

SYNTHESE TECHNIQUE

LES PREMIERS RETOURS D'EXPERIENCE SUR LE SECHAGE SOLAIRE SOUS SERRE DES BOUES URBAINES

MANGIN Guillaume

E-mail : guillaume.mangin@polytechnique.org

Février 2005

ENGREF Centre de Montpellier
B.P.44494 –
34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. (33) 4 67 04 71 00
Fax (33) 4 67 04 71 01

OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – SNIDE
15, rue Edouard Chamberland
87065 LIMOGES Cedex
Tél (33) 5 55 11 47 47
Fax (33) 5 55 11 47 48

RESUME

Cette synthèse s'intéresse au séchage naturel des boues de stations d'épurations urbaines. L'énergie solaire et l'effet de serre sont mis à profit pour sécher les boues dans de grandes serres où une intense ventilation a lieu. Cette technique ne nécessite que peu d'équipements. Des odeurs peuvent être émises en cas de dysfonctionnement du système ; elles peuvent indisposer les habitants du voisinage. Afin d'éviter ces odeurs les constructeurs proposent souvent des filtres d'air.

Il existe déjà quelques installations de séchage naturel, d'autres sont en construction. On peut néanmoins se faire une idée des coûts d'investissement. C'est assez cher pour une collectivité de taille moyenne, de 10 000 à 100 000 EH (entre 500 000 et 1 000 000 €) mais cela reste moins cher que les installations traditionnelles de séchage thermique. Les coûts de fonctionnement sont eux aussi moins chers dans le cas du séchage naturel car la consommation énergétique est réduite.

En conclusion, le séchage naturel des boues est en phase avec les concepts de développement durable et « respecte l'environnement ». Le nombre de ces installations risque d'augmenter dans le futur.

MOTS CLES

BOUES D'EPURATION, STATION D'EPURATION, SECHAGE SOLAIRE, EFFET DE SERRE, COUTS D'INVESTISSEMENT, COUTS DE FONCTIONNEMENT, PROCEDES, EQUIPEMENTS, RETOURS D'EXPERIENCE, RISQUES, ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX.

INTRODUCTION

En traitant les eaux usées, les stations d'épuration produisent différents sous-produits dont des boues d'épuration (ou boues urbaines). Chaque équivalent habitant produit en moyenne entre 50 et 80 g de boue (MS¹) par jour (MIZIER, 2003), en fonction du procédé de traitement de l'eau utilisé. La production totale estimée de boues en France s'accroît, de 878 000 tMS² en 1998 (CLAVIES, 1999) à plus de 1 300 000 tMS prévues pour 2005 (GARRIGUES, 2004).

Depuis la loi sur l'eau de 1992, un traitement au moins sommaire des boues urbaines est désormais obligatoire. A ce titre le séchage des boues est une des techniques de traitement possibles, et le séchage solaire des boues est un procédé particulier de séchage (voir schéma n°1).

Rappelons qu'il n'existe que trois destinations finales aux boues : l'épandage agricole, l'incinération et la mise en décharge.

Au sein de la filière boues le séchage comporte plusieurs intérêts : une réduction du volume des boues d'abord, d'un facteur 4 à 5 par rapport au volume des boues en sortie de digesteur (MAILLOT, 2001), une stabilisation des boues par arrêt de la fermentation lorsque les boues ont une siccité³ supérieure à une certaine valeur (on parle de 80%) (GARRIGUES, 2004). Quant au séchage solaire, il permet de réduire drastiquement l'apport d'énergie utilisée pour le séchage et il résout les problèmes de stockage dans le temps des boues sur le site de la station (tout en requérant une surface à peu près identique à celle utilisée pour le stockage). Par ailleurs, le fonctionnement d'une serre semble relativement simple.

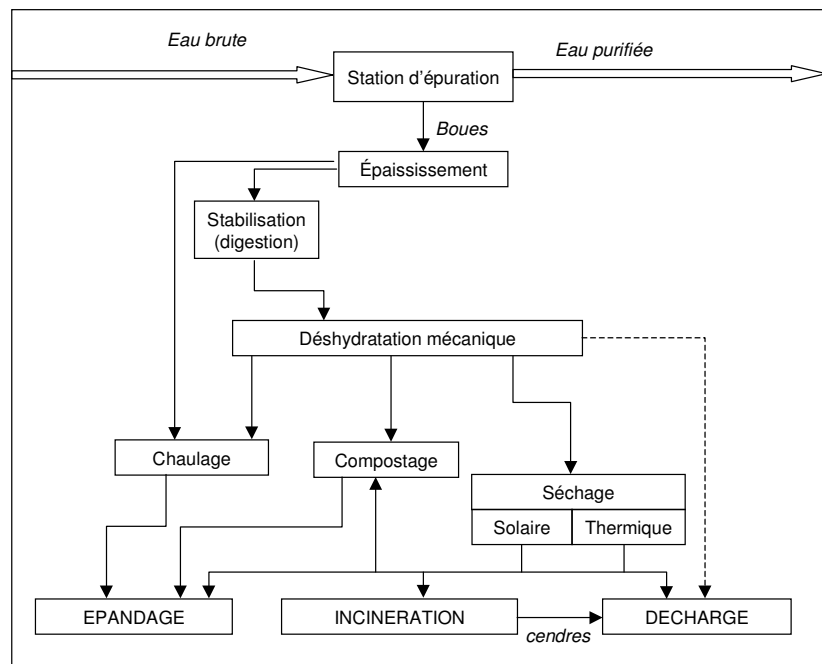


Schéma n°1 : schématisation de la filière de traitement des boues urbaines.

Le procédé de séchage solaire est apparu récemment en Allemagne (vers 1994). En France, des sociétés comme AMEcolIndustries (brevet EcoDryer[®]) ont cherché dans les années 2000 à diffuser cette technique auprès des STEP⁴ moyennes (5 000 à 10 000 EH), technique rapidement généralisée et fiabilisée par d'autres constructeurs, tels que Degrémont (Héliantis[®]), CGE (Solia[®]), SAUR (Héliocycle[®]). Parmi les fabricants étrangers (allemands) citons Thermo-System et Huber Technology.

¹ MS = Matière Sèche

² tMS = tonne de matière sèche

³ siccité = « masse de matière sèche d'un échantillon » / « masse totale de l'échantillon ». Elle s'exprime en %.

⁴ STEP = abréviation pour STation d'EPuration

LA TECHNIQUE DE SECHAGE SOLAIRE DES BOUES SOUS SERRE

O QUELS SONT LES PRINCIPES PHYSIQUES DE FONCTIONNEMENT ?

Thermodynamique du séchage

L'eau indésirable, située initialement dans la boue, doit être évacuée vers le milieu récepteur final, qui est dans ce cas l'air extérieur à la serre. Entre ces deux états, plusieurs transferts thermiques interviennent.

L'eau contenue dans la boue, à l'état liquide, doit d'abord s'évaporer. L'énergie nécessaire à cette évaporation dépend de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, et de la capacité de l'air à recevoir davantage d'eau. Cette capacité est simplement la différence entre l'humidité de l'air⁵ et l'humidité de l'air saturé en vapeur d'eau⁶ (MICHEL et GRESLE, 2004). Plus l'air est chargé en vapeur d'eau, plus il faudra d'énergie pour évaporer de l'eau (pour donner une image disons que le linge sèche plus vite par temps sec que par temps humide !).

Cette capacité de l'air à recevoir de l'eau est le point crucial du séchage. Pour en accroître l'efficacité, il faut donc simplement diminuer l'humidité de l'air. En pratique un brassage énergétique renouvelant l'air dans la serre suffit.

Le transfert d'eau dans la boue intervient également. Lorsque la boue est humide, chargée en eau, le séchage est rapide puisque la surface de la boue est saturée en eau. Le séchage se fait alors à vitesse constante. En revanche lorsque la siccité s'accroît, la surface n'est plus saturée en eau, et l'eau doit circuler jusqu'à la surface afin de s'évaporer (NADEAU et PUIGGALI, 1995). Cela ralentit considérablement la vitesse de séchage, et celle-ci dépend alors directement de l'humidité de la boue. (cf. schéma n°2).

En pratique une croûte se forme rapidement à la surface de la boue, ce qui ralentit le séchage. Il faut alors « casser » cette croûte à l'aide d'un scarificateur (MICHEL et GRESLE, 2004).

Pour préciser ces descriptions, deux bilans d'énergie sont donnés ci-dessous (MICHEL et GRESLE, 2004) :

□ Bilan thermique sur l'air :

$$\Delta \left(\begin{array}{l} \text{énergie interne de l'air le long} \\ \text{de la serre (proportionnelle à} \\ \text{la température)} \end{array} \right) = \begin{array}{l} \text{chaleur nécessaire à} \\ \text{l'évaporation de l'eau} \\ \text{sur la boue.} \end{array} + \begin{array}{l} \text{échange convectif} \\ \text{avec la boue} \end{array} + \begin{array}{l} \text{échange convectif} \\ \text{avec la paroi} \end{array}$$

Au fur et à mesure de son avancée dans la serre, et grâce au brassage, l'air échange de l'énergie directement avec la boue et les parois de la serre (échanges de type convectifs), et donne son énergie à la vapeur d'eau qui s'évapore. En retour il se charge en humidité.

