

Evolution des pratiques associées à la gestion des boues d'épuration dans le contexte d'une économie circulaire.

CHEMICAL ENGINEERING

PEPs – Products, Environment, Processes

Prof. A. Léonard

A.Leonard@ulg.ac.be



CHEMICAL
ENGINEERING

Contenu

- Introduction
- Le gisement à l'échelle Européenne
- L'évolution des pratiques de valorisation
- La récupération du phosphore
- L'optimisation de la filière 'boue'
- Impact environnemental
- Pour terminer

Introduction

Faculté des Sciences Appliquées

- 4 départements et 4 unités de recherche
 - A&M : Aéronautique et Mécanique
 - ArGENCO : Architecture, Géologie, Environnement et Constructions
 - EEI : Electricité, Electronique et Informatique
 - Chemical Engineering

Chemical Engineering

- 3 groupes – Environ 60 personnes

- ✓ CRYO – Cryotechnology

(Pr J.-L. Bozet)

- ✓ NCE – Nanomaterials, Catalysis and Electrochemistry

(Dr C. Gommaes, Pr B. Heinrichs, Pr N. Job, Dr S. Lambert,)

- ✓ PEPs – Products, Environment, and Processes

(Dr M.-N. Dumont, Pr A. Léonard, Pr G. Léonard, Pr A. Pfennig, Pr D. Toye,)

<http://www.chimapp.ulg.ac.be/>

Parcours ...

1998 Chemical Engineer - University of Liège

FRS-FNRS Research Fellow: convective drying – sludge – X-ray μ CT

2003 PhD Thesis: Study of wastewater sludge convective drying: texture follow-up using X-ray μ CT

2004 FRS-FNRS Postdoctoral Researcher: convective drying – carbon xerogels - modeling

Extension of X-ray μ CT applications

Postdoc research stay in Bordeaux (Laboratoire 'TREFLE')

2008 FRS-FNRS Research Associate: Drying – relations between process/product

2009 Associate professor at ULg: Processes and Sustainable development

Development of existing LCA activities

2011 Head of the Dpt (until end 2015)

2013 Professor

2016 Director of the Research Unit
Chair Woman of Drying Working Party of the European Federation of
Chemical Engineering

Member of the 'Femmes et Sciences' committee

...

