



Les différentes filières de traitement et de valorisation des boues

Sommaire

► Contexte & Généralités

► Les différentes techniques de traitement

- Filières intégrées : lagunages & Lits plantés de roseaux
- Epaissement
- Déshydratation
- Séchage

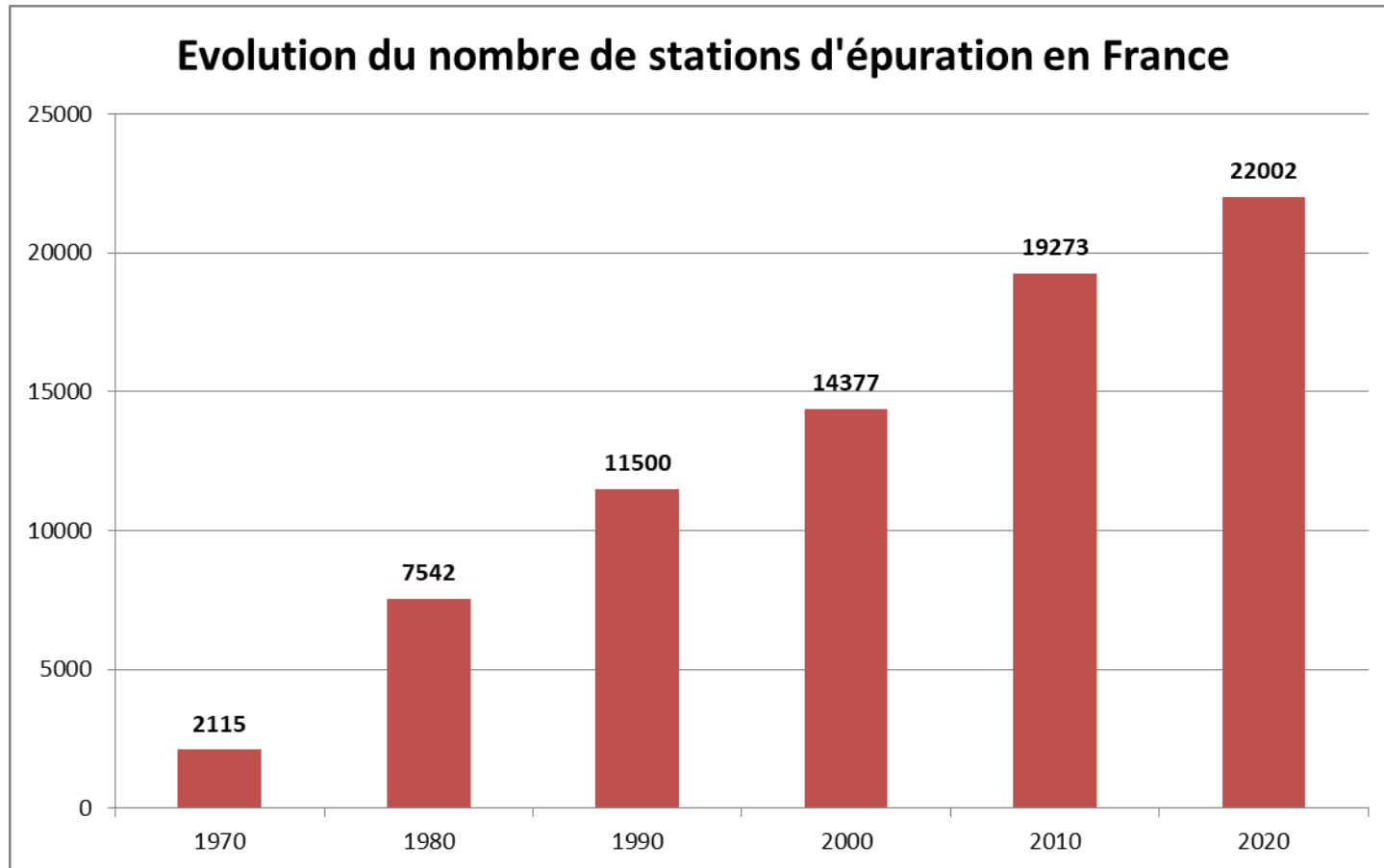
► Les différentes formes de valorisation

- > Valorisation matière
 - Epandage agricole
 - Compostage
- > Valorisation énergétique
 - Incinération
 - Méthanisation



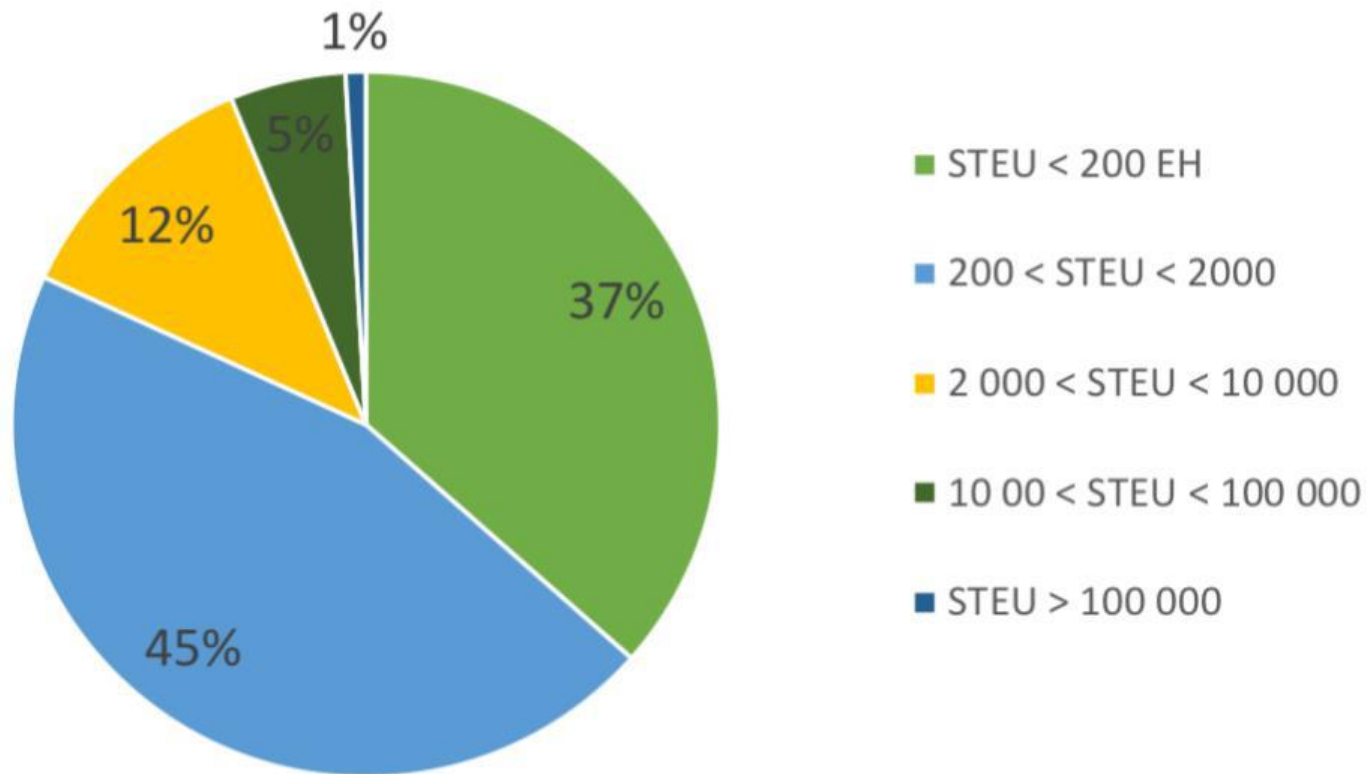
Contexte & Généralités

Les stations d'épuration en France



22 000 stations de traitement des eaux domestiques
Capacité épuratoire globale de 105 millions d'EH

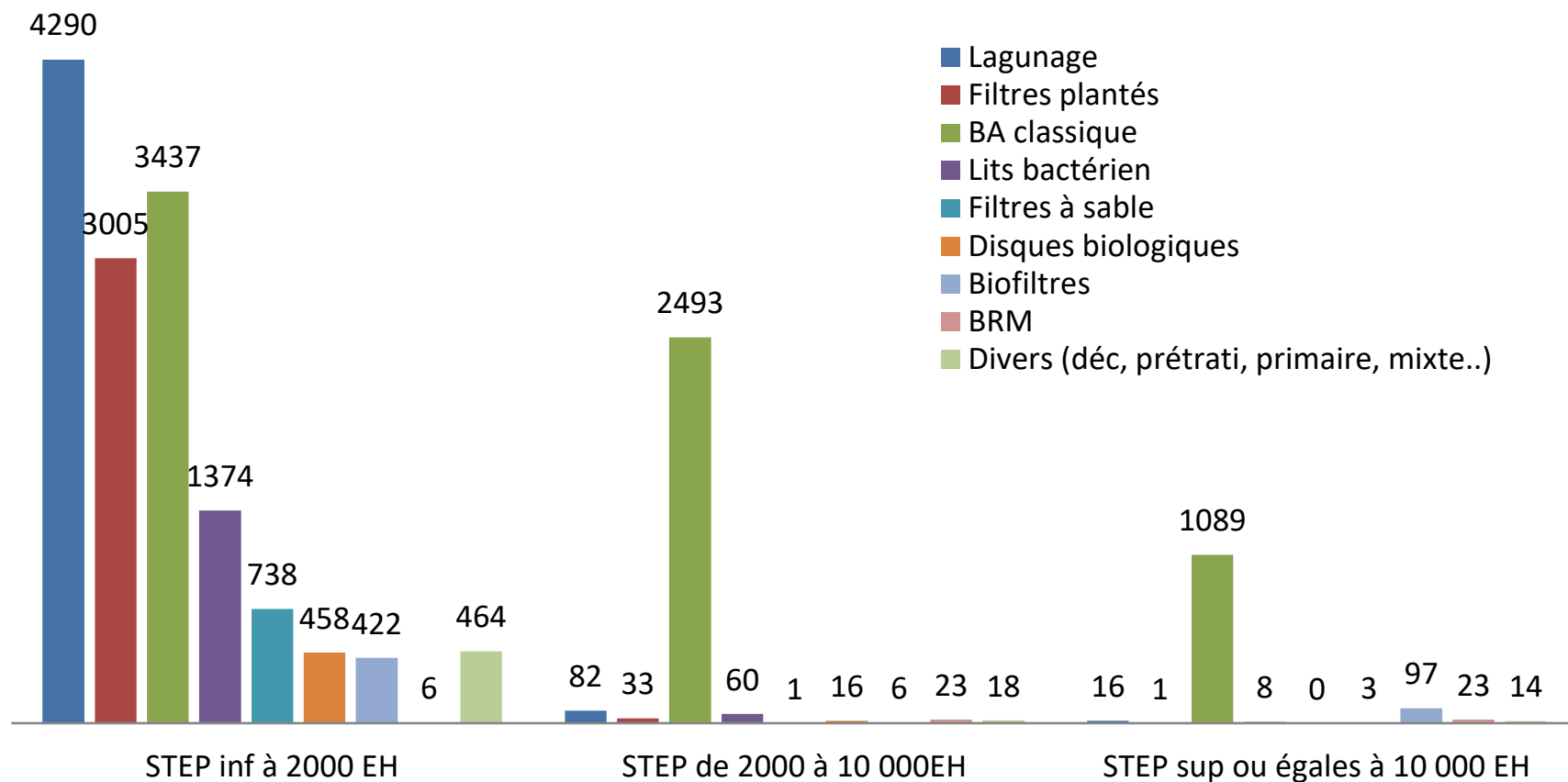
Les stations d'épuration en France



Plus de 50 % des stations ont une capacité théorique inférieure à 500 EH.
Les quelques 6% avec une capacité égale ou supérieure à 10 000 EH traitent plus de 80% de la charge polluante.

Les stations d'épuration en France

STEP France métropolitaine



Source: bilan assainissement ONEMA

Production de boues des STEU

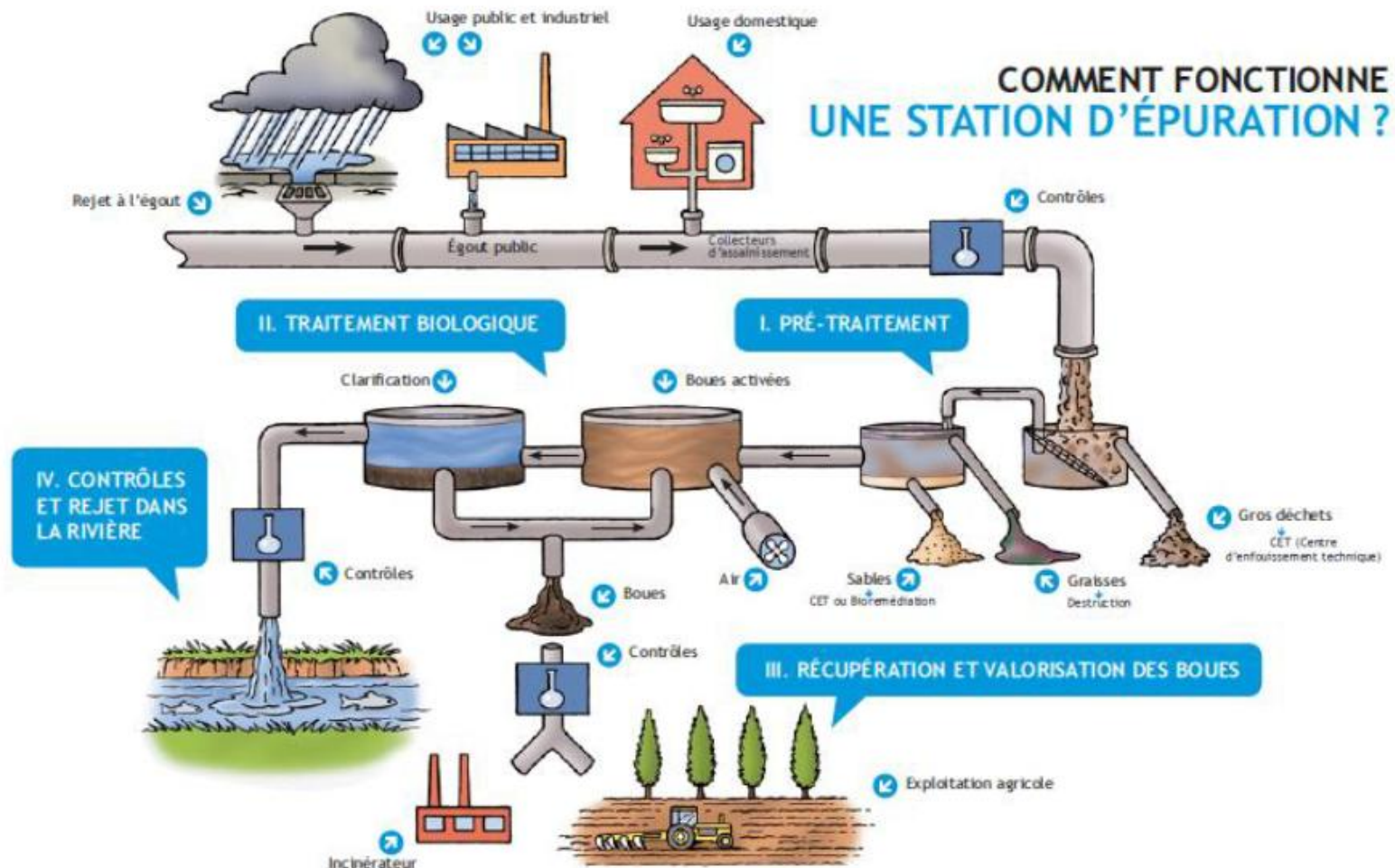


Figure 3 : Schéma du fonctionnement d'une station d'épuration
(source : Intercommunale de Développement Économique et d'Aménagement du cœur du Hainaut)

Production de boues des STEU

► Statut des boues

Une boue d'épuration est **un déchet** produit par le processus d'épuration des effluents.

Elle contient des matières minérales et des matières organiques.

Sa composition peut varier suivant le mode de traitement des effluents et les caractéristiques des effluents traités.

Boues
primaires

Traitement primaire par
décantation des
matières non dissoutes
facilement décantables

Boues
physico-
chimique

Adjonction d'un réactif
pour décanter les
particules fines diffuses
et colloïdes

Boues
biologiques

Epuration de la pollution
dissoute par processus
aérobies de micro-
organismes formant un
floc bactérien

Production de boues des STEU

EAU BRUTE

Pour 1 000 habitants
55 000 m³/an



EAU TRAITEE

55 000 m³/an



DECHETS

Refus de dégrillage : 2 T

Sables : 5 à 10 T

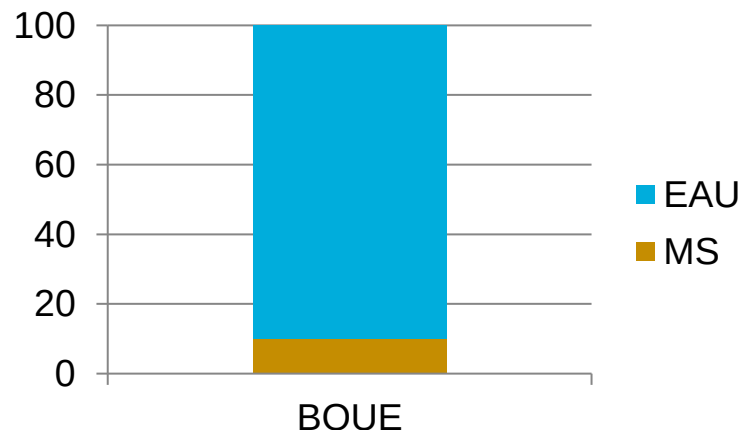
Graisses : 1 T

Boues : 15 t MS soit **75 T à 20% MS**

Production de boues des STEU

► Notion de siccité

- > Les boues sont constituées d'eau et de matières sèches.
- > La siccité est le pourcentage massique de matière sèche.
- > Une boue avec une siccité de 10 % (soit 100 g/L) présente un taux de matières sèche (MS) de 10 % et donc une humidité de 90 %.

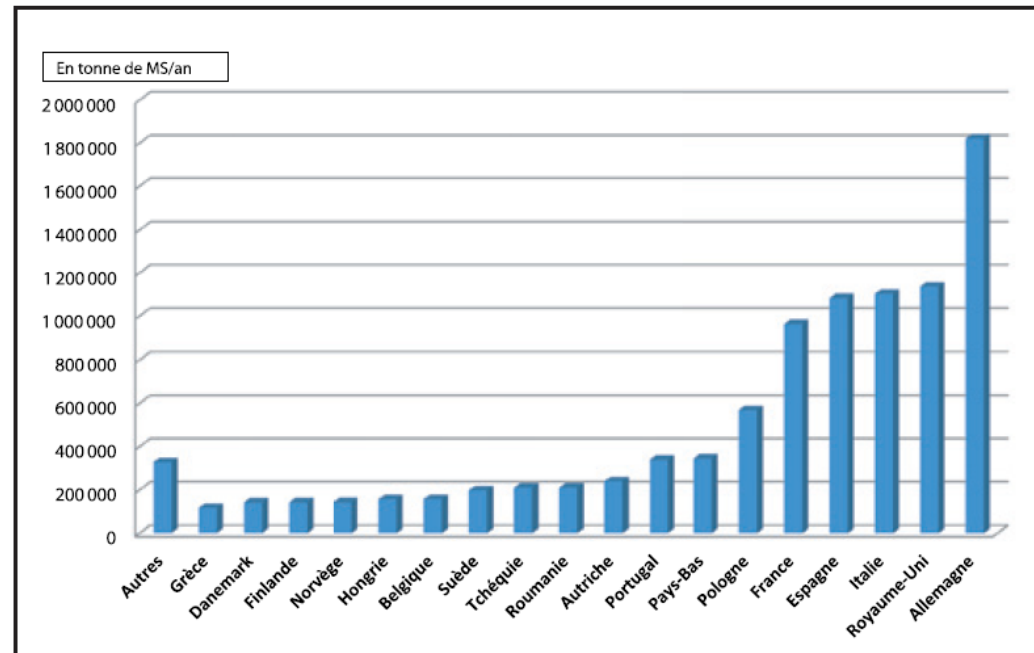


- > La méthode de mesure consiste à mettre à l'étuve à 105 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante, un échantillon de boue (25 à 100 mL selon la concentration de la boue).

Production de boues des STEU

► Boues urbaines

- > Chaque français produit entre 15 et 20 kg par an de matières sèches (MS)
- > Soit une production totale de l'ordre de **1 million de tonnes de MS**



Source : Eurostat 2010-2015.

Figure 1. Production de boues d'épuration dans les différents pays européens en tonnes de matière sèche (MS) par an

Que contiennent les boues ?

► Des éléments fertilisants

Paramètres	Composition moyenne de boues urbaines (ADEME)
M.O.	50 à 70% MS
Azote	3 à 9% MS
Phosphore	4 à 6% MS
Potasse	< à 1% MS
Magnésium	< à 1% MS
Chaux	4 à 8% MS
Soufre	0,5 à 2% MS



Les boues d'épuration sont riches en éléments nutritifs et en matière organique ce qui leur confère une utilité pour l'amendement des sols agricoles. Plus particulièrement, les boues possèdent des teneurs importantes en azote, phosphore et potassium ainsi qu'en oligo-éléments (Cuivre, Magnésium, Zinc) qui ont intérêt et un rôle dans le développement des cultures.

Que contiennent les boues ?

► Des composés indésirables

Paramètres	Composition moyenne de boues urbaines (ADEME) (mg/kg MS)		Valeur limite pour l'épandage (mg/kg MS) Au 01/01/2004	
Cadmium	6	PROJET SOCLE COMMUN EN COURS SEUIL PFAS	10	↘
Chrome	80		1000	↘
Cuivre	330		1000	
Mercure	3		10	↘
Nickel	40		200	
Plomb	130		800	↘
Zinc	920		3000	

Depuis 1975, les concentrations moyennes en ETM ont diminué pour tous les paramètres soumis à réglementation et sont donc désormais en moyenne comme en percentile 90 bien inférieures aux seuils.

Que contiennent les boues ?

► Des composés indésirables

- **Des micropolluants organiques** : HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) et les CTO (Composés Traces Organiques). Parmi les CTO présents dans les boues, PCB (Polychlorobiphényles) (somme des 7 PCB), Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène et Benzo(a)pyrène.
- **Des micro-organismes pathogènes** : virus, bactéries, protozoaires, vers parasites et champignons. Ils sont présents dans les matières fécales rejetées dans les réseaux d'eaux usées et se trouvent dans les boues brutes.
- **Des substances à visée thérapeutique**, y compris les hormones et en particulier les substances contraceptives, les résidus de traitement cancéreux...

Les substances pharmaceutiques, malgré leur faible concentration dans les boues, restent bio-accumulables et peuvent entrer dans la chaîne alimentaire. Elles peuvent donc présenter un risque pour les hommes si les concentrations sont trop importantes.

Que contiennent les boues ?

► De l'énergie

COMPOSITION DE LA MATIERE VOLATILE			
	Boue Biologique	Bois	Charbon
C	55	50	80
H	8	6	5
O	32	40	10
N	4	4	4
S	1	-	1
PCI	3700	3800	8500
(kcal/kg MS)			

Autosuffisance obtenue à 30 – 35 % de siccité
Taux de MV d'une boue biologique : 50 à 70 % de la MS

Valorisation des boues

► Répartition des différents usages

- > En France, la répartition entre les différents usages est la suivante :
 - Epandage agricole (44 % des boues),
 - Compost utilisé comme amendement organique (36 %),
 - Incinération (17 %),
 - Mise en décharge (1 %),
 - Autre (3%).

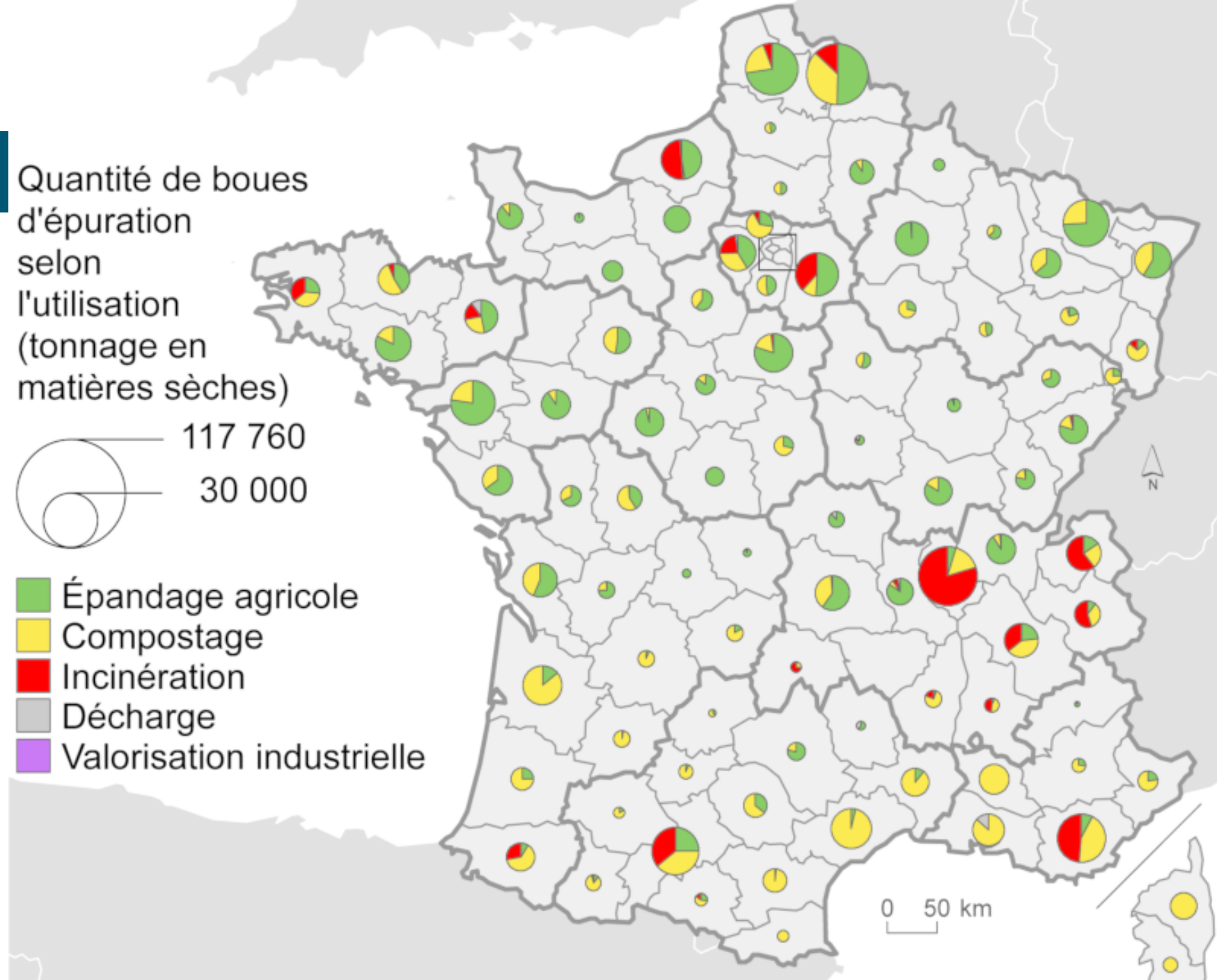
► Répartition géographique de ces usages

- Dans le Nord du territoire, l'épandage domine
- Dans le Sud c'est plutôt le compostage
- L'incération des boues est concentrée dans des Départements où l'on trouve d'importants pôles urbains : Paris et la Seine-et-Marne, le Rhône (Lyon), le Var (avec Marseille dans le département limitrophe des Bouches-du-Rhône) et la Haute Garonne (Toulouse).

