| Nombre total de Serres référencées (y compris projets) | Inventaire du Parc | | Réponses au questionnaire (le 16/11/09) | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|---|--|
| | Serres en service au 1/01/2009 | Serres en service au 1/01/2008 | Nombre total de retours | Nombre de retours serres en service au 1/01/2008 |
| 130 | 92 Analyse du parc | 62 Retour d'expérience | 72 | 45 |

On observe que 38 installations sont en cours de construction ou en projet (29 % du parc) ce qui confirme bien l'expansion actuelle de cette filière.

1. REPRESENTATIVITE DE L'ECHANTILLON TRAITE

Par procédé :

Le dépouillement de l'enquête montre que tous les procédés sont bien représentés.

| Procédés | Héliantis | Heliocycle® Helioplus® | Ternois 3S | Sanglier électrique® | Solia | Sogelios | Total |
|---|----------------|---------------------------|---------------|-------------------------|---------------|--------------|-------|
| Nombre commercialisé | 38 | 12 | 23 | 20 | 23 | 14 | 130 |
| Nombre total de réponses : 72 avec la répartition suivante : | | | | | | | |
| | 28 | 6 | 12 | 12 | 10 | 4 | 72 |
| Nombre d'installation en service avant 2009 : 92 avec un nombre de réponse de 72 stations d'où un taux de participation de 78 % | | | | | | | |
| % de réponses par procédé sur des installations en service au 1/01/2009 : | | | | | | | |
| | 28/36 : 78% | 6/9 : 67% | 9/15 : 60% | 11/14 : 79% | 9/9 : 100% | 3/9 : 33% | 66/92 |
| Pour le retour d'expérience : | | | | | | | |
| Nombre d'installation en service avant 2008 : 62 avec un nombre de réponse de 45 stations d'où un taux de participation de 72 % | | | | | | | |
| % de réponses par procédé sur des installations en service avant 2008: | | | | | | | |
| | 23 | 3 | 3 | 8 | 8 | 0 | 45/62 |
| | 23/28 : 82% | 3/3 : 100% | 3/4 : 75% | 8/14 : 57% | 8/8 : 100% | | |

58

Ce tableau montre :

- un taux de réponse très élevé pour chaque constructeur à l'exception du procédé Sogélios (33 % de réponse et l'absence de retour d'expérience),
- une très bonne représentativité de l'ensemble du parc.

Il convient de signaler que le procédé Thermo-System, au nombre de 20 références avec son système « Sanglier électrique® », est le seul à être commercialisé par plusieurs constructeurs du traitement de l'eau alors que certains disposaient de leur propre technologie.

| Constructeurs commercialisant le procédé : Thermo-System | Veolia (MSE –Sade - OTV) | Vinci (GTM - SOGEA) | Nantaise des eaux | Thermo-System | Autres : AMECO, Soureil, Cegelec |
|--|-----------------------------|------------------------|-------------------|---------------|--|
| Nombre d'installations | 7 | 3 | 2 | 2 | 6 |

Statut de la personne enquêtée :

L'enquête a été envoyée aux exploitants des stations équipées d'un séchage solaire. Ces exploitants peuvent dépendre de différentes structures : d'une collectivité ou d'une société d'exploitation privée dépendante ou non du

constructeur de la serre. Lors du dépouillement, ce point a été pris en compte mais les réponses pour lesquelles la société d'exploitation et le constructeur de la serre étaient du même groupe représentent seulement 15% des retours.

| | Avis de la Collectivité | | Avis de la Société d'exploitation | |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | Exploitante (régie directe) | Non exploitante | liée au constructeur | non liée au constructeur |
| Nombre de réponses Total = 52 | 22 | 6 | 8 | 16 |
| % | 54 % | | 46 % | |

En dehors du statut de la personne enquêtée, il conviendra aussi d'être prudent sur une analyse un peu trop rapide des résultats de l'enquête car l'objectivité des réponses communiquées lors de cette enquête doit être relativisée en fonction du

taux de charge de l'installation, du temps passé (degré d'exploitation), de l'ensemble de la filière, du recul sur l'exploitation de l'installation, des conflits actuels (en cours d'expertise ou non)

2. INTERPRETATION DE L'ENQUETE

Type de boues traitées

Cette enquête s'est intéressée tout d'abord au type de boues traitées par l'installation. Le recensement a donné les valeurs suivantes :

| Type de boues | Nombre de réponses | Pourcentage |
|--|--------------------|-------------|
| Boues secondaires | 46 | 64% |
| Boues mixtes : primaires + secondaires voire tertiaires | 10 | 14% |
| Boues mixtes + apports extérieurs : Matières de Vidange, graisses, boues | 3 | 4% |
| Boues secondaires avec une déphosphatation biologique | 10 | 13% |
| Boues digérées | 1 | 2% |
| Divers (boues eaux potable , R3F) | 2 | 3% |
| Total : | 72 | |

Les stations d'épuration équipées d'une serre traitent majoritairement des boues issues de stations d'épuration de type boue activée fonctionnant dans le domaine de charge de l'aération prolongée. Ce qui sous entend des boues avec des taux de MVS faibles et le plus souvent d'un bon degré d'aération.

Dans cette exploitation, nous avons voulu distinguer les boues facilement fermentescibles, en particulier la présence ou non de boues primaires, mais aussi les installations qui collectent des boues extérieures dont la qualité peut être préjudiciable au bon fonctionnement de la serre.

Système de déshydratation amont

Les systèmes de déshydratation installés à l'amont des serres sont différents suivant les sites, pour aboutir à une très large gamme de siccité finale.