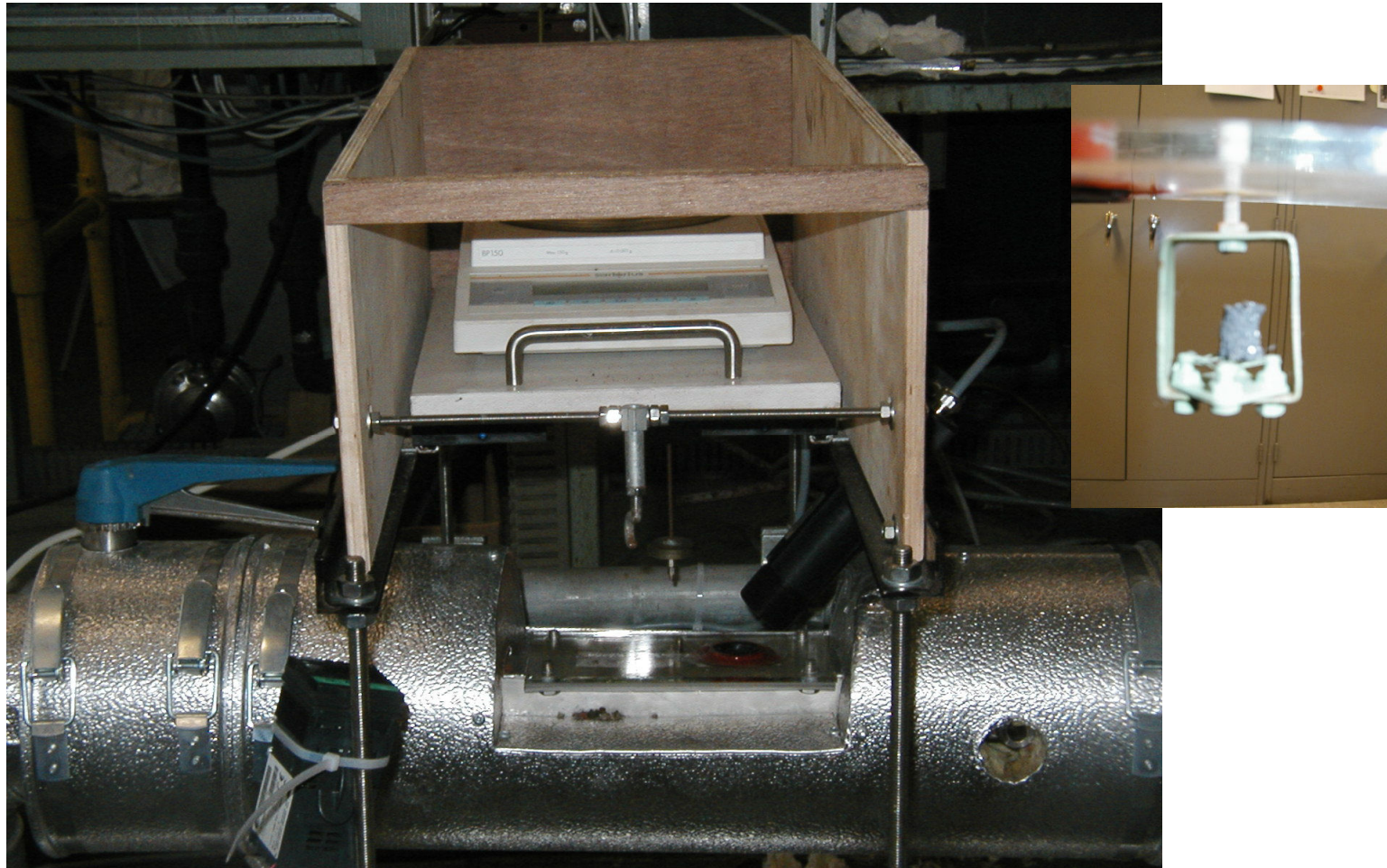
Nombreux dispositifs en lien avec les boues