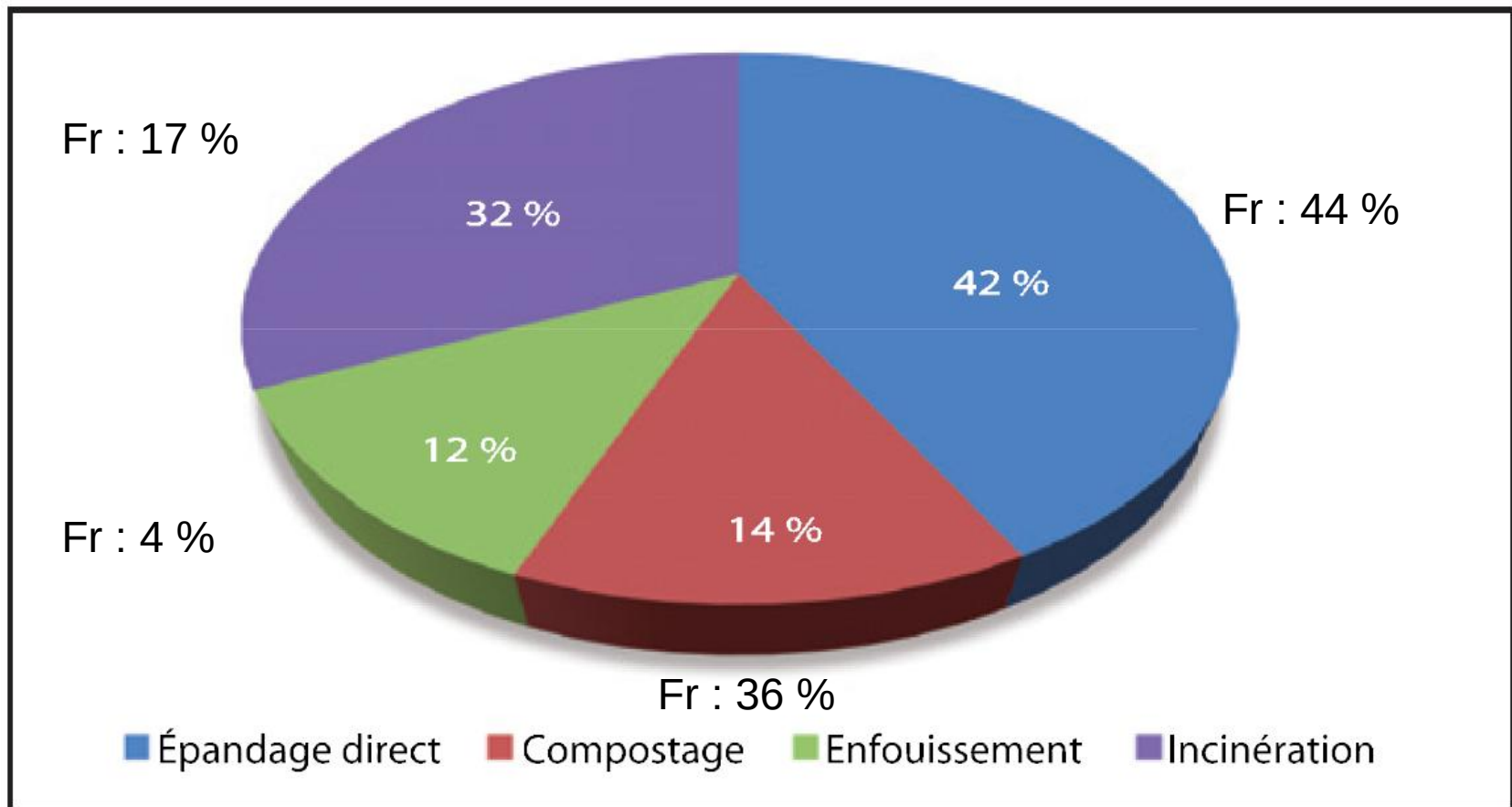
Quantité de boues
d'épuration
selon
l'utilisation
(tonnage en
matières sèches)



- Épandage agricole
- Compostage
- Incinération
- Décharge
- Valorisation industrielle



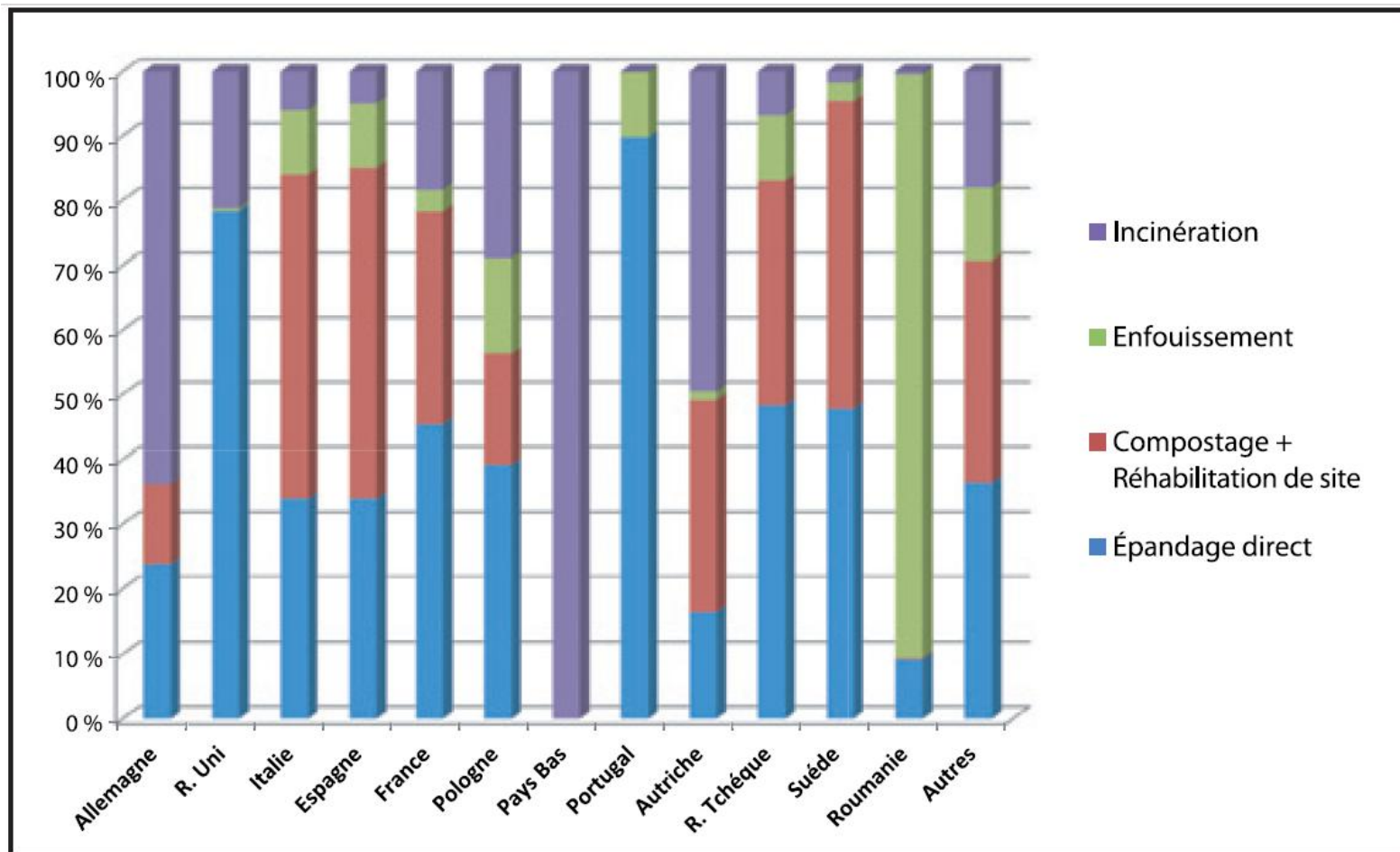
Valorisation des boues



Source : Eurostat 2015.

Figure 3. Destination des boues urbaines au sein de l'Union Européenne

Valorisation des boues



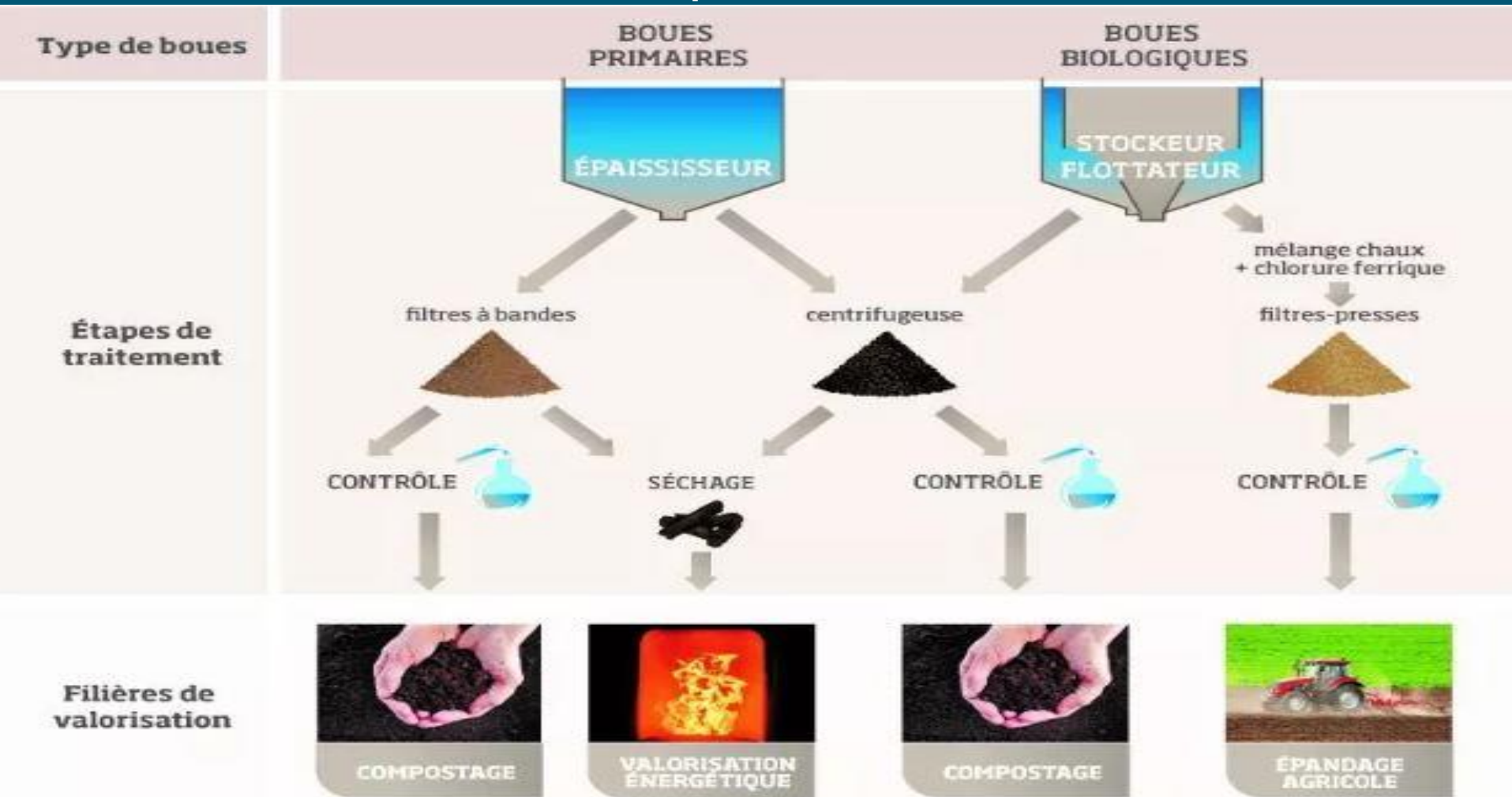
Source : Eurostat 2015.

Figure 4. Destination des boues urbaines au sein des différents pays de l'Union Européenne



Les différentes techniques de traitement

Les différentes techniques de traitement



<https://www.youtube.com/watch?v=AYbQ5AFfoU8>

Les différentes techniques de traitement

En vue de leur valorisation, des traitements sont appliqués aux boues :

- Pour **réduire leur teneur en eau** : épaissement par gravité, épaissement mécanique (90-95% d'eau), centrifugation (70-80% d'eau) ou séchage (10-40% d'eau)
- Pour **stabiliser la matière organique**, en diminuant sa fermentescibilité pour réduire ou supprimer les mauvaises odeurs
- Pour les **hygiéniser**, si nécessaire, en détruisant les micro-organismes pathogènes

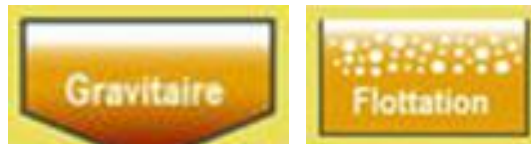
Les différentes techniques de traitement

FILIERES INTEGREES



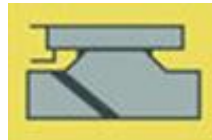
< 10 000 EH

EPAISSISSEMENT



50 g/l

DESHYDRATATION



200 g/l ou 20 % MS

SECHAGE

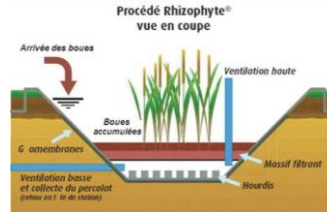


700 g/l ou 70% MS
Séchage Solaire < 50 000 EH

900 g/l ou 90% MS
Séchage Thermique > 100 000 EH

Les différentes techniques de traitement

**FILIERES
INTEGREES**



< 10 000 EH

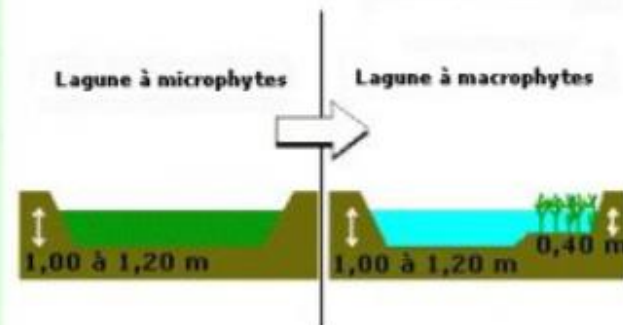
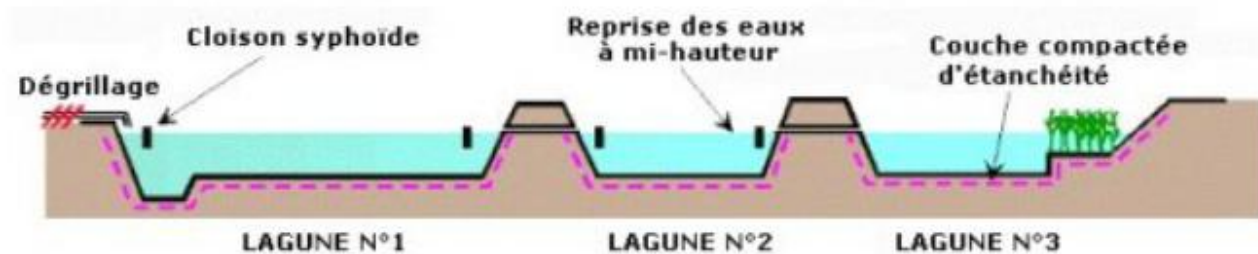
➤ **Lagunage naturel / aéré**

Lagunage naturel / aéré

► Gestion des boues

- > Stockage dans la 1^{ère} lagune
- > Curage tous les 10 ans
- > Réduction de volume par minéralisation

Pour les stations de moins de 10 000 EH



Lagunage naturel / aéré

► Gestion des boues

- > Stockage dans la 1^{ère} lagune
- > Curage tous les 10 ans
- > Réduction de volume par minéralisation

Pour les stations de moins
de 10 000 EH



Lagunage naturel / aéré

► Techniques de curage

- > Sol porteur (argile) : curage au bull des marais qui racle la lagune vers un point de pompage (NB : nécessite by-pass de la lagune)



Lagunage naturel / aéré

► Techniques de curage

> Sol porteur (argile) : curage au bull des marais

1. Voie liquide :

Evacuation directe
5 – 15 g/l

Pompage en lagune



Stockage tampon homogénéisation
Epaississement



Epandage boues
Tonnes à lisier agricole

2. Voie sèche :

Stockage in situ
3 ans max
Séchage 60-80 %



Reprise par bull & pelle des boues sèches
Epandage par épandeur agricole



Lagunage naturel / aéré

► Techniques de curage

- Sol non porteur : curage au radeau (sans by-pass de lagune)



Lagunage naturel / aéré

► Alternative au stockage : Déshydratation par géotubes



- > Géotextile perméable à haute résistance (500 μm)
- > Produit non réutilisable

Dimensions standard

Circonférence	10,00	13,70	18,30	27,40	m
Diamètre	3,18	4,36	5,83	8,73	m
Largeur à vide	4,3	6,4	8,2	13	m
Hauteur de remplissage	1,5	1,68	1,83	2,13	m
Ratio dimensionnement	5,5	8	12	22,2	m ³ boues/m linéal

Lagunage naturel / aéré

► Alternative au stockage : Déshydratation par géotubes



Lagunage naturel / aéré

► Géotubes



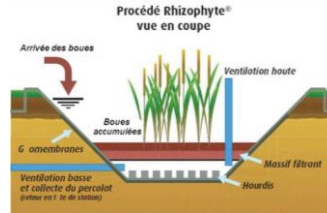
Curage > 20 %MS



Les géotubes montent jusqu'à 2m pendant le remplissage puis ressuient.

Les différentes techniques de traitement

**FILIERES
INTEGREES**



< 10 000 EH

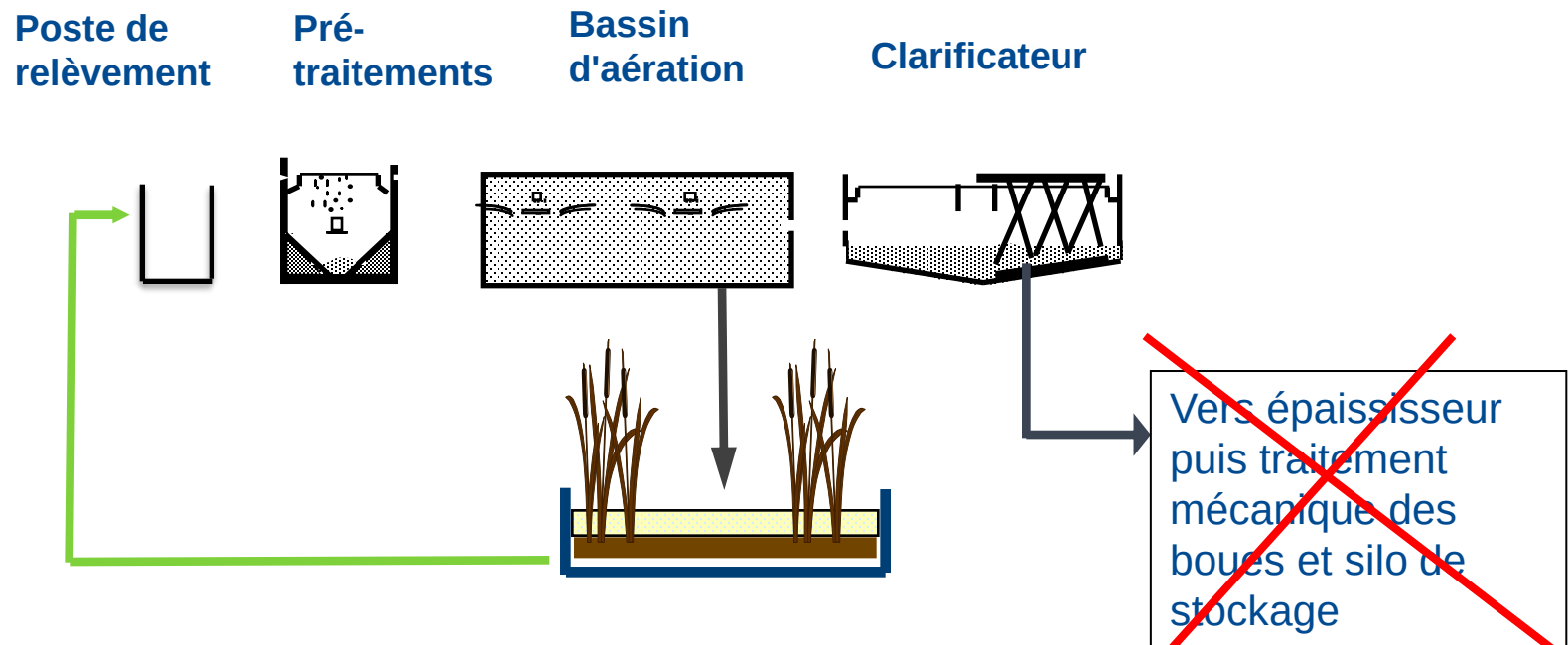
➤ Lits Plantés de Roseaux (LSPR)

Lits plantés de roseaux

► Emplacement dans la filière

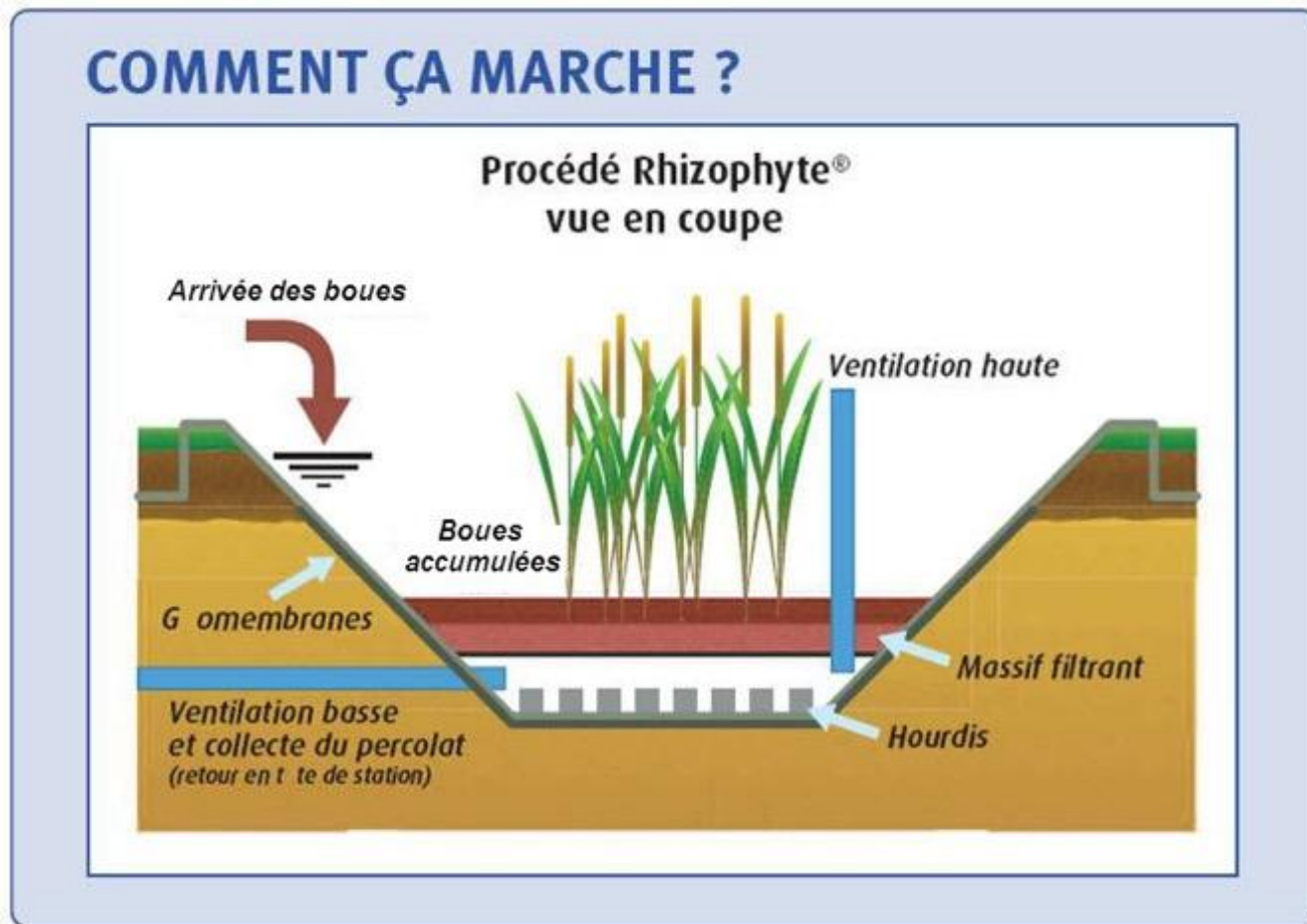
- > Alimentation à partir du bassin d'aération
- > Facile à intégrer sur une station existante
- > Réduction de volume par minéralisation

Pour les stations de moins de 10 000 EH



Lits plantés de roseaux

► Traitement des boues sur massif filtrant



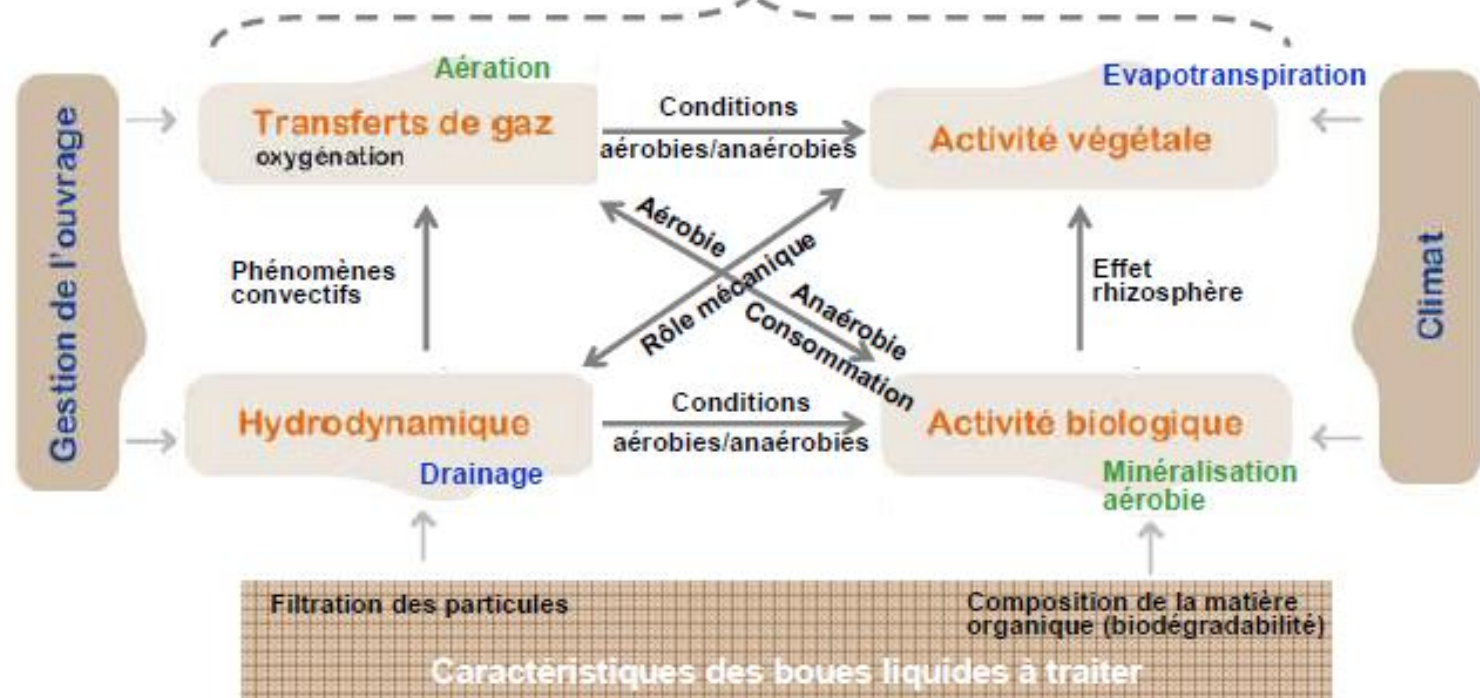
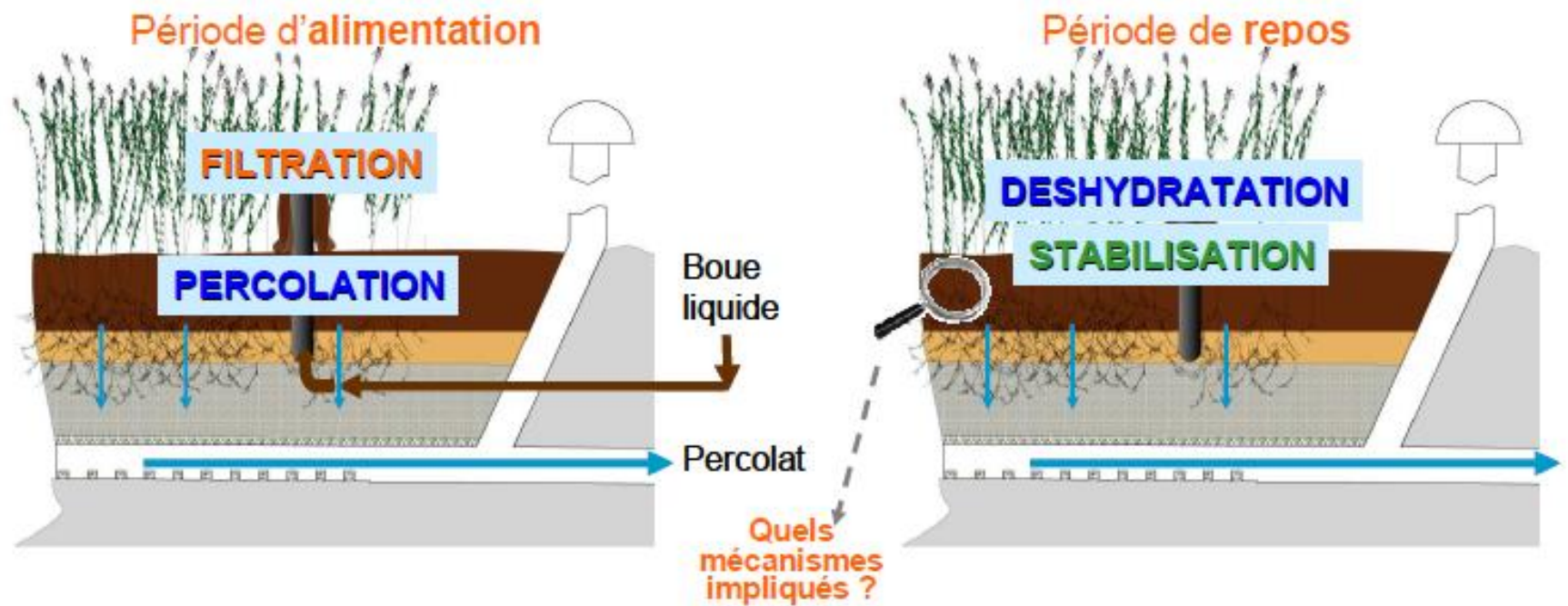


Figure 4: processus impliqués dans les LSPR (adapté de Molle, 2012)

Lits plantés de roseaux

Filtration

Qualité des percolats: retour en tête

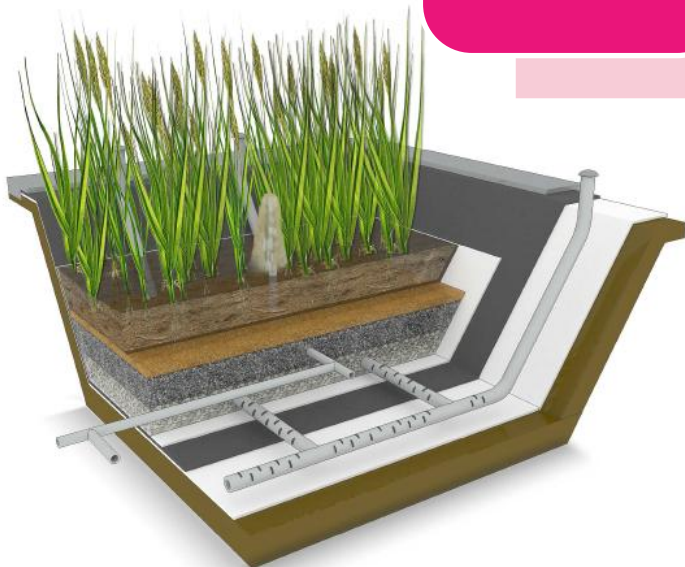
Epaississement

Siccité finale > 15%

Réduction des boues

Minéralisation env 20% des MES

Stockage



Lits plantés de roseaux



Lits plantés de roseaux

► Mise en œuvre : béton





Curage sur casier béton (crédit photo : Alliance Environnement)



Curage sur casier déblais-remblais (crédit photo : Irstea)



Curage avec descente de l'engin sur des plaques porteuses dans des lits de grande taille (crédit photo Orbicon/Steen Nielsen)



Boues curées stockées en b



Figure 30 : exemple de curage de lits de séchage de boues.