□ Bilan thermique sur la boue :

$$\begin{array}{l} \text{« humidité de l'air »} \\ \text{à la différence :} \\ \text{évaporer l'eau (proportionnelle} \\ \text{énergie utilisée pour} \end{array} = \begin{array}{l} \text{fournie par le soleil} \\ \text{chaleur directement} \end{array} + \begin{array}{l} \text{avec l'air} \\ \text{échange convectif} \end{array} + \begin{array}{l} \text{avec le sol} \\ \text{échange convectif} \end{array} + \begin{array}{l} \text{fermentation interne...} \\ \text{(surtout pour les corps noirs,} \\ \text{autres sources d'énergie} \end{array}$$

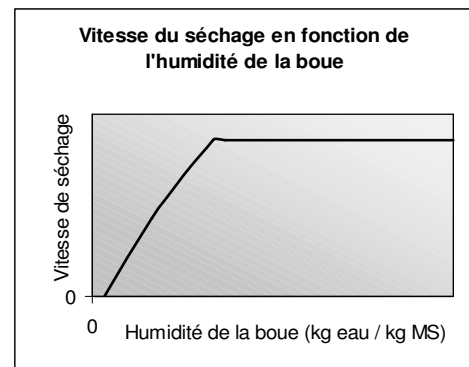


Schéma n°2 : vitesse du séchage en fonction de l'humidité de la boue, d'après (MICHEL, GRESLE, 2004)

⁵ On peut caractériser la quantité de vapeur d'eau dans l'air par l'humidité, définie comme la masse de vapeur d'eau par unité de masse d'air sec (BRUTSAERT, 1982).

⁶ Lorsque la quantité de vapeur d'eau dans l'air augmente, la pression partielle de vapeur d'eau augmente. Lorsque cette pression partielle atteint la pression de vapeur saturante (qui ne dépend que de la température), l'eau change d'état et se condense. L'air est dit « saturé en vapeur d'eau ».

L'énergie utilisée pour évaporer l'eau est fournie par le soleil, les échanges avec l'air et le sol (cela peut éventuellement être des pertes d'énergie), et par d'autres apports d'énergie : fermentation, réactions exothermiques internes aux boues, chauffage éventuel des boues par divers moyens,...)

Remarques diverses de fonctionnement

Le brassage et la scarification des boues ont plusieurs objectifs :

- empêcher la fermentation, qui générerait des mauvaises odeurs et des particules non désirées.
- Augmenter la surface d'échange entre l'air et la boue.
- Accroître l'humidité de la boue à proximité de la surface, en mettant en surface de l'eau contenue dans les pores interstitielles de la boue. Cela augmente la vitesse de séchage (cf. schéma n°2).

Pour toutes les serres du nord de la France l'ensoleillement n'est suffisamment efficace qu'en été. Le séchage n'a lieu alors que 3 ou 4 mois par an (pire des cas). En été, le séchage est relativement rapide, et deux semaines suffisent à sécher un lit de boue (MICHEL et GRESLE, 2004 ; TETYKERE, 2004). Cette précision est importante pour dimensionner la serre. **Il faut pouvoir stocker les boues pendant 8 à 9 mois parfois.**

O QUELLES SONT LES TECHNIQUES UTILISEES ?

◆ La serre : constituée en général de parois en matière plastique transparente, ou en verre, elle est optimisée pour maximiser l'effet de serre (EBERHART, 2004). Elle est comparable aux serres utilisées en agriculture. Bien qu'il n'existe pas de règle générale, le dimensionnement dépend de plusieurs facteurs :

- du niveau de séchage requis,
- de la quantité de boues à stocker en hiver,
- de l'ensoleillement du site, et
- du procédé utilisé (constructeur !)

◆ Le sol : doit être imperméabilisé, et drainé. En général il s'agit d'une couche de béton.

	Héliantis©	Solia©	Ecodyrer©	KULT© SRT
SERRE				
Particularités	Serres de 10 m de large et de 50 à 120 m de long.	RAS	RAS	Dispositif de circulation d'eau d'insufflation d'air dans le sol.
Ouverte ?	Oui	Non	Non	Oui/Non
BOUES	Sont étalées en lits. Avancent progressivement pendant le séchage. Boues brutes à l'entrée et boues séchées à la sortie.	Étalées en andains de 1 m de haut environ.	Étalées sur un lit dans la serre. Fixes.	Étalées sur un lit dans la serre. Il n'est pas prévu de les stocker.
SCARIFICATEUR				
Description	Un grand bras perpendiculaire à l'axe de la serre. Des godets brassent les boues	Les andains de boues sont simplement retournés.	"Sanglier" électrique, composé de deux roues avec des godets pour retourner les boues.	Bras perpendiculaire à la serre (comparable à celui d'Héliantis). Une insufflation d'air peut être aussi utilisée.
Fonctionnement	Le bras avance progressivement. A chaque passage les boues sont avancées de 50 cm environ.	Retournement par intervention manuelle.	Le sanglier se déplace aléatoirement. Il retourne les boues à son passage.	Le bras avance, mais sans faire avancer les boues.
TRAITEMENT DE L'AIR	Pas de traitement d'odeurs. Elles sont diluées à l'extérieur de la serre via un renouvellement d'air très important	Biofiltre	Biofiltre	Filtre sur pouzzolane si la serre est fermée, aucun sinon.
DISPOSITIFS COMPLEMENTAIRES D'ENERGIE	Non prévu	Non prévu	Non réalisé	Pompe à chaleur, la source chaude étant l'effluent de la STEP.
Références	DEGREMONT, 2002 ; DEGREMONT, 2004	EBERHART, 2004 ; MORTGAT, 2004	TETYKERE, 2004 ; ADEME, 2001 ; MORTGAT, 2004 ; MAILLOT, 2001	MISCHLER, 2004 ; HUBER TECHNOLOGY 2004

Tableau 1 : caractéristiques techniques de quelques procédés commercialisés.

◆ Les **boues** : leur position et évolution varie selon les procédés. Elles peuvent être soit étendues sur le sol (épaisseur de la couche entre 20 et 50 cm), soit disposées en andains.

◆ Le **retourneur** (ou scarificateur) : caractéristique du procédé.

◆ L'**aération** : c'est un point clé du séchage (cf. partie précédente). Il y a toujours des ventilateurs, plus ou moins nombreux. Il existe des systèmes de traitement de l'air dans le cas où la serre est fermée. Dans le cas inverse, la ventilation est puissante afin de permettre une dilution suffisante des mauvaises odeurs.

Quantité de boues	Sud (Espagne)	Nord (France)
200 t MS/an	540 m ²	680 m ²
600 t MS/an	1 600 m ²	2 000 m ²
1 000 t MS/an	2 670 m ²	3 390 m ²

Tableau 2 : ordre de grandeur de la surface d'une serre. Source : DEGRF MONT 2004

O QU'EN DIT-ON APRES REALISATION ET MISE EN ŒUVRE ?

Données techniques sur ce qui a été réalisé

Face au nombre grandissant de serres, cette étude se concentre sur quelques serres déjà existantes et représentatives de ce que l'on trouve en France. Elle ne prétend pas traiter exhaustivement de toutes les serres existantes.

Commune	EH	Surface m ²	T MS / an (estimation)	Siccité (en %)		Procédé	Date de mise en service	Source
				Initiale	Finale			
ANTONNIERE	7 300	1 100	180	15	75	Héliantis		ANTONNIERE, 2003
BEAUNE (21)	70 000	4 800	2 000	NC	NC	Ecodyer	février 2003	GARRIGUES, 2004 ; MAILLOT, 2001
BELLECOMBE (74)	16 000	1 500	320	18	80	Héliantis	janvier 2004	PATOIS, 2004
BRUMATH (67)	24 500	1 800	650	16	70	Héliantis		MIGUET, 2004
FORBACH (57)		250				Solia		
ILE d'YEU	> 5 000	600	100	18	> 85	Ecodyer	2002	TETYKERE, 2004
SALINDRES (30)	≈ 150 00	4 000	1 800	15	85	Ecodyer	2001	ADEME, 2001; MAILLOT, 2001; CLIQUOT DE MENTQUE, 2001
TOURETTES (83)	5 000	330	85			Ecodyer		MORTGAT, 2004
VIRE	50 000	4 320	470	NC	60	Héliantis	août 2005	MONTORI, 2004

Tableau 3 : caractéristiques de quelques installations de séchage.

Quelques retours d'expérience

◆ **Fonctionnement** : les retours d'expérience reçus sont favorables à cette technique. L'île d'Yeu, avec le procédé Ecodyer[®] n'a pas eu, pendant les deux années d'exploitation, de problème notoire. Le système est jugé « robuste, simple et efficace » (TETYKERE, 2004). Veolia Environnement (procédé Solia[®]) a testé pendant deux ans une serre à Forbach, et le retour est positif : la serre sera agrandie en 2005 pour traiter toutes les boues de la station d'épuration. Aucune nuisance ni problème n'ont été rencontrés (EBERHART, 2004).