- Sécheurs : courant croisé discontinu



Nombreux dispositifs en lien avec les boues

- Sécheurs : micro-sécheur convectif



Nombreux dispositifs en lien avec les boues

- Sécheurs : vapeur surchauffée



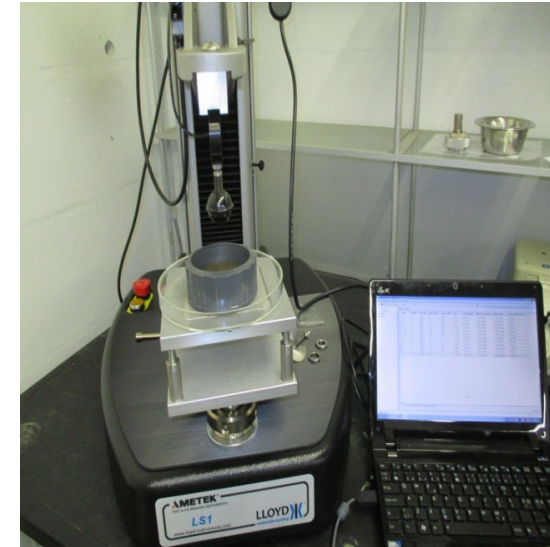
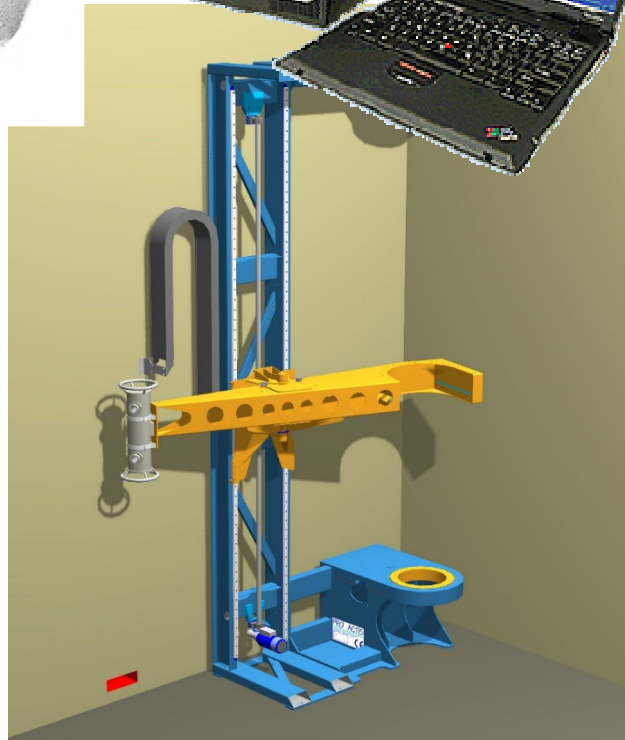
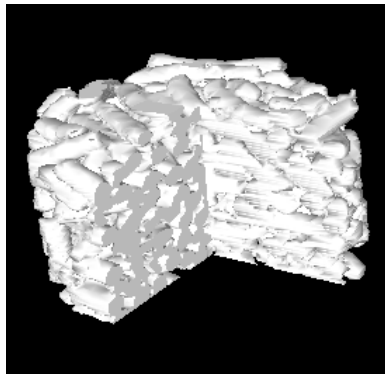
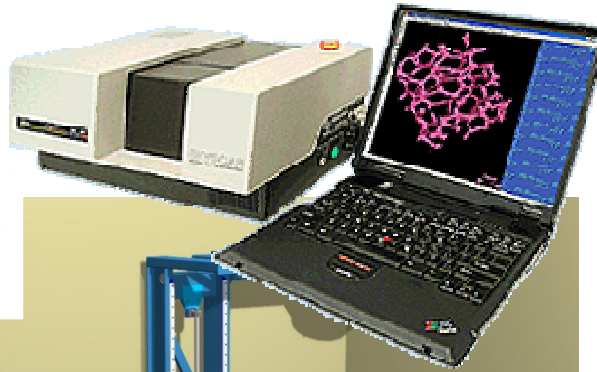
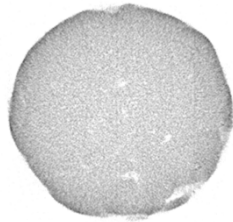
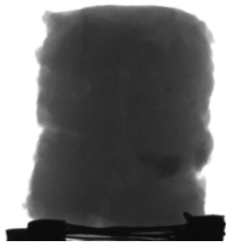
Nombreux dispositifs en lien avec les boues

- Conditionnement/filtration



Nombreux dispositifs en lien avec les boues

■ Caractérisation



Le gisement à l'échelle européenne

Structure d'une station d'épuration

15 à 20 kg de matières sèches (MS) par EH et par an



Eaux usées



Dégrillage



Dessablage-Déshuilage



Traitement biologique
Bassin à boues
activées



Séparation de l'eau
épurée et de la boue
Décanteur



Egouttage et
déshydratation
mécanique des boues



Evacuation des boues
déshydratées via conteneurs



Eau
épurée

« Matière pâteuse »
70 à 85% d'eau !!

La filière boue 'classique'

- Traitement de la biomasse en excès produite par le traitement biologique (+ physico-chimique)
 - Épaississement
 - Stabilisation
 - Chaulage → pré ou post déshydratation → épandage agricole
 - Digestion → biogaz + digestat → cogénération
 - Pré-traitement : thermolyse, ultrasons, microbroyage, ...
 - Co-digestion
 - Déshydratation mécanique
 - Centrifugation
 - Filtre à bandes
 - Filtre presse
 - Combinaison centrifugation – séchage : Centridry®

+ Séchage ??