Lits plantés de roseaux

► Les avantages

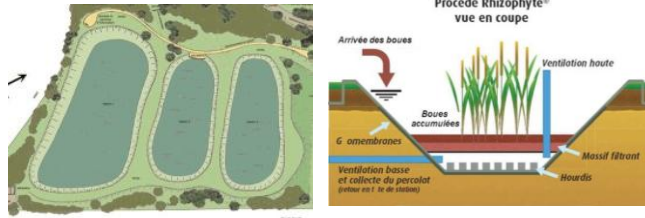
- Pas d'équipements mécaniques pour déshydrater
- Procédé rustique: peu de maintenance
- Faible coût d'exploitation
- Réduction des boues (>20%)
- Stockage sur plusieurs années : 5 ans d'autonomie
- Pas de nuisances environnementales

► Les inconvénients

- Procédé extensif: surface importante
- Performances « limitées »

Les différentes techniques de traitement

FILIERES INTEGREES



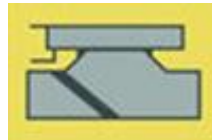
< 10 000 EH

EPAISSISSEMENT



50 g/l

DESHYDRATATION



200 g/l

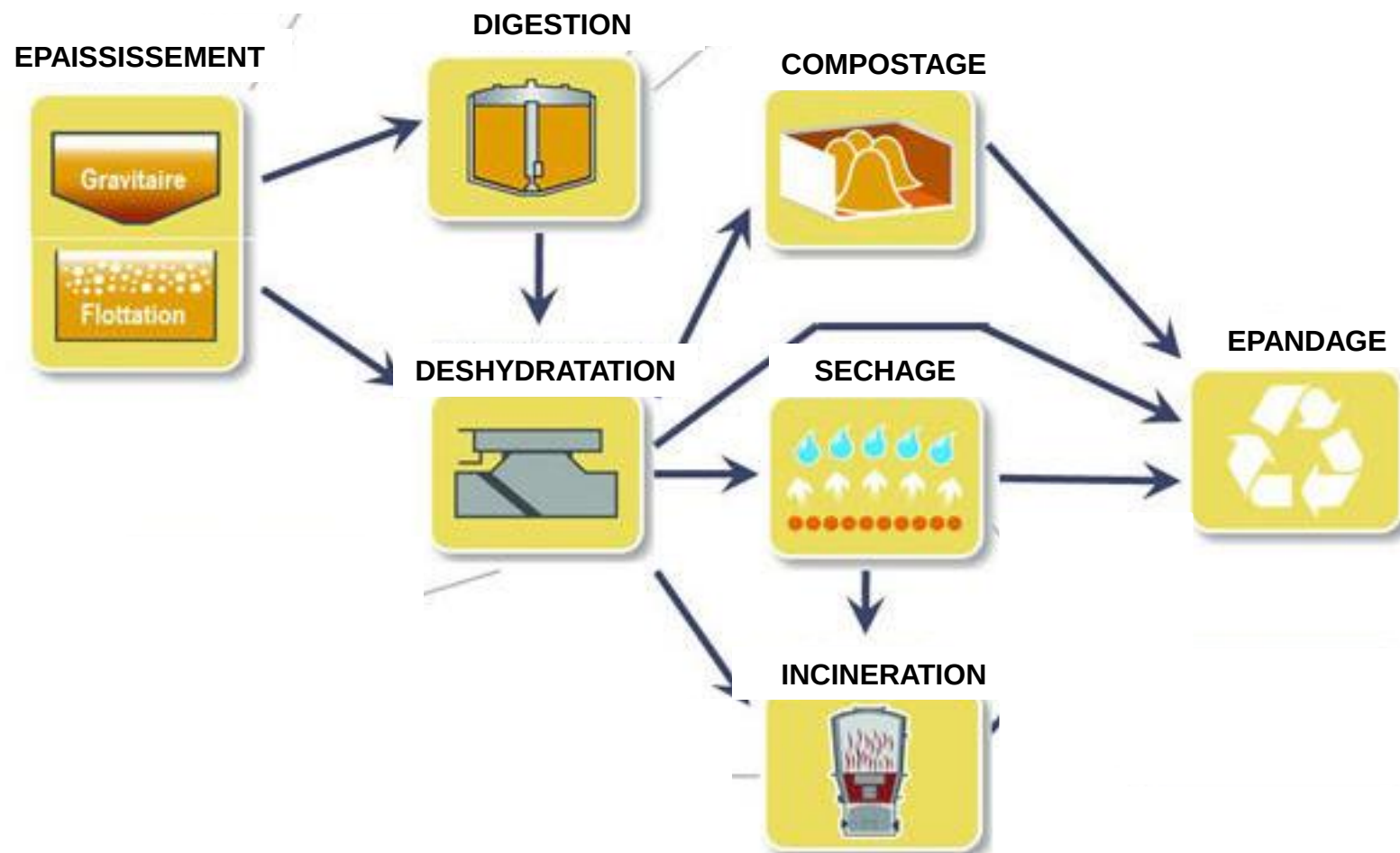
SECHAGE



700 g/l Solaire < 50 000 EH

900 g/l Thermique > 100 000 EH

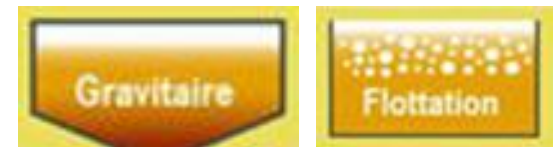
Les différentes filières de traitement



Les différentes filières de traitement

► Réduction du volume

EPAISSISSEMENT



Epaississement : objectif > 5 % MS

Réduction du volume

► Epaississement

- > Epaississeur statique (15 à 90 g/l)
- > Flottation (30 à 40 g/l)
- > Epaississeur dynamique: table d'égouttage (30 à 70 g/l)

► Déshydratation

- > Presse à bandes (17 à 27%)
- > Centrifugeuse (20 à 35%)
- > Filtre presse (28 à 45%)

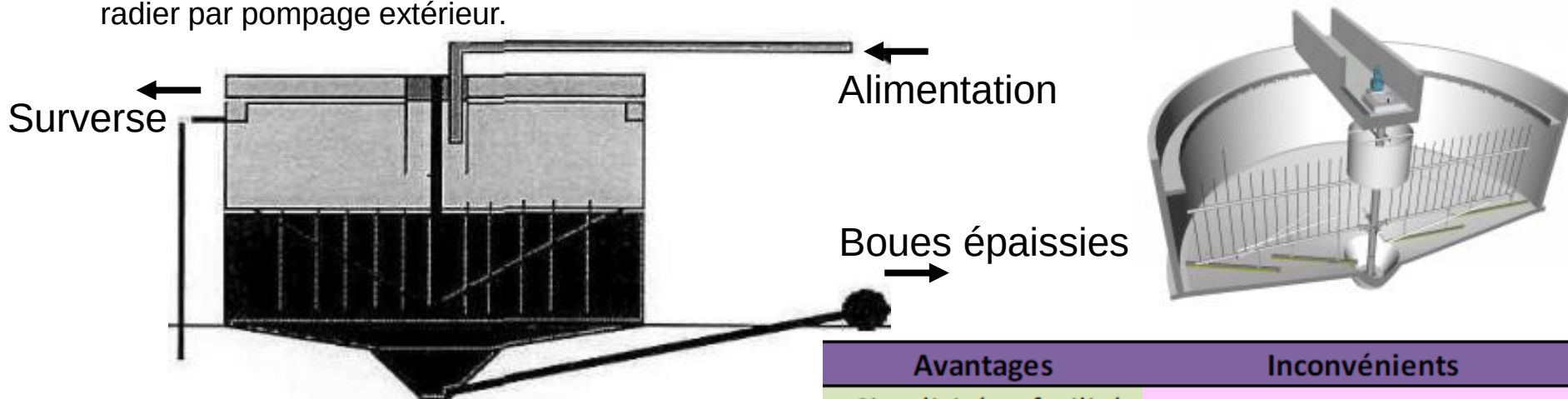
► Séchage

- > Séchage solaire (60 à 80 %)
- > Séchage thermique (60 à 90%)

Réduction du volume

► Épaississeur statique : épaississeur gravitaire hersé

L'épaississeur statique est un ouvrage dans lequel les boues sont mises à épaissir sous un hersage lent. Il s'agit d'un ouvrage circulaire dont le radier a une pente de 10 à 20% et muni d'une herse et d'un racleur diamétral permettant le transfert des boues de la périphérie vers le centre (racleur) et facilitant l'évacuation de l'eau interstitielle. L'arrivée des boues est effectuée par le haut à l'intérieur d'une jupe de répartition (1 à 2 m sous le niveau liquide) et le soutirage des boues épaissies au centre du radier par pompage extérieur.

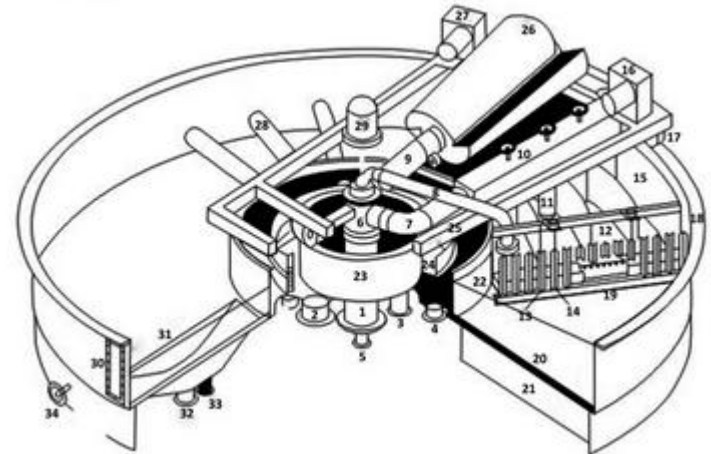
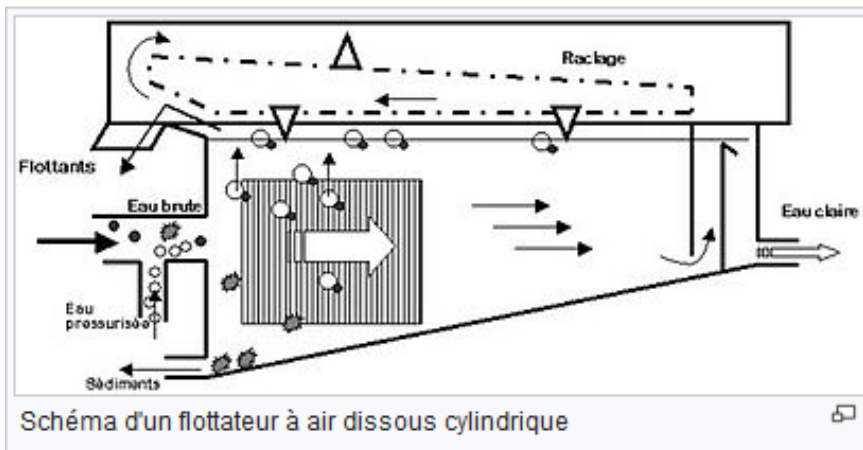


La hauteur de boue dans l'ouvrage est d'environ 1m et la hauteur d'eau claire de 2 à 2,5 m.
Le temps de séjour doit être limité à 10-24 heures (risque de fermentation au delà)

Avantages	Inconvénients
-Simplicité et facilité d'exploitation	-Importante emprise au sol
-Consommation énergétique faible	-Performance faible pour les boues biologiques
	-Nuisances olfactives possibles

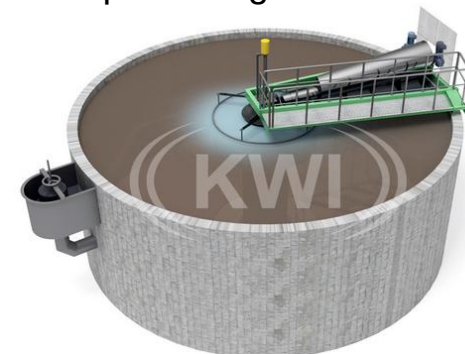
Réduction du volume

► Epaisseur statique : flottateur à air dissous



Le principe d'un flottateur est de faire monter la boue biologique à la surface d'un ouvrage cylindro-conique par pressurisation d'un fluide à 3 à 6 bars en utilisant de fines bulles d'air (réduction de la masse volumique apparente de la boue) et de récupérer la boue flottée par raclage de surface.

Les avantages par rapport à l'épaississement gravitaire sont une réduction de surface d'un facteur 3, de volume d'un facteur 6 et un meilleur piégeage des colloïdes.



Réduction du volume

► Epaississeur dynamique : le recours au flocculant

Dans les procédés qui vont suivre, l'utilisation d'un flocculant (polymère) permet d'accélérer la séparation eau / boues et donc d'améliorer le rendement des machines.

Sachant qu'il existe différentes compositions de produit, le choix du flocculant se fera en fonction de la nature des boues (minérale, organique, mixte) et du dispositif d'épaississement/déshydratation en place (résistance des floccs à la pression, au cisaillement...).

La quantité de polymère utilisée peut être comprise entre **3 et 10 kg de matière active par tonne de matières sèches** selon les procédés.

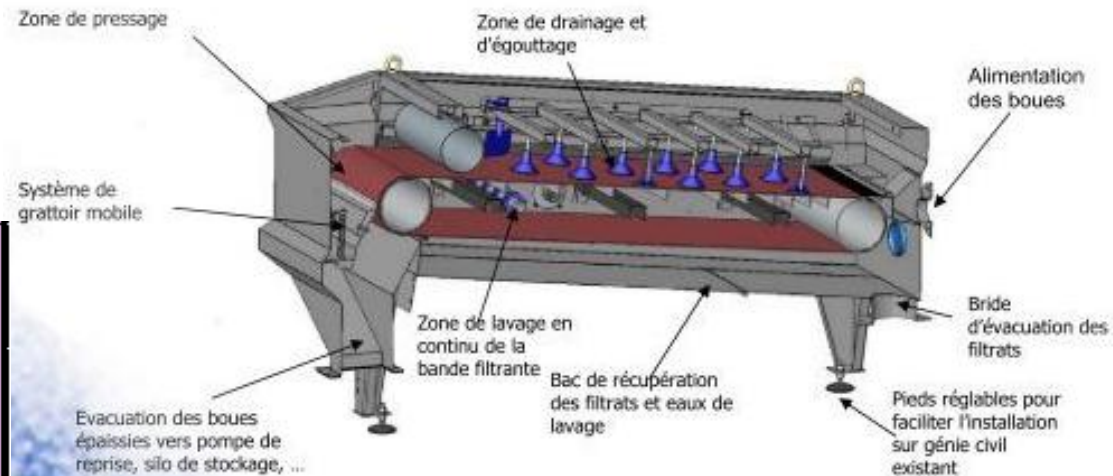
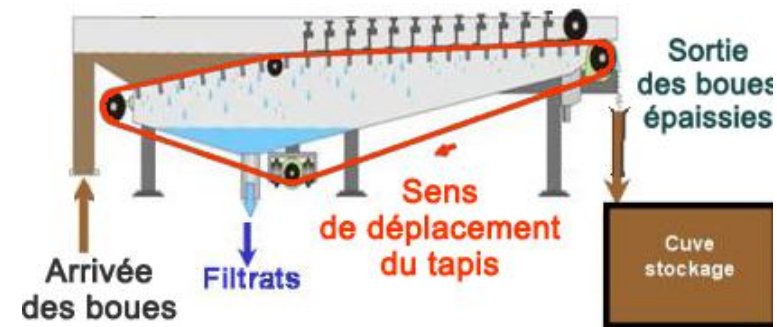
Quelle que soit la technique de déshydratation utilisée, **il est important de vérifier la qualité de l'eau issue de la séparation** des phases solides et liquides, appelée généralement « filtrat ». Elle doit être peu chargée en matières en suspension (MES) afin d'éviter des retours de boues dans la filière eaux.

Réduction du volume

► Epaississeur dynamique : table d'égouttage

La boue préalablement conditionnée (4 à 8 kg/t MS) avec un flocculent est placée sur une grille au travers de laquelle l'eau va être évacuée tandis que les boues vont avancer sur la grille. Un système de râteau et une injection d'eau de procédé améliorent la séparation. Les siccités obtenues sont de l'ordre de 5 à 6%.

La table d'égouttage accepte des boues d'alimentation peu concentrées pour un **taux de capture élevé** (> 95 %).



-Simplicité et facilité d'exploitation

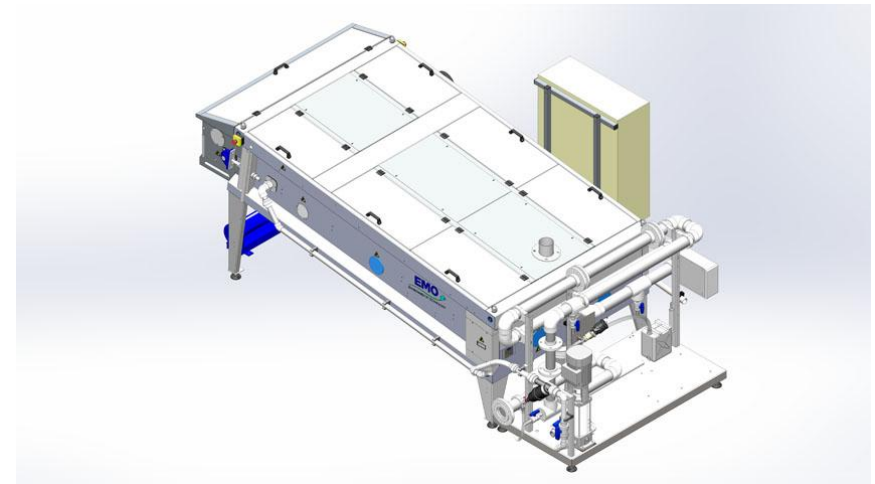
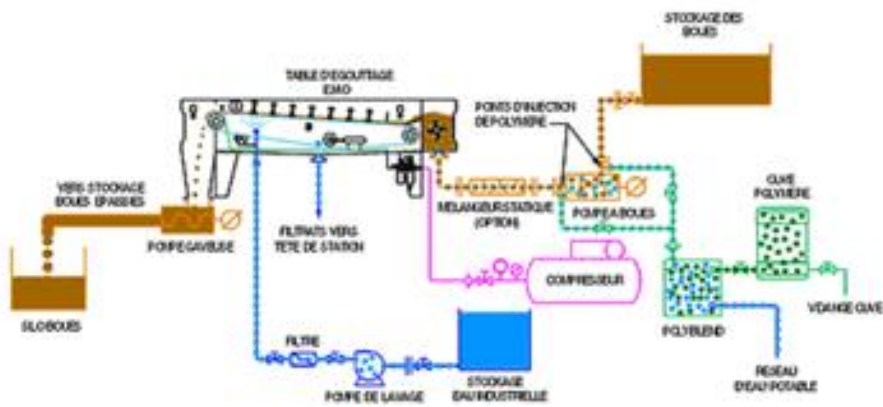
-Compacité et nuisances contrôlables

-Besoin de main d'œuvre et d'eaux de lavages

-Polymère indispensable

Réduction du volume

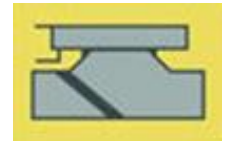
► Epaississeur dynamique : table d'égouttage



Les différentes filières de traitement

► Réduction du volume

DESHYDRATATION



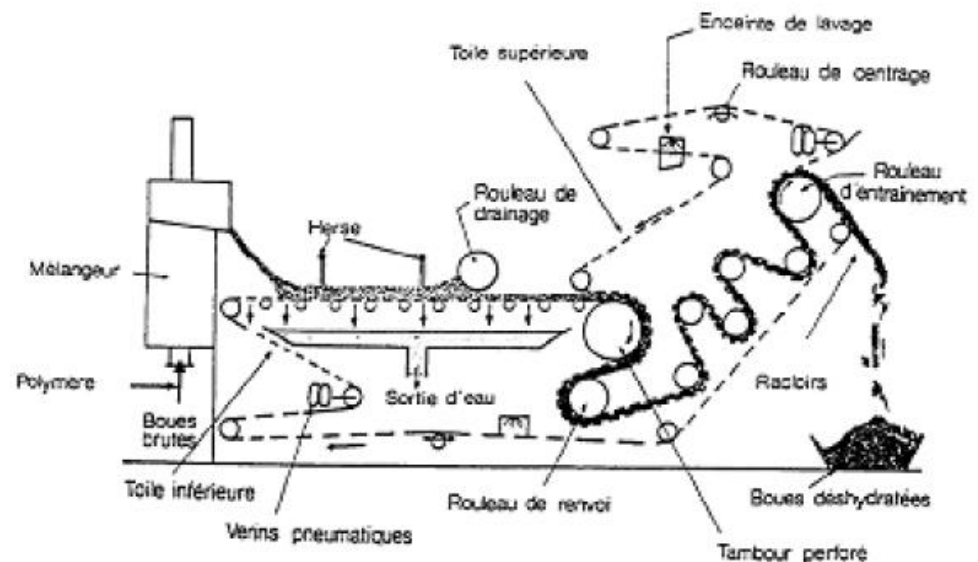
Déshydratation : objectif > 15 % MS

Réduction du volume

► Déshydratation : presse à bandes

Le filtre à bande est un équipement conçu pour la déshydratation continue des boues. Le gâteau obtenu après conditionnement est de l'ordre de 15 à 20%, en fonction de la qualité des boues entrantes (notamment le mélange boue primaire et secondaire et leur teneur en matières organiques).

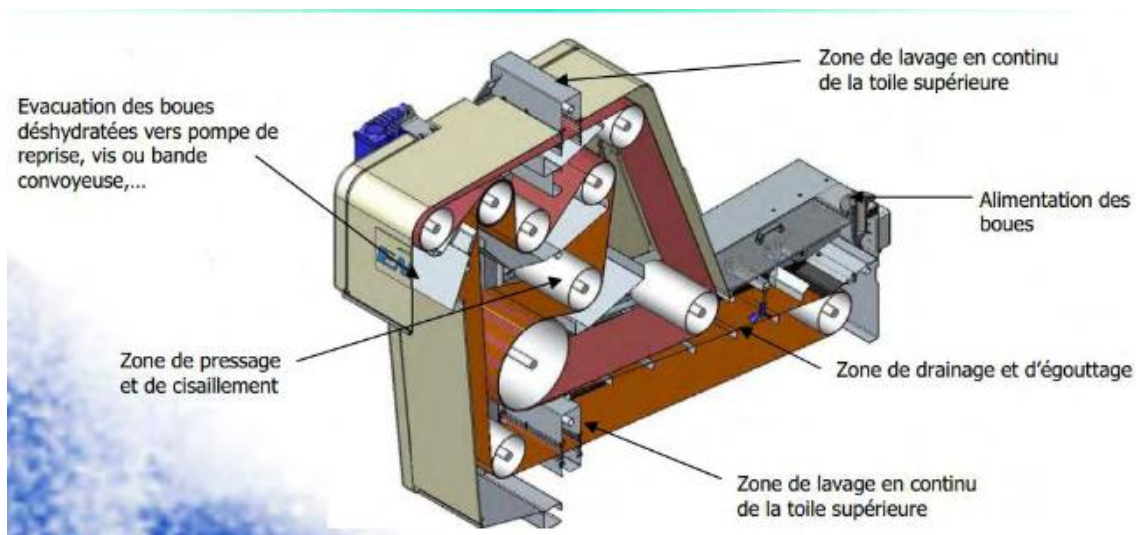
Le filtre à bande est composé d'une toile ou bande de filtration circulant entre différents rouleaux de pressage. L'opération se déroule en plusieurs étapes : floculation des boues, égouttage gravitaire, pré-pressage, pressage avec cisaillement.



-Investissement modéré	-Maintenance non négligeable (lavage, réglage, changement de la toile)
-Cout d'exploitation faible	
-Maintenance aisée	-Siccité de 20 % (devenir limité : compostage)
-Faible consommation en polymères	

Réduction du volume

► Déshydratation : presse à bandes



Réduction du volume

► Déshydratation : combiné table égouttage - presse à bandes

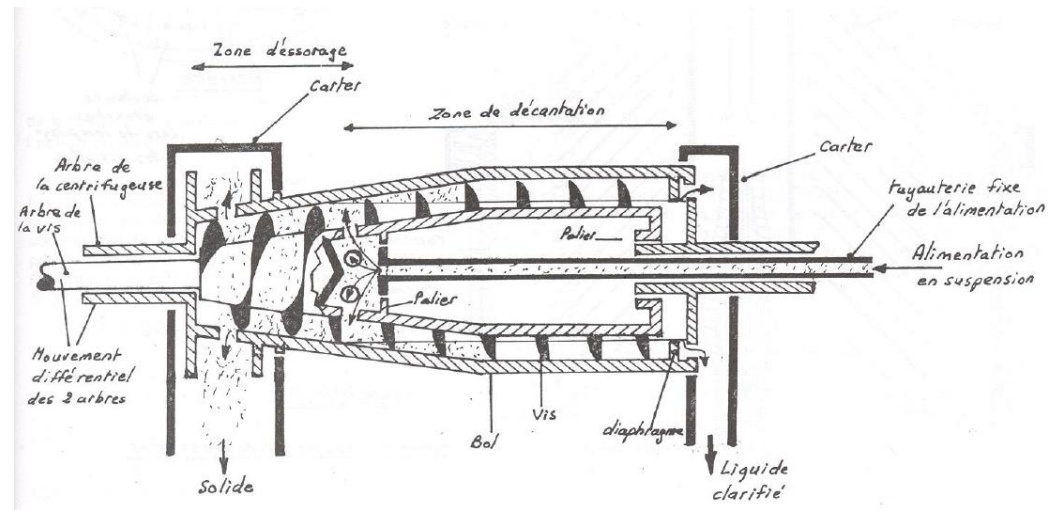


<https://youtu.be/si4oD8TYaQM>

Réduction du volume

► Déshydratation : centrifugeuse

La centrifugation est un procédé permettant la séparation de l'eau des boues grâce à la force centrifuge. Le dispositif est composé d'un rotor cylindro-conique horizontal. A l'intérieur de ce dernier, une vis convoyeuse tourne dans le même sens mais à une vitesse légèrement supérieure à celle du rotor. Les boues polymérisées sont introduites dans le dispositif. Avec force centrifuge, les particules solides se déposent sur les parois du bol. Elles sont reprises par la vis convoyeuse qui les envoie vers la sortie de la machine. L'eau est récupérée au centre de la machine et est évacuée.



ANDRITZ



WESTFALIA

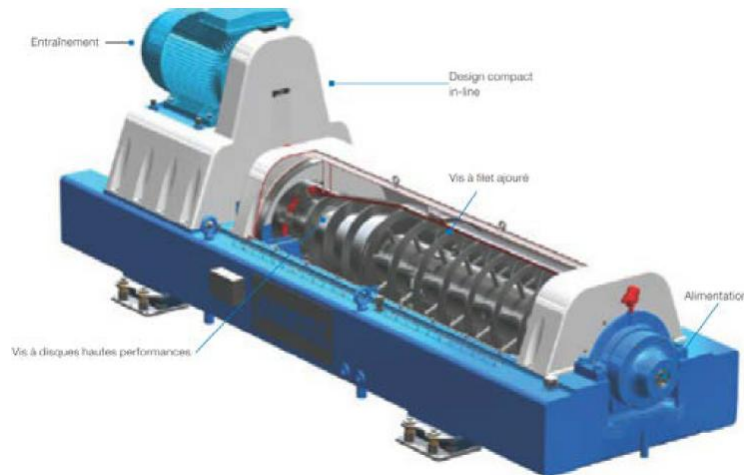


ALFA LAVAL

-Siccité de 25 % (boues pâteuses à solide)	-Coût d'investissement important
-Machines compactes	-Coût d'exploitation important (forte consommation d'énergie électrique)
-Machines automatisables et compactes	-Forte consommation en polymères

Réduction du volume

► Déshydratation : centrifugeuse



Réduction du volume

► Déshydratation : centrifugeuse

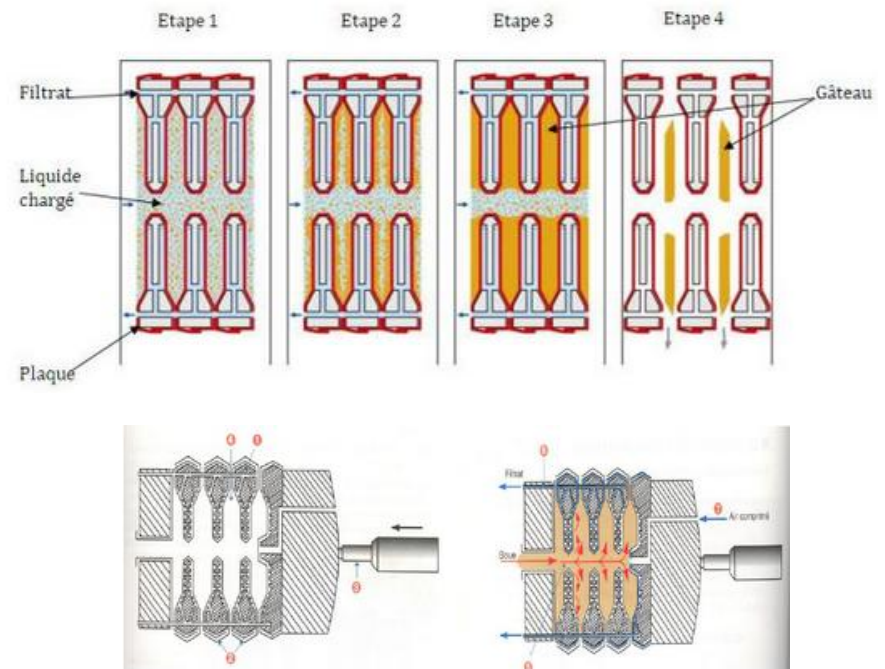


<https://www.youtube.com/watch?v=OqEODWcJwnY>

Réduction du volume

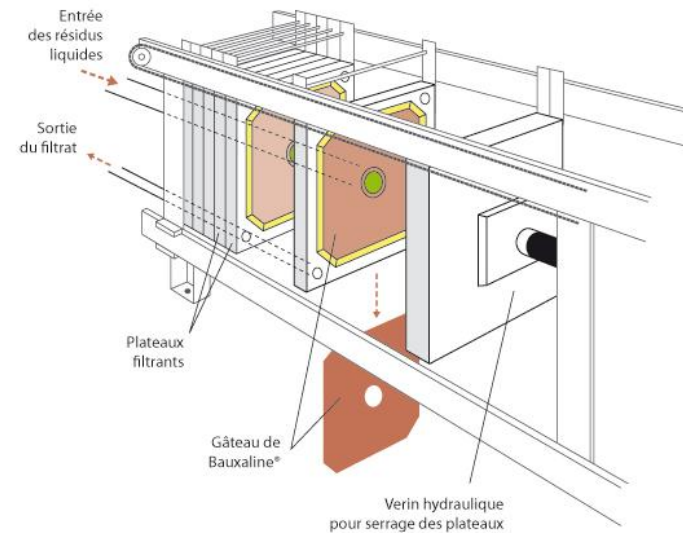
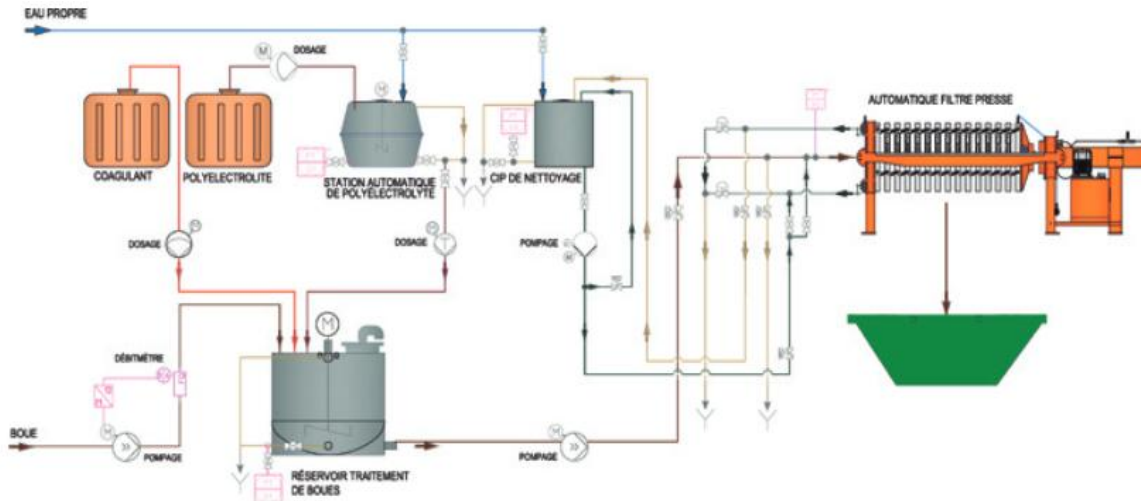
► Déshydratation : filtre à plateaux (ou filtre presse)

Le filtre-pressé est une technique permettant de séparer un mélange solide-liquide. Le liquide est injecté dans un système constitué de plateaux et cadres, recouvert d'une toile et formant des chambres serrées avec une presse. Le filtre fonctionne sous pression (quelques bars) par injection du liquide chargé sous pression (environ 15 bars). On récupère après filtration d'une boue, conditionnée préalablement au chlorure ferrique et à la chaux (ex : 10% et 30% respectivement), un gâteau avec une siccité voisine de 30%. Le système est discontinu et nécessite le débatissage du système pour récupérer les gâteaux. La durée des cycles est de 2 à 4 h.