◆ **Mise en service** : le syndicat de Bellecombe a mis en service, en janvier 2004, une serre de type Héliantis[®]. La première année d'exploitation s'est avérée délicate (PATOIS, 2004). Les travaux sur la station et la mise en route du filtre à bande ont fourni des boues pendant l'hiver 2004 à 14% de siccité (au lieu des 18% prévus). Aussitôt des problèmes de mélanges sont apparus : un excès de brassage (pourtant nécessaire afin d'éviter la fermentation) conduit à un changement de texture de la boue. Elle adopte un comportement thixotropique, c'est-à-dire pâteux, collant, comme une sorte de beurre. Par contre un nombre de brassages réduit (2 passages / jour) conduisait à un début de fermentation et les boues n'avançaient pas assez vite dans la serre (cf. tableau 2). La solution adoptée a consisté à ajouter des copeaux de bois et à pratiquer un brassage intense (30 passages / jour). Puis jusqu'à présent, à chaque arrêt du retourneur, des odeurs sont senties rapidement en moins d'une journée, à cause de l'entrée en fermentation. Dans le cas de Bellecombe (serre ouverte), il apparaît donc nécessaire de brasser en continu et de disposer, en entrée, de boues à plus de 18 % de siccité.

◆ **Atmosphère en serre fermée** : la température peut atteindre 65°C en été. Dans ces conditions, même s'il n'y a pas de formation de H₂S ou de COV, il y a une forte concentration

d'ammoniac dans la serre. Ces facteurs combinés rendent l'exploitation difficile, d'autant plus lorsque le retournement doit être assuré par une personne conduisant un tracteur – cas de Beaune, Ecodyer, (GARRIGUES, 2004). Outre ces conditions de travail difficiles, l'ammoniac n'est pas traité par le biofiltre, et ainsi il s'échappe dans l'atmosphère. Ce point est limitant pour ce qui concerne les serres fermées.

LES COUTS DE CETTE TECHNIQUE

O COUTS D'INVESTISSEMENT

Quels sont les prix du marché ?

Il est difficile de comparer les prix payés en investissement par les collectivités, car ceux-ci dépendent beaucoup de la taille des installations, du contexte local, de la concurrence présente localement, et d'autres facteurs encore. Quant aux coûts réels d'investissement, il est quasiment impossible de les reconstituer, tant les technologies sont propres aux fabricants. Le tableau 4 recense les différents prix payés pour quelques collectivités.

Commune	Investissement (€ HT)	Subventions éventuelles	Source
ANTONNIERE	GC : 110 000 € équipements : 385 000 €	Etat, département, agence de l'eau, pays du Mans soit ? 80 %	MORTGAT, 2004 ; ANTONNIERE, 2003
BEAUNE	1 370 000	NC	MAILLOT, 2001
BELLECOMBE	700 000 €	NC	PATOIS, 2004
BRUMATH	GC : 290 000 € équipements : 490 000 €	NC	MIGUET, 2004
ILE D'YEU	770 000 € (coût élevé car implantation sur une île)	ADEME, FEDER, Agence de l'eau, département, région soit ? 80 %	TETYKERE, 2004
SALINDRES (site industriel)	1 372 000 €	ADEME, FEDER, département, région soit ? 35 %	ADEME, 2001
VIRE	GC : 600 000 € équipements : 1 000 000 €	Agence de l'eau et département ADEME + région -> aide spécifique	MONTORI, 2004

Tableau 4 : prix payés par quelques collectivités lors de l'investissement dans une serre de séchage des boues.

Les prix semblent-ils cohérents ?

Ces prix se répartissent souvent en deux parties : le génie civil (construction des serres, sol en béton, abords aménagés,...) et les équipements (scarificateur, automates, station météorologique, ventilateurs, système de traitement de l'air,...). Ils varient selon les conditions locales. Par exemple l'île d'Yeu a des prix supérieurs car l'acheminement du matériel sur l'île a posé des contraintes supplémentaires.

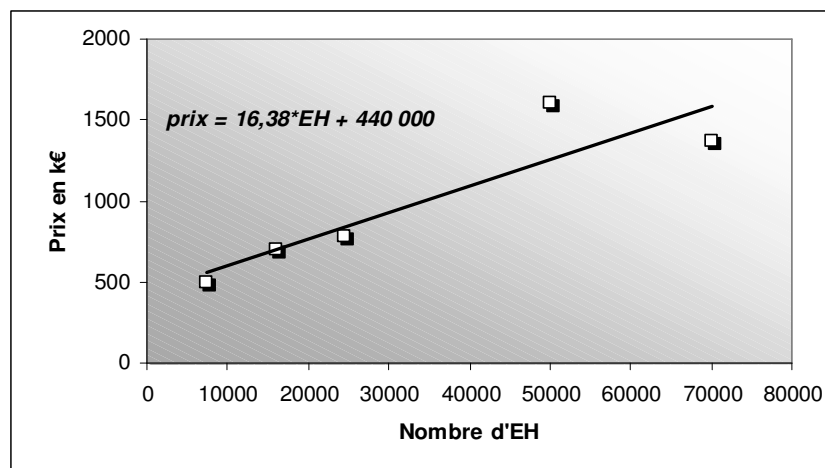


Schéma 4 : comparaison prix par EH payés par 5 collectivités (cf. tableau 4).

En dehors des cas de l'île d'Yeu et de Salindres (serre adaptée à des boues industrielles), les prix sont plutôt cohérent (cf. schéma n°4) : une partie fixe de 440 000 € environ (qui correspondrait environ aux équipements minimums) et une partie variable de 16 € environ par EH.

Quelles subventions mobiliser ?

Les investissements peuvent bénéficier d'aides publiques, de la même manière que l'investissement pour les stations d'épuration. De plus, des aides spécifiques peuvent être mobilisées, souvent en invoquant l'argumentation « écologique et environnementale » liée aux serres. Les organismes financeurs sont alors l'ADEME, les Conseils Régionaux, et dans certains cas le fonds européen de développement régional (FEDER). Les taux maxima de subvention observés grimpent jusqu'à 80 % du prix de la serre dans le cas de l'île d'Yeu et de l'Antonnière (cas des petites collectivités). Il faut cependant prêter attention aux aides liées au caractère innovant du procédé, qui ne se renouvelleront pas forcément en cas de généralisation dans les années à venir (cas des aides ADEME notamment).

O FRAIS D'EXPLOITATION

Les données précises concernant les coûts d'exploitation sont rares et le recul dont nous disposons est bien faible (quelques années d'exploitation tout au plus). Tout au plus trouve-t-on dans la littérature des ordres de grandeur, ou des énergies consommées. Cela vient du fait que ces coûts sont globalement faibles. Pour plus de détail, il faudrait consulter les comptes de gestion ou une comptabilité analytique des communes.

Frais proportionnels

Il s'agit principalement des frais d'électricité nécessaires aux automates, au scarificateur et aux ventilateurs. Cette énergie n'est pas utilisée pour sécher directement les boues. Pour le reste il s'agit de quelques réactifs pour le biofiltre et de carburant éventuellement. L'électricité consommée est globalement évaluée à **environ 100 kWh par tonne d'eau éliminée**. Cela donne un ordre de grandeur du coût, qui dépend du coût énergétique.

Frais fixes

Il s'agit là surtout des **frais de personnel**. Compte-tenu de l'automatisation des serres, le personnel requis est minimal : une intervention par jour d'une heure au maximum. Il faut toutefois ajouter le personnel technique destiné à la surveillance et l'entretien des installations et des automates. Il y a donc peu de personnel.

Autres charges

Les frais d'entretien sont limités à l'entretien des équipements, et de la structure de la serre. Pour l'instant, toutes les serres étant récentes (moins de 3 ans), ces **frais sont peu élevés**. Ce poste sera à surveiller dans le futur.

Des provisions pour renouvellement sont aussi prévues. Typiquement l'équipement est prévu pour durer une dizaine d'années, le génie civil une vingtaine, et la bâche de la serre entre 5 et 8 ans (TETYKERE, 2004).

Les frais d'exploitation pour la ville de Beaune sont donnés dans le schéma n°5 à titre d'exemple.

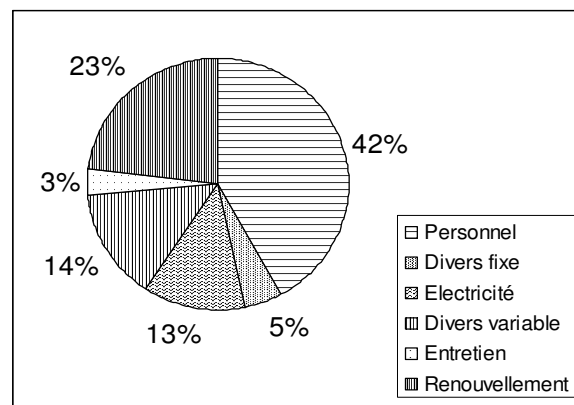


Schéma 5 : Répartition des frais d'exploitation de la serre pour la ville de Beaune. Source : HYDRATEC, 2001.

COMPARAISON AVEC LES AUTRES FILIERES DE SECHAGE

O DES COÛTS REDUITS POUR LE SECHAGE SOLAIRE

CHABRIER, 2001, effectue une revue détaillée des coûts des centrales de séchage thermique des boues. Nous baserons notre comparaison sur cet article, en reconstituant les coûts par rapport à sa méthode.

Investissement

Pour des installations de séchage thermique de taille inférieure à 100 000 EH, Chabrier évalue l'investissement à moins de 1 500 000 €. Ce coût est donc comparable aux prix d'investissement du séchage solaire (cf. tableau 4). Il existe néanmoins une taille minimale pour un sécheur thermique, et il est difficile voire impossible pour une « petite » collectivité (10 000 EH) d'installer une unité complète de séchage thermique.