Sur 72 installations enquêtées, on note :

| Type de déshydratation | Nombre de sites (%) | Constructeurs concernés | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---------|---------|---------------|--------|-------|
| | | FA | Stereau | Ternois | Thermo-System | Veolia | Vinci |
| Filtre bandes | 18 (25 %) | 8 | | 2 | 6 | 2 | |
| Filtre presse (ou à plateaux) | 9 (12.5 %) | 7 | | | 1 | 1 | |
| Centrifugeuse | 45 (62.5 %) | 13 | 6 | 10 | 5 | 7 | 4 |

On n'observe pas de politique très arrêtée sur le choix d'une technologie à l'amont du séchage solaire:

- la centrifugation est retenue par l'ensemble des constructeurs et se retrouve majoritairement dans les filières boues,

- le procédé filtre à plateaux est essentiellement retrouvé pour le constructeur FA - Degrémont qui le privilégie.

60

Gamme de siccité en entrée et sortie de la serre

La siccité à l'entrée des serres a été souvent présentée comme un paramètre important pour faciliter l'exploitation de la serre et surtout éviter

un départ en anaérobiose en début de séchage ou le passage de la boue dans une phase collante.

| Taux de siccité à l'entrée | < 15% | De 15 à < 18% | De 18 à < 20% | De 20 à < 22% | De 22 à 25% | ≥ 25 % |
|----------------------------|-------|---------------|---------------|---------------|-------------|--------|
| Nombre de réponses | 0 | 12 | 10 | 33 | 7 | 8 |
| % d'installations | | 17 % | 14 % | 47 % | 10 % | 11 % |

On note une large gamme de siccités variant de 15% à plus de 25%. Mais la gamme la plus fréquente se trouve dans la plage 20 à 22% qui correspond logiquement à la déshydratation amont par centrifugation.

On note l'absence de boues liquides et on peut rappeler que le gain de quelques points pour des boues de faible siccité nécessite d'évaporer des

volumes d'eau importants, d'où des durées de séchage plus longues à des périodes où les risques de dysfonctionnement sont plus élevés.

La siccité des boues sèches obtenue par le séchage solaire est majoritairement supérieure à 70 %, sauf pour quelques exceptions. Il convient de rappeler que l'objectif d'une siccité supérieure

à 75 % n'est pas souhaitable en raison des quantités de poussières produites lors du retournement ou du déplacement des boues dans

la serre. Ces poussières occasionnent des contraintes importantes en exploitation.

| Taux de siccité en sortie | < 60 % | De 60 à < 70% | De 70 à < 80% | De 80 à < 90% | ≥ 90 % |
|---------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|--------|
| Nombre de réponses | 2 | 2 | 7 | 28 | 6 |

Par rapport aux réponses reçues, 25 questionnaires indiquent des variations de siccité très importantes en sortie de serre, ce qui peut s'expliquer par plusieurs vidanges de la serre sur

l'année, des difficultés de séchage liées au dimensionnement, et des mesures autres que lors de la vidange de l'ouvrage (hiver / été).

Taux de charge des installations par rapport au dimensionnement

Cette enquête avait pour objectif de collecter principalement les avantages et inconvénients de ce procédé. Mais il faut rappeler que le retour d'expérience, et plus particulièrement les problèmes rencontrés, sont fonction de l'ancienneté de l'installation, de son dimensionnement et de son taux de charge.

Globalement, les installations ayant répondu étaient majoritairement sous chargées, ce qui s'explique en partie par l'implantation relativement récente de ce procédé.

| Taux de charge | Non répondu | Ne sait pas | < 40% | De 40 à < 60% | De 60 à < 80% | De 80 à 100% |
|--------------------|-------------|-------------|-------|---------------|---------------|--------------|
| Nombre de réponses | 20 | 8 | 11 | 18 | 11 | 4 |
| % | | | 25% | 41% | 25% | 9% |

Notons que 39% des installations n'ont pas répondu à cette question ou ne connaissent pas le taux de charge de leur installation.

Présence d'une désodorisation

La présence ou non d'une désodorisation est une question très souvent abordée. Certains constructeurs, en particulier pour les procédés Helioplus® (avec plancher chauffant) et le procédé Solia (bio-séchage recherché), proposent systématiquement ce traitement de l'air sauf exception. Pour les autres, le choix ou non de

mettre en place une désodorisation va surtout être fonction :

- de la sensibilité du secteur géographique (proximité des habitations avec une distance inférieure à 200 m),
- de la position arrêtée du maître d'ouvrage.

Dans tous les cas, il n'est pas à exclure qu'à un moment donné de l'année (le plus souvent après la période hivernale lors des premières chaleurs), et sur une période de quelques jours, la serre va dégager des odeurs pouvant pénaliser l'environnement immédiat.

A partir de notre enquête, on observe que 62 % des installations ayant répondu ne sont pas équipées d'une désodorisation. Lorsque ce traitement est en place, on peut noter que la désodorisation biologique domine le marché pour le séchage solaire. Ce choix est compréhensible compte tenu du procédé dit rustique.

3. PRINCIPAUX AVANTAGES DE CETTE FILIERE EXPRIMES PAR L'EXPLOITANT DE L'INSTALLATION

Parmi les avantages avancés par les exploitants, deux points se démarquent très nettement :

- la qualité du produit obtenu par sa siccité élevée et sa texture de type granuleuse qui est

très appréciée par les agriculteurs. Ensuite, on relève l'intérêt d'avoir un produit stable et sans odeur.