La production de boues

- Difficulté d'obtenir des données récentes
 - Transfert depuis pays membres vers Eurostat
 - Différence de qualité de données entre 'EU 12' et 'EU 15'

- Chiffres clés

- UE 15

- 1992 : 6,5 millions T M
 - 2005 : 8,8 millions T M

- UE 12

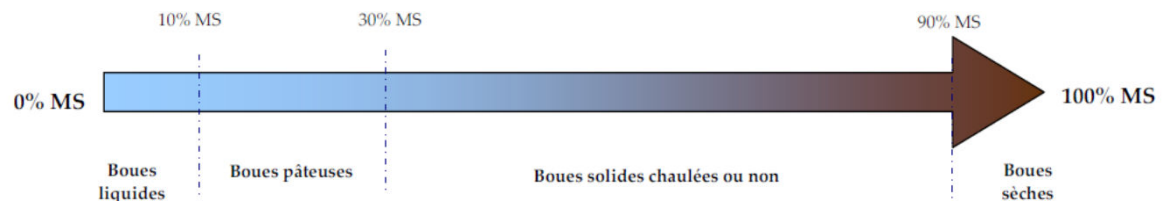
- 2005 : 1,1 millions T MS

- UE 27

- 2005 : 10 millions T MS
 - 2020 : > 13 millions T MS

- Chine

- 2013: 6,25 millions T MS

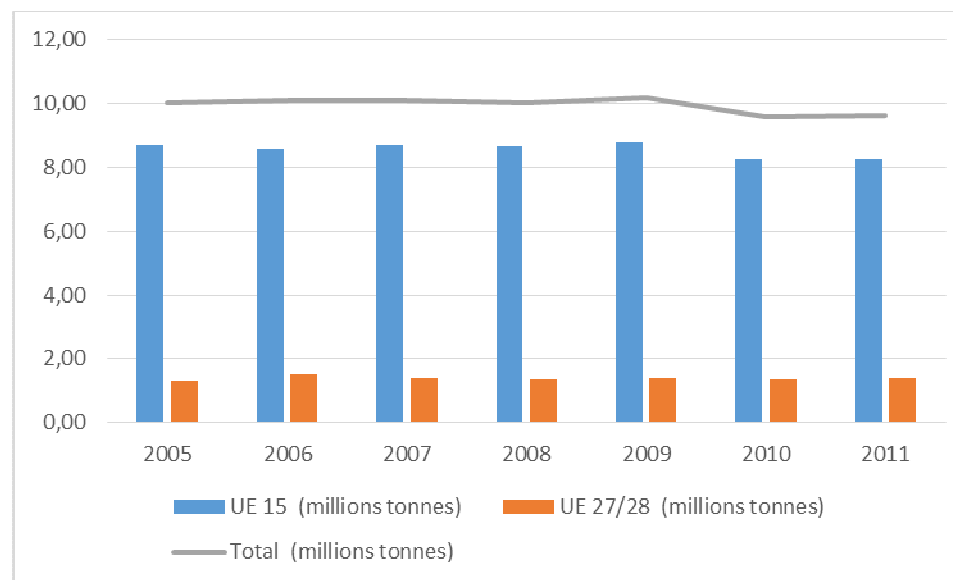


Quantités 'humides' à multiplier par 4 à 6

[Water Res.](#) 2015 Jul 1;78:60-73

La production de boues (Eurostat, 26/03/2016)

| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| UE 15 (millions tonnes) | 8,78 | 8,68 | 8,80 | 8,73 | 8,88 | 8,35 | 8,34 | 9,63 | 9,49 |
| UE 15 (%) | 88% | 86% | 87% | 87% | 87% | 87% | 87% | 88% | 87% |
| UE 12/13 (millions tonnes) | 1,23 | 1,41 | 1,31 | 1,27 | 1,30 | 1,24 | 1,29 | 1,33 | 1,42 |
| UE 12/13 (%) | 12% | 14% | 13% | 13% | 13% | 13% | 13% | 12% | 13% |
| Total (millions tonnes) | 10,01 | 10,09 | 10,10 | 10,00 | 10,18 | 9,60 | 9,64 | 10,96 | 10,91 |