Le séchage solaire apparaît alors comme une alternative intéressante au séchage thermique en ce qui concerne les collectivités de taille moyenne. Est-il alors pertinent de vouloir comparer exactement ces deux filières de séchage ?

Fonctionnement

- ◆ Frais proportionnels (en énergie électrique principalement)

Physiquement, il faut fournir une énergie variant entre 700 et 750 kWh/TEE⁷.

Compte-tenu des rendements des installations usuelles de séchage (séchage indirect par conduction, séchage direct par conduction, séchage

par lits fluidisés (PARDO, 1998)), la consommation d'énergie thermique s'établit entre 800 et 1 000 kWh/TEE (CHABRIER, 2001). Cette énergie est produite par combustion de gaz naturel ou de fuel. Il faut ajouter à cela la consommation électrique des installations, entre 35 et 100 kWh/TEE (CHABRIER, 2001).

	Energie utile au séchage (gaz ou fuel)		Energie pour les installations (électricité)		Source
	Consommation (kWh/t eau évaporée)	Prix (€/t eau évaporée)	Consommation (kWh/t eau évaporée)	Prix (€/t eau évaporée)	
Séchage classique	800 à 1000	15,70 à 19,50	35 à 100	1,80 à 5,30	CHABRIER, 2001
Séchage solaire	0	0	100 à 200	5 à 10	Données de l'étude

Tableau 5 : comparaison des principaux coûts proportionnels du séchage thermique et du séchage solaire.

- ◆ Frais fixes

- Personnel : dans le cas du séchage thermique il faut prévoir de nombreuses interventions (un ou plusieurs agents de conduite). Ces frais dépendent de la capacité du sécheur. Afin de pouvoir comparer avec le séchage solaire, il faut donc considérer les coûts des sécheurs de petite capacité (moins de 1 t/h). Les données retenues sont alors un agent à mi-temps et un technicien présent un jour sur trois (CHABRIER, 2001). En revanche dans le cas du séchage solaire, seul un agent présent une heure par jour (1/8 du temps) et un technicien deux journées par mois suffisent.

	Personnel	Coût personnel	Entretien courant	Sources
Séchage classique	1/2 agent 1/3 technicien	11,40 €/t eau évaporée environ	10 €/t eau évaporée	CHABRIER, 2001
Séchage solaire	1/8 agent 1/15 technicien	2,80 €/t eau évaporée environ	10 €/t eau évaporée	collectif

Tableau 6 : comparaison des principaux coûts fixes du séchage thermique et du séchage solaire.

- Entretien courant : on compte en moyenne 2,5% de l'investissement initial.

⁷ TEE : tonne d'eau évaporée.

◆ **Autres charges**

Il s'agit principalement des coûts d'amortissement technique et de renouvellement. Ces coûts sont extrêmement variables et difficilement chiffrables. La valeur donnée pour le séchage thermique oscille entre 22,90 € et 38,10 €/TEE (CHABRIER, 2001). Il faut ajouter à cela les coûts de renouvellement et gros entretien, qui s'estiment à 3% environ de l'investissement initial, soit 4,60 € à 9,10 €/TEE. En revanche ces coûts n'ont pas été chiffrés pour le séchage solaire. Il est donc difficile de les estimer.

◆ **Récapitulatif**

Les frais d'exploitation courants s'estiment :

- entre **38,9 € et 46,2 €/TEE pour le séchage thermique classique,**
- entre **17,8 € et 22,8 €/TEE pour le séchage solaire.**

A cela il faut ajouter les coûts d'amortissement technique et les frais de gros renouvellement.

O UN LARGE CHOIX DE DEBOUCHES POUR LES BOUES

Le séchage des boues de station d'épuration permet d'accéder à toutes les destinations finales des boues (cf. schéma n°1). Parmi les débouchés d'intérêt figurent l'épandage agricole ou le compostage sur une plate-forme de compostage. Ces deux solutions sont très prisées par les collectivités (cf. tableau 7).

Quelques installations essaient d'amender les boues séchées, en rajoutant de la potasse par exemple (PATOIS, 2004), pour fabriquer un engrais complet. Cet engrais peut ensuite être commercialisé, en se référant aux normes en vigueur : NFU 42 001 et 44 051 (ADEME, 2001).

On voit que l'incinération, ou co-incinération avec les ordures ménagères, n'est pas privilégiée, même si elle reste techniquement possible. Cela est sans doute dû à l'image négative de

l'incinération auprès de la population, et de la faible disponibilité des incinérateurs existants. Néanmoins cette solution est souvent envisagée comme une solution de secours en cas de défaillance de la filière d'épandage ou de compostage existante (PATOIS, 2004). Mentionnons également le coût de l'incinération, qui encourage aussi à trouver des débouchés plus économiques.

ILE D'YEU	Compostage	Utilisation par les espaces verts de la ville	TETYKERE, 2004
BELLECOMBE	Epandage agricole des boues séchées	Incineration possible si défaillance de la filière d'épandage. Idée en cours pour ajouter de la potasse et commercialiser un engrais complet (NPK)	PATOIS, 2004
VIRE	Epandage agricole des boues séchées	Projet de compostage	MONTORI, 2004
FORBACH	Centre d'enfouissement technique	Autres filières à l'étude	EBERHART, 2004
SALINDRES	Engrais	Valorisation et commercialisation selon les normes NFU 42 001 et 44 051	ADEME, 2001

Tableau 7 : quelques exemples de filières de valorisation des boues utilisées par des collectivités.

Concernant l'épandage agricole, il serait intéressant d'étudier si les boues séchées peuvent s'épandre sur tous les types de terrains agricoles. Ou y a-t-il des cultures ou terrains privilégiés/interdits ?

O UNE ACCEPTATION DU PUBLIC PLUS FACILE ?

Une image plus « saine » du traitement des boues

Même s'il n'a pas été évalué complètement, il est certain que le séchage solaire des boues peut plaire au public. Il déploie des arguments environnementaux faciles (réduction des émissions de gaz à effet de serre, utilisation d'énergies renouvelables,...). Il serait donc facile pour les collectivités concernées de mettre ces arguments en avant pour faire émerger le projet.

De plus l'aspect visuel des installations est plutôt rassurant : il s'agit d'une serre, comme celles utilisées en agriculture maraîchère. Cela donne davantage confiance aux riverains qu'une installation de séchage avec de grandes cheminées !

Y a-t-il des risques ?

Bien conduite, une installation de séchage solaire des boues ne doit pas présenter de risque particulier.

Dans le cas d'une serre ouverte (Héliantis[®]) en fonctionnement normal, les odeurs sont inexistantes car les boues sont brassées, et ainsi les particules émises dans l'atmosphère sont à la fois réduites et diluées dans de grands volumes d'air. Cependant si le scarificateur s'arrête pour une raison quelconque, des odeurs sont rapidement générées, qui indisposent rapidement le voisinage (exemple de la serre de Bellecombe, PATOIS, 2004). C'est le cas par exemple s'il faut intervenir sur le bras retourneur. Ces serres ont donc un fonctionnement qui présente quelques risques pour le voisinage (à distinguer des risques environnementaux).

Dans le cas des serres fermées des odeurs fortes sont ressenties dans la serre, dues à la fermentation le plus souvent. Il faut alors un dispositif efficace de traitement des odeurs. Si celui-ci vient à disfonctionner, ou si la serre n'est plus étanche, les conséquences sur le voisinage peuvent être importantes (des odeurs intenses, plus fortes que dans le cas d'une serre ouverte).

Les conditions de travail pour les opérateurs intervenant à l'intérieur des serres peuvent être parfois délicates (GARRIGUES, 2004). En effet, s'il y a fermentation, l'atmosphère dans les serres se remplit d'ammoniac, mercaptan et H₂S principalement. Ces gaz ne sont pas inoffensifs pour l'homme et il convient d'y prêter attention. De plus, en été, la température peut s'élever drastiquement dans les serres, jusqu'à 60-70°C, et ce d'autant plus qu'il peut y avoir des procédés complémentaires d'apport d'énergie. Là-aussi il convient d'y prêter attention, à la fois pour le personnel amené à intervenir dans les serres, et pour les matériaux utilisés dans la construction (le revêtement du sol par exemple ne devrait pas être en bitume, car il ne résisterait pas aux températures maximales observées).

Une étude des molécules gazeuses émises pendant les processus de fermentation de boues serait judicieuse dans ce cas, couplée à une analyse des molécules trouvées dans les atmosphères des serres.

En conséquence, les volets environnementaux (nuisances sur le voisinage) et conditions de travail doivent être étudiés avec soin lors des études de construction de serres, à la fois par le maître d'ouvrage et par le futur exploitant. Toutes les situations de fonctionnement doivent être envisagées.

Un gain environnemental ?