- Et ensuite le volume faible de boues sèches à évacuer de la serre.

| Type d'avantage exprimé | | Nombre de fois où l'avantage est abordé | |
|--|--|---|---------------|
| Qualité du produit obtenu | Intéressant en agriculture car produit granuleux, produit apprécié par la profession | 16 | 62 (39.7%) |
| | Siccité élevée | 21 | |
| | Produit stable, sans odeurs, sans chaux, facile à stocker | 16 | |
| | Accès à différents débouchés | 9 | |
| Volume de boue à évacuer très réduit | | 29 (18.6%) | |
| Exploitation | Réduite, automatisé et simple | 10 | 14 (9%) |
| | Peu d'entretien | 4 | |
| Coût | Temps d'exploitation faible | 9 | 18 (11.6%) |
| | Frais transport réduit | 9 | |
| Système combiné : stockage et séchage | | 6 (3.8%) | |
| Aspects énergétiques | Utilisation d'énergie renouvelable | 11 | 16 (10%) |
| | Procédé peu consommateur | 5 | |
| Séchage rapide en été | | 8 (5.1%) | |
| Bilan MVS non équilibré d'où minéralisation de la boue | | 3 (1.9%) | |
| Total : | | 156 | |

Les autres points cités comme avantage du procédé sont moins significatifs.

4. PRINCIPAUX INCONVENIENTS DE CETTE FILIERE EXPRIMES PAR L'EXPLOITANT DE L'INSTALLATION

La liste des inconvénients relevés par les enquêtés est la suivante :

| Type d'inconvénients exprimés | | Nombre de sites où l'inconvénient est abordé | Total et Pourcentage |
|-------------------------------|---|--|----------------------|
| Matériaux retenus | Bâche : trous, vandalisme, tempête | 4 | 7 (4.7%) |
| | Verre : vandalisme | 3 | |
| Coûts | Investissement | 5 | 14 (9.4%) |
| | Energétiques | 9 | |
| Nuisances | Olfactives | 26 | 43 (28.9%) |
| | Sonores | 2 | |
| | Poussières | 11 | |
| | Thermiques | 3 l'été et 1 l'hiver | |
| Performances | Inefficace l'hiver | 17 | 20 (13.4%) |
| | Garanties non atteintes | 3 | |
| Qualité de la boue | Pâteux : mélange ou étalement difficile | 5 | 5 (3.3%) |
| Exploitation | Alimentation/ Evacuation de la boue | 8 | 36 (24.2%) |
| | Temps, suivi délicat et compétences nécessaires | 23 | |
| | Difficulté de travailler dans cette atmosphère, Sécurité (gaz) | 5 | |
| Equipements | Fiabilité et usure: robot ou autres | 14 | 20 (13.4%) |
| | Corrosion importante | 1 | |
| | Informatique, automatisme (T°, logiciel,...) | 5 | |
| Conception | Non reprise totale de la boue (problème du radier, scarificateur) | 2 | 4 (2.7%) |
| | Infiltration d'eau | 1 | |
| | Ouvrants | 1 | |
| Total : | | | 149 |

Parmi les nombreux inconvénients cités, deux sont également fréquemment évoqués :

- les nuisances, dont les odeurs puis les poussières
- et ensuite les contraintes d'exploitation de ce type d'installation.

Les différentes visites effectuées sur sites confirment ces deux points, mais ceux-ci correspondent plus à un manque d'information sur ces sujets.

Pour la nuisance olfactive, on ne peut pas garantir une absence totale d'odeur. Ces épisodes de

dysfonctionnement peuvent arriver sur des périodes très courtes, le plus souvent au printemps, par un dégagement d'odeurs lié à la reprise du séchage solaire.

Pour les exploitants, les installations ont souvent été présentées en précisant l'absence totale de suivi et donc d'exploitation à l'exception de la maintenance préventive des équipements. Pourtant, un temps passé en exploitation est indispensable sur ce type de filière dont le pilotage et l'exploitation s'acquièrent au cours du temps.

5. TAUX DE SATISFACTION DE LA FILIERE

A. SATISFACTION GENERALE

L'analyse et l'interprétation des retours d'enquêtes donnent les informations suivantes :

| | Total des réponses | Pourcentage |
|---|--------------------|-------------|
| Satisfait | 48 | 67 % |
| Non satisfait | 16 | 22 % |
| Indéterminé | 4 | 5.5 % |
| Ne se prononce car technologie trop récente | 4 | 5.5 % |
| Total | 72 | 100% |

Les exploitants sont majoritairement satisfaits du procédé mais des points d'amélioration du procédé sont nécessaires.

Parmi les non satisfaits, sur 11 réponses exploitables, on note que 5 installations (soit 7 %

des enquêtés) regrettent d'avoir fait le choix du séchage solaire comme filière de déshydratation poussée des boues. Pour les autres, ils souhaitent à part égale exploiter un système plus récent ou changer de technologie.

B. SATISFACTION SUIVANT LE PROCEDE : SERRES EN FONCTIONNEMENT AU 1/01/2008

Ce dernier tableau permet de se rendre compte si l'absence de satisfaction est plus liée à

une technologie. A partir de l'exploitation des réponses par procédés, on observe :

| | Degrémont - FA | Stereau / Saur | Ternois | Thermo - system | Veolia | Vinci |
|--------------------------------------|----------------|---|------------|----------------------------------|--------|----------|
| | Héliantis | Heliocycle [□] Helioplus [□] | Ternois 3S | Sanglier Electrique [□] | Solia | Sogelios |
| Nombre de réponses exploitables : 44 | 23 | 3 | 2 | 8 | 8 | 0 |
| Nombre de réponses | | | | | | |
| Satisfait : 26 | 15 | 1 | 1 | 5 | 4 | |
| Non satisfait : 14 | 6 | 2 | | 3 | 3 | |
| Autres : 4 | 2 | | 1 | | 1 | |
| Degré de satisfaction | | | | | | |
| % de satisfaction : 59% | 65 % | NR | NR | 62.5 % | 50 % | |
| % de non satisfaction : 32% | 26 % | NR | NR | 37.5 % | 37.5 % | |

NR : non représentatif

Autres : pas d'avis tranché

Le taux global de satisfaction est de 59% pour les serres de plus de 2 ans.