Réduction du volume

► Déshydratation : filtre à plateaux (ou filtre presse)



Réduction du volume

► Déshydratation : filtre à plateaux (ou filtre presse)



<https://www.youtube.com/watch?v=8eFBoYVTLTI>

Les différentes filières de traitement

► Réduction du volume

SECHAGE



Séchage : objectif > 60 % MS

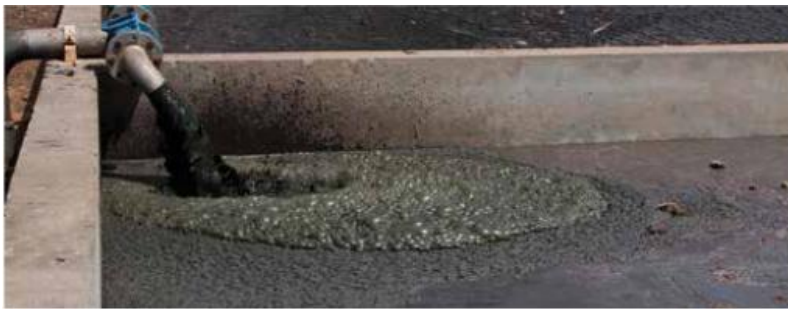
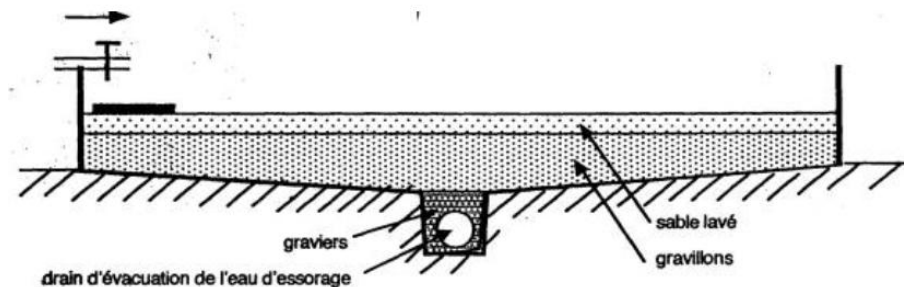
Réduction du volume

► Séchage : lits de séchage (< 2 000 EH)

Ils restent utilisés (avec éventuellement du polymère pour accélérer la phase de drainage) dans les régions de faible précipitation. En moyenne, il faut 3 à 4 semaines pour sécher une hauteur de boue liquide de 30-40 cm.

Les boues sont ensuite ratissées manuellement, reprises et stockées dans un endroit approprié (bennes étanches, aire de stockage couverte). Emprise foncière pour les ouvrages de traitement : $0.33 \text{ m}^2/\text{EH}$.

La boue présente un aspect très hétérogène de type pâteux (hiver) à solide (été). La siccité moyenne attendue est supérieure à 30 %.



Réduction du volume

► Séchage : séchage solaire (< 50 000 EH)

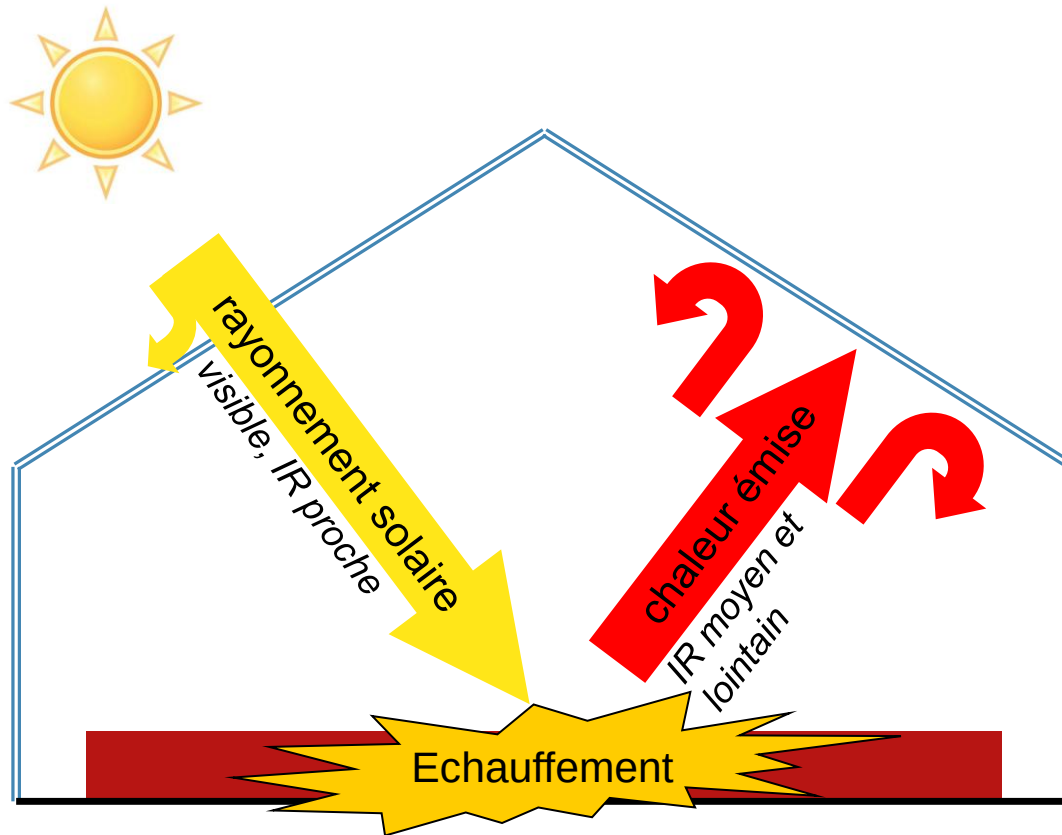
Ce procédé consiste en un ensemble de serres qui, en piégeant le rayonnement solaire, permettent d'augmenter la température des boues et d'en évaporer plus facilement l'eau interstitielle.

En hiver, lorsque l'ensoleillement est faible, **les serres permettent de stocker les boues** à l'abri des événements climatiques (pluie et froid), préjudiciables à leur séchage.

Plusieurs systèmes présents dans les serres permettent d'améliorer le taux d'évaporation :

- **la ventilation forcée** de la serre à un débit élevé (taux de renouvellement de $10 \text{ V.V}^{-1}.\text{h}^{-1}$ minimum) afin de favoriser le transfert de l'eau interstitielle dans l'atmosphère et d'évacuer l'air humide et vicié vers une unité de désodorisation
- **le retournement automatisé des boues**. Ce qui doit permettre un brassage régulier et uniforme pour renouveler les surfaces d'évaporation, et une aération des boues afin de limiter les réactions de fermentation anaérobie, sources d'importantes nuisances olfactives
- **le chauffage de l'air ambiant ou du radier** en vue de réduire les surfaces de séchage à mettre en œuvre. Ce type de dispositif n'est généralement proposé que pour les très grandes installations, qui ont la possibilité de recycler les énergies issues d'autres procédés épuratoires comme sources de chauffage de la production de boues.

Le séchage solaire: l'effet de serre



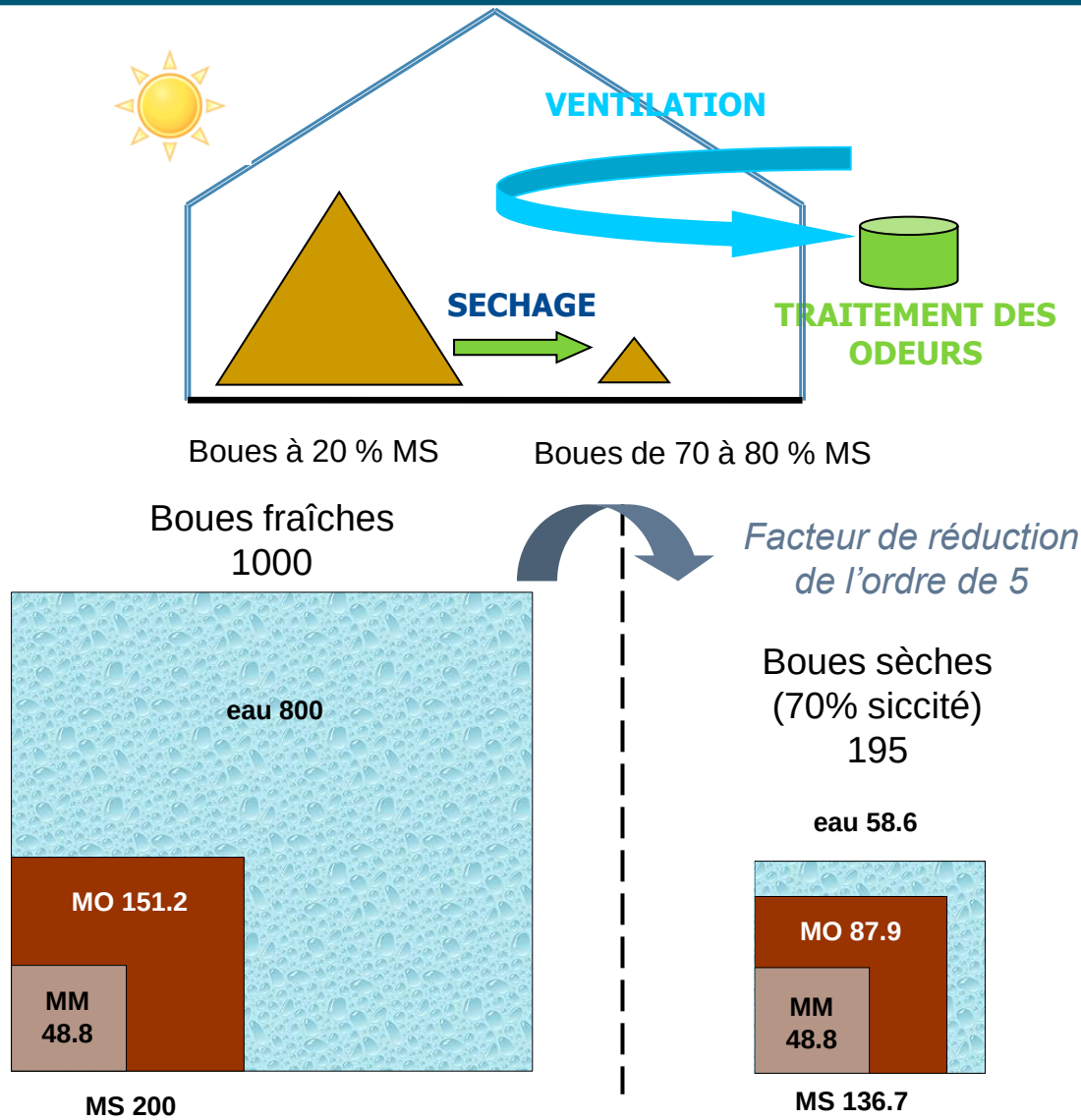
- > Le verre est opaque à la chaleur ré-émise par l'échauffement
➡ Echauffement global de l'ambiance

Le séchage solaire: l'effet de serre

► Favoriser l'évaporation de l'eau contenue dans la boue déshydratée :

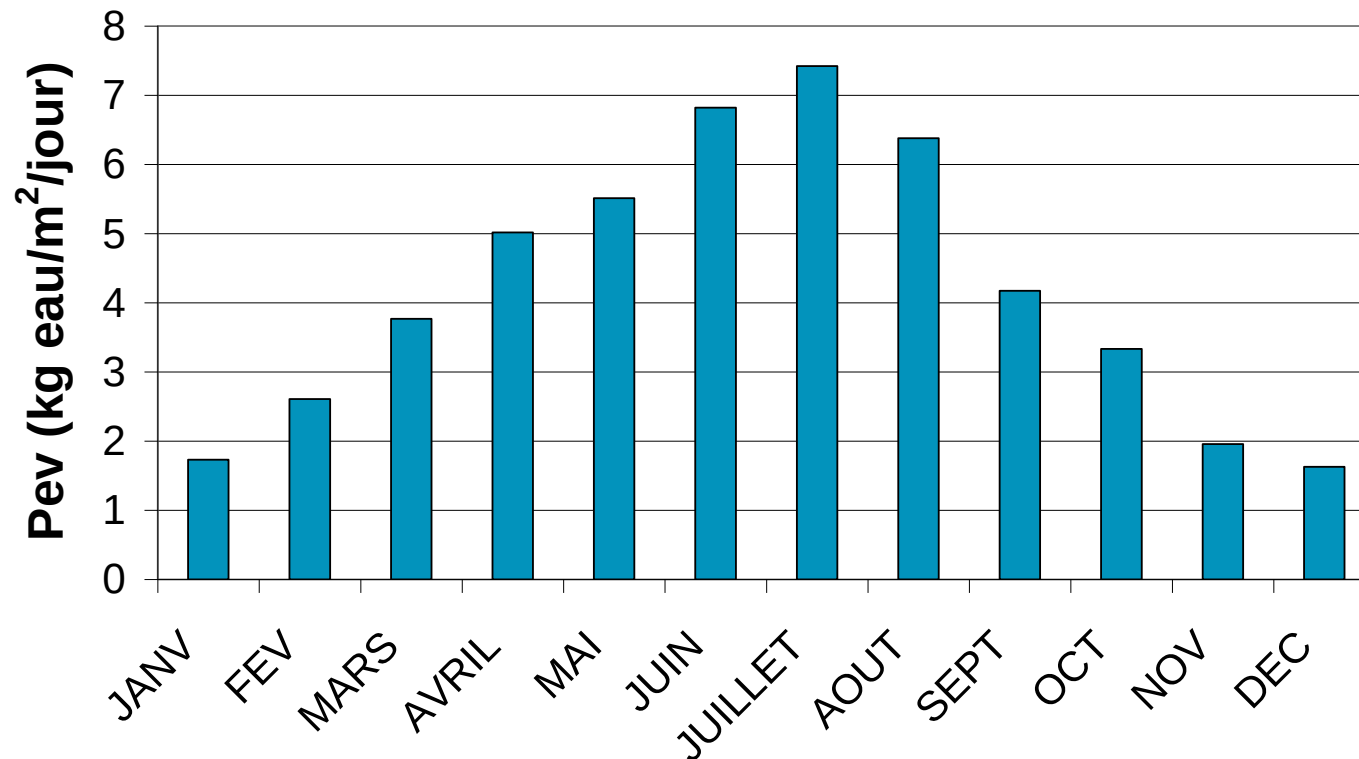
- > **SOUS SERRE** : (protection de la pluie, stockage des boues, réchauffage de l'air)
- > **PAR UNE VENTILATION FORCÉE** : l'air est le vecteur de l'humidité et la ventilation est une « pompe à eau »
- > **EN BRASSANT LA BOUE EN PERMANENCE** :
1 X par jour au minimum

Le séchage solaire: l'effet de serre



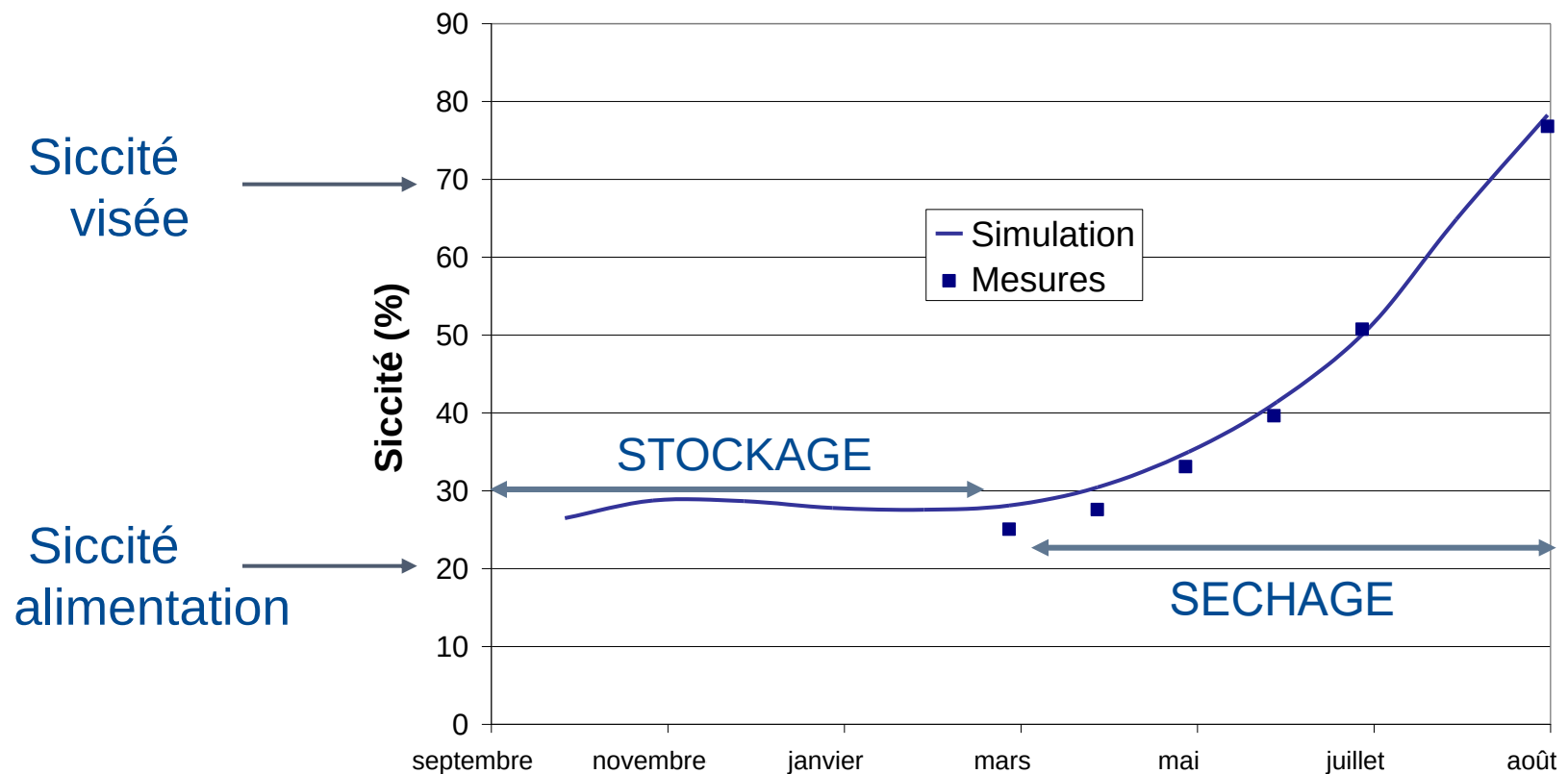
Mise en œuvre du séchage solaire

► Capacité évaporatoire sur une année



Mise en œuvre du séchage solaire

► Suivi de la siccité moyenne des boues

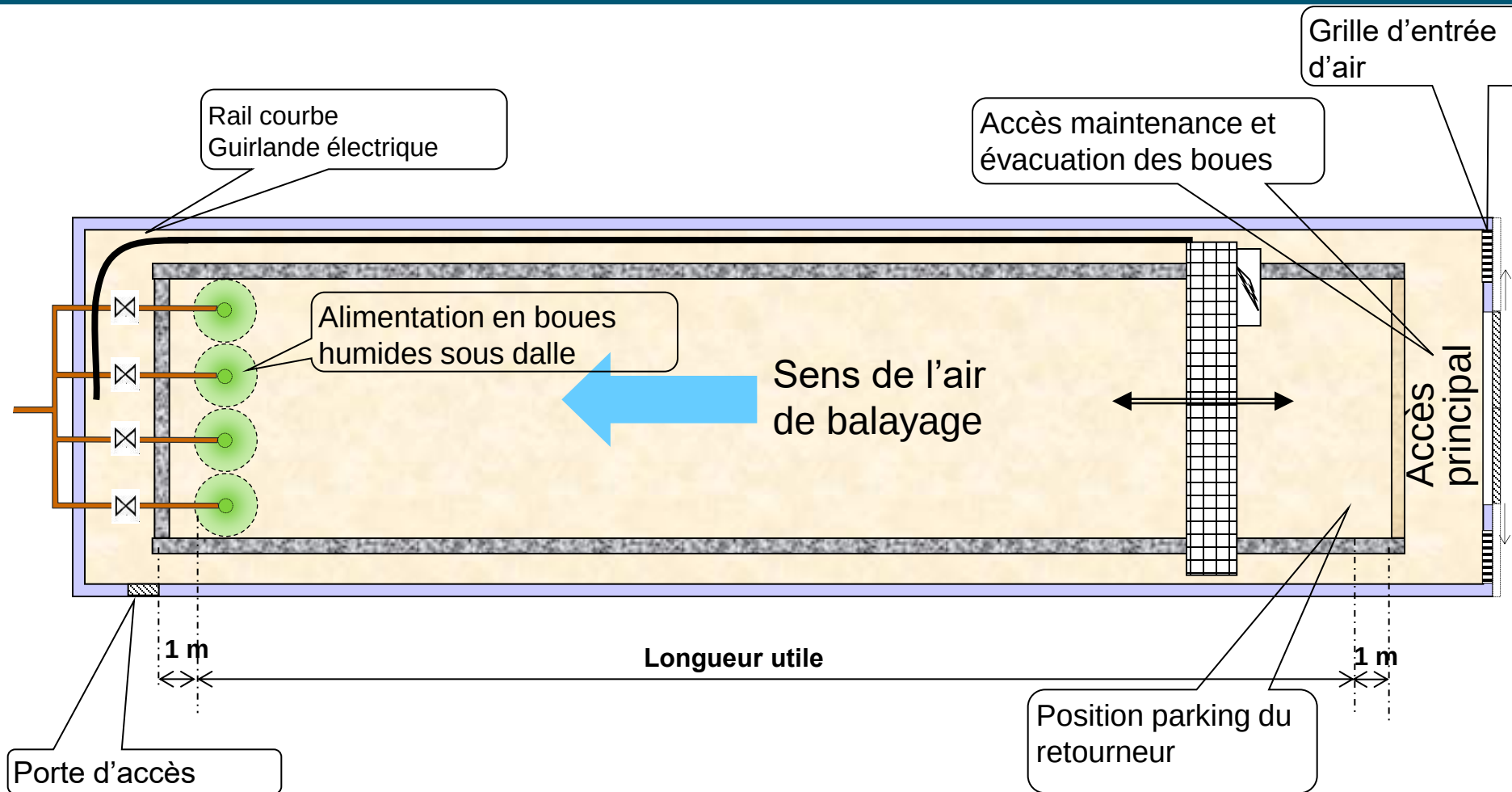


Mise en œuvre du séchage solaire

► Evolution du lit de boues au cours du cycle annuel



Mise en œuvre du séchage solaire



Mise en œuvre du séchage solaire



Mise en œuvre du séchage solaire



Mise en œuvre du séchage solaire

► Exemple : Thuit Signol (Eure)



- ✓ Surface utile = $7,8 \text{ m} * 38 \text{ m}$, soit 300 m^2
- ✓ Production de boues = $100 \text{ t}_{\text{MS}}/\text{an}$ (5 000 EH)
- ✓ Ventilation = $31\,800 \text{ m}^3/\text{h}$ (20 renouvellements par heure)

Séchage solaire classique

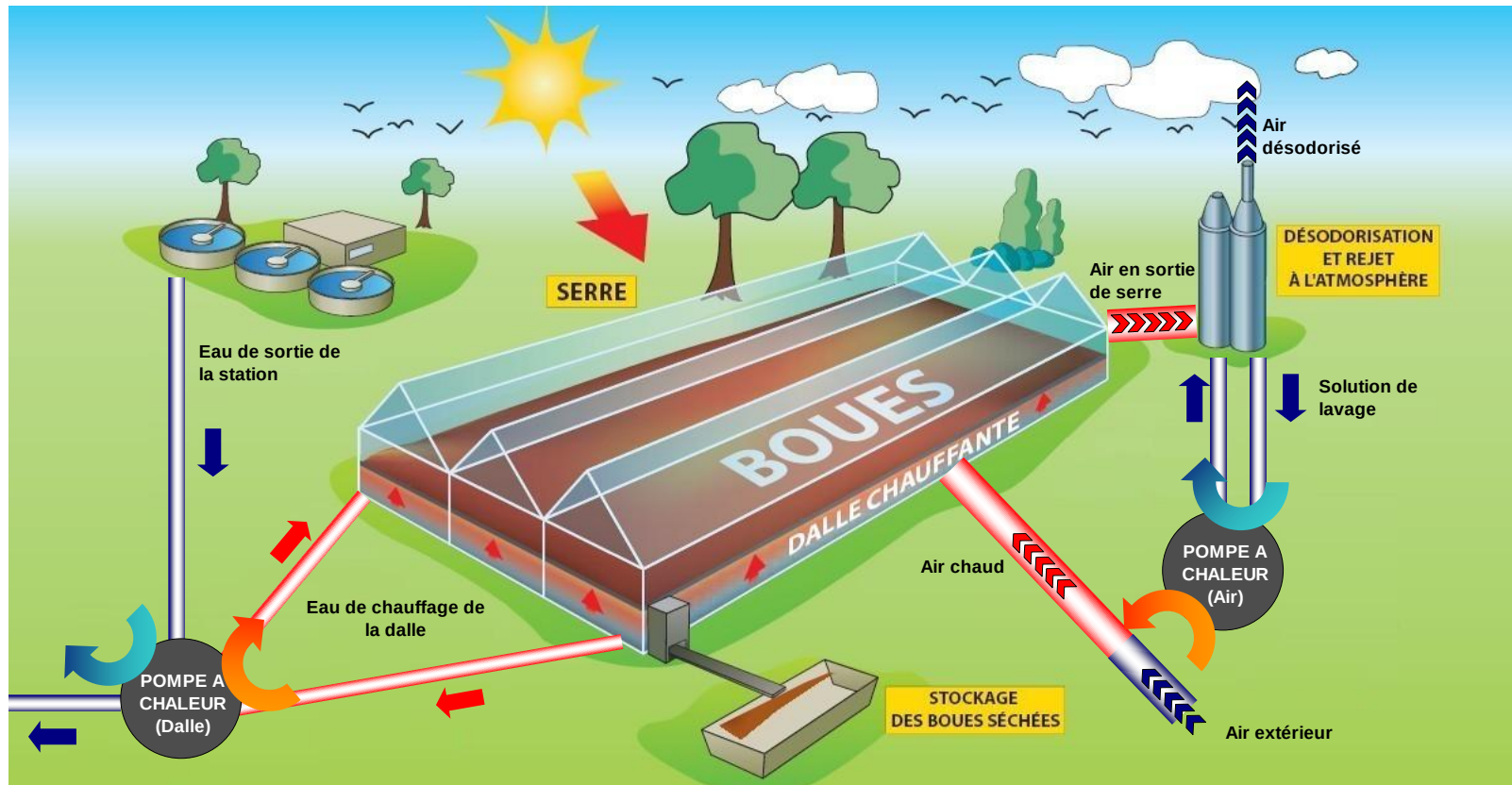
■ Ses avantages

- > Coûts de fonctionnement faibles (énergie, réactif, personnel)
- > Procédés autonomes et écologiques
- > Stockage des boues sur une année

■ Ses limites

- > Surface de serre importante
- > Séchage surtout efficace en été
- > Boues sèches disponibles une fois par an
- > Désodorisation de l'air coûteuse

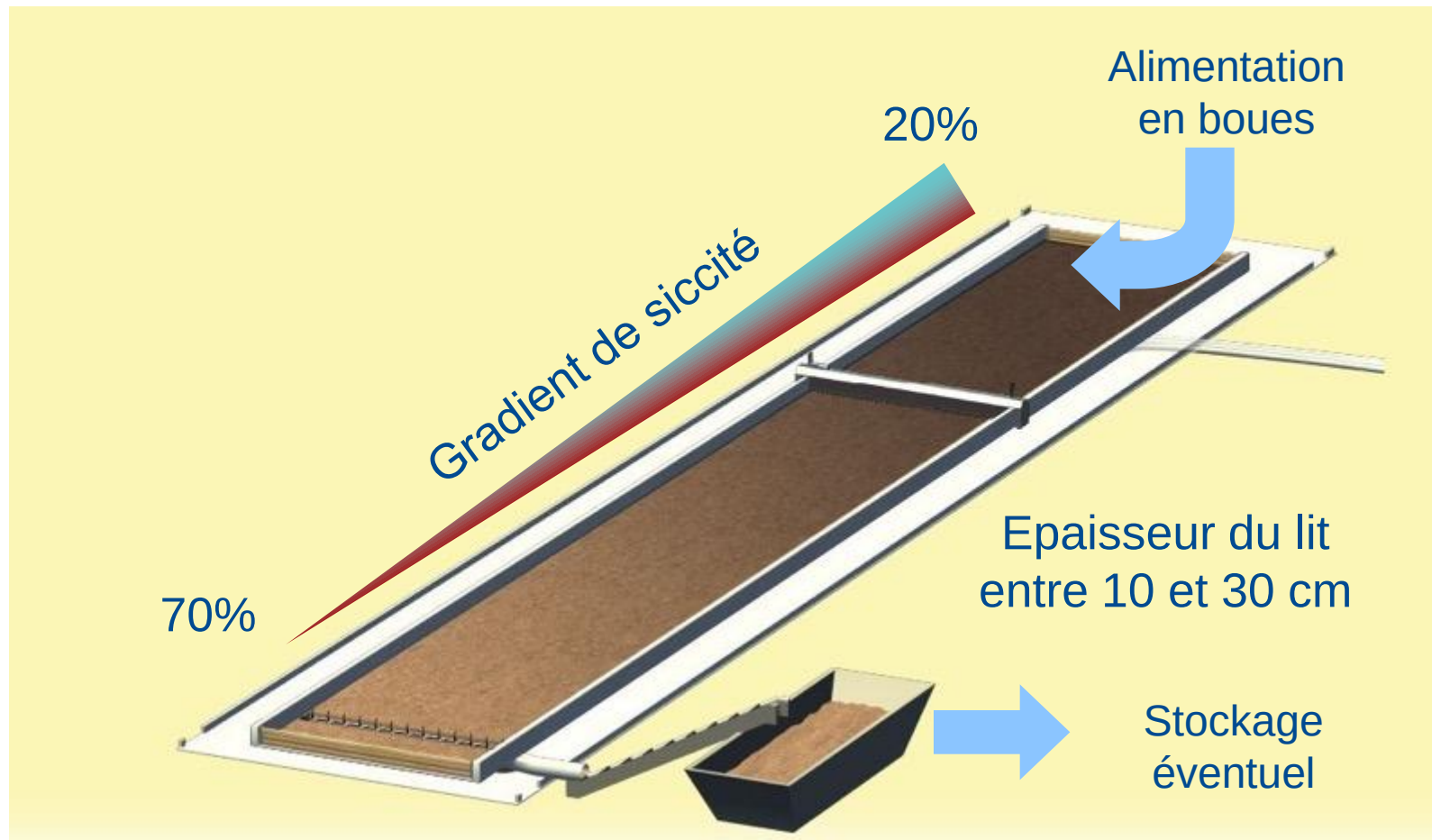
Séchage solaire + Pompe à chaleur



- > Energie solaire + apport complémentaire par PAC
- > Performances de séchage = **6 kg ee.m⁻².jour⁻¹**

Séchage solaire + Pompe à chaleur

► Gestion des boues



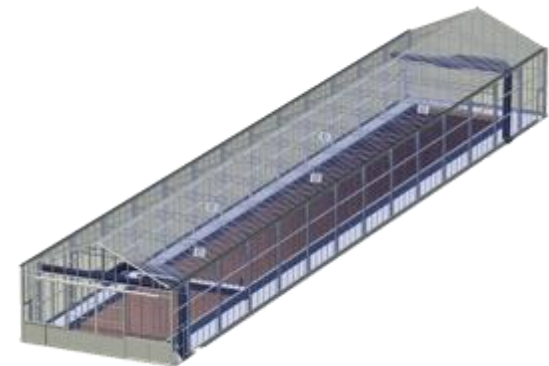
Séchage solaire + Pompe à chaleur

► Exemple d'une 10.000 EH (dans les environs de Clermont Ferrand)

> Classique



> Pompe à chaleur



- > Emprise au sol moins importante
- > Débit d'air beaucoup plus faible
- > Évacuation des boues sèches à prévoir

Séchage solaire + Pompe à chaleur

► Avantages

- | | |
|-----------------------------|--|
| + compacité | <i>Surface utile moins importante</i> |
| + procédé continu | <i>Boues sèches toute l'année</i> |
| + désodorisé | <i>Débit d'air faible</i> |
| + efficacité énergétique | <i>Utilisation de pompes à chaleur</i> |
| + simplicité d'exploitation | <i>Entièrement automatisé</i> |

► Limites

- | | |
|------------------------|------------------------------|
| - procédé continu | <i>Stockage nécessaire</i> |
| - équipements nombreux | <i>Maintenance régulière</i> |

Le séchage thermique

► Les différentes technologies

- > Séchage direct (par convection)
- > Séchage indirect (par contact)

STEU > 50 000 EH – 100 000 EH
Réduction du stockage
Economie de transport

Le coût énergétique est de l'ordre de **800 à 1200 kWh/T** d'eau évaporée. A partir d'une boue à 25 %, il faut 30 kWh/T MS d'électricité pour obtenir une siccité de 35 % (séchage partiel) et de 50 kWh/T MS pour obtenir une siccité de 95 % (séchage total) .