Afin de vérifier les arguments environnementaux, il serait utile de se reporter à une analyse de cycle de vie des boues qui sont séchées par ce dispositif. Il doit y avoir un gain

environnemental, encore faut-il le chiffrer. Les agences de l'eau ont entrepris des travaux dans ce sens, réalisés par le bureau d'études Arthur Andersen, mais ces travaux n'intègrent pas les boues séchées en serre. De même le cabinet de conseil PricewaterHouseCoopers a entrepris des études dans ce sens (VIAL, 2001), sans en conclure toutefois sur le séchage solaire des boues.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2001. Fabrication d'amendements à partir de sous-produits organiques d'origine agro-alimentaire à Salindres (30). [en ligne]. Disponible sur : <[www.ademe.fr/languedocroussillon/actualites/fiche_operation/sechage_Sous_Prod_Organ_AM_Eco_Industrie\(30\).pdf](http://www.ademe.fr/languedocroussillon/actualites/fiche_operation/sechage_Sous_Prod_Organ_AM_Eco_Industrie(30).pdf)> [consulté le 27.9.2004]

ANTONNIERE (communauté de communes), 2003. Avant projet à la construction de la station d'épuration et compte rendu de déroulement de la consultation. Document fourni par la communauté de communes de l'Antonnière.

BRUTSAERT Wilfried, 1982. Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications. Dordrecht, D. Reidel publishing company. 1982. 300 p.

CHABRIER Jean-Paul, 2001. Les différentes techniques de séchage en vue des différentes filières de valorisation et d'élimination des boues. Panorama européen. In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 29 p.

CLAVIES Nathalie, 1999. La gestion des boues d'épuration dans l'Union européenne. Synthèse technique. Montpellier, ENGREF; Limoges, Office International de l'Eau. 15 p.

CLIQUOT DE MENTQUE, 2001. Boues, les performances du séchage solaire. Environnement Magazine, octobre 2001. p. 65.

ONDEO DEGREMONT, 2004. Heliantis™, le séchage solaire des boues. Descriptif commercial.

ONDEO DEGREMONT, 2002. Séchage solaire des boues, Héliantis™. L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, novembre 2002, n°256 p.40

GARRIGUES Arnaud, 2004. Le boom du séchage. Hydroplus, septembre 2004, n°146. p. 28-37.

HUBER TECHNOLOGY, 2004. Sécheur solaire combiné Kult® combiné. Plaquette et présentation commerciale.

HYDRATEC, 2001. Analyses des différentes filières de traitement des boues. Document rédigé pour la ville de Beaune. Octobre 2001.

MAILLOT Max, 2001. Le séchage naturel : une nouvelle technique de traitement des boues urbaines et industrielles ? In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 18 p.

MICHEL Gérard, GRESLE Anne, 2003. Modélisation et dimensionnement des procédés de séchage solaire de boues. L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, décembre 2003, n°267. p. 55-58.

MIGUET Laurent, 2004. Séchoirs solaires pour boues d'épuration. Le Moniteur des Travaux Publics, 16 janvier 2004, n°5225, p. 62.

MISCHLER Jean François, 2004. Responsable commercial Nord Est France, Huber Technology, Barr. Entretien téléphonique du 15 novembre 2004.

MIZIER Marie-Odile, 2004. Traiter les boues pour mieux s'en séparer. L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, décembre 2003, n°267. p. 33-40.

MONTORI Jérôme, 2004. Responsable technique de la ville de Vire. Entretien téléphonique du 20 octobre 2004.

MORTGAT Bruno, 2004. Le séchage des boues, une filière qui préserve les options. Environnement et Techniques, juin 2004, n°237, p. 35-39.

NADEAU Jean Pierre, PUIGGALI Jean Rodolphe, 1995. Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Paris : Tec et Doc, 307 p.

PARDO Pierre-Emmanuel, 1998. Séchage thermique des boues de stations d'épuration utilité et perspectives. Synthèse technique. Montpellier, ENGREF; Limoges, Office International de l'Eau.

PATOIS Luc, 2004. Directeur de syndicat d'assainissement de Bellecombe. Entretien téléphonique du 16 novembre 2004.

TETYKERE Christian, 2004. Responsable technique de la commune de l'Île d'Yeu. Entretien téléphonique du 23 novembre 2004.

VIAL Estelle, 2001. Evaluation des filières de traitement des boues. In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 11 p.



TECHNICAL SYNTHESIS

THE SOLAR DRYING OF URBAN SLUDGE

MANGIN Guillaume

E-mail: guillaume.mangin@polytechnique.org

February 2005

ENGREF Centre de Montpellier
B.P.44494 –
34093 MONTPELLIER CEDEX 5
Tél. (33) 4 67 04 71 00
Fax (33) 4 67 04 71 01

OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – SNIDE
15, rue Edouard Chamberland
87065 LIMOGES Cedex
Tél (33) 5 55 11 47 47
Fax (33) 5 55 11 47 48

ABSTRACT

Both solar energy and the greenhouse effect may be used in a new sense to dry sludge produced by waste water treatment plants. This technique is known as the solar drying of urban sludge. Sludge is introduced in a large greenhouse and thanks to an important air ventilation and solar heat, sludge can easily dry. Little equipment is involved in the drying processes. Sometimes odours can be produced by sludge and contaminate both the environment and its inhabitants. To avoid those unpleasant effects some builders install air filtering facilities that allow only fresh air to escape outside.

Some of these installations are already built or are in preparation. But it is extremely difficult to estimate both costs and size. It is rather expensive for one municipality (ranging between 500 000 € and 1 500 000 €) but it is less expensive than classical thermal drying processes. Operational costs are also cheaper because they consist mostly of electricity for the equipment only.

To compare with classical thermal drying, costs are really lower. The techniques are also simpler in the case of solar drying and it requires fewer human interventions, additional costs too.

Solar drying sits very comfortably alongside sustainable development theory. In consequence this use of solar drying installations will probably increase in the years to come.

KEY-WORDS

SEWAGE SLUDGE, WASTE WATER TREATMENT PLANT, SOLAR DRYING, GREENHOUSE EFFECT, INVESTMENT AND OPERATIONAL COSTS, PROCESS AND EQUIPMENT, TECHNICAL FEEDBACK, RISKS, ENVIRONMENTAL ISSUES.

INTRODUCTION

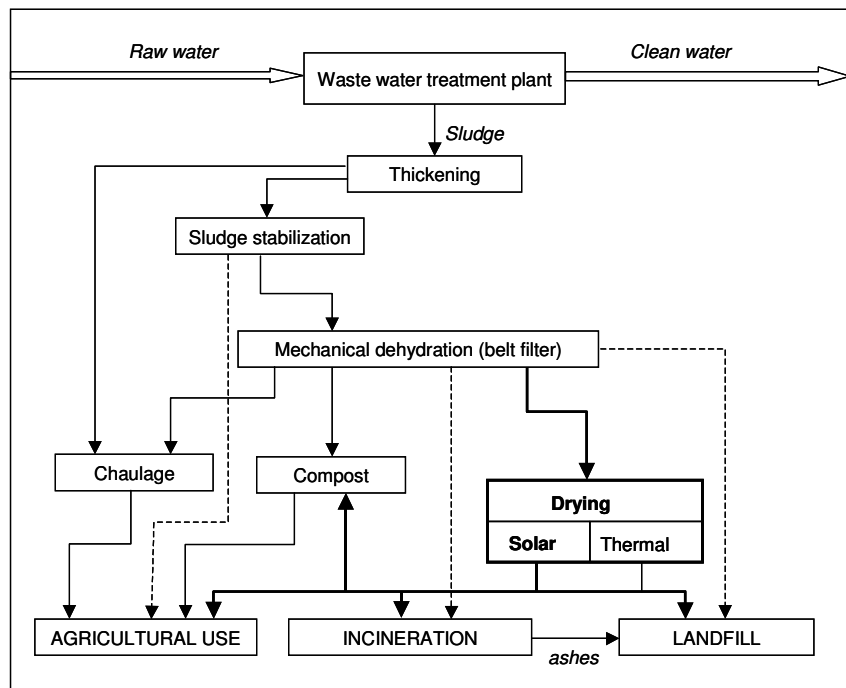
In order to treat water, wastewater treatment plants¹ produce sludge that has to be treated. Each population equivalent² produces between 50 to 80 g of sludge (dry weight³) (MIZIER, 2003), depending on the process of the WWTP involved. French total urban sludge production is expected to rise from 878 000 t DW in 1998 (CLAVIES, 1999) to 1 300 000 t DW in 2005 (GARRIGUES, 2004).

Because of the 1992 French water law and its consequences, a minimum treatment of sewage sludge is compulsory. In order to satisfy the law, sludge can be dried (this is a technique). Solar drying is a particular process of drying (cf. scheme n°1).

Only three final destinations for sludge exists: agricultural use, incineration and landfilling.

Drying sludge has several advantages: a bulk reduction of 4 or 5 times in comparison to the volume before thickening (MAILLOT, 2001), sludge stabilization by end of fermentation when solid content⁴ has reached a certain value (GARRIGUES, 2004).

Solar drying has several unique advantages: the required energy is mostly reduced, sludge can be stored for a long period without any constraints, and, moreover, it is quite easy to make a solar drying installation work.



Scheme n°1: overview on sludge treatment processes.

The solar drying process is relatively recent and was developed in Germany in 1994. In France AMEcoIndustries tried early in 2000 to sell this process (EcoDryer™) to middle sized WWTP (5 000 to 10 000 EH). Then this process has been quickly generalized by other firms, such as Degrémont (Héliantis™), CGE (Solia™) or SAUR (Héliocycle™). German manufacturers include Thermo-System and Huber Technology.

¹ WWTP

² PE. 1 PE = 60 g of BDO/day.

³ DW

⁴ solid content = dry weight of sludge / total weight of a sludge sample. In French : la siccité.