Les serres construites par Vinci, Ternois et dans une moindre mesure Stereau sont trop récentes pour un retour d'expériences objectif. De plus, le nombre de réponses exploitées est trop faible pour en tirer des conclusions.

Pour les 3 autres systèmes, la majorité des exploitants est satisfaite du procédé.

Aucun des 6 systèmes ne retient l'entière satisfaction des exploitants. Le taux de non satisfaction est à peu près équivalent, et de l'ordre de 30 %, pour 3 procédés. Pour les autres systèmes (Stereau, Ternois et Vinci) le nombre de réponses est insuffisant pour pouvoir les interpréter.

Notons aussi que le procédé Héliantis, 2^{ème} arrivé sur le marché avec un nombre d'installations plus important (2 fois plus que les autres systèmes) a le même degré de satisfaction.

Parmi les 14 exploitants non satisfaits, les principaux types de problèmes rencontrés, par ordre d'importance, sont les suivants:

Odeurs, pannes et fiabilité des appareils, absence de séchage en période hivernale, consommation énergétique importante, présence de poussières et mauvais dimensionnement.

Malgré des serres équipées d'une désodorisation et alimentées avec des boues à des siccités élevées (centrifugeuses) on note un même degré d'insatisfaction. De même, les dates de mise en route des serres s'échelonnent de 2003 à 2007 et les taux de charge annoncés de 30 à plus de 100%.

Ainsi, les problèmes rencontrés découlent principalement d'erreurs de dimensionnement du procédé (sous dimensionnement pour 3 sites, évacuation des boues en cours d'année...), de premières installations non encore totalement optimisées ainsi que d'une mauvaise communication sur le fonctionnement du séchage solaire durant l'année.

De plus, sur ces sites, un certain nombre de facteurs responsables de problèmes ont été identifiés et pris en compte par les constructeurs (siccité d'entrée, odeurs et proximité d'habitation, degré d'aération de la boue, teneur en Matière Organique des boues d'entrée...).

6. SOLUTIONS APPORTEES AVEC EFFICACITE

Les nombreuses discussions avec tous les acteurs confrontés à cette technologie ont permis de trouver des solutions à un certain nombre de problèmes évoqués.

| Type de problèmes évoqués. | Solutions apportées. |
|--|---|
| Matériaux retenus pour la serre. | Longévité de la bâche trop limitée (perçements) d'où passage à un matériau plus résistant : le polycarbonate. Installation de fils sur le faîtage ou de système sonores anti-oiseaux. |
| Nuisances olfactives | Installation d'une désodorisation non prévue à l'origine |
| | Si occasionnelles (sortie de l'hiver), utilisation ponctuelle de masquant. |
| | Limiter par une meilleure gestion des retournements (à adapter en fonction des qualités de la boue) et épaisseur du lit de boue à réduire |
| Equipements électriques et automatismes | Mise en place de sondes de températures dans le sol afin de détecter le compostage de la boue |
| | Implantation de cette armoire à l'extérieur de la serre (à l'abri de la chaleur, des poussières) mais avec vue sur la serre pour en faciliter le paramétrage en fonction de la qualité de la boue. |
| Qualité de la boue introduite et à l'intérieur de la serre | Meilleure gestion de la file eau : degré d'aération de la boue à traiter, extractions régulières afin d'éviter tous processus de fermentation à l'amont du séchage |
| | Meilleure gestion des retournements et de l'étalement |
| | Ré introduction de boues sèches lors de boues introduites trop faibles en siccité sur des installations sous chargées (solution à envisager avec précaution en raison de risques plus importants de départ en compostage) |
| | En période critique de séchage entraînant des hauteurs élevées, évacuation directe de la boue avant séchage |
| | Contrôle fréquent du poste de déshydratation : réglage machine et siccité des boues déshydratées |
| | Eviter l'apport de boues extérieures non maîtrisable en qualité (durée de temps de séjour, % de MVS...) |
| Fiabilité des équipements (cas particuliers) | Fabrication de raclettes autour des roues pour éviter le patinage des robots Optimisation de l'automatisme et des différents capteurs |
| Poussières | Sortir les boues sèches de la serre Réduire le nombre de retournement Arrêter le fonctionnement des déstratificateurs |



Le séchage solaire s'est développé en France à partir des années 2003 et est toujours en constant développement. Les principaux constructeurs de stations d'épuration ont commercialisé leur propre technologie, et on dénombre actuellement 6 systèmes de séchage solaire dont les principales particularités sont :

- un séchage solaire associé ou non à un chauffage complémentaire de type plancher chauffant,
- mise en place ou non d'une désodorisation.

L'analyse du parc a permis de montrer une satisfaction globale de ce procédé bien qu'il nécessite un minimum d'exploitation (de l'ordre de 0,5 Jour / semaine).

Pour la majorité des enquêtés, ces systèmes sont encore à ce jour en cours d'amélioration technique avec une exploitation peu aisée car basée principalement sur l'expérience de ce procédé qui nécessite quotidiennement une observation critique du lit de boue dans la serre. A ce jour, les manuels d'exploitation des serres sont très rares et très succincts lorsqu'ils existent.

En conclusion de cette enquête sur l'état de l'art et le retour d'expériences sur le séchage solaire en France, un inventaire des principales interrogations sur lesquelles le maître d'ouvrage doit se positionner avant de s'équiper d'un tel système est proposé. Il doit permettre ainsi d'orienter le choix vers un système plutôt qu'un autre.

Les principaux points à aborder sont listés ci-dessous :

Le site de la station d'épuration est-il adapté pour l'installation d'une serre ?

Il est nécessaire d'avoir une surface au sol suffisante, un site découvert vis-à-vis de l'ensoleillement (pas dans un vallon à l'ombre ou à proximité d'une forêt) et non situé en zone humide. L'orientation de la serre par rapport au vent dominant est aussi un élément important à intégrer.