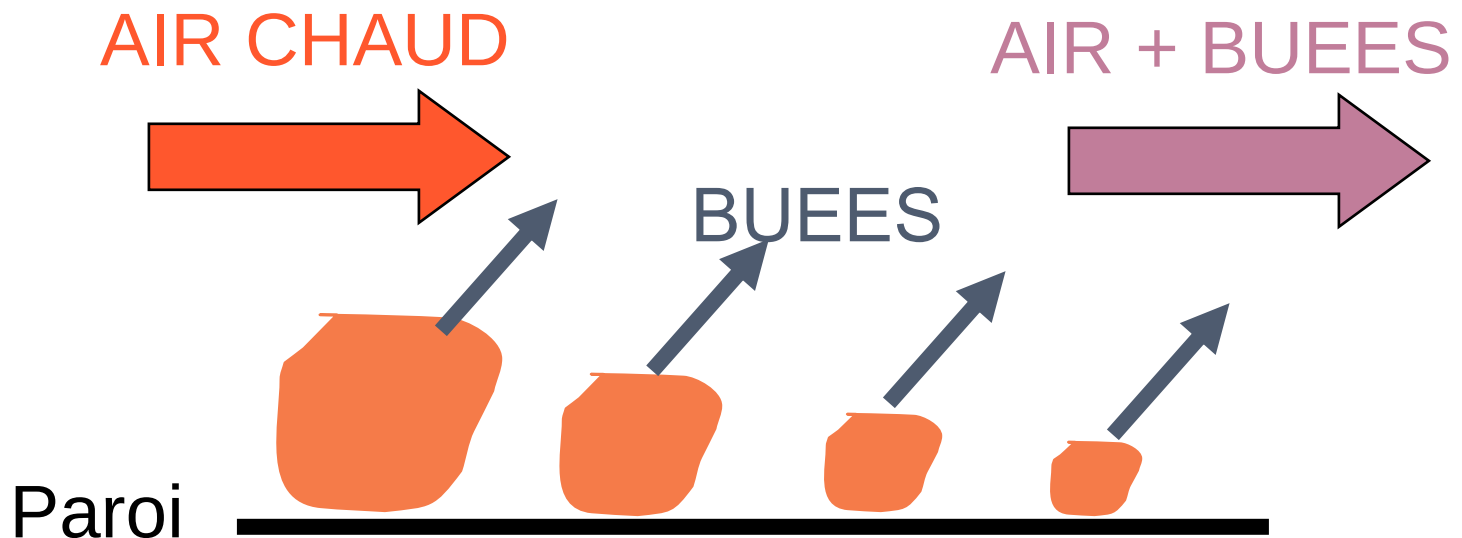
Des mesures de sécurité sont nécessaires lors de la mise en place de sècheurs notamment contre les **risques de feu et d'explosion**. La concentration en poussière doit être inférieure à 60g/Nm³, la concentration en O₂ inférieure à 12% et la température des granulés inférieure à 100°C

Le séchage thermique

► Principe du séchage direct

Le séchage par convection

La boue est directement séchée par le gaz de combustion ou l'air chaud en libérant l'humidité. L'air chaud sert de transport pneumatique à travers le sécheur. La température de séchage $< 85\text{ }^{\circ}\text{C}$



Le séchage thermique

► Principe du séchage direct

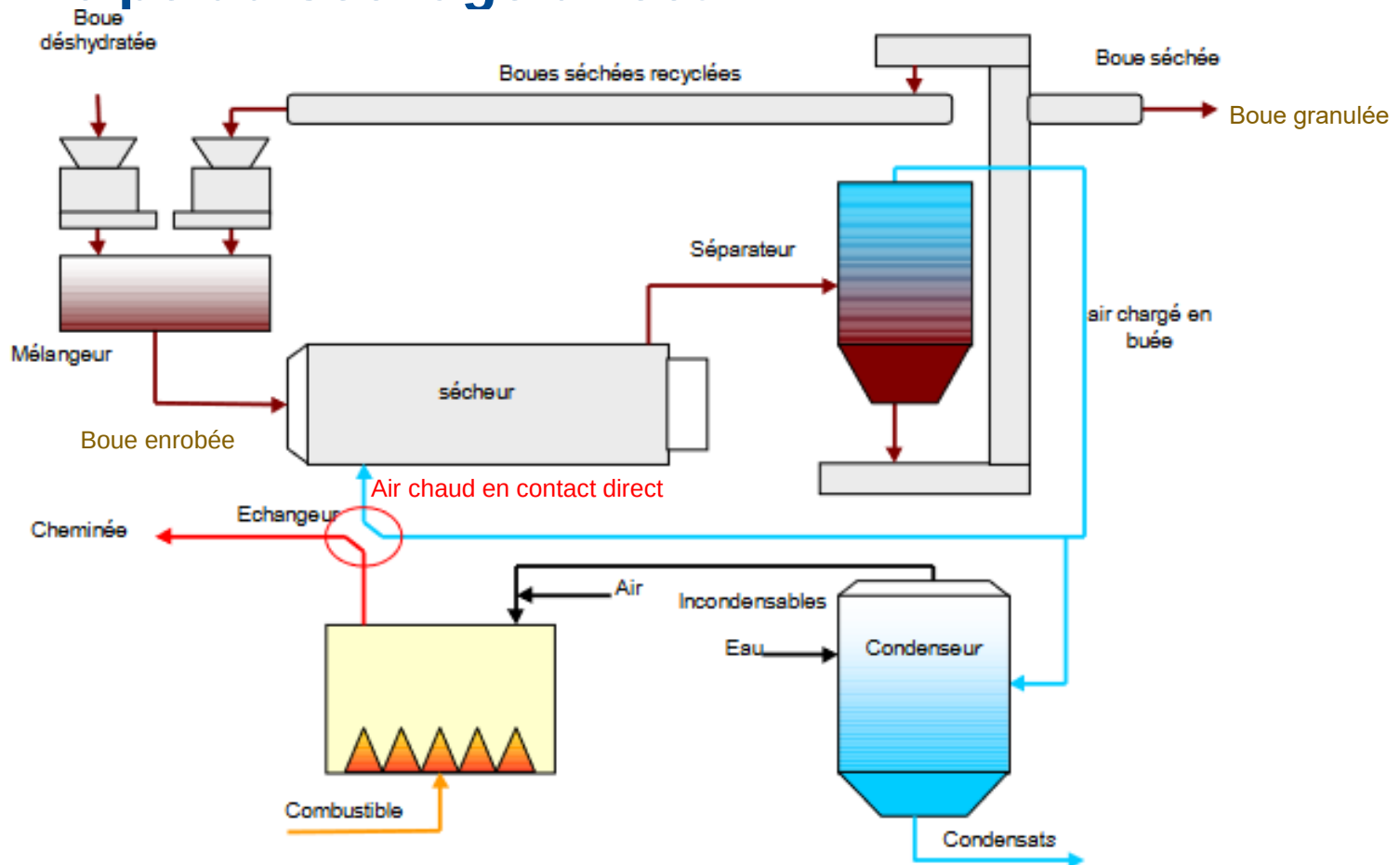


Schéma 3-Le Principe de fonctionnement d'un sécheur direct [8]

Le séchage thermique

► Séchage direct ou par convection

Principe :

- La boue est séchée au contact d'un flux de gaz chaud

Avantages :

- Granulation par recyclage
- Homogénéité du séchage
- Flexibilité aux variations de siccité entrante
- Adapté pour les grosses capacités
- Consommation énergétique

Le séchage thermique

► Séchage direct ou par convection

Inconvénients :

- Aspect sécurité : présence O₂ + MV = risques de feu et d'explosion si mal géré
- Recirculation de la boue inévitable
- Débit d'air important à traiter

Le séchage thermique: ANDRITZ

► Sécheur direct

Sécheur à tambour



Le séchage thermique: ANDRITZ

Sécheur tunnel à bande
basse température (BDS) –
Wohlen, Suisse



Le séchage thermique

► Boue granulée

Boue sèche (aspect granulés comparables aux engrais chimiques)

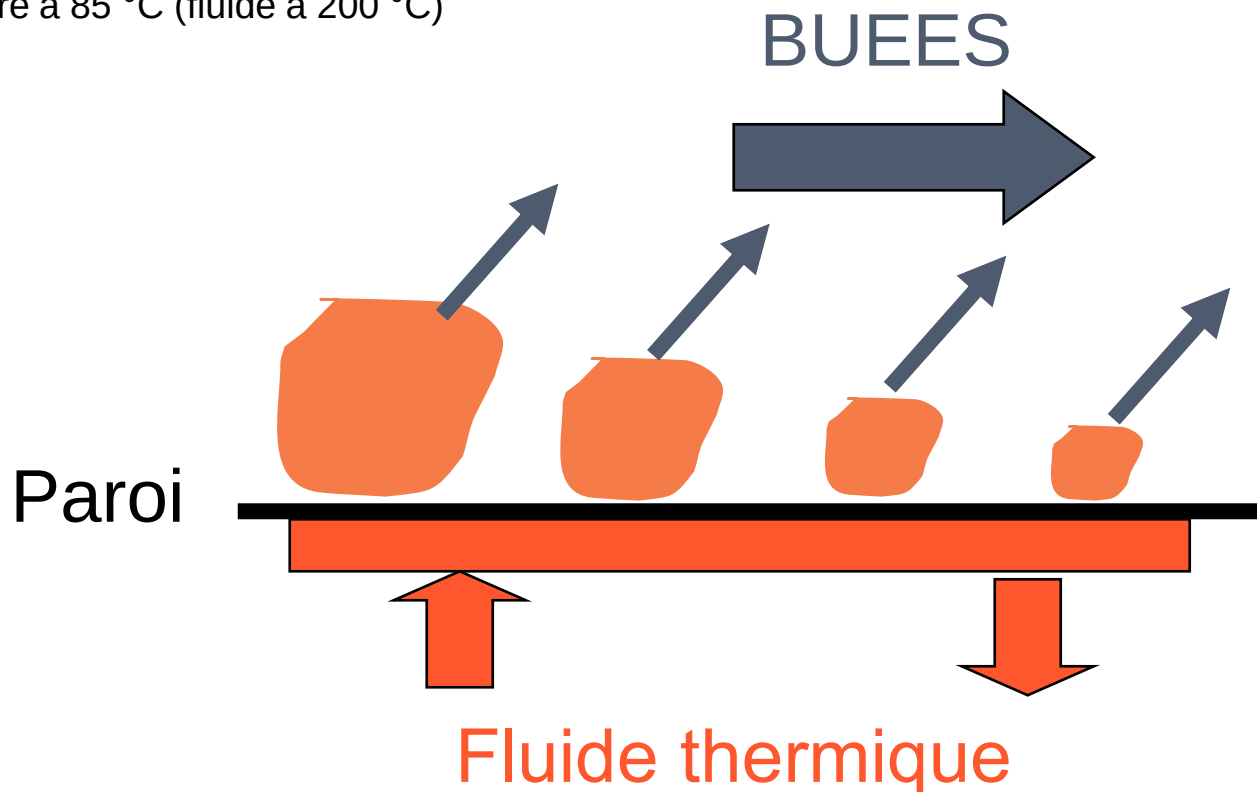


Le séchage thermique

► Séchage indirect

Le séchage par contact

la boue est indirectement séchée par le gaz de combustion ou de l'air chaud (contact avec surface). Le transport de la boue est assuré par déplacement «mécanique». La température de séchage est supérieure à 85 °C (fluide à 200 °C)



Le séchage thermique

► Séchage indirect

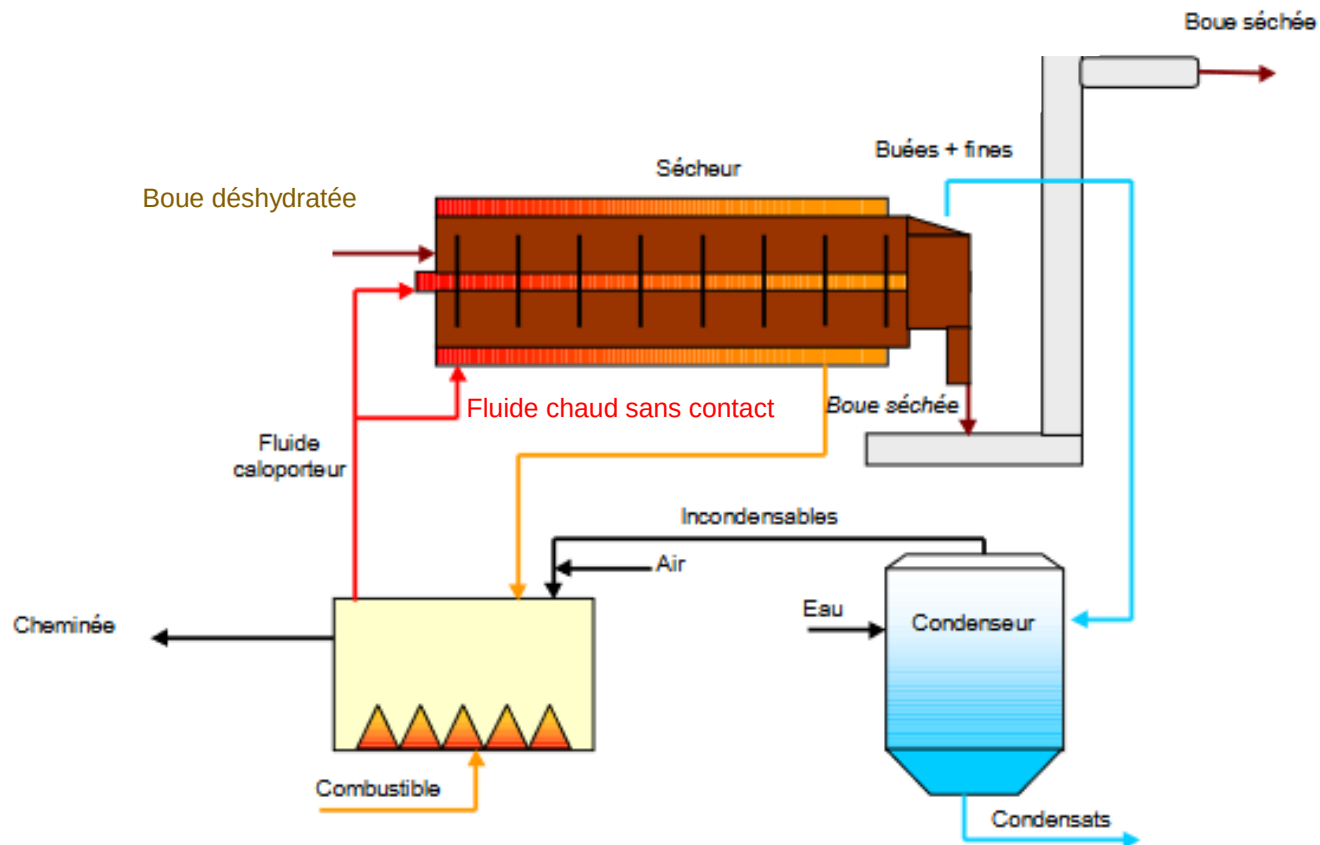


Schéma 5-Principe de fonctionnement d'un sécheur indirect [8]

Le séchage thermique

► Séchage indirect

Principe :

- La boue est séchée au contact d'une paroi chaude.
- Fluide:
 - ✓ Vapeur: 180° C maxi
 - ✓ Huile: autour de 250°C

Avantages :

- Risques incendie plus faibles dans le sécheur
- Sécheur adapté à de petites unités
- Faible volume d'air à traiter
- Adapté au pré-séchage

Le séchage thermique

► Séchage indirect

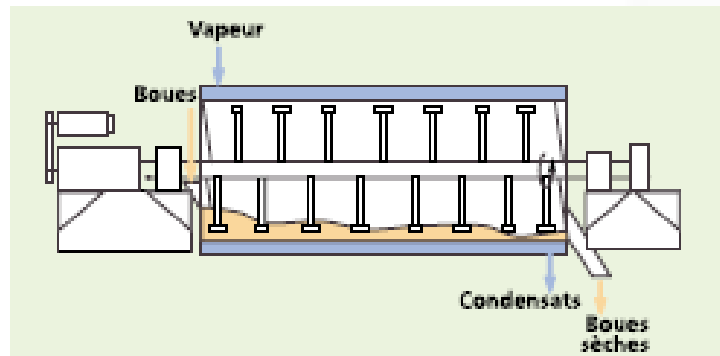
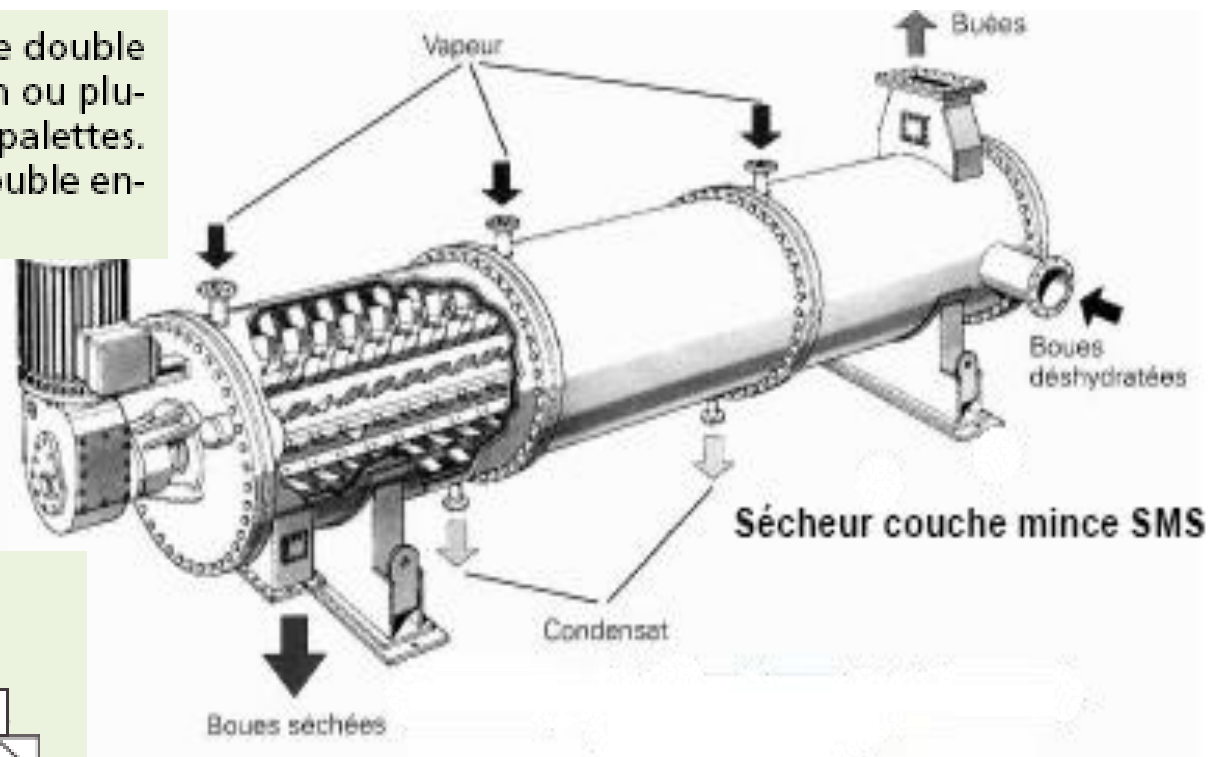
Inconvénients :

- Aspect du produit final (souvent pulvérulent) : granulation souhaitable
- Peu flexible aux variations de siccité
- Abrasion importante des pièces internes
- Sensible au colmatage

Le séchage thermique

► Sécheur indirect : BUSS

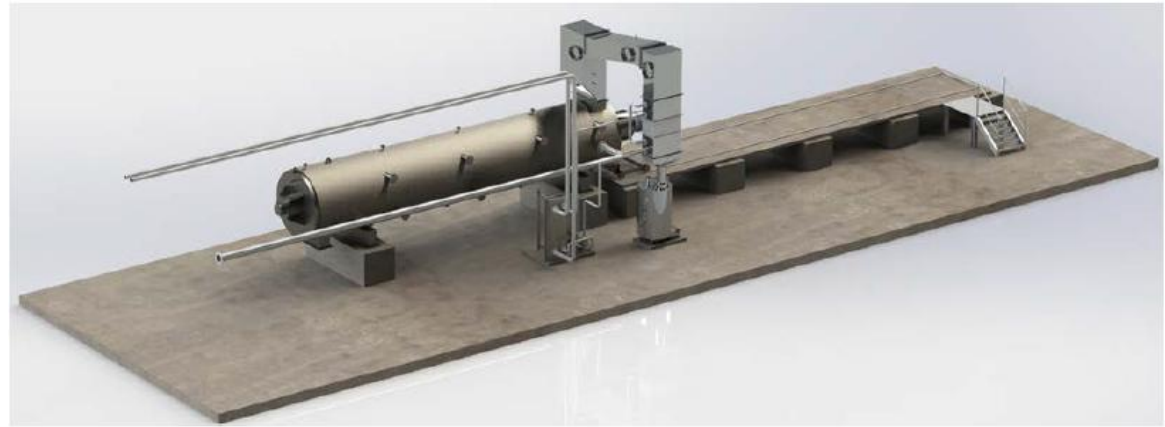
Les sécheurs à palettes disposent d'une double enveloppe extérieure immobile et d'un ou plusieurs rotors sur lesquels sont fixées les palettes. Le fluide caloporteur circule dans la double enveloppe, les rotors et les palettes.



Sécheur à palettes

Le séchage thermique

► Séchage indirect : BUSS



Installation classique d'un InnoPreDry®



Le séchage thermique



Le séchage thermique

► Sécheur combiné : les Grésillons (400 000 EH)

Dimensionnement :

Production de boue annuelle :	11 930 tMS/an
Disponibilité du sécheur :	48 sem/an
Production de boue hebdomadaire :	250 tMS/sem
Rythme de fonctionnement de l'atelier :	100 h/sem (Lun/Ven)
Siccité d'entrée :	25 % MS
Siccité de sortie :	90 % MS

Calcul de la capacité évaporatoire :

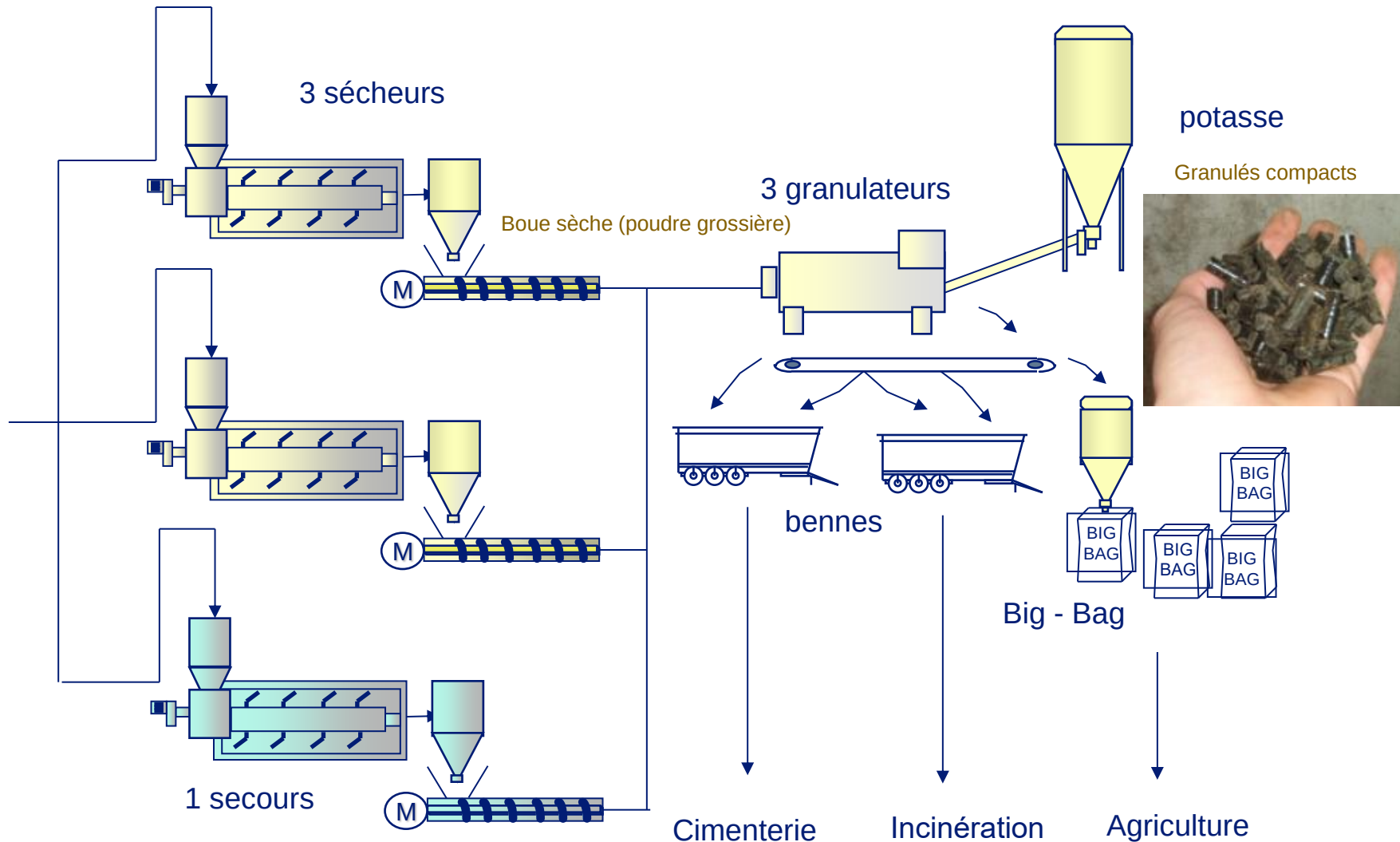
$$250\,000 / 100 / 0,25 = 10\,000 \text{ kg/h de boues brutes en entrée}$$

$$250\,000 / 100 / 0,9 = 2\,780 \text{ kg/h de boues sèches en sortie}$$

$$\text{Capacité évaporatoire} = 10\,000 - 2\,780 = 7\,220 \text{ kg eev/h}$$

Soit 2 sécheurs de capacité standard 3,5 teev/h (ou 3 500 kg H₂O/h)

Le séchage thermique : Caen (330 000 EH)



Le séchage thermique : Caen (330 000 EH)

Hall
industriel
abritant les
3 sécheurs



Le séchage thermique

Traitement
des
poussières



Le séchage thermique : Caen (330 000 EH)



Le séchage thermique



Les différentes formes de valorisation

► Valorisation de la matière

EPANDAGE



COMPOSTAGE



► Valorisation énergétique

DIGESTION



> 50-100 000 EH

INCINERATION



> 300 000 EH

Epandage agricole

► Epandage agricole

- L'épandage de boues ne peut-être pratiqué que si celles-ci présentent un **intérêt agronomique**
- Les boues ont le **caractère de déchets** au sens de la loi du 15 juillet 1975. Le producteur en est donc responsable jusqu'à complète élimination
- Une **étude préalable** définissant l'ensemble de la filière technique (caractérisation des boues, périmètre d'épandage, organisation d'épandage...) est obligatoire
- Une **solution alternative d'élimination** ou de **valorisation des boues** doit être prévue
- Un **stockage suffisant et aménagé** doit être prévu pour tenir compte des périodes où l'épandage est soit interdit, soit rendu impossible
- Les producteurs de boues doivent mettre en place une surveillance de la **qualité des boues et des sols** ainsi qu'une surveillance des épandages

Les règles d'épandage applicables aux boues (distances, périodes...) sont similaires à celles applicables aux effluents d'élevage.

Epandage agricole

► Epandage agricole : réglementation

Boues de station d'épuration : quelle procédure pour leur retour au sol ?