HOW IS SEWAGE SLUDGE DRIED ?

O A PHYSICAL OVERVIEW OF THE DRYING TECHNIQUE

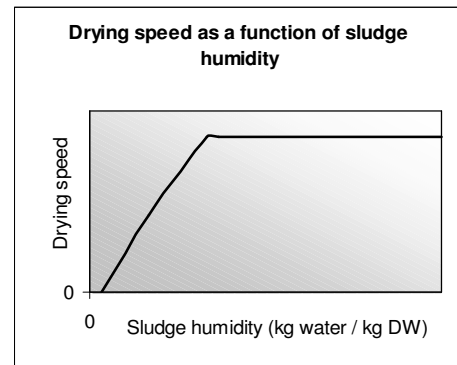
Thermodynamics

At the beginning water is located inside the sludge and has to be removed. Hence its final location will be outside the greenhouse. Between these two states and during the drying period several thermodynamic processes are involved.

First the liquid water, which is at the beginning inside the sludge, has to evaporate. The required energy for this operation depends on water properties (latent heat of vaporization) and on the **ability of the ambient air to increase its humidity**. This ability is linked to the difference between the humidity of the surrounding air⁵ and the humidity of the air saturated in water vapour (MICHEL et GRESLE, 2004). The more humid the air is, the harder it is to evaporate more water.

So the heart of the drying relies on the ability of the surrounding air to increase its humidity. The best way to increase the efficiency of the drying process is hence to decrease the humidity of the air inside the greenhouse. This can easily be obtained with an intense flow of air through the greenhouse.

We have also to take into account water transfers within the sludge. If the sludge is entirely wet, the drying is fast because the contact area between the sludge and the air is full of water. In this case the drying process has a constant speed. Conversely, if the sludge has a high siccidity, the water inside the sludge has to move towards the layer sludge/air to be evaporated (NADEAU et PUIGGALI, 1995). In consequence the drying process slows down and the drying depends more on the humidity of the sludge (see scheme n°2).



Scheme n°2 : drying speed as a function of sludge humidity, from MICHEL, GRESLE, 2004

In this second case, the apparition of a crust on the sludge is observed inside a greenhouse, which slows down the efficiency of drying. **This crust has to be broken** (MICHEL et GRESLE, 2004).

To complete those descriptions, two conservation equations are given below (MICHEL et GRESLE, 2004):

□ Air:

$$\Delta \left(\begin{array}{l} \text{Internal energy of the air} \\ \text{along the greenhouse} \\ \text{(proportional to temperature)} \end{array} \right) = \begin{array}{l} \text{Heat used to} \\ \text{evaporate water} \\ \text{on the sludge} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Convection exchange} \\ \text{with sludge} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Convection exchange} \\ \text{with walls} \end{array}$$

The air inside the greenhouse exchanges energy with the sludge and the greenhouse walls by a convection phenomena. This air also gives its energy to the water in the sludge to make it evaporate. Consequently this air increases its humidity.

□ Sludge:

$$\begin{array}{l} \text{Heat used to} \\ \text{evaporate water} \\ \text{(proportional to the} \\ \text{difference of humidity)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Heat coming} \\ \text{from the sun} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Convection exchange} \\ \text{with air} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Convection exchange} \\ \text{with ground} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Other energy sources} \\ \text{(black body emission,} \\ \text{sludge fermentation,..)} \end{array}$$

⁵ Quantity of water vapour inside the air can be defined as humidity. "Humidity is defined as the mass of water vapour per unit mass of dry air" (BRUTSAERT, 1982).

The energy used to evaporate water comes from the sun (solar energy), from air and ground exchanges and from other energy sources: fermentation, exothermal chemical reactions, heating of the sludge by artificial means,...

Further information

Mixing and scarifying have several objectives:

- to avoid fermentation processes that would provoke nasty smells and undesirable particles,
- to increase the exchange surface between air and sludge,
- to take the water located deep in the sludge to the top and hence to increase the drying speed (see scheme n°2).

In the northern part of France the sun is only efficient during summertime. So, in bad conditions, drying is only permitted for 3 or 4 months per year. During summertime the drying is quite fast and two weeks are enough to dry a significant amount of sludge (MICHEL et GRESLE, 2004 ; TETYKERE, 2004). This point is important to correctly size the greenhouse. **The greenhouse may have to store liquid sludge for a period as long as 8 to 9 months.**

O WHAT TECHNIQUES ARE USED ?

◆ **Greenhouse:** generally made with transparent plastic or glass, it is designed to maximise the greenhouse effect. Those greenhouses are the same as those used in agriculture. Even if there exists no general rule, several factors need to be taken into account to compute the size of a greenhouse. Among them:

	Héliantis™	Solia™	Ecodyer™	KULT™ SRT
GREENHOUSE				
Particularities	50 to 120 m by 10 m	OK	OK	Water and air circulation in the ground under the greenhouse.
Opened ?	Yes	No	No	Yes/No
SLUDGE	Are put in beds. Go forwards during drying. Raw sludge at the beginning and drying sludge at the end.	Put on 1m high windrow.	Do not move.	Put inside the greenhouse. No storage available.
MIXER				
Description	A big machine perpendicular to the greenhouse.	Windrows are just turned over (like compost).	Electrical "boar", which wanders inside the greenhouse and turns sludge.	Machine like the one for Héliantis. Air circulation can also be used.
Working	The turning machine goes slightly forwards and take sludge a little bit (50 cm) forwards each time.	Turning by men intervention.	Electrical "boar" wanders randomly. It turns sludge when it passes.	The machine goes forwards, without making sludge go forwards.
AIR FILTERING SYSTEMS	No odour treatment. Odours are diluted outside the greenhouse with an intense flow of water.	Biofilter	Biofilter	Pouzzolan filter if the greenhouse is closed, no filter if the greenhouse is opened.
OTHER ENERGY SOURCES	No	No	No	Heat pump, the cold source being treated water running off the WWTP.
References	DEGREMONT, 2002 ; DEGREMONT, 2004	EBERHART, 2004 ; MORTGAT, 2004	TETYKERE, 2004 ; ADEME, 2001 ; MORTGAT, 2004 ; MAILLOT, 2001	MISCHLER, 2004 ; HUBER TECHNOLOGY 2004

Table n°1: technical characteristics of some commercial processes.

- initial and required (final) siccidity,
 - amount of sludge to store during wintertime,
 - exposure to solar energy (north or south of France),
 - industrial process involved (depending on the manufacturer).
- ◆ The **ground**: must be impermeable and drained. Usually it consists of a concrete layer.

◆ **Sludge:** the position and evolution of the sludge depend on the process used. The sludge can be laid on the ground (20 to 50 cm thick), or put in windrows.

◆ **Scarifier** (or mixer): is a characteristic of the process (described in patents).

◆ **Ventilation:** is a key point of the drying process (see above). There are always ventilators, both to take air outside and to mix air in the greenhouse. If the greenhouse is completely closed, there are also air filtering systems to remove any odour from the air. If the greenhouse is open, ventilation is strong enough to permit a sufficient dilution of odours.

	South (Spain)	North (France)
200 tDW/year	540 m ²	680 m ²
600 tDW/year	1 600 m ²	2 000 m ²
1 000 tDW/year	2 670 m ²	3 390 m ²

Table n°2: size of some greenhouses. Source: DEGREMONT, 2004.

O WHAT ABOUT EXISTING GREENHOUSES ?

Technical data about existing greenhouses.

There are more and more greenhouses built and it is now almost impossible to give a precise review of all existing greenhouses. Consequently this work focuses on only a few representative greenhouses.

Collectivities	PE	Surface m ²	tDW/year (estimation)	Siccidity (%)		Patent	Implementation time	Source
				Initial	Final			
ANTONNIERE	7 300	1 100	180	15	75	Héliantis™		ANTONNIERE, 2003
BEAUNE (21)	70 000	4 800	2 000	NC	NC	Ecodyer™	februar 2003	GARRIGUES, 2004 ; MAILLOT, 2001
BELLECOMBE (74)	16 000	1 500	320	18	80	Héliantis™	january 2004	PATOIS, 2004
BRUMATH (67)	24 500	1 800	650	16	70	Héliantis™		MIGUET, 2004
FORBACH (57)		250				Solia™		
ILE d'YEU	> 5 000	600	100	18	> 85	Ecodyer™	2002	TETYKERE, 2004
SALINDRES (30)	? 150 000	4 000	1 800	15	85	Ecodyer™	2001	ADEME, 2001; MAILLOT, 2001; CLIQUOT DE MENTQUE, 2001
TOURETTES (83)	5 000	330	85			Ecodyer™		MORTGAT, 2004
VIRE	50 000	4 320	470	NC	60	Héliantis™	august 2005	MONTORI, 2004

Table n°3: characteristics of some drying installations.

Technical feedback

◆ **Working:** what I heard about solar drying was mainly positive. At Yeu island the Ecodyer™ process worked perfectly during its two first years. This system is described as “robust, simple and efficient” (TETYKERE, 2004). Veolia Environnement (Solia™ process) has been conducted for two years in an experimental greenhouse in Forbach. This experiment was positive: the greenhouse will be extended to treat all the sewage sludge from the city. No nuisance or problems have been encountered (EBERHART, 2004).