Il faut également prendre en compte la distance avec les premières habitations (nuisances olfactives) ou encore l'altitude du site (importance du gel et de l'enneigement).

Différents emplacements sont-ils possibles ?

Si la serre est équipée d'extracteurs d'air, ceux-ci doivent être orientés à l'opposé du village et du local d'exploitation afin d'éviter les nuisances olfactives.

Il est nécessaire d'avoir une surface de zone extérieure suffisamment importante pour faciliter les manœuvres lors de l'évacuation des boues sèches.

Il est préférable de limiter la distance entre la serre et le local de déshydratation afin de faciliter l'alimentation en boues et réduire la longueur de transport (conduite, tapis, ou vis).

Les boues à traiter sont-elles compatibles avec le procédé de séchage solaire ?

Les boues à l'alimentation doivent être les plus fraîches possibles, sans stockage intermédiaire pouvant engendrer des phénomènes d'anaérobiose. Il est préconisé de limiter, voir de refuser, les boues extérieures dont le traitement amont n'est pas toujours bien maîtrisé.

Le système de déshydratation doit être suffisant avec un taux de polymère maîtrisé (déshydratation et lubrification si pompe gaveuse), une siccité obtenue suffisante (> 20%) pour une meilleure teneur mécanique de la boue, un taux de matière organique suffisamment bas (d'où système faible charge), et une absence de chaulage des boues.

Quelle siccité recherchée ?

L'objectif maximal du séchage solaire est d'atteindre une siccité de 75 – 80%. Des siccités supérieures engendrent de nouvelles contraintes d'exploitation (poussières).

Dans certains cas, pour des critères technico-économiques locaux, différentes gammes de siccité sur l'année peuvent être recherchées en fonction des débouchés possibles des boues traitées.

Quelle est la période d'évacuation des boues sèches ?

Le débouché classique du séchage solaire est la valorisation agricole. Les périodes d'évacuation sont donc fonction des périodes possibles d'épandages liées aux cultures locales. En règle générale, on note une à deux périodes sur l'année : septembre et mars.

Pour d'autres débouchés, l'évacuation des boues de la serre peut être continue. De plus, selon la fréquence d'évacuation, le stockage des boues sèches doit être précisé : dans la serre ou à l'extérieur.

Dans le cas de plusieurs évacuations dans l'année, leur débouché doit pouvoir accepter différentes siccités à l'exception des serres équipées de chauffage complémentaire.

Dans certains cas, la serre peut n'être utilisée qu'en période favorables au séchage (durée de 6 à 10 mois suivant le contexte) d'où un second débouché doit être précisé et mis en place (boues chaulées, compostage...).

Risques d'odeurs

La collectivité ou le voisinage immédiat de la serre doivent être prêt à accepter d'éventuels dégagements d'odeurs (ceux-ci pouvant être limités à quelques jours dans l'année) en provenance du site quelque soit le type de serre retenu. Ils doivent également être au courant des différentes possibilités en ce qui concerne la limitation de ces odeurs :

- Utilisation temporaire de masquant dans la serre,
- Installation d'une tour de dissémination d'air pour propulser et disperser les odeurs en altitude,
- Mise en place d'un taux de renouvellement de l'air de la serre très élevé (20 fois le volume horaire)
- Mise en place d'une désodorisation totale et continue, avec un choix entre 2 systèmes de traitement (biologique ou chimique),
- Possibilité d'installer une désodorisation partielle traitant en routine seulement une partie du débit, et l'ensemble du débit lors des périodes de crises (crises nécessairement de courtes durées: panne du retourneur, problème d'automatisme, période de début de printemps.....) avec évidemment un renouvellement moindre de l'air de la serre en période critique.

Procédé « rustique » ou procédé industriel

En fonction de la politique environnementale retenue par la collectivité, la commune doit faire le choix entre les 3 types de serres aux conséquences différentes en termes de consommation énergétique, de risques d'odeurs,....

- Serre ouverte,
- Serre fermée,
- Serre fermée avec apport d'énergie extérieure.

Dans tous les cas, le procédé de séchage solaire nécessitera une exploitation attentive.

Le procédé choisi accepte-t-il la présence humaine ?

Suivant le système retenu, l'équipement et les conditions de sécurité pour l'exploitant peuvent être variables, avec l'obligation possible du port de masque, combinaisons étanches, lunettes, capteurs de mesures de gaz....

Degré d'automatisme du procédé

Il est nécessaire de savoir si la gestion de la serre est centralisée avec le pilotage de la station d'épuration ou si son exploitation est gérée par un automate annexe. De plus, suivant les systèmes et leur degré d'automatisation en particulier leur adaptabilité aux données météorologiques, le temps nécessaire à l'exploitation peut fortement

varier (si alimentation manuelle, vidanges fréquentes...).

Comment s'effectue la gestion des boues sèches entre 2 épandages afin de maîtriser la siccité finale ?

Est-il possible d'extraire régulièrement une partie des boues de la serre ?

Existe-il une fosse ou une zone de stockage de boues sèche non retournée dans la serre ou à l'extérieur de celle-ci ?