Plan d'épandage

Prescriptions, organisation, recommandations : art. R. 211-25 à R 211-47 du CE, arrêté du 8 janvier 1998

Autorisations administratives : régimes de déclaration/autorisation au titre de la loi sur l'eau : nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration (articles L. 211 et suivants CE et R. 241-1 du CE) ; procédures (R. 214-6 à -31 du CE)

Autorisation de mise sur le marché

Procédure d'homologation ou d'autorisation provisoire : article L. 255-2 du Code rural et pêche maritime

Démarche individuelle par producteur

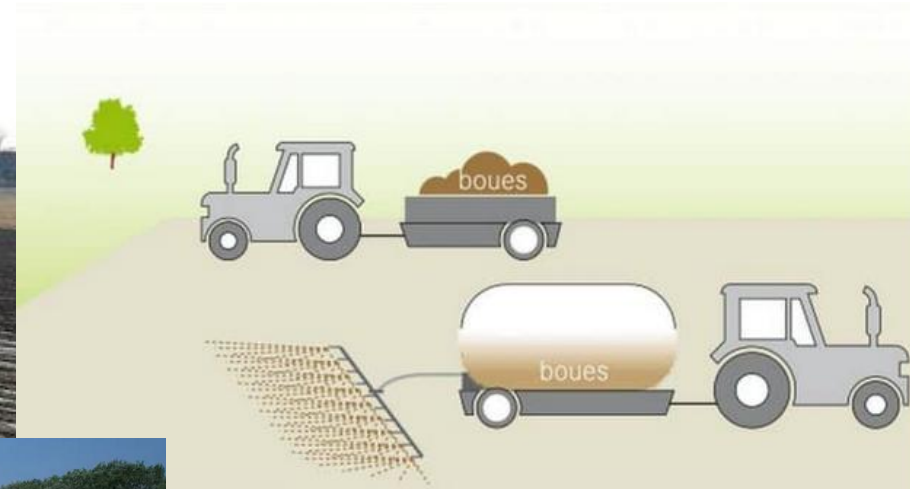
Examen de la demande par l'ANSES dans les conditions prévues par le décret n°80-477 du 16 juin 1980 et l'arrêté du 21 décembre 1998 modifié relatif à l'homologation des matières fertilisantes et des supports de culture

Normalisation

Norme NFU 44-095 : amendements organiques obtenus par compostage et contenant des matières issues du traitement des eaux, d'intérêt agronomique et d'application obligatoire depuis mars 2004

L'épandage des boues d'épuration doit respecter des procédures et des normes strictement définies par les textes, destinées à garantir son innocuité.

Epandage agricole : mise en œuvre



Compostage

► Compostage

Processus naturel de transformation de matériaux biodégradables en amendement humifère stabilisé

► Produit normé

- Norme **NFU 44 095**: pas de plan d'épandage
- Produit élaboré, facile à épandre
- Absence d'odeur du produit
- Image écologique du produit



Compostage

► Norme NFU 44 095

- Paramètres agronomiques (MO, MS en % de la MB)
- Éléments traces métalliques (arsenic, cadmium, plomb, mercure, chrome, cuivre., nickel, sélénium, zinc)
- Composés traces organiques (PCB, Fluoranthène...)
- Micro-organismes pathogènes (E.coli, Clostridium perfringens, Entérocoques, Œufs d'helminthes, Listeria, Salmonelles)

Les composts répondant aux spécifications et aux critères d'innocuité de cette norme pourront être sans contrainte de plan d'épandage.

Compostage

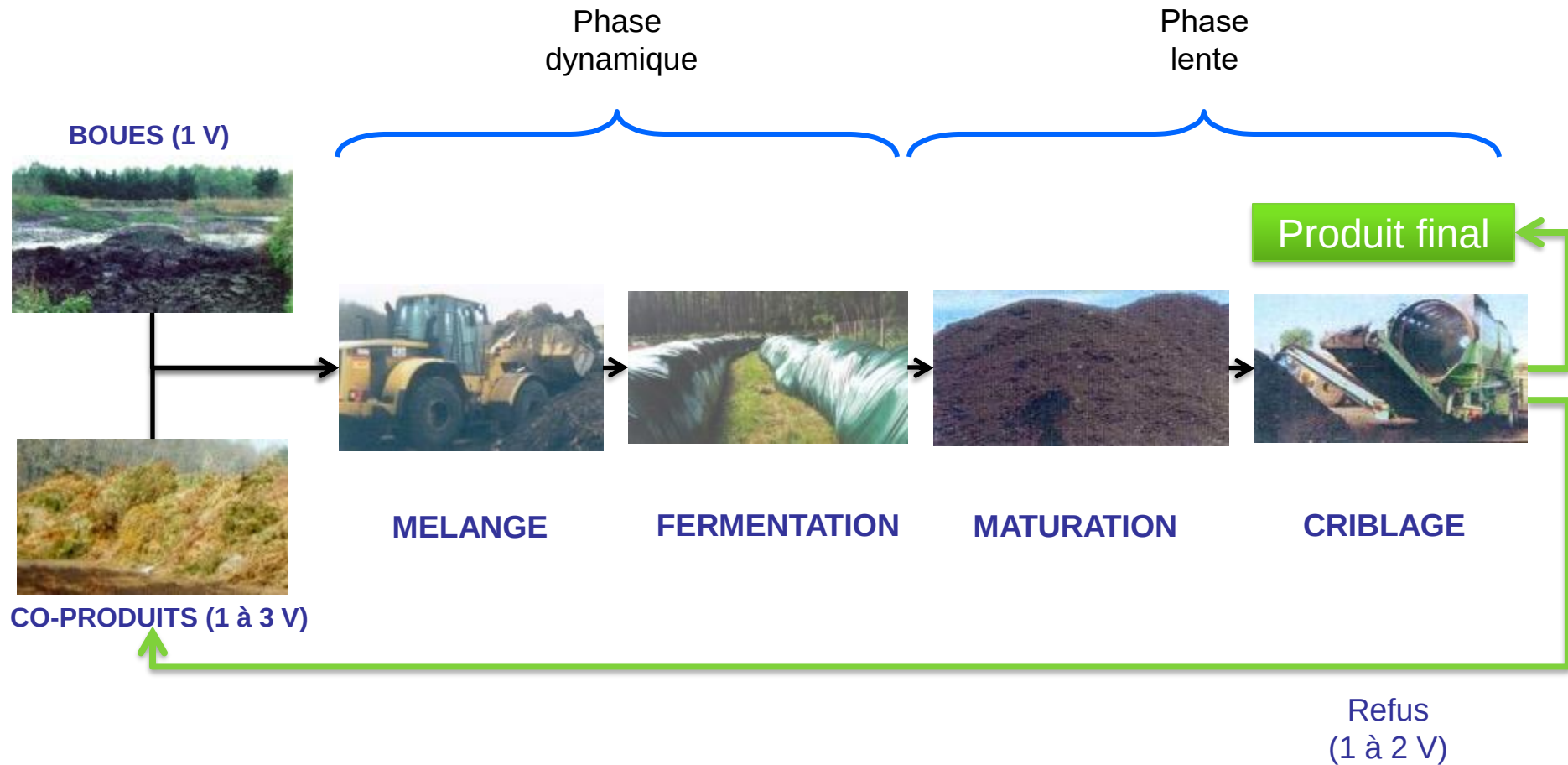
► Description du processus

Le compostage est une décomposition naturelle des matières organiques par voie aérobie due à l'activité des micro-organismes.

Le compostage s'accompagne d'une:

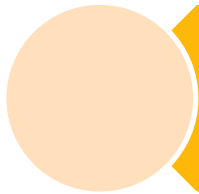
- élévation de température: **hygiénisation**
- oxydation de la matière fermentescible : **stabilisation**
- déshydratation par aération et réchauffement: **réduction**

Compostage

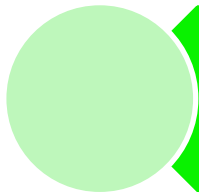


Compostage

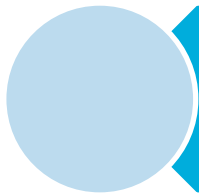
► Les techniques



Compostage en andains



Sacs ventilés



Compostage en casiers

Compostage en andains retournés



Compostage en andains retournés

► Caractéristiques

Procédé extensif et rustique

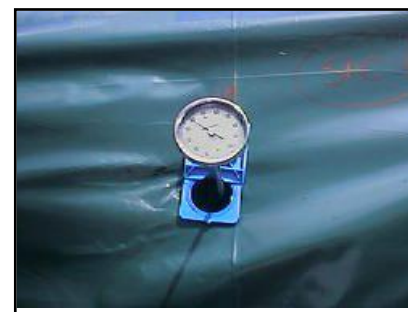
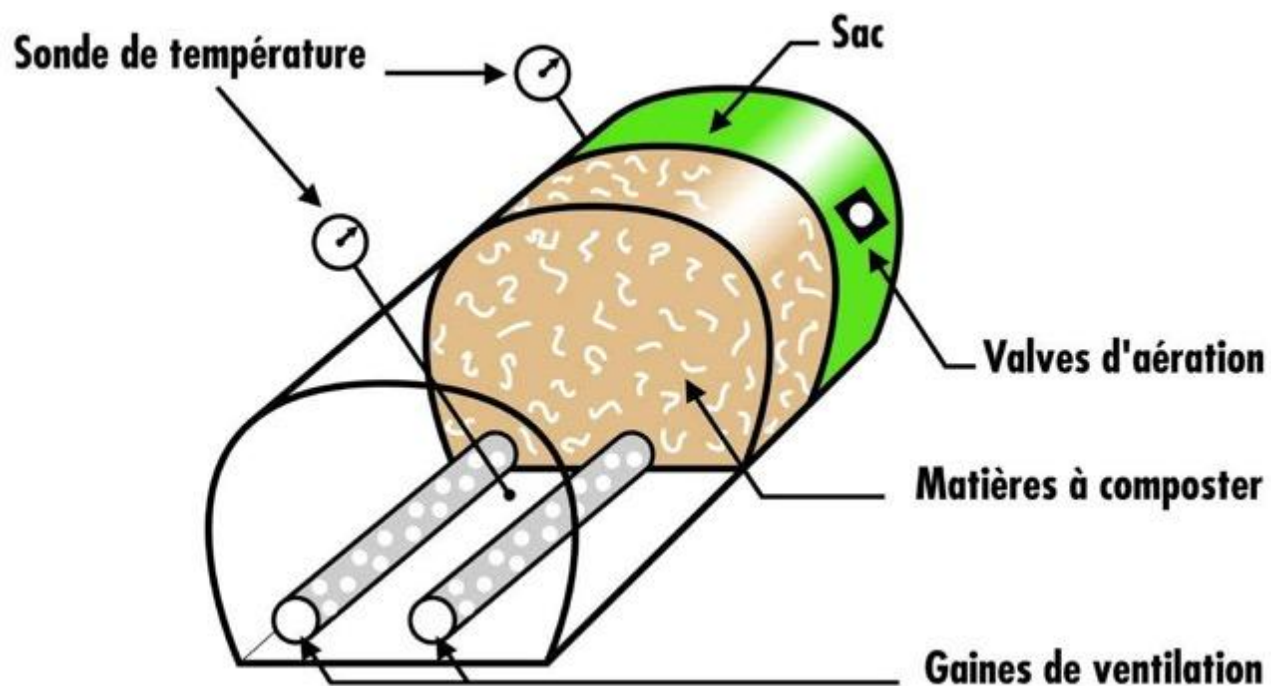
Entièrement à l'extérieur

Généralement sans aération intégrée

► Avantages / Inconvénients

- Capacité modulable
- Faibles besoins techniques
- Coûts d'exploitation réduits
- Surface importante
- Pas de traitement des odeurs

Compostage en sacs ventilés



Valve de ventilation
et sonde de température



Ventilateur

Compostage en sacs ventilés

► Caractéristiques

Procédé semi intensif

Aération forcée

► Avantages/Inconvénients

- Capacité modulable
- Fermentation confinée
- Investissement réduit
- Pas de traitement d'odeur
- Consommables (sac et drains)



Compostage: station de Nîmes

(1) Mélange des boues

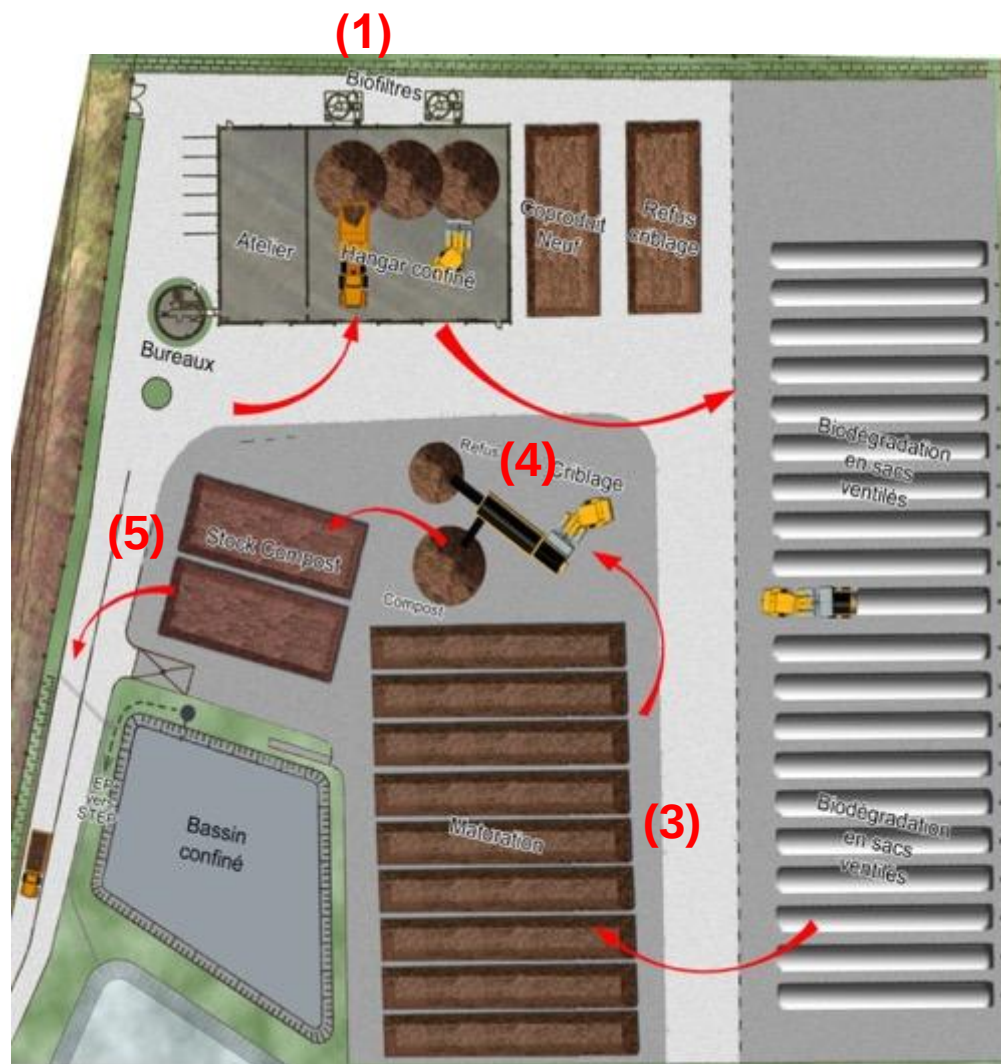
(2) Biodégradation

(3) Maturation

(4) Criblage

(5) Stockage compost

30 000 m² aménagés
15 000 t/an de boues



Compostage: station de Nîmes

► Compostage en sac ventilés



Compostage: station de Nîmes

► Compostage: bâtiment de mélange



Compostage: station de Nîmes



Compostage: station de Nîmes

► **Désodorisation** du bâtiment de compostage



Compostage: station de Nîmes

► Sacs de fermentation



Compostage: station de Nîmes

► Sacs de fermentation



Compostage: station de Nîmes

► Maturation en andains



Compostage: station de Nîmes

► Criblage par unité mobile



Compostage: station de Nîmes

► Stockage du compost (NFU 44095)

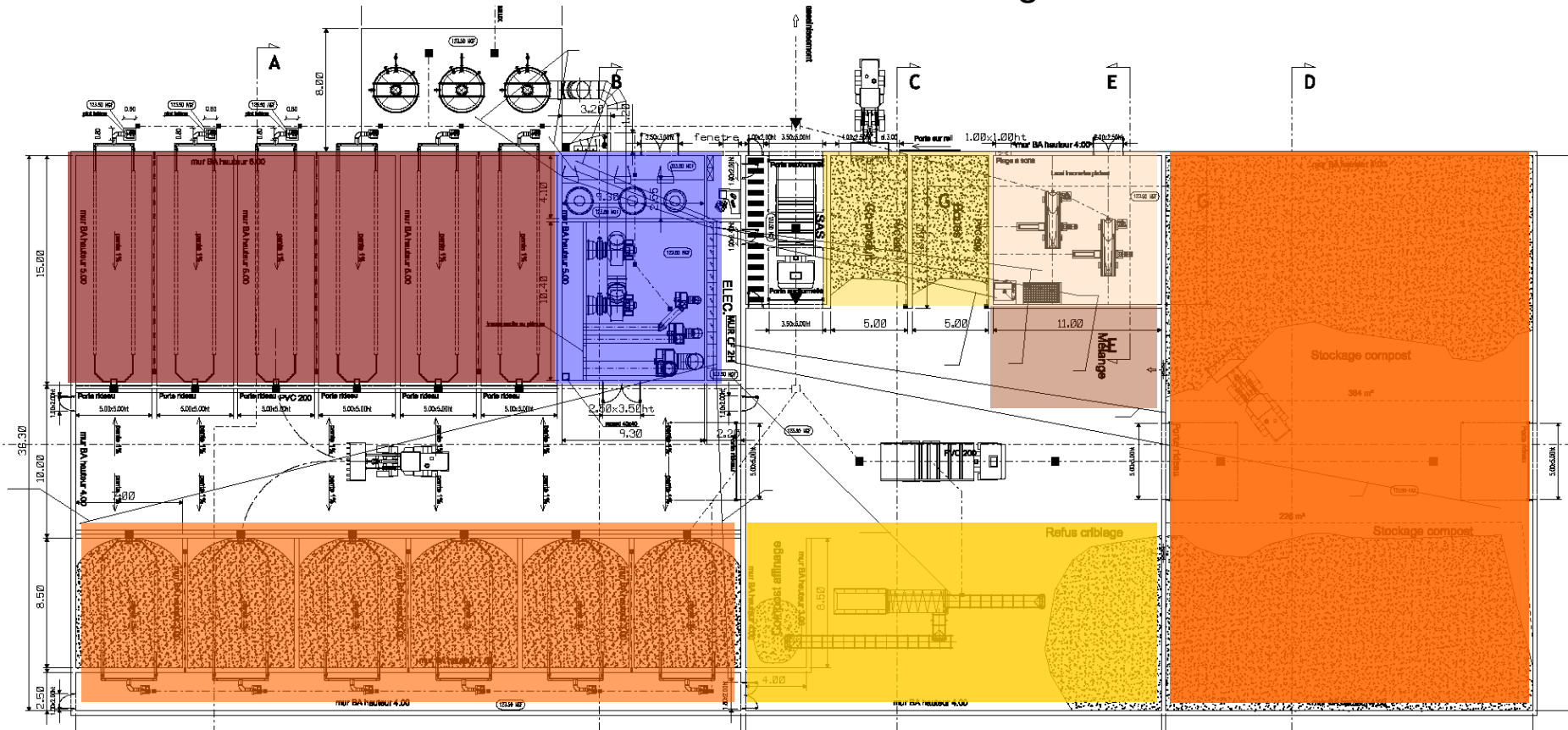


Compostage en casiers fermés (Aime La Plagne)

Fermentation

Désodorisation

Mélange



Maturation

Criblage

Stockage

Compostage en casiers fermés

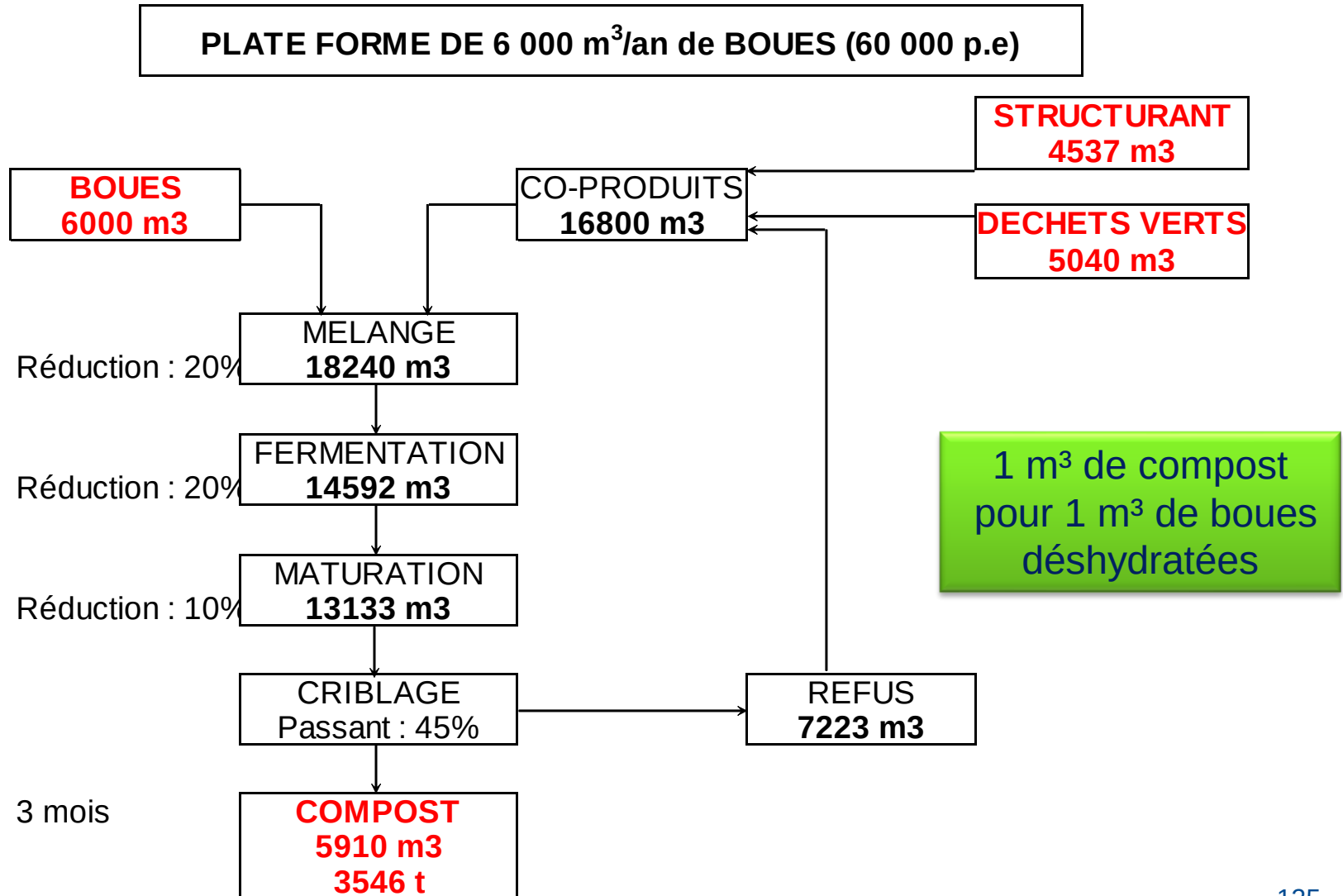
Casier de maturation



Casier de fermentation étanche



Compostage : étude de cas



Compostage – avantages/inconvénients

► Avantages

- ❑ Adhésion du monde agricole au produit :
 - Produit final stabilisé et hygiénisé
 - Meilleure perception des boues
 - Véritable amendement organique

- ❑ Gestion globale des déchets :
 - Valorisation des boues et déchets verts
 - Plateforme centralisée

- ❑ Procédé simple et rustique :
 - Consommation énergétique réduite
 - Exploitation proche du monde agricole

Compostage – avantages/inconvénients

■ Inconvénients

- Procédé extensif
- Facteur de réduction nul
- Nuisances olfactives des plateformes
- Installation ICPE : régime déclaration ou autorisation

Ainsi les installations de compostage des boues d'épuration :

- Sont soumises à autorisation si la quantité de déchets traitée dépasse 75 t/jour ;
- Sont soumises à enregistrement si la quantité de déchets traités est comprise entre 20 t/jour et 75 t/jour ;
- Sont uniquement soumises à déclaration si la quantité de déchets traitée dépasse 2t/j mais reste inférieure à 20 t/jour ;

La réglementation ICPE fixe des critères techniques pour les installations soumises à autorisation :

Tableau 4 : Critères techniques concernant les installations soumises à autorisation²³

Procédé de compostage	Procédé imposé
Par retournement	3 semaines de fermentation 3 retournements minimum 3 jours entre chaque retournement 55 °C au moins pendant 72h
Par aération forcée	2 semaines de fermentation 1 retournement au minimum 3 jours entre chaque retournement 55°C minimum pendant 72h.

Les différentes formes de valorisation

► Valorisation de la matière

EPANDAGE



COMPOSTAGE



► Valorisation énergétique

DIGESTION



> 50-100 000 EH

INCINERATION



> 300 000 EH

Digestion anaérobie (méthanisation)

Contrairement au compostage, la méthanisation est une fermentation de la matière organique des boues en l'absence d'oxygène (anaérobie).

Les déchets organiques sont stockés dans une cuve hermétique, le digesteur, et sont soumis à l'action de bactéries en conditions anaérobiques pendant une durée de 30 à 50 jours.

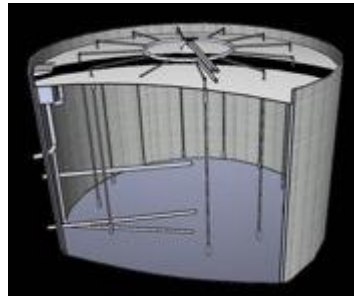
Il existe deux types de fermentations liées à la température du process :

- La **fermentation mésophile** (entre 30 et 35°C) : procédé reposant sur l'activité des entérobactéries (bactéries de l'intestin).
- La **fermentation thermophile** (entre 50 et 60°C) : seules les bactéries thermophiles et les actinomycètes subsistent. Le temps de séjour est court, mais l'exploitation s'avère délicate.

Digestion anaérobie (méthanisation)

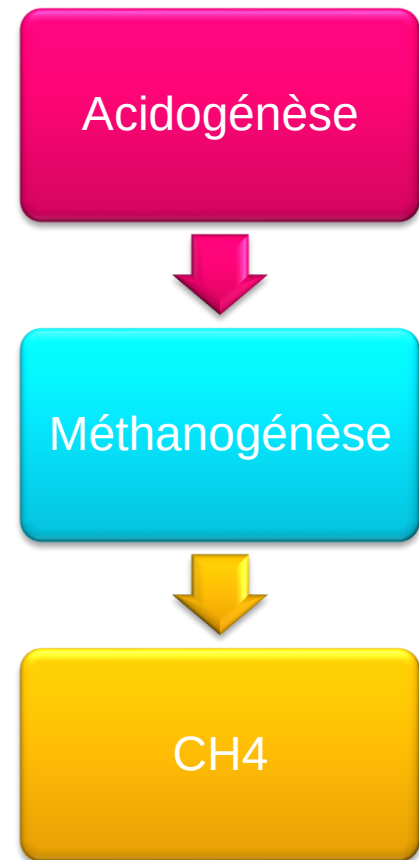
► Digestion mésophile

- > Température à 35°C environ
- > Bactéries anaérobies
- > Brassage mécanique ou au gaz
- > Gazomètre + torchère



► Fonctionnement

- > Temps de séjour: 20 j
- > Charge : 1.8 à 2 kg MVS/m³.j
- > Réduction de 35 à 55% des MVS

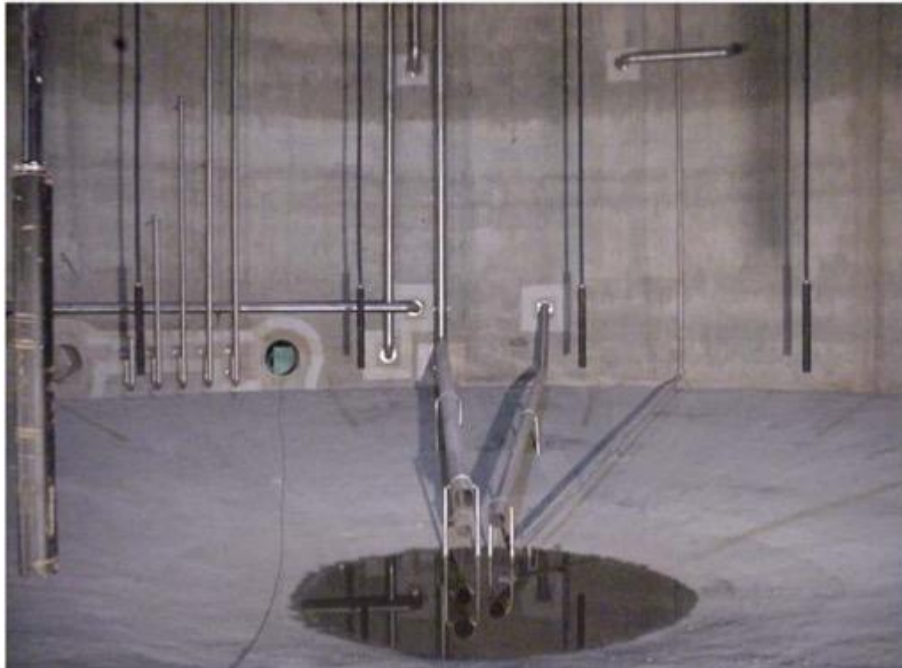


Digestion anaérobie (méthanisation)



Digestion anaérobie (méthanisation)

► Brassage du digesteur



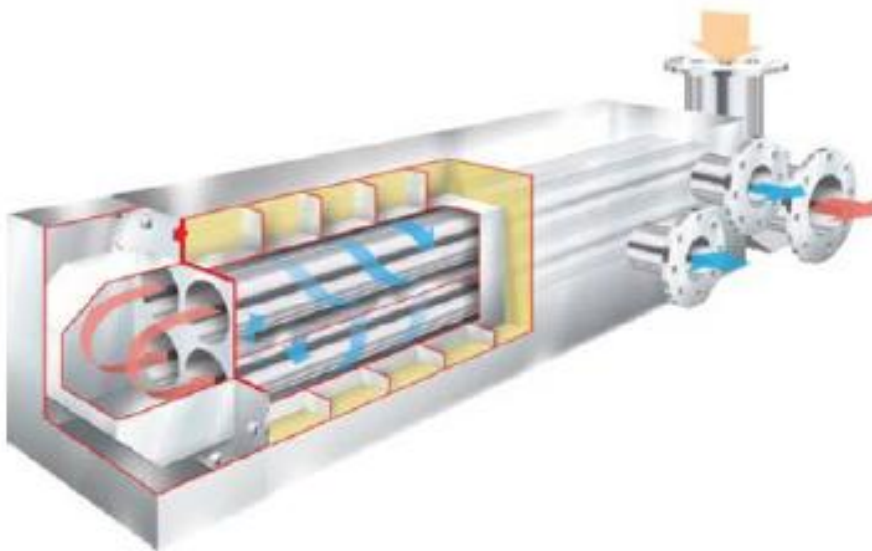
Lance de brassage au biogaz



Agitateur de brassage

Digestion anaérobie (méthanisation)