◆ **Implementation :** the sewage syndicate of Bellecombe built a solar drying installation in January 2004. In 2004 many problems appeared. At the beginning, and because of works in the WWTP and especially in the belt filter, the sludge had a siccidity of 14% (instead of the 18% required). Quickly a thixotropic behaviour of the sludge was observed: if there was an excess of mixing, the sludge changed its state and became pasty and sticky, like butter. On the other hand if there was not enough mixing (only twice a day), the sludge began to ferment. The solution was to put wood shavings in the sludge, and to mix it about 30 times per day (PATOIS, 2004).

It has also been observed that if the mixer stops, nasty smells are quickly generated within a few hours. Hence it is necessary to mix as in the case of Bellecombe.

◆ **Atmosphere in a closed greenhouse:** temperature can reach as high as 65°C. In parallel even if there is no H₂S or VOC⁶ detected, there is a high concentration of NH₃ inside the greenhouse. These two factors (temperature and NH₃) create bad working conditions for people inside the greenhouse (an engine driver for example – Beaune - Ecodryer™ process) (GARRIGUES, 2004). Moreover NH₃ cannot be treated by a biofilter and hence NH₃ goes directly into the atmosphere.

COSTS OF THIS TECHNIQUE

O INVESTMENT COSTS

What are market prices ?

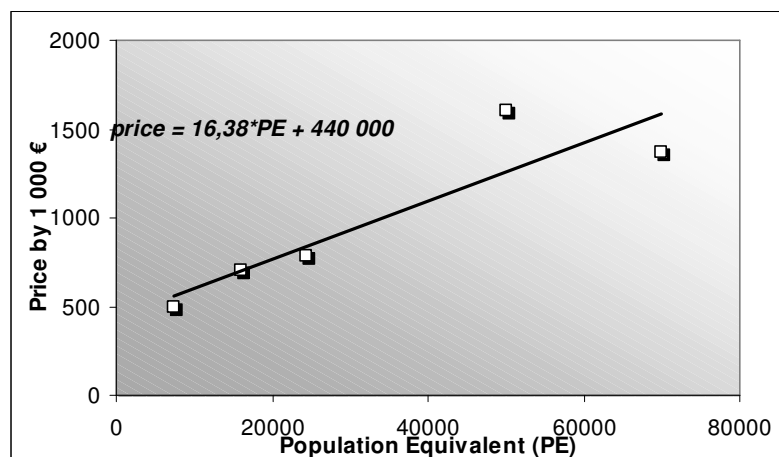
There is hardly any sense in comparing the investment prices paid by collectivities, because these prices depend much on installation sizes, on local contexts, on local competition and on other factors. Real investment costs are even harder to compute because technology belongs to industry and is a secret. Prices paid by some collectivities are set out in table 4.

Collectivity	Investment (€ without tax)	Subsidies	Source
ANTONNIERE	CE : 110 000 € equipments : 385 000 €	State, department, water agency, "pays du Mans" about ? 80 %	MORTGAT, 2004 ; ANTONNIERE, 2003
BEAUNE	1 370 000	NC	MAILLOT, 2001
BELLECOMBE	700 000 €	NC	PATOIS, 2004
BRUMATH	CE : 290 000 € equipments : 490 000 €	NC	MIGUET, 2004
ILE D'YEU	770 000 € (high cost because located on an island)	ADEME, FEDER, Water agency, department, Region about ? 80 %	TETYKERE, 2004
SALINDRES (site industriel)	1 372 000 €	ADEME, FEDER, department, Region about ? 35 %	ADEME, 2001
VIRE	CE : 600 000 € equipments : 1 000 000 €	Water agency and department ADEME + Region -> specific subsidy	MONTORI, 2004

Table n°4 : investment prices paid by some collectivities.

Are prices coherent ?

Prices generally include two parts: civil engineering (greenhouse building, concrete for walls,...) and equipment (mixer, automatons, weather station, air filtering systems,...). These two parts depend on local conditions. For example they are more expensive prices on Yeu Island because of boat transportation from France.



Scheme n°4: comparison of prices paid by 5 collectivities.

Yeu island and Salindres apart (this is a greenhouse made for industrial use) excluded, prices are rather coherent (cf. scheme n°4): a constant price (around 440 000 €, which represents minimum equipments for example) added to an adjusted price. This adjusted price is about 16 € per PE⁷.

⁶ VOC: Volatile Organic Compound

⁷ PE = population equivalent.

Can solar drying processes be subsidised?

Public subsidies can be given only to initial investments in solar drying processes, in the same way as for sewage treatment plants. Specific subsidies can also be granted, linked to the “environmental and ecological” assets of solar drying processes. These specific subsidies are generally given by the ADEME (association for the environment and the control of energy), by the Regional Councils (the French “Régions”), and by European FEDER funds. Maximum subsidies rates can reach as much as 80 % of the investment price. This was the case in respect of Yeu island and of the Antonnière (small communities).

O OPERATIONAL COSTS

Precise data about operational costs are scarce and **there is almost no common experience** in the way it works. At best there are 3 or 4 years of working at maximum. In the literature a few scales of prices or energy are given. But for more detail one should have a look at communities account departments, for each community having a solar drying process.

Proportional operational costs

These costs consist mainly of electricity for automation, for the mixer and ventilators. This electrical energy is not used to dry sludge. Other proportional operational costs are some added products in the biofilter (if it exists) and petrol in cases where the mixer is a manually operated tractor.

Electricity used is **about 100 kWh per ton of water evaporated⁸**. This can give an idea of proportional operational costs.

Constant operational costs

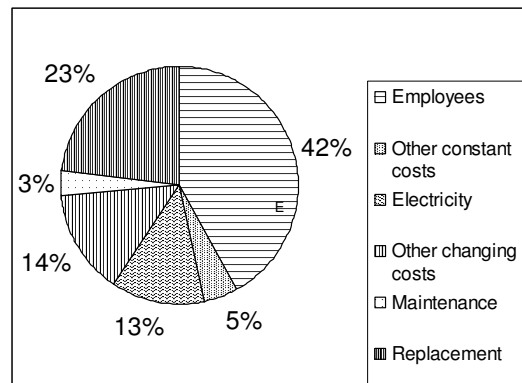
It is mainly the cost of employees. Greenhouses being automatic, required employees are minimum: one intervention of about one hour per day at the most. This intervention can be made by employees from the sewage treatment plant. Greenhouses also require technicians to tend to the installations and the automatons, about one intervention per month when everything is functioning normally. There are hence very few employees employed exclusively in respect of solar drying systems.

Other operational costs

Maintenance costs are limited to the maintenance of the installations and of the greenhouse. At the moment, all existing greenhouses being relatively recent (less than 4 years old), **maintenance costs are low**. But one should continue to monitor these costs in the future.

Reserves for replacements of the installations are also foreseen. Equipment should be replaced every 10 years approximately, civil engineering and concrete every 20 years and the greenhouse roof (made of glass or plastic) every 8 years at the most (TETYKERE, 2004).

Operational costs for the city of Beaune are given in scheme n°5 as an example.



Scheme n°5: operational costs for the solar drying installations of Beaune. Source : HYDRATEC, 2001.

⁸ Ton of Water Evaporated (TWE) is the quantity of water which evaporate during the drying period in the greenhouse.

COMPARISON WITH OTHER DRYING TECHNIQUES

O REDUCED COSTS: SOLAR DRYING

CHABRIER, 2001 wrote a review containing all costs relating to thermal drying techniques⁹. This present comparison is based on this paper, in particular the method employed to compute costs is the same.

Investment

According to Chabrier, for thermal drying plants of a capacity smaller than 100 000 PE, the investment is less than 1 500 000 €. So this investment cost seems to be of the same magnitude as the price paid for solar drying installations (cf. table 4). However there exists a minimal size for thermal drying plants, and it is difficult, if not impossible, for small collectivities (less than 10 000 PE) to build an entire thermal drying plant.

Solar drying hence appears as an interesting solution for these small collectivities. So is the following comparison really relevant?

Operational costs

◆ Proportional costs (mainly electrical costs)

According to a physical rule, an energy ranging between 700 and 750 kWh/TWE has to be given to dry wet sludge. Because of the efficiency of the usual drying machines, the energy used to dry

	Energy used to dry (gaz or fuel)		Electrical energy		Source
	Consumption (kWh/TWE)	Price (€/TWE)	Consumption (kWh/TWE)	Price (€/TWE)	
Thermal drying	800 à 1000	15,70 à 19,50	35 à 100	1,80 à 5,30	CHABRIER, 2001
Solar drying	0	0	100 à 200	5 à 10	From this study

Table n°5: comparison of main proportional costs of thermal and solar drying.

sludge ranges between 800 and 1 000 kWh/TWE (CHABRIER, 2001). This energy is produced by gas or fuel combustion. The electrical consumption of machines, estimated between 35 and 100 kWh/TWE (CHABRIER, 2001) must also be added.

◆ Constant costs

- Employees: numerous interventions are needed in the case of thermal drying (one or several technicians). These costs depend on drying capacity. In order to compare with solar drying, costs for small plants (less than 1T/h) have to be taken into account.

	Employees	Cost of employees	Current maintenance	Sources
Thermal drying	1/2 employee 1/3 technician	about 11,40 €/TWE	10 €/TWE	CHABRIER, 2001
Solar drying	1/8 employee 1/15 technician	about 2,80 €/TWE	10 €/TWE	this study

Table n°6: comparison of main constant costs of thermal and solar drying.