Ces principales questions vont permettre aux décideurs d'avoir une meilleure connaissance de la filière envisagée et de ses contraintes sur une technologie relativement récente.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://www.planetoscope.com/sols/624-Tonnes-de-mati-egrave-res-s-egrave-ches-de-boues-de-station-d-epuration-produites-en-France.html>
- [2] <http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/Pages/f53.htm>
- [3] Patricia LE STRAT, *Les procédés « écologiques » pour le traitement des boues urbaines*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 286, page 83
- [4] Haoua AMADOU, *La modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines*, thèse, partie II.3.
- [5] Jean-Christophe BAUDEZ, *La gestion des boues résiduaires : de l'étude de la matière molle à la valorisation de la matière organique*, extraits du rapport
- [6] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Compostage>
- [7] http://www.actu-environnement.com/ae/news/reglementation_compostage_5302.php4
- <http://www.thermo-system.com/>, site de Thermo-System, brochures Sanglier électrique et Manager de boues
- http://www.huber.fr/upload/56316f81X1057162a0fbXY218/1122984295730/srt_fr.pdf, brochure sécheur solaire Huber
- http://www.t-e.fr/docs/plaquette_sechage_09.pdf, brochure sécheur solaire Ternois
- <http://www.veoliawaterst.com/processes/link/download?site=doc&objectId=621> brochure sécheur solaire Veolia,
- http://www.degremont.fr/document/?f=nos-realisations/fr/B2_Heliantis%20Brumath.pdf, brochure séchage solaire Degrémont
- http://www.stereau.fr/admin/Portal/LinkClick.aspx?tabid=353&table=Links&field=ItemID&id=141&contenttype=application/pdf&link=other%3AFP_HELIOCYCLE_A0407.pdf brochure sécheur solaire Stereau
- <http://www.richel.fr/richeportal/easysite/action/WebdriveActionEvent/oid/01e-000019-00q>, plaquette serres de séchage solaire Marchegay
- http://www.poyry-environnement.fr/uploadfichier//LS4009_St_Vallier_solaire_240TMS_OK.pdf, plaquette de présentation Pöyry de la station de Saint Vallier (26)
- http://www.poyry-environnement.fr/uploadfichier//NM4124_Taradeau_solaire_OK.pdf, plaquette de présentation Pöyry de la station de Taradeau (83)
- http://www.poyry-environnement.fr/uploadfichier//MJ3055_Livron_solaire_boues_OK.pdf, plaquette de présentation Pöyry de la station de Livron (26)
- http://www.poyry-environnement.fr/uploadfichier//PA2007_Antonniere_solaire_OK.pdf, plaquette de présentation Pöyry de la station de L'Antonnière (72)
- <http://www.tierso.fr/LinkClick.aspx?fileticket=JFv70He4MLg%3d&tabid=866&mid=2447&language=fr-FR>, Désodorisation biologique, Liste de références Polytec, juin 2008
- <http://www.dislaub.fr/dislaub/activites-sechage-boues-serres.html>, DISLAUB, Séchage sous serre des boues de station d'épuration

- Philippe GRULOIS, Jean-Christophe FAMEL, Jean-Pierre HANGOUET, Christian FAYOUX, *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ... en boues !*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 195, page 42
- Gérard MICHEL, *Modélisation et dimensionnement des procédés de séchage solaire de boues*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 267, page 55
- Robert PETIT, Yann Le BELLEGO, *Déshydratation et traçabilité des boues : mise en service d'une serre de séchage*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 279, page 65
- *Quand les boues prennent le soleil*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 282, page 12
- Céline MAURIZE, *Le séchage solaire au secours des boues*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 286, page 89
- Marc MAUDUIT, *Traitement des boues : quelles solutions ?*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 293, page 55
- Sabine ROUS, *Le séchage : un atout multi-filière*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 293, page 69
- H. AMADOU, C. BECK, A-G SADOWSKI, J-B POULET, *Etude du séchage solaire des boues de stations d'épuration urbaines*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 297, page 41
- Mathieu BOILLOT, Anne GRESLE, *Le séchage solaire combiné des boues : l'exemple de Carnac*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 297, page 45
- *Ternois combine séchage solaire et récupération d'énergie*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 303, page 22
- Sahra CEPIA, *Optimiser le devenir des boues résiduaires*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 307, page 31
- Alain VERGNES, *Nuisances odorantes en stations d'épuration : quelles solutions ?*, Article du périodique L'eau, l'industrie et les nuisances N° 322, page 27
- Bruno MORTGAT, *Le séchage des boues, une filière qui préserve les options*, Article du périodique Environnement et Technique N° 237, page 35, Juin 2004
- Véronique MAMBRE, Bernard MARCHAND, *Le séchage thermique des boues urbaines et industrielles*, Article du périodique Environnement et Technique N° 246, page 43, Mai 2005
- Emmanuel ADLER, *Les boues d'épuration se dorment la pilule au soleil*, Article du périodique Environnement et Technique N° 282, page 86, Décembre 2008
- *Brumath : procédé de séchage solaire pour les boues de la STEP*, Article du Journal de Maires, page 28, Novembre 2004
- Claude MARIET, *A Brumath, le soleil allège les boues*, Article du périodique TSM N° 10, page 8, Octobre 2004
- *Gestion des déchets organiques et des boues : un choix local*, Science et Décision, Février 2003
- Fabienne NEDE, *Séchage de boues : de nouveaux procédés*, Article de La Gazette, page 42, 27 Octobre 2008
- Haoua AMADOU, *Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2007
- Rayan SLIM, *Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007
- Antoine-Georges SADOWSKI, *Techniques d'épuration des eaux usées : boues activées*, Formation Continue, Session n° 02-208 du 3 au 7 juin 2002 à Strasbourg

- Mines d'Albi, *Aide au dimensionnement d'une installation de séchage solaire de boues*, rapport de projet
- Guillaume MANGIN, *Les premiers retours d'expérience sur le séchage solaire sous serre des boues urbaines*, Synthèse technique, Février 2005
- *Préoccupations relatives aux odeurs associées au compostage des matières organiques*, Rapport d'enquête auprès des gestionnaires de sites de compostage, 18 Août 2006
- ADEME, *Séchage thermique des boues urbaines et industrielles*, 2004
- ADEME, *Synthèse des données relatives à la production et à la gestion des boues d'épuration en France*