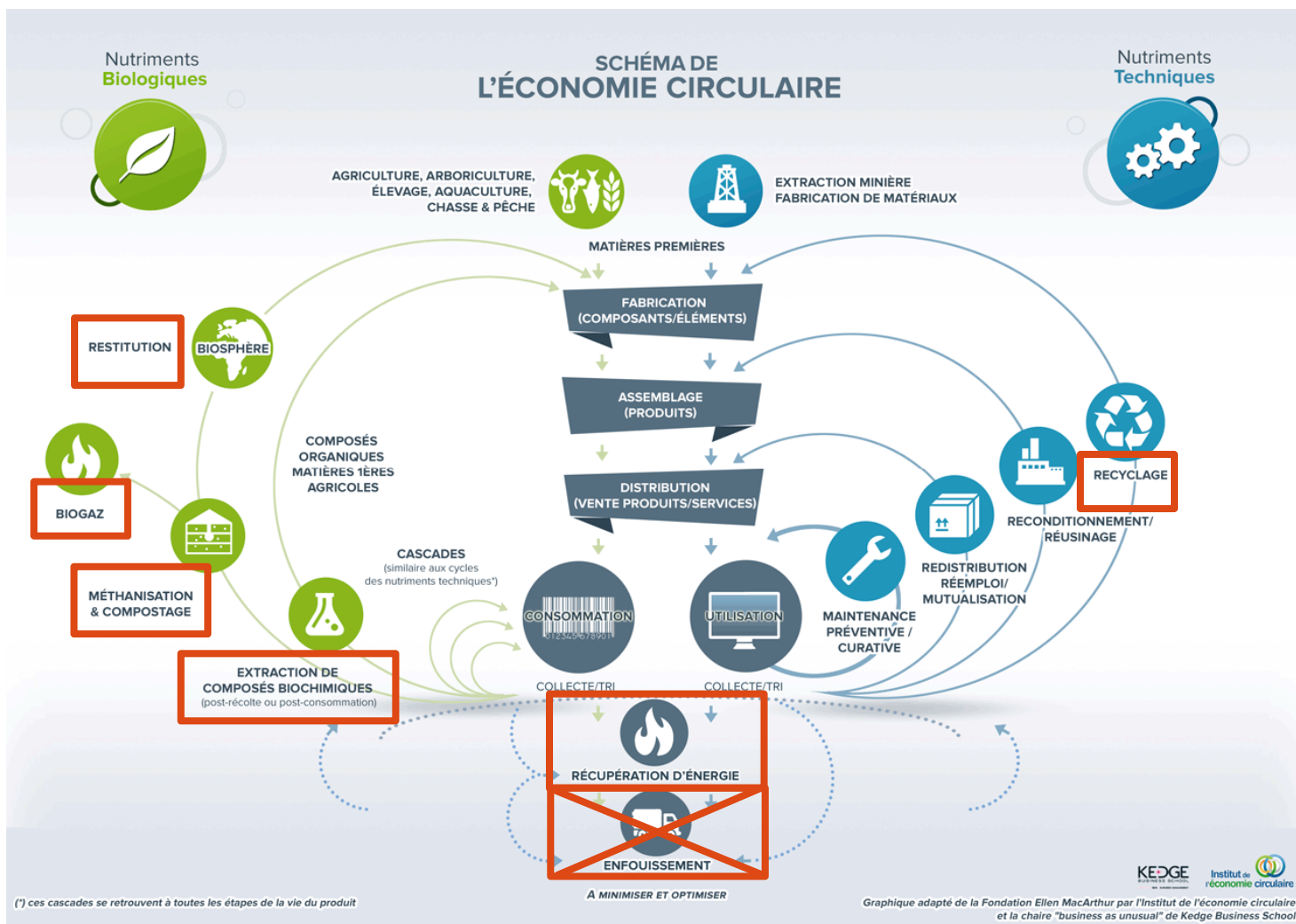


Une production inégale

- UE 15
 - Allemagne, Royaume-Uni, Espagne, France, Italie = 80% production
- UE 12/13
 - Pologne = 38% de la production
 - Pologne, République Tchèque, Hongrie, Roumanie = 80%
- Production spécifique (kg/ EH)
 - UE 15 : 21,9 en moyenne (25,4 par EH raccordé à STEP)