► Chauffage du digesteur



Conception technique

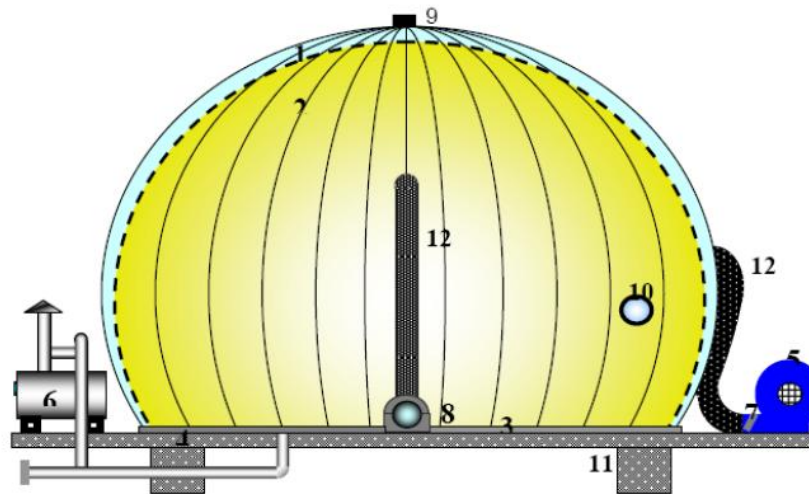
- Construction unique spécialement conçue pour les boues
- Chambres de retour brevetées
- Unité compacte facile à installer
- Inspections et démontage faciles
- Excellente transmission thermique
- Volume de transfert élevé

Avantages du processus

- Digestion et hygiénisation plus efficaces
- Entretien facile
- Elimination du problème de brides multiples et de liaisons desserrées
- Egalisation du profil de température des boues
- Pertes de pression réduites
- Risques de colmatage réduits

Digestion anaérobie (méthanisation)

► Stockage du biogaz



Composition du gazomètre/ Gas holder description

1. Membrane extérieure/ Outer Membrane
2. Membrane intérieure/ Inner Membrane
3. Membrane de fond/ Bottom Membrane
4. Système de fixation/ Anchoring System
5. Ventilateur/ Blower
6. Soupape de sécurité Gaz Double Effet/ Gas Safety valve Double EFFECT
7. Vanne anti-retour/ Non return Valve Air
8. Soupape de Pression (Registre)/ Over Pressure Valve
9. Mesure de Niveau/ Ultrasonic Sensor
10. Hublot d'observation/ Window
11. Dalle Béton/ Concrete base
12. Tuyau d'Air/ Air pipe

Digestion anaérobie : méthanisation

► Les bénéfices

- > Réduction de la matière organique
- > Production d'énergie verte valorisable: le biogaz
- > Boue en sortie de meilleure aptitude à la déshydratation
- > Elimination des agents pathogènes



Digestion anaérobie (méthanisation)

► Composition biogaz moyen

GAZ	%
CH ₄	55 à 75
CO ₂	25 à 40
N ₂	0 à 7
H ₂ (H ₂ S)	1 à 7
Autres (COV)	0.1 à 0.5

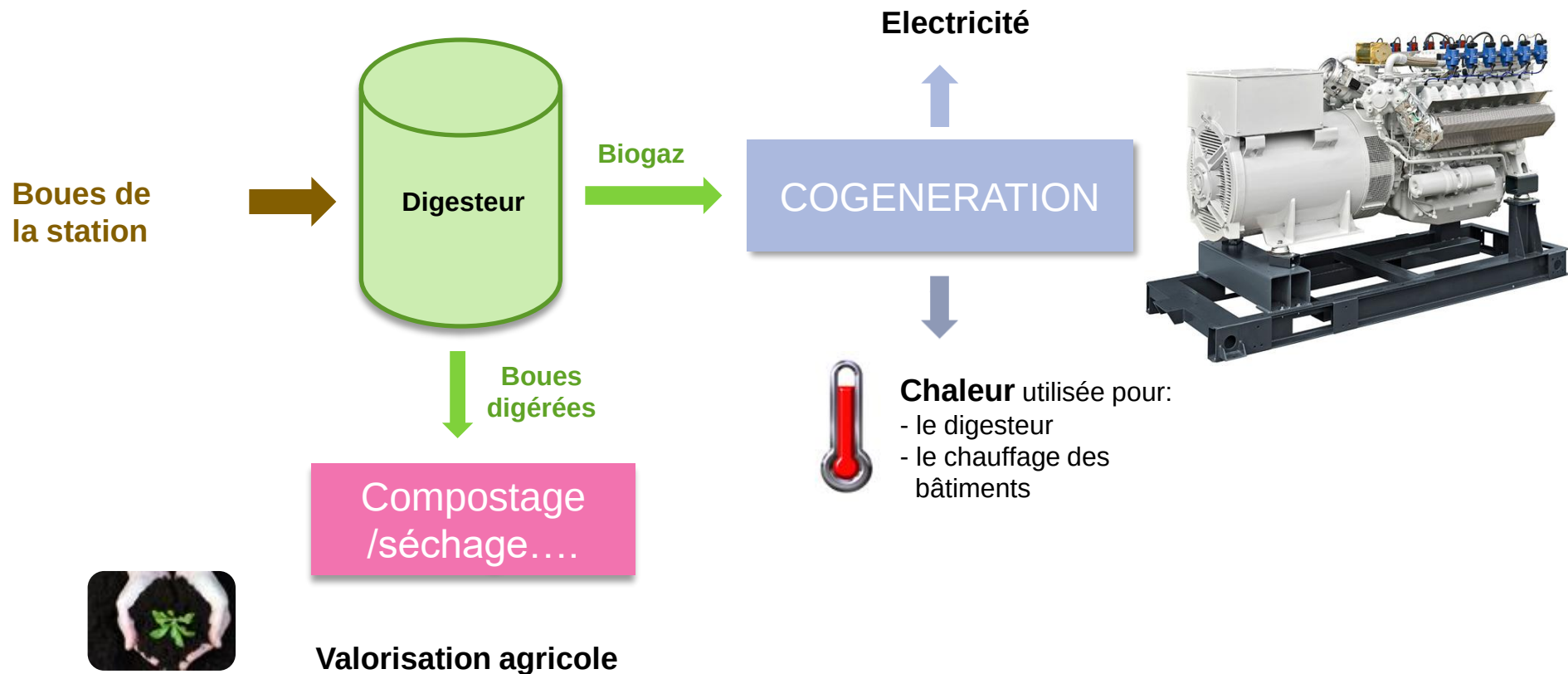
Digestion anaérobie (méthanisation)

L'avantage principal de la méthanisation est la valorisation du biométhane produit, qui a un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) de 5 à 7 kWh/Nm³ (le PCI correspond à la quantité théorique d'énergie contenue dans un combustible). Cette valorisation peut être effectuée de quatre manières :

- **Valorisation thermique** : valable si un débouché pérenne et régulier est disponible sur l'année, pour la chaleur, à proximité du lieu de production (industrie, réseau de chaleur) ou en interne (digesteur de boues).
- **Valorisation électrique**, cogénération ou production alternée : Elle est très répandue à l'étranger et s'est développée en France depuis une quinzaine d'années.
- Utilisation sous forme de **biocarburant** (GNV)
- **Raccordement au réseau de gaz naturel** : l'injection de biométhane (biométhane épuré) issu de la méthanisation des boues d'épuration a reçu l'approbation de l'ANSES en 2014. En 2019 10 installations injectent déjà sur le réseau et 7 sont en cours de construction

Digestion anaérobie (méthanisation)

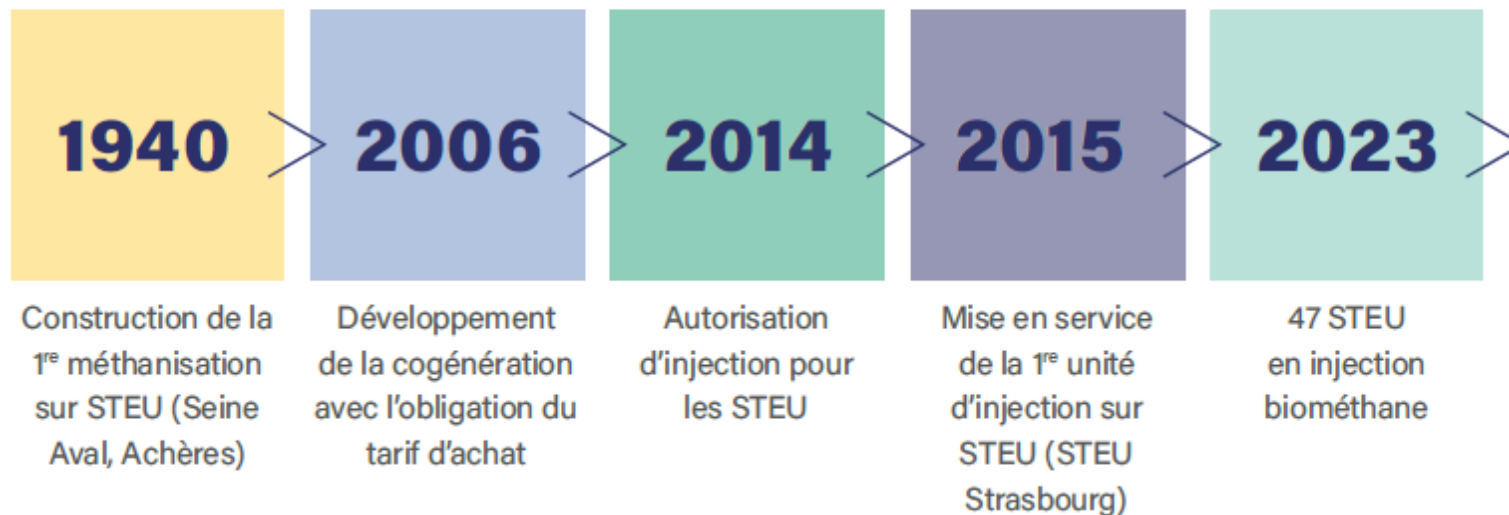
► Couplage à une unité de cogénération



Digestion anaérobie (méthanisation)

► Réinjection au réseau GRDF

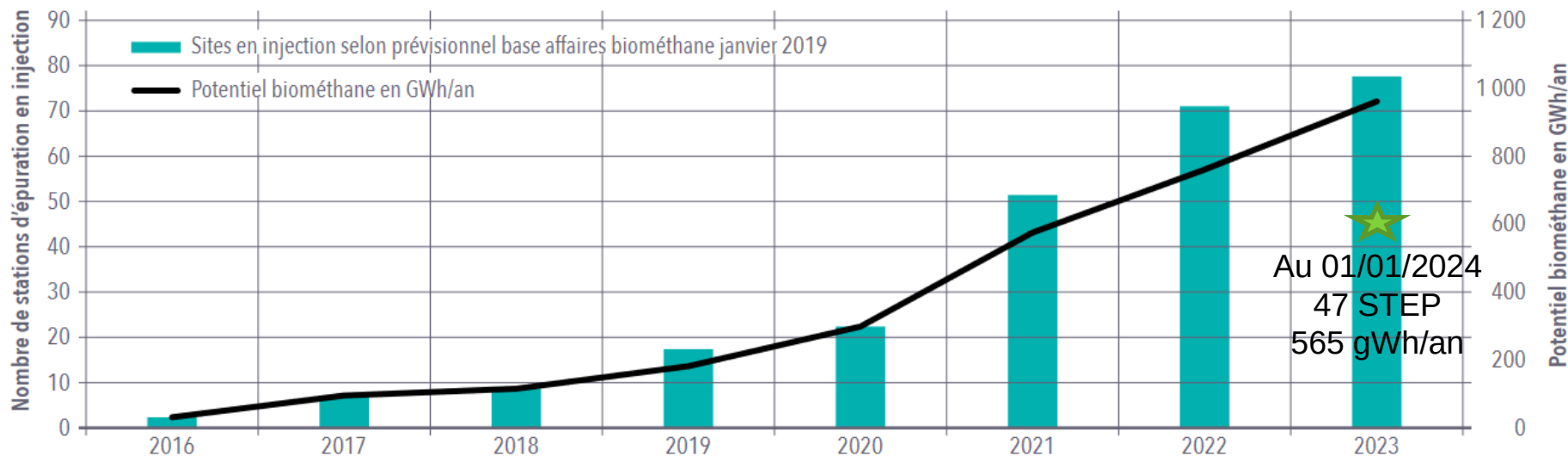
Historique sur la méthanisation et la valorisation
du biogaz en STEU



Digestion anaérobie (méthanisation)

► Réinjection au réseau GRDF

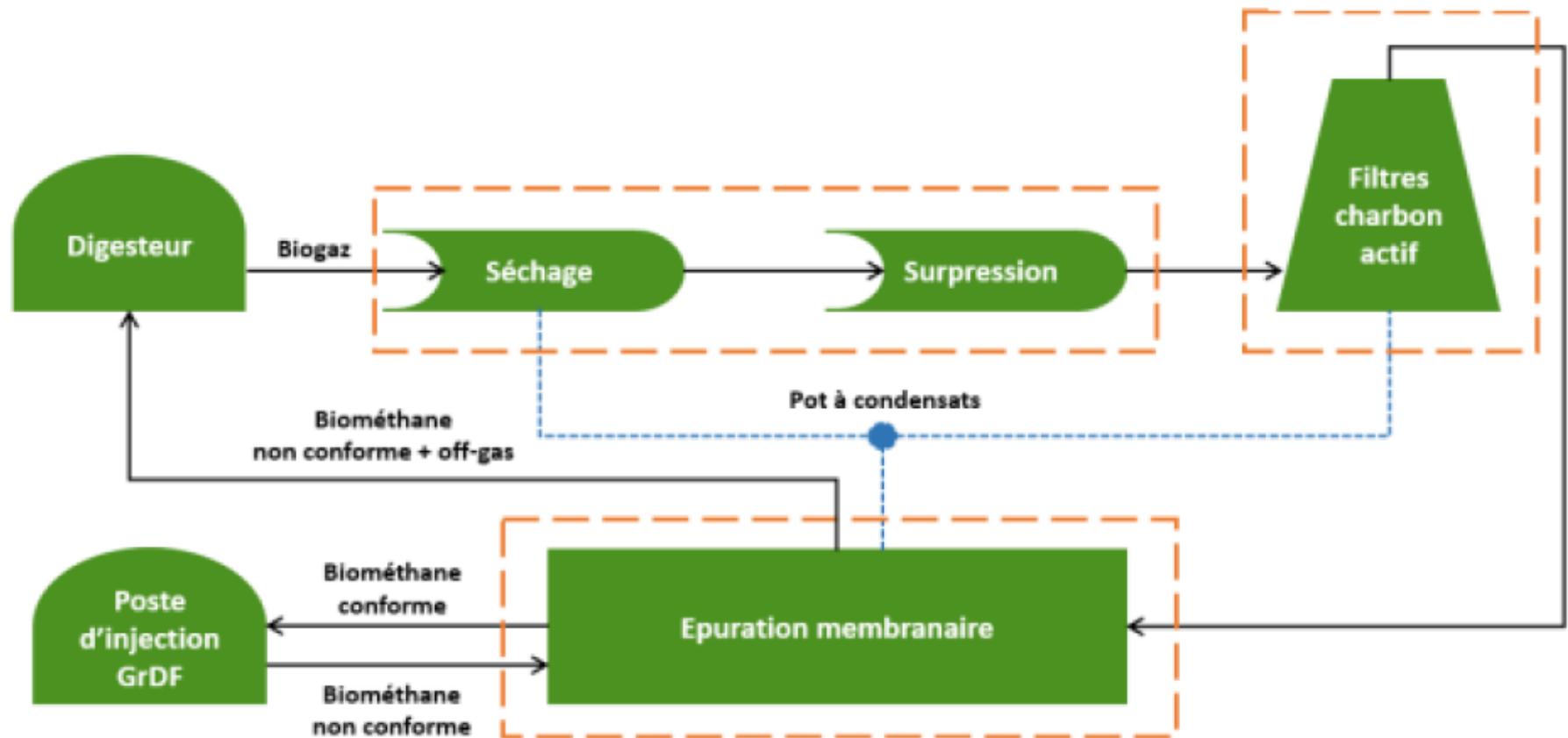
ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ BIOMÉTHANE SUR STATION D'ÉPURATION DEPUIS 2016 ET PRÉVISIONNEL À 2023



La production de biométhane en France à partir des eaux usées - État des lieux et perspectives GRDF

Digestion anaérobie (méthanisation)

► Réinjection au réseau GRDF



Digestion anaérobie (méthanisation)

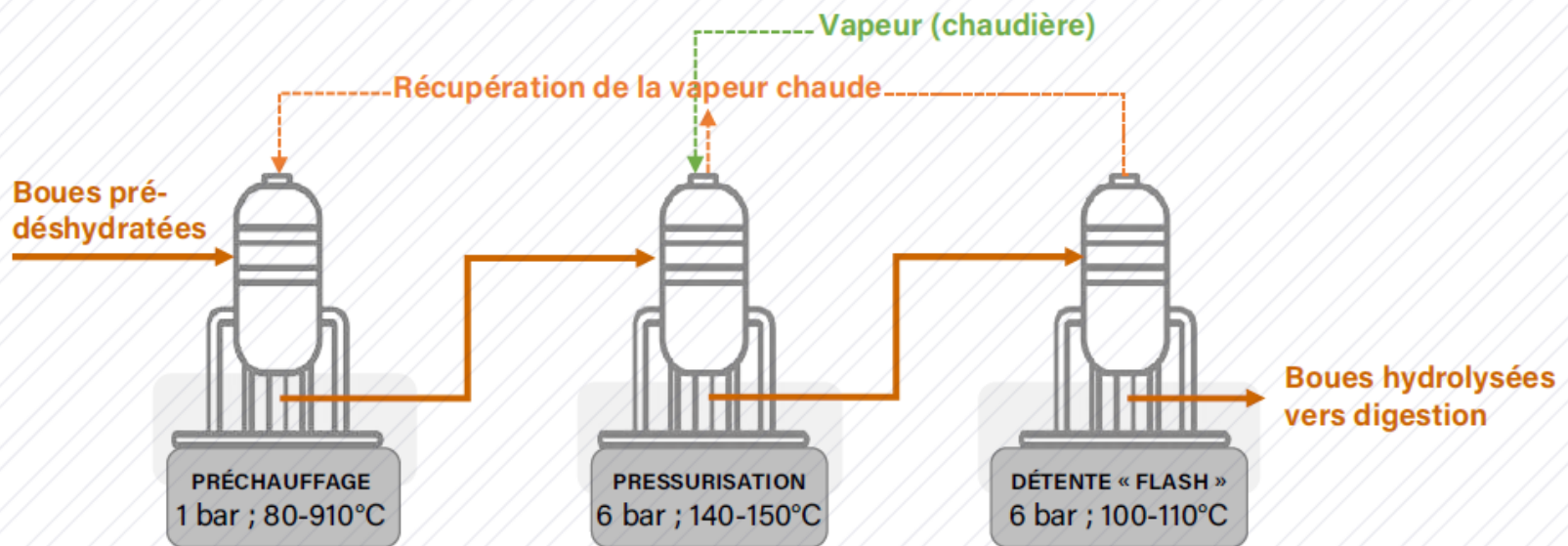


STEP de Sète
(165 000 EH)



Evolution des filières boues

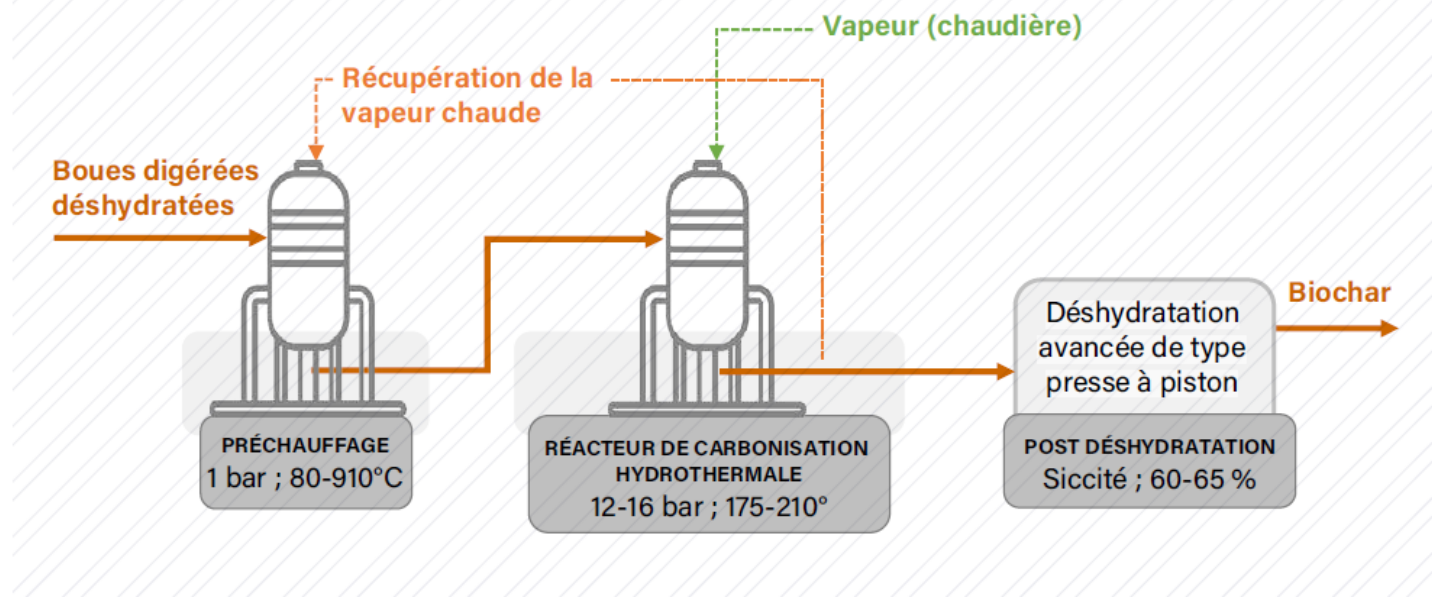
Principe de l'hydrolyse thermique



L'hydrolyse thermique permet d'augmenter la production de biogaz sur des boues peu méthanogènes comme les boues biologiques d'aération prolongée. À titre d'exemple, elle permet d'augmenter jusqu'à 50 % la production de biogaz de boues biologiques d'aération prolongée et 30 % sur des boues mixtes primaires et aération prolongée. Elle a peu d'intérêt sur des boues primaires seules. Elle permet également une diminution du volume de boues à digérer en gagnant jusqu'à 8 points de siccité supplémentaires en sortie d'épaississement (comparée à une filière sans hydrolyse thermique).

Evolution des filières boues

Principe de la carbonisation hydrothermale



En recirculant le filtrat issu de la post-déshydratation vers la digestion, **la production de biogaz peut être augmentée jusqu'à 30 %**. Comparé à un traitement du digestat sans carbonisation hydrothermale, **le volume de boues à évacuer est divisé par 4** en sortie de post-déshydratation du fait de l'atteinte d'une siccité proche d'environ 60-65 %.



Focus Stations

L'HYDROLYSE THERMIQUE EST NOTAMMENT EN PLACE SUR L'USINE DE GINESTOUS-GARONNE (TOULOUSE), 950 000 EH MAIS AUSSI SUR DES STATIONS DE PLUS PETITE CAPACITÉ TELLE QUE LA STATION DE CHÂTEAU-GONTIER (53), 37 500 EH OU ENCORE SUR LA STATION DE SAUMUR (49), 60 000 EH.

LA CARBONISATION HYDROTHERMALE EST EN PLACE SUR L'USINE DE PAU LESCAR (64), 200 000 EH.

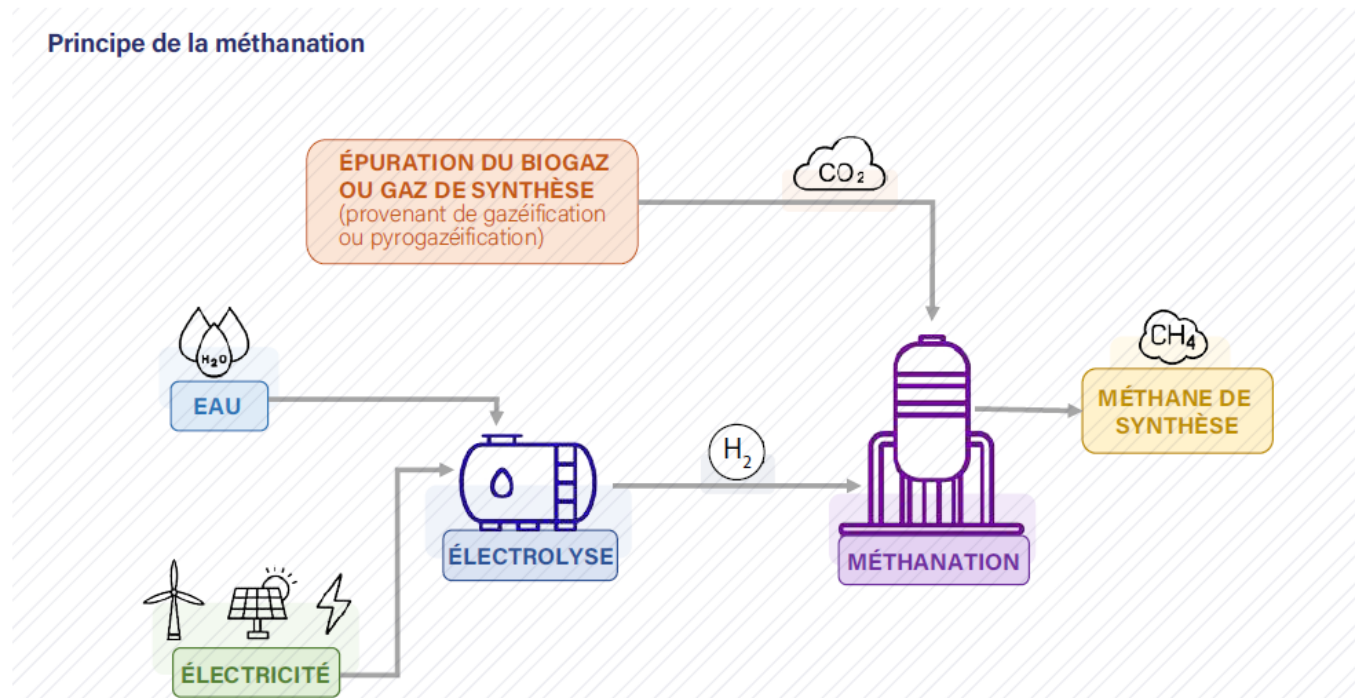
Evolution des filières boues

Le CO_2 récupéré peut également être converti en méthane en présence d'hydrogène dans une réaction de méthanation. Il existe différentes voies de méthanation :

- > la **méthanation catalytique** où la réaction de conversion se déroule en présence d'un catalyseur. La méthanation catalytique peut aussi s'appliquer à l'épuration d'un gaz de synthèse produit en gazéification hydrothermale ou pyrogazéification (se rapporter au paragraphe « Produire un gaz de synthèse ») ;
- > la **méthanation biologique** où la réaction se fait par voie biologique.

La méthanation catalytique possède un rendement et un niveau de maturité technologique supérieurs à la méthanation biologique. Cependant, elle nécessite des températures de fonctionnement plus élevées ($300\text{--}350^\circ\text{C}$) que la méthanation biologique ($30\text{--}70^\circ\text{C}$). La méthanation catalytique est un procédé peu tolérant aux impuretés contenues dans le biogaz et nécessite une épuration amont poussée.