ANNEXE : LISTE DE REFERENCES

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|---------------------------|-----------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
| Saur (Stereau) | Saint Vallier | 26 | 16 000 | sept-08 |
| | La Couture Boussey | 27 | 3 200 | mars-07 |
| | Thuit-Signol | 27 | 5 040 | mai-05 |
| | Bannalec | 29 | 13 000 | juil-08 |
| | Coutances | 50 | 20 000 | mai-08 |
| | Luxueil les bains | 70 | 20 000 | août-08 |
| | Saint-Souplet | 77 | 5 200 | mars-08 |
| | Belleville sur vie | 85 | 4 000 | sept-08 |
| | Vivonne | 86 | 7 000 | en cours |
| | Saint Leu Les Avirons | Réunion | 15 000 | en cours |
| | Genlis | 21 | 7 200 | nov-07 |
| | Carnac | 56 | 2 800 | serre pilote |

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|--------------------------|------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
| Vinci - Sogea | Mansle | 16 | 4 400 | 2008 |
| | Roumazières | 16 | 4 500 | 2008 |
| | Gémozac | 17 | 2 200 | 2008 |
| | Bessières | 31 | 6 000 | 2010 |
| | Leognan | 33 | 12 000 | 2008 |
| | Crevin | 35 | 3 400 | 2009 |
| | Le Barp | 33 | 12 000 | 2009 |
| | Montreuil-bellay | 49 | 13 000 | 2008 |
| | Chateaufort-sur-Sarthe | 49 | 4 200 | 2010 |
| | Allaire | 56 | 3 200 | 2008 |
| | Surzur | 56 | 3 000 | 2005 |
| | la bazoge | 72 | 4 200 | 2007 |
| | Les Arcs sur Argens | 83 | 13 000 | 2008 |
| | Le Marin | Martinique | 12 500 | 2009 |

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|----------------------|---------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
| Thermo-System | Peyruis | 4 | 5 500 | 2007 |
| | Le Pouzin | 7 | 13 000 | en cours |
| | Nogent sur Seine | 10 | 15 000 | 2007 |
| | Louannec | 22 | 4 900 | 2009 |
| | Naveil | 41 | 7 400 | 2006 |
| | Chazelles sur Lyon | 42 | 7 500 | juin-05 |
| | Saint Julien de concelles | 44 | 8 000 | 2004 |
| | Saint Ay | 45 | 4 500 | 2004 |
| | Malesherbes | 45 | 8 000 | 2002 |
| | Les Attaques | 62 | 2 500 | 2007 |
| | Saint-Jamme sur Sarthe | 72 | 5 000 | en cours |
| | Houdan-Maulette | 78 | 15 000 | 2004 |
| | Friville – Escarbotin | 80 | 13 000 | 2005 |
| | Bagnols-en-Forêt | 83 | 4 000 | en cours |
| | Tourrettes | 83 | 5 000 | 2003 |
| | Ile d'Yeu | 85 | 8 000 | 2002 |
| | Chablis | 89 | 8 000 | 2006 |
| | Nantes Métropole | 44 | 100 000 | en cours |
| | Romilly-sur-Seine | 10 | 34 100 | en cours |

| | | | | |
|--------------|--------|----|--------|---------|
| AMECO | Beaune | 21 | 90 000 | févr-03 |
|--------------|--------|----|--------|---------|

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|--|------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
| Degrémont - France Assainissement | Biesheim | 68 | 9 000 | janv-06 |
| | Brumath | 67 | 21 000 | mai-04 |
| | Clairvaux-les-lacs | 39 | 6550 été ; 2180 hiver | juil-05 |
| | Dieuze | 57 | 6 800 | févr-05 |
| | Dommartin | 88 | 7 500 + 3 150 ext. | juin-08 |
| | Ensisheim | 68 | 12 500 | oct-03 |
| | Etrechy | 91 | 10 000 | juil-05 |
| | (La) Ferté Saint Aubin | 45 | 9 000 | févr-10 |
| | Folschwiller | 57 | 15 000 | nov-05 |
| | Gargenville | 78 | 12 000 | sept-09 |
| | Granges s/Vologne | 88 | 3 000 | sept-05 |
| | Is-Marcilly sur Tille | 21 | 9 900 | juil-05 |
| | Larmont (Pontarlier) | 25 | 50 000 | août-04 |
| | Marolles | 91 | 22 000 | juin-08 |
| | Montreux Bourbeuse | 90 | 4 000 | mars-07 |
| | Neufchâteau | 88 | 18 000 | mars-06 |
| | Orgelet | 39 | 4 350 | mai-05 |
| | Pont St Maxence | 60 | 40 000 | avr-08 |
| | Reignier | 74 | 15 000 | févr-04 |
| | Romorantin | 41 | 25 500 | juin-05 |
| | SADI le Touvet | 38 | 18 000 | mars-08 |
| | Sierentz | 68 | 13 000 | oct-05 |
| | Thiers | 63 | 20 000 | sept-07 |
| | Val de l'Eure | 28 | 4 700 | mai-07 |
| | Vesoul | 70 | 72 000 | mai-08 |
| | Baugé | 49 | 9 500 | mars-08 |
| | Gévèzé | 35 | 7 100 | juin-05 |
| | Laillé | 35 | 5 500 | janv-07 |
| | L'Antonnière | 72 | 7 200 | sept-05 |
| | Nevez | 29 | 2 500 hiver ; 5 000 été | oct-08 |
| | Noirmoutier | 85 | 3 000 hiver; 18 000 été | oct-06 |
| | Val de Seiche | 35 | 32 000 | janv-06 |
| | Vallet | 44 | 15 200 | avr-06 |
| | Vire | 14 | 50 000 | nov-05 |
| Montbrison | 42 | 32 000 | mars-07 | |
| Peymeinade | 6 | 18 000 | juil-07 | |
| Dignes les bains | 4 | 33 800 | mars-10 | |
| Reignier BIS | 74 | 32 000 | août-08 | |
| Villefranche de Rouergue | 12 | 30 000 | juin-05 | |