In this case it is one employee half-day

and one technician one day in three (CHABRIER, 2001). On the contrary, for solar drying, only one employee one hour per day and one technician two days per month are enough.

- Current maintenance: 2,5 % of the initial investment is a good estimation of these costs.

◆ Other costs

These other costs are technical amortization, replacement and forecast maintenance. They are extremely unreliable and hardly computable. The given value for amortization in the case of thermal drying ranges between 22,90 and 38,10 €/TWE (CHABRIER, 2001). Replacement and

⁹ The expression « thermal drying » is used in reference to all the techniques of drying different from solar drying.

forecast maintenance are about 3% of the initial investment, which is between 4,60 and 9,10 €/TWE. These costs have not been computed for solar drying. It is very hard to compute them.

◆ Summary:

Operation costs can be estimated between:

- **38,9 € and 46,2 €/TWE for thermal drying,**
- **17,8 € and 22,8 €/TWE for solar drying.**

Technical amortization, replacement and forecast maintenance also have to be added.

O MANY OPPORTUNITIES FOR DRIED SLUDGE

Dried sludge coming from sewage treatment plants can have access to all the existing final destinations of sludge (cf. scheme n°1). Among interesting destinations are agricultural use and compost on a composting station. These two solutions are used by many French collectivities (cf. table 7).

Some drying installations are trying to increase the quality of sludge, by the addition of

potash for example (PATOIS, 2004), in order to make a complete fertilizer. Then this fertilizer can be sold, in agreement with the standards NFU 42 001 and 44 051 (ADEME, 2001).

Incineration, or co-incineration with refuse, is not really used by collectivities, even if it is technically achievable. It may be due to a strong opposition of the population against incineration, and to the lack of availability of incinerators. However this solution is generally seen as an emergency solution in the case where the agricultural use fails (PATOIS, 2004). Another reason is that incineration costs encourage collectivities to find another solution for sludge destination.

In so far as agricultural use is concerned, it would be interesting to study if dried sludge can be put onto all kinds of soils, or if there is a restriction for certain types of plants.

Collectivity	Final destination for sludge	Comments	Source
ILE D'YEU	Compost	Used by city services	TETYKERE, 2004
BELLECOMBE	Agricultural use of dry sludge	Possible to incinerate sludge if failure of the agricultural use. Idea to create a complete fertilizer.	PATOIS, 2004
VIRE	Agricultural use of dry sludge	Compost into project	MONTORI, 2004
FORBACH	Landfilling	Other final destinations are studied	EBERHART, 2004
SALINDRES	Fertilizer	In agreement with standards NFU 42 001 et 44 051	ADEME, 2001

Table n°7: some examples of final destinations for the sludge of collectivities.

O A WAY TO CONVINCING THE POPULATION ?

A more eco-friendly vision of sludge ?

Even if there is no complete assessment which has been carried out, the population may like the solar drying of sewage sludge. This technique uses striking environmental arguments, such as the reduction of CO₂ emissions, the use of renewable energy,... Hence it would be easy for collectivities to use these arguments in order to obtain the agreement of the population.

Moreover, the visual aspect of installations of solar drying is quite familiar: it is a greenhouse, like those used in agriculture to make vegetables grow. This can give more confidence to the local population – certainly when compared to the large chimney of a thermal drying plant !

Are there risks?

In good working conditions, a solar drying installation has no particular risk involved.

In the case of an open greenhouse (Héliantis™), there are no odours because sludge is mixed and hence odours are both reduced at emission and diluted in huge air volumes. However, if the mixer stops for any reason, odours are quickly produced, and can quickly trouble the

surrounding population (example of the installation of Bellecombe, PATOIS, 2004). This is the case for example if an intervention is required on the mixer. These kinds of greenhouses have hence some risks towards local neighbourhoods (these risks are different from environmental risks).

In the case of closed greenhouses, deep odours are smelt into the greenhouse, because of fermentation processes that take place into the greenhouse. An odour treatment device is then needed. If this system does not work correctly at any moment, the greenhouse is no more closed and consequences on the neighbourhood may be important (strong odours in particular, more than in the case of an open greenhouse).

Working conditions for workers inside the greenhouse may be difficult (GARRIGUES, 2004). Indeed, if there is fermentation, the atmosphere of the greenhouse contains ammoniac (NH_3), mercaptan and H_2S mainly. These gasses are toxic for humans and workers should pay attention to them. Moreover, during summertime, temperatures can reach as high as 60-70°C, all the more that there can be other energy supply. It is also a point to pay attention to, both for personnel and for the choice of building materials. For example the soil should not be in asphalt, because asphalt does not resist to high temperatures.

A study of the molecules emitted during fermentation processes would be judicious in this case. This study could be carried out in parallel with an analysis of the molecules found in the atmosphere of the greenhouses.

Consequently, environmental aspects (neighbourhood annoyances) and working conditions should be studied with a good deal of care before building. All the working situations must be examined.

Is there an environmental gain?

In order to check the environmental arguments given, it would be useful to refer to a life cycle analysis of sludge dried by the sun. This life cycle analysis would quantify the environmental gain. One water agency has begun a study in this sense (work carried out by Arthur Andersen) but this work does not take into account solar dried sludge (AGENCES DE L'EAU, 1999). In the same way, PricewaterHouseCoopers worked in this field of life cycle analysis (VIAL, 2001), but without any conclusion about the solar drying of sewage sludge.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2001. Fabrication d'amendements à partir de sous-produits organiques d'origine agro-alimentaire à Salindres (30). [en ligne]. Disponible sur : <[www.ademe.fr/languedoc-roussillon/actualites/fiche_operation/sechage_Sous_Prod_Organ_AM_Eco_Industrie\(30\).pdf](http://www.ademe.fr/languedoc-roussillon/actualites/fiche_operation/sechage_Sous_Prod_Organ_AM_Eco_Industrie(30).pdf)> [consulté le 27.9.2004]

AGENCES DE L'EAU, 1999. Audit environnemental et économique des filières d'élimination des boues d'épuration urbaines. Les études de l'agence n°70. Septembre 1999

ANTONNIERE, 2003. Avant projet à la construction de la station d'épuration et compte rendu de déroulement de la consultation. Document fourni par la communauté de communes de l'Antonnière.

BRUTSAERT Wilfried, 1982. Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications. D. Reidel publishing company. 1982. 300 p.

CHABRIER Jean-Paul, 2001. Les différentes techniques de séchage en vue des différentes filières de valorisation et d'élimination des boues. Panorama européen. In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 29 p.

CLAVIES Nathalie, 1999. La gestion des boues d'épuration dans l'Union européenne. Synthèse technique pour l'ENGREF et l'OIEau.

CLIQUOT DE MENTQUE, 2001. Boues, les performances du séchage solaire. Environnement magazine, octobre 2001. p. 65.

DEGREMONT, 2004. Heliantis™, le séchage solaire des boues. Descriptif commercial.

DEGREMONT, 2002. Séchage solaire des boues, Héliantis™. L'eau, l'industrie, les nuisances, novembre 2002, volume spécial : le guide des nouveautés.

GARRIGUES Arnaud, 2004. Le boom du séchage. Hydroplus, septembre 2004, n°146. p. 28-37.

HUBER TECHNOLOGY, 2004. Sécheur solaire combiné Kult® combiné. Plaquette et présentation commerciale. Fournis par M. Mischler.

HYDRATEC, 2001. Analyses des différentes filières de traitement des boues. Document rédigé pour la ville de Beaune. Octobre 2001.

MAILLOT Max, 2001. Le séchage naturel : une nouvelle technique de traitement des boues urbaines et industrielles ? In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 18 p.

MICHEL Gérard, GRESLE Anne, 2003. Modélisation et dimensionnement des procédés de séchage solaire de boues. L'eau, l'industrie, les nuisances, décembre 2003, n°267. p. 55-58.

MIGUET Laurent, 2004. Séchoirs solaires pour boues d'épuration. Le moniteur des travaux publics, 16 janvier 2004, n°5225, p. 62.

MISCHLER Jean François, 2004. Responsable commercial Nord Est France, Huber Technology, Barr. Entretien téléphonique du 15 novembre 2004.

MIZIER Marie-Odile, 2004. Traiter les boues pour mieux s'en séparer. L'eau, l'industrie, les nuisances, décembre 2003, n°267. p. 33-40.

MONTORI Jérôme, 2004. Responsable technique de la ville de Vire. Entretien téléphonique du 20 octobre 2004.

MORTGAT Bruno, 2004. Le séchage des boues, une filière qui préserve les options. Environnement et techniques, juin 2004, n°237, p. 35-39.

NADEAU Jean Pierre, PUIGGALI Jean Rodolphe, 1995. Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Paris : Tec et Doc, 307 p.

PARDO Pierre-Emmanuel, 1998. Séchage thermique des boues de stations d'épuration utilité et perspectives. Synthèse technique pour l'ENGREF et l'OIEau.

PATOIS Luc, 2004. Directeur de syndicat d'assainissement de Bellecombe. Entretien téléphonique du 16 novembre 2004.

TETYKERE Christian, 2004. Responsable technique de la commune de l'Île d'Yeu. Entretien téléphonique du 23 novembre 2004.

VIAL Estelle, 2001. Evaluation des filières de traitement des boues. In : séminaire traitement des boues. Décembre 2001. (Organisateur : Euroforum) 11 p.