Principe de la méthanation



Evolution des filières boues

La méthanation

pour booster la production de biométhane



Méthane de
synthèse
(e-méthane)

1. Electrolyse de l'eau

Réaliser une électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène *



2. Méthanation

Combiner l'hydrogène et le BioCO₂ pour produire du biométhane injectable au réseau de gaz naturel



L'incinération

► Un procédé d'élimination des boues par valorisation énergétique

APRES
SECHAGE



PARTIE ORGANIQUE
70% = énergie



PARTIE MINERALE
30% = cendres



L'incinération

► Principe de l'incinération: la combustion

- > Combustion: oxydation thermique en présence de flamme
 - > Combustible: élément qui va s'oxyder (brûler)
 - > Comburant: le gaz nécessaire à la combustion (oxygène) à trouver de la chaleur «propre » et peu coûteuse
 - > Porter ces deux corps à la température d'inflammation (température minimale pour déclencher la combustion)

► Sous produits:

- > Inoffensifs: CO₂, H₂O, O₂ et N₂
- > Soumis à la législation: SO₂ et HCL, traitement obligatoire

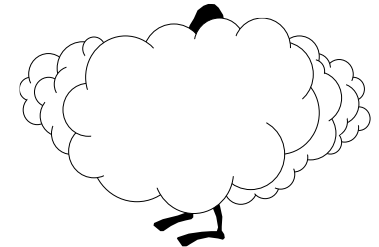
L'incinération

1 TONNE DE BOUE A 20% DE SICCITE



60 KG
DE CENDRES

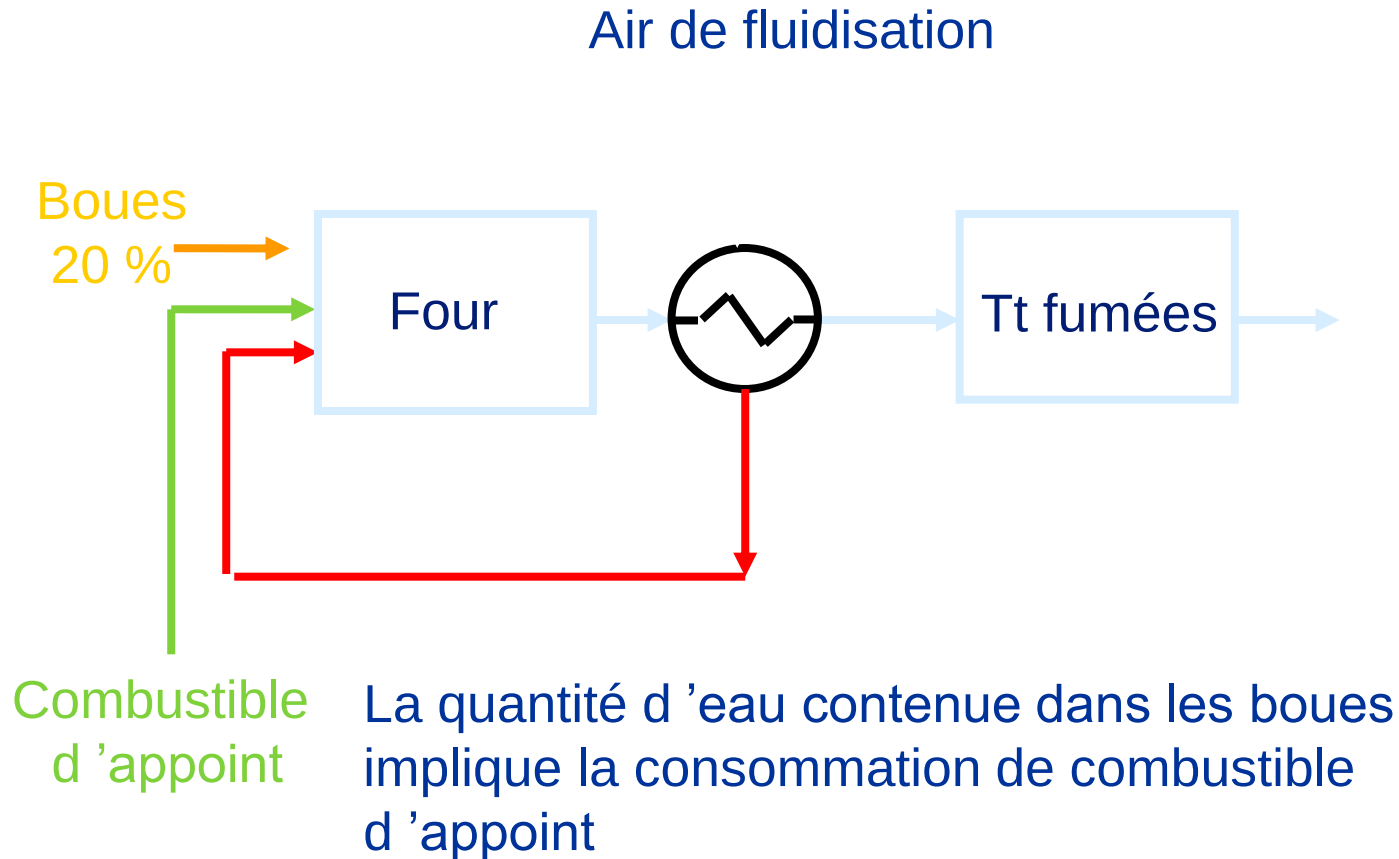
40 KG DE RESIDUS
(TRAITEMENT DES FUMEEES)



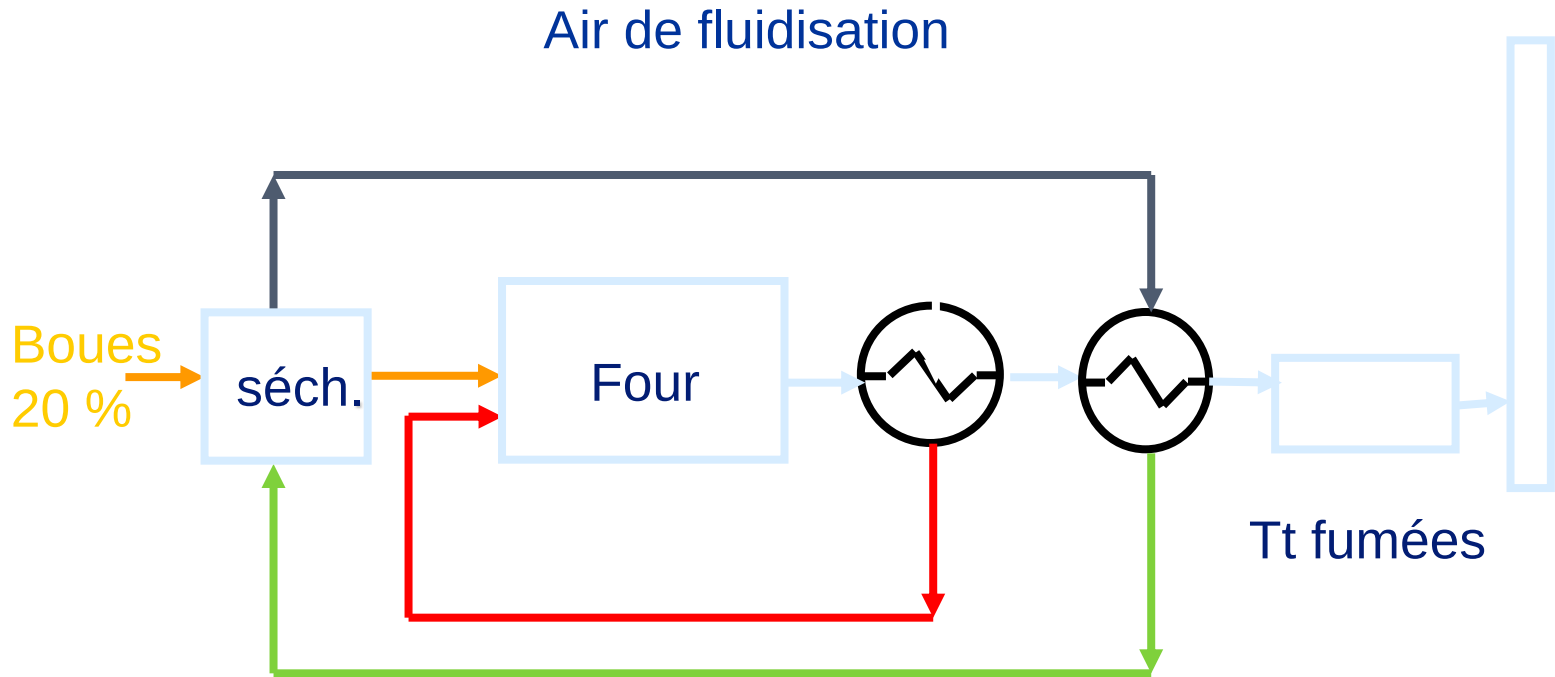
3 500 Nm³
DE FUMEEES

→ Incinération
15 % des débouchés en
France

Incinération classique



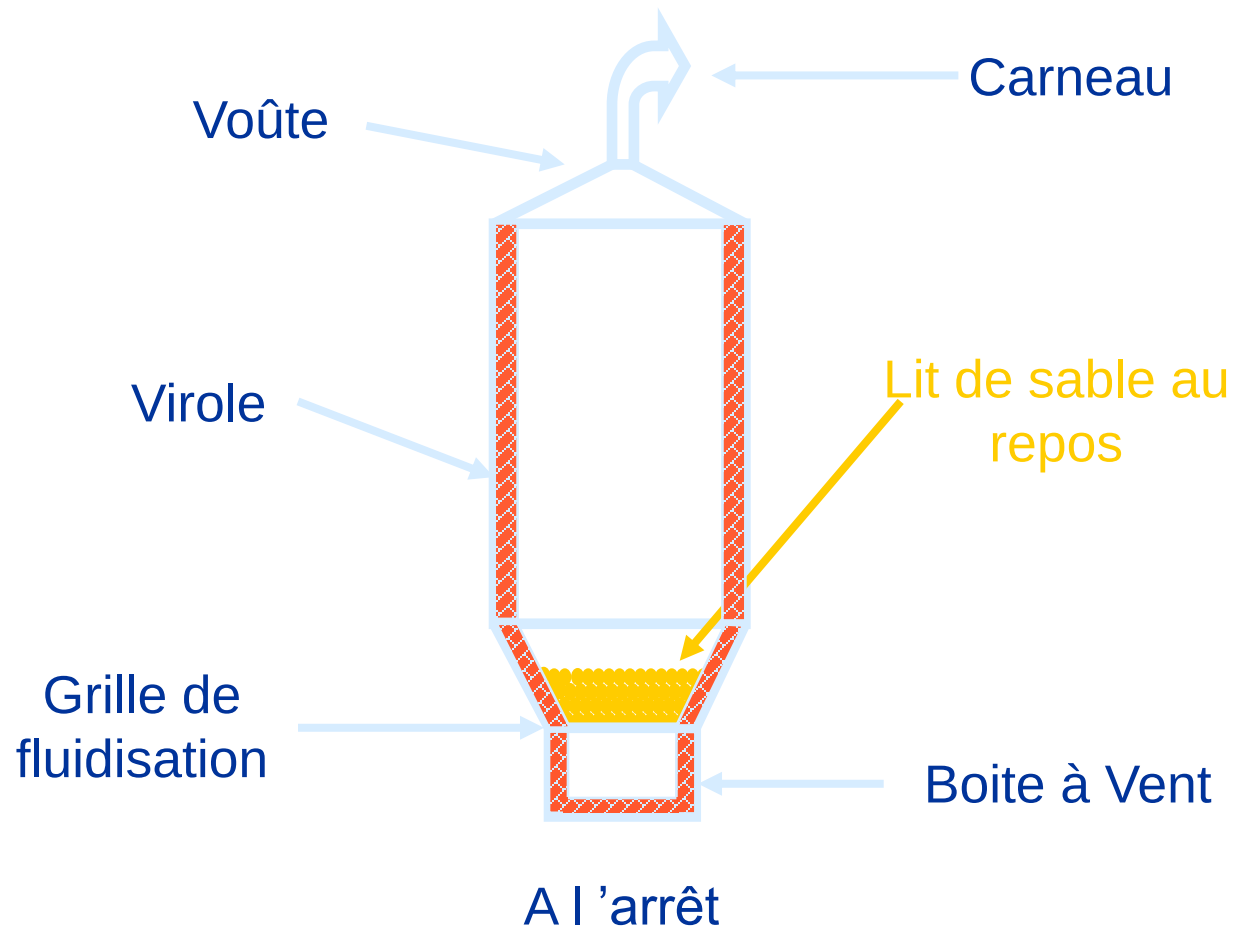
Incinération optimisée



Préséchage à 30-35% : économie en partie du combustible d'appoint

Incinérateur à lit fluidisé

► Principe du lit fluidisé



Incinérateur à lit fluidisé

► Principe du lit fluidisé

Grande facilité d'exploitation

Performance remarquables

« 3T » : Turbulence

Température

Temps de séjour

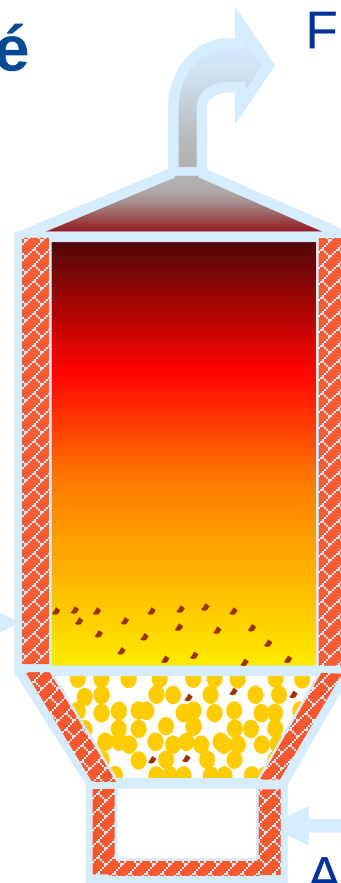
Compact

Pas de pièces en mouvement

Inertie thermique

Boues

Fumées vers traitement



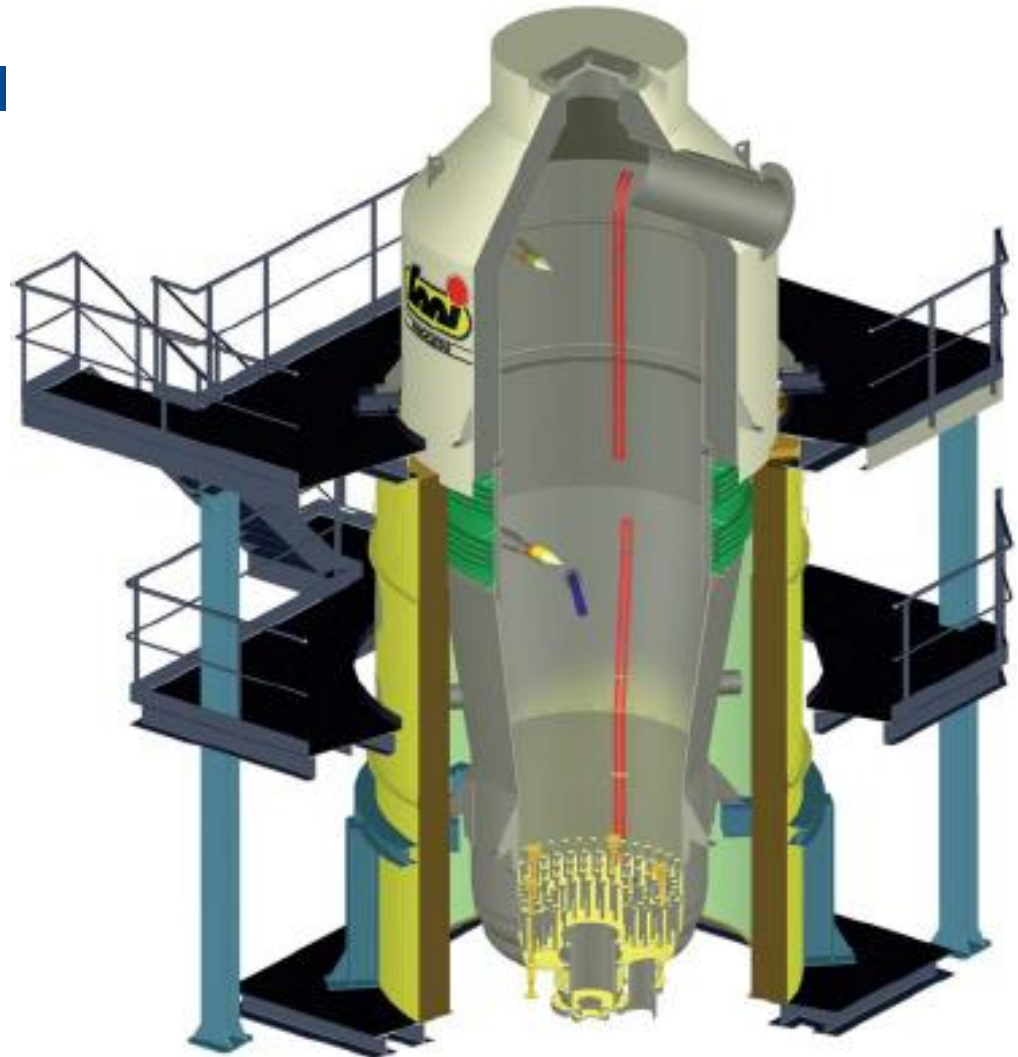
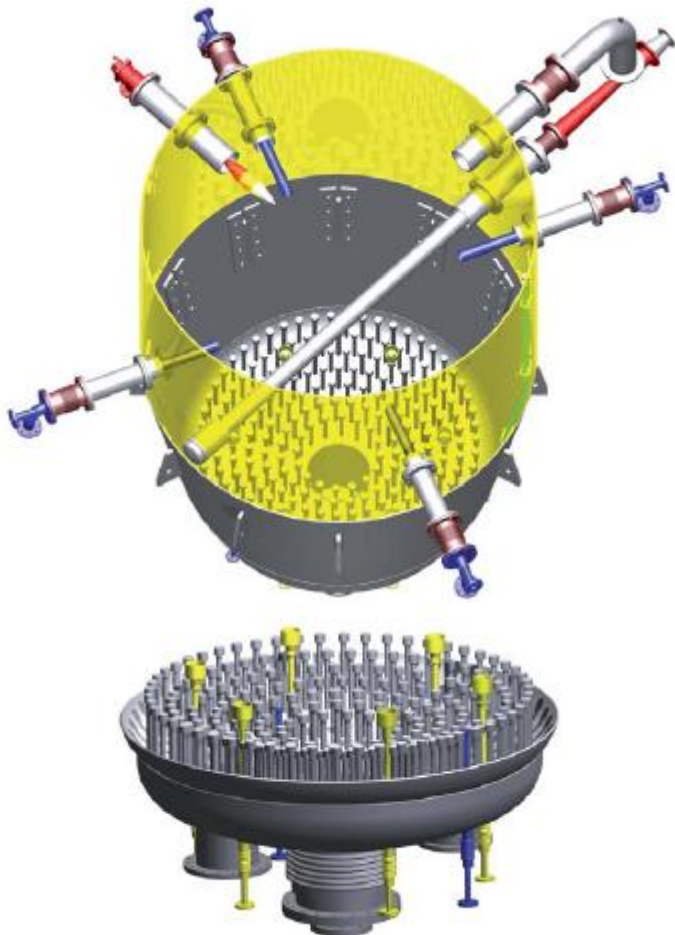
Air de
fluidisation



Figure 11 : Exemple de mono-incinérateur Pyrofluid™

Incinérateur à lit fluidisé

► Exemple : Four FMI



Incinérateur à lit fluidisé

► Composition des fumées

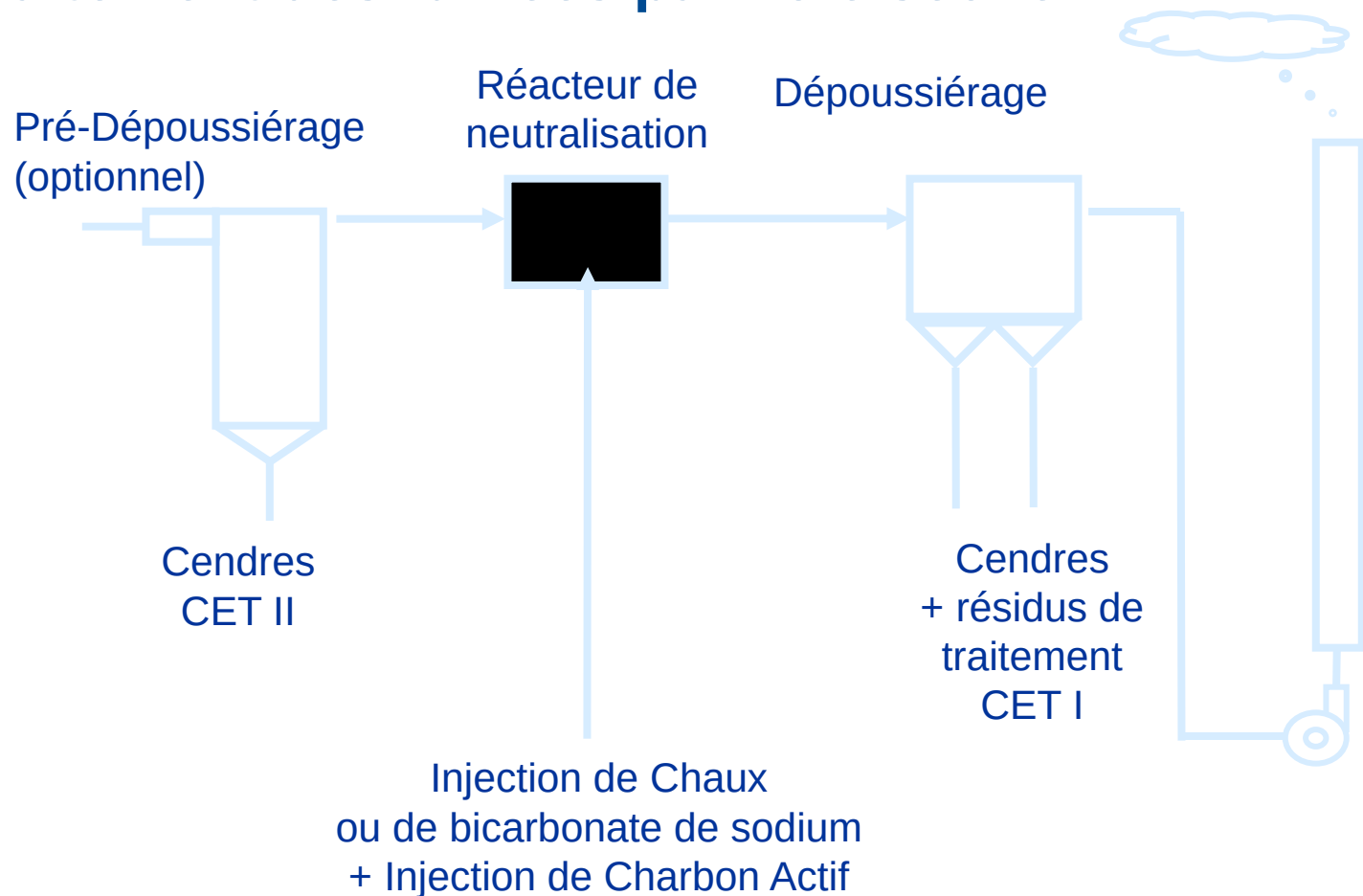
Poussières : 20 à 70 g/Nm³
HCl : 50 à 500 mg/Nm³
SO₂ : 500 à 2500 mg/Nm³
NO_x : 100 à 200 mg/Nm³
+ métaux lourds, dioxines...

Objectifs du traitement des fumées :

- capter les poussières (rejet 10 mg/Nm³)
- neutraliser HCl (rejet 10 mg/Nm³)
- neutraliser SO₂ (rejet 50 mg/Nm³)
- capter métaux lourds et dioxines

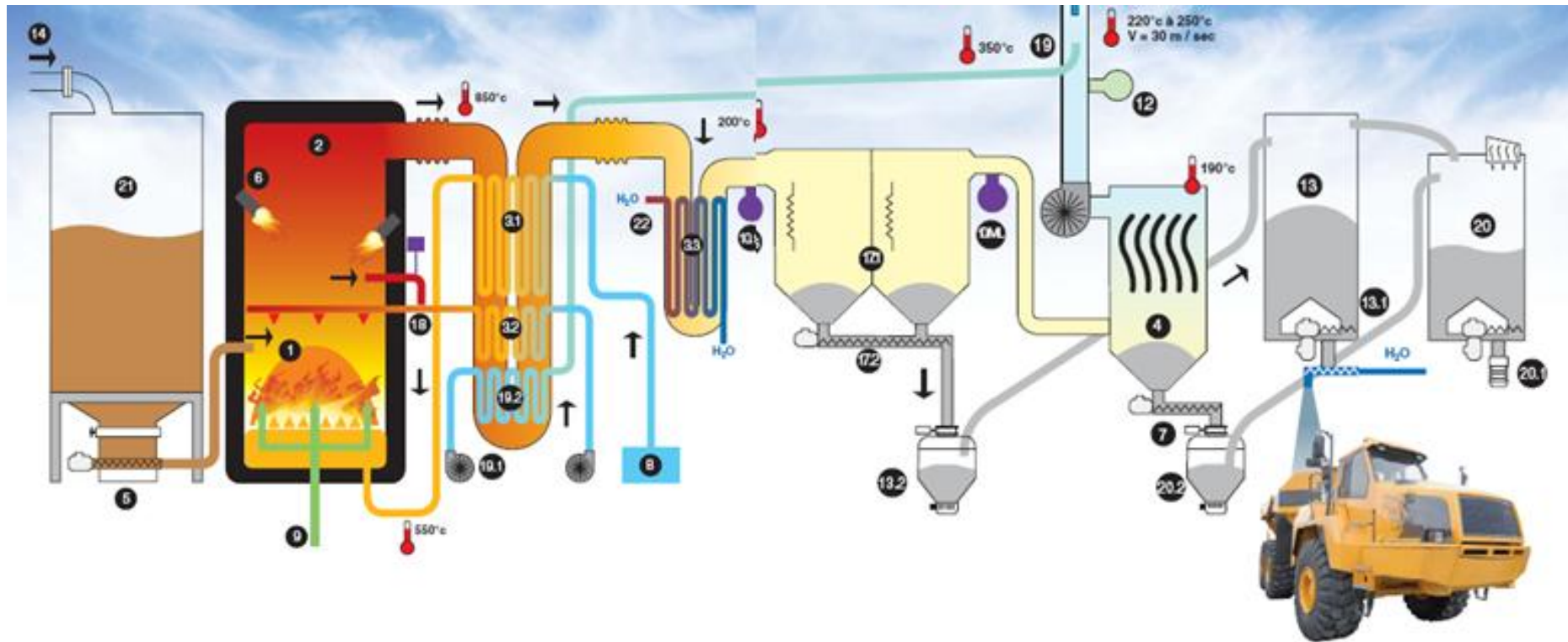
Incinérateur à lit fluidisé

► Traitement des fumées par voie sèche



L'incinération

► Filière complète

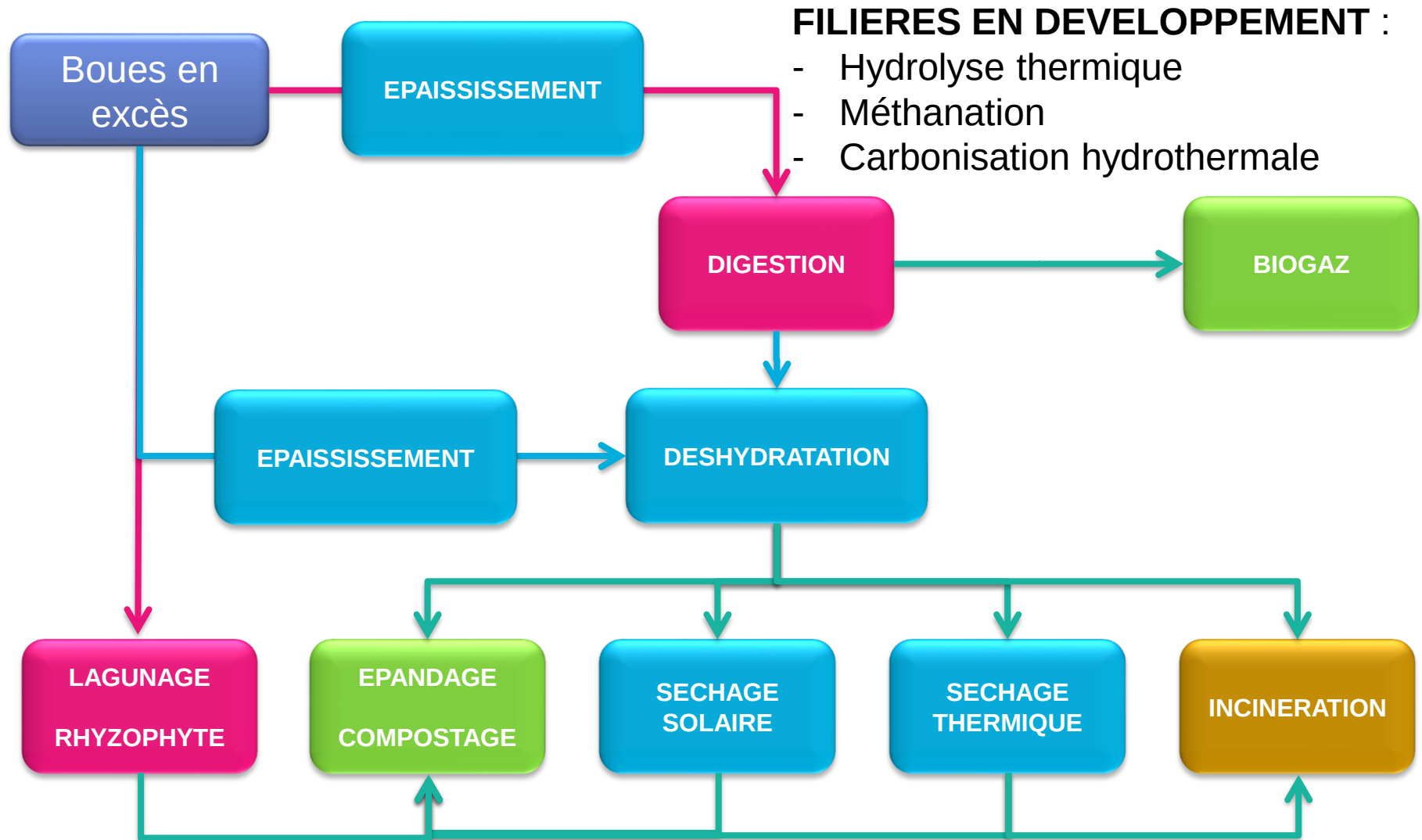


Incinérateur à lit fluidisé

► Exemple : Four FMI



Conclusion : récapitulatif des techniques



Conclusion : récapitulatif des techniques

Le traitement et la valorisation des boues



<https://www.youtube.com/watch?v=LJXHMt2eHy0>

Conclusion : récapitulatif des filières de valorisation

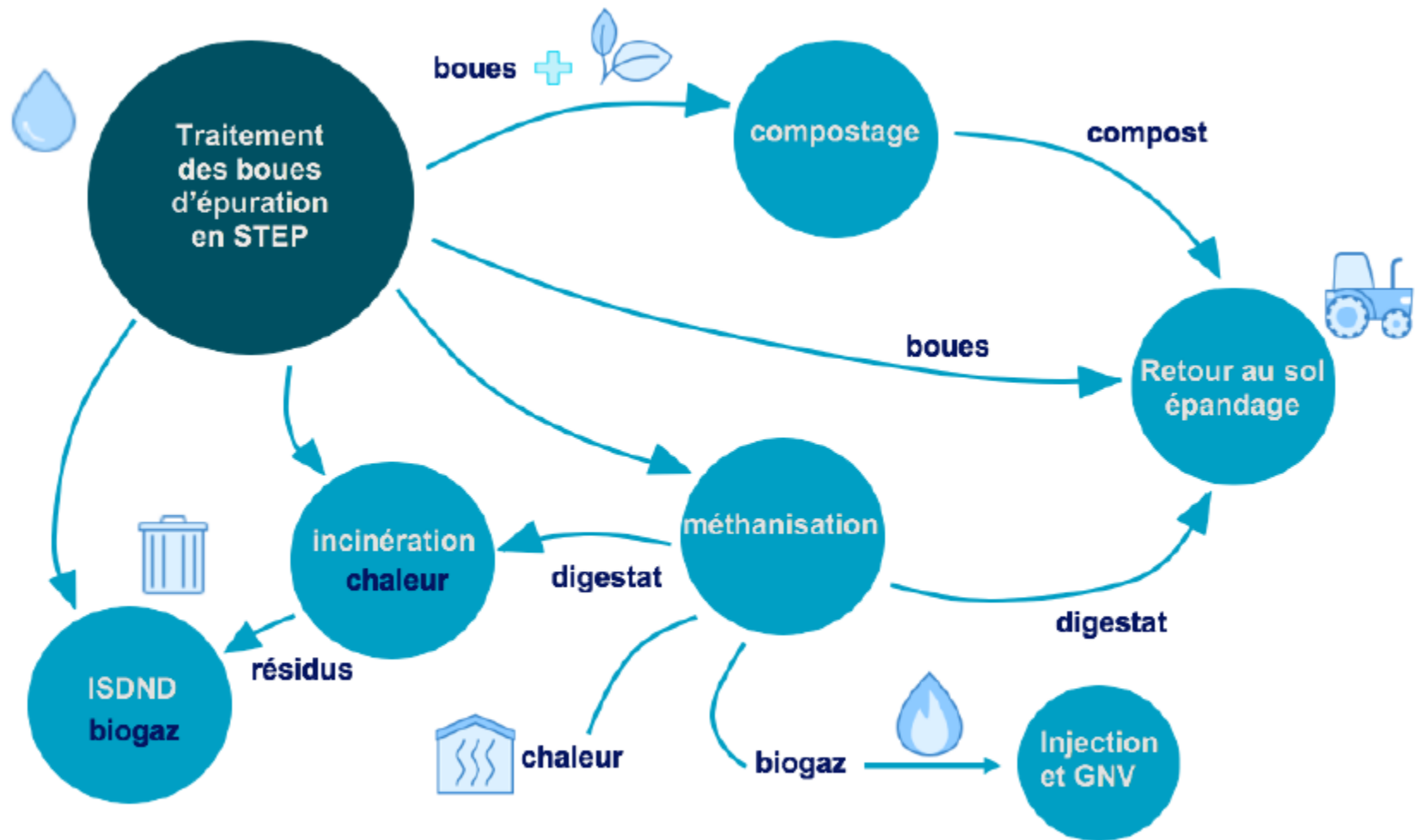


Figure 13 : Schéma des principales filières de valorisation

Conclusion : choix des filières