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Veolia EAU - MSE | Fonsorbes Cantalauze | 31 | serre pilote | 2005 |
| | Fonsorbes Boulbènes | 31 | 9 000 | fin 2006 |
| | Pechbonnieu | 31 | 6 500 | 2008 |
| | La Réole | 33 | 12 000 | 2010 |
| | Montbeton | 82 | 4 000 | 2009 |
| | Saint-Paul-3-Châteaux | 26 | 13 000 | 2006 |
| | Montmerle-3-Rivières | 1 | 8 000 | 2009 |
| | Val de Saone Chalaronne | 1 | 6 – 8 000 | 2009 |
| | Joigny | 89 | 18 000 | 2010 |
| | Meximieux | 1 | 10 000 | 2010 |
| | Le Véron | 37 | 17 000 | 2006 |
| | Saint Jouan des Guerets | 35 | 7 500 | 2009 |
| | Mortagne au Perche | 61 | 12 000 | 2010 |
| | La Chatre | 36 | 9 000 | 2009 |
| | Le Lude | 72 | 6 000 | 2009 |
| | Bonnetable | 72 | 6 000 | 2009 |
| | Saint-André de l'Eure | 27 | 8 500 | 2009 |
| | Ay | 51 | 6 000 – 39 000 | 2010 |
| | Chateaulin | 29 | 25 000 | fin 2006 |
| | Le Marillet | 85 | eau potable | 2006 |
| | Saint Pierre | Réunion | 80 000 | 2009 |
| | Verdun | 55 | Compost 36 300 | 2006 |
| Forbach | 57 | 70 000 + boues indus | 2004 | |
| Richemont | 57 | 70 000 + boues indus | 2007 | |

| Constructeur | Sites | Département | Taille de la serre (EH) | Année de mise en service |
|---|--------------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|
| Ternois – Huber Technology | Saint Maurice de Beynost | 1 | 8 000 | mars-07 |
| | Livron sur Drôme | 26 | 13 000 | 2008 |
| | Bourg Achard | 27 | 7 825 | 2008 |
| | Bonneval | 28 | 7 000 | 2007 |
| | Nogent Le Roi | 28 | 12 500 | 2010 |
| | Illiers Combray | 28 | 5 300 | 2010 |
| | Lherm | 31 | 4 000 | 2009 |
| | Vallères Lignièrès | 37 | 3 200 | oct. 2009 |
| | Ernée | 53 | 10 000 + boues ext. | sept.2007 |
| | Evron | 53 | 16 500 + boues ext | 2008 |
| | Laval | 53 | 150 000 | nov. 2007 |
| | Villaines La Juhel | 53 | 5 400 | oct. 2009 |
| | Hottviller | 57 | 6 330 | 2008 |
| | Rodemack-Evange | 57 | 3 400 + boues ext | 2007 |
| | Bellême | 61 | 6 420 | nov. 2007 |
| | Aigueperse | 63 | 7 200 | 2008 |
| | Gunstett | 67 | 18 000+boues ext | 2008 |
| | Goderville | 76 | 3 600 | 2010 |
| | Bourron-Marlotte | 77 | 6 700+boues ext | dec. 2007 |
| | Le chatelet en Brie | 77 | 7 000 | 2009 |
| Snecma Villaroche | 77 | 3 500 | 2010 | |
| Taradeau-Vidauban | 83 | 15 000 | 2008 | |
| Noirmoutier | 85 | 15 000/40 000 | juin-09 | |

RESUME

En raison de l'augmentation de la population raccordée aux filières de traitement (nouvelle ou existante) et d'une réglementation de plus en plus stricte, la production de boues résiduelles urbaines ne fait que s'accroître au cours du temps. En sortie de station d'épuration, ces boues sont particulièrement liquides, ce qui représente des volumes très importants. Différentes technologies existent afin d'éliminer une partie de l'eau contenue dans ces boues, on peut citer les filtres à bandes, les filtres presse, les centrifugeuses, les lits de séchage plantés de roseaux ou encore les sécheurs thermiques. Ainsi, en fonction de la siccité finale, les coûts de transport vers les filières de valorisation, tels que le compostage, l'incinération ou l'épandage agricole, sont diminués.

Le séchage solaire est un procédé récent de déshydratation des boues (introduit en France depuis 2002) qui est présenté comme une technique rustique et s'inscrivant dans une politique de développement durable. Une étude a donc été demandée par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse afin de réaliser un état de l'art ainsi qu'un retour d'expériences sur le séchage solaire en France.

La première partie de ce document (chapitres I et II) est générale. Elle est consacrée à la description d'une serre de séchage solaire, l'explication de son fonctionnement, sa conception et son dimensionnement. Le chapitre III suivant introduit les différents constructeurs de ce procédé et fait le bilan de l'implantation du séchage solaire en France : nombre de serres installées par constructeur, répartition géographique, évolution du nombre d'installations au cours du temps... Le chapitre IV comprend l'état de l'art du séchage solaire en France proprement dit avec la présentation et la comparaison des procédés de tous les constructeurs. Une approche économique de cette technologie se trouve au chapitre V et les retours d'expériences sont répertoriés au chapitre VI avec un bilan de l'enquête effectuée auprès de tous les exploitants de stations d'épuration munies de serres de séchage solaire. Cette étude se termine par les critères à prendre en compte et les questions principales à se poser avant de s'équiper d'un système de séchage solaire.

Mots clés : séchage solaire, serre, boues, déshydratation