 - UE 12/13 : 11,5 en moyenne (21,1 par EH raccordé à STEP)
 - Différences liées au taux de raccordement, type de traitement, densité de population, ...
 - Traitement tertiaire pas répandu en UE 12/13

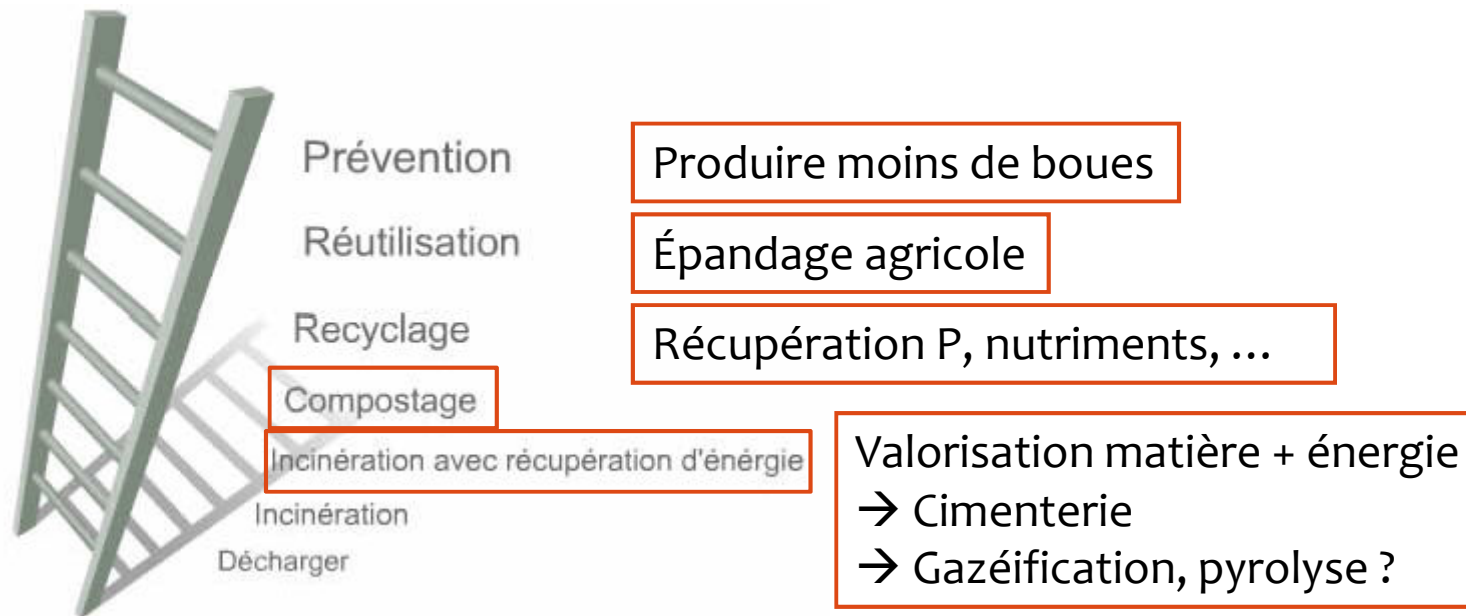
Évolution des pratiques de valorisation

L'idéal ??



L'idéal ??

- L'échelle de Lansink et les boues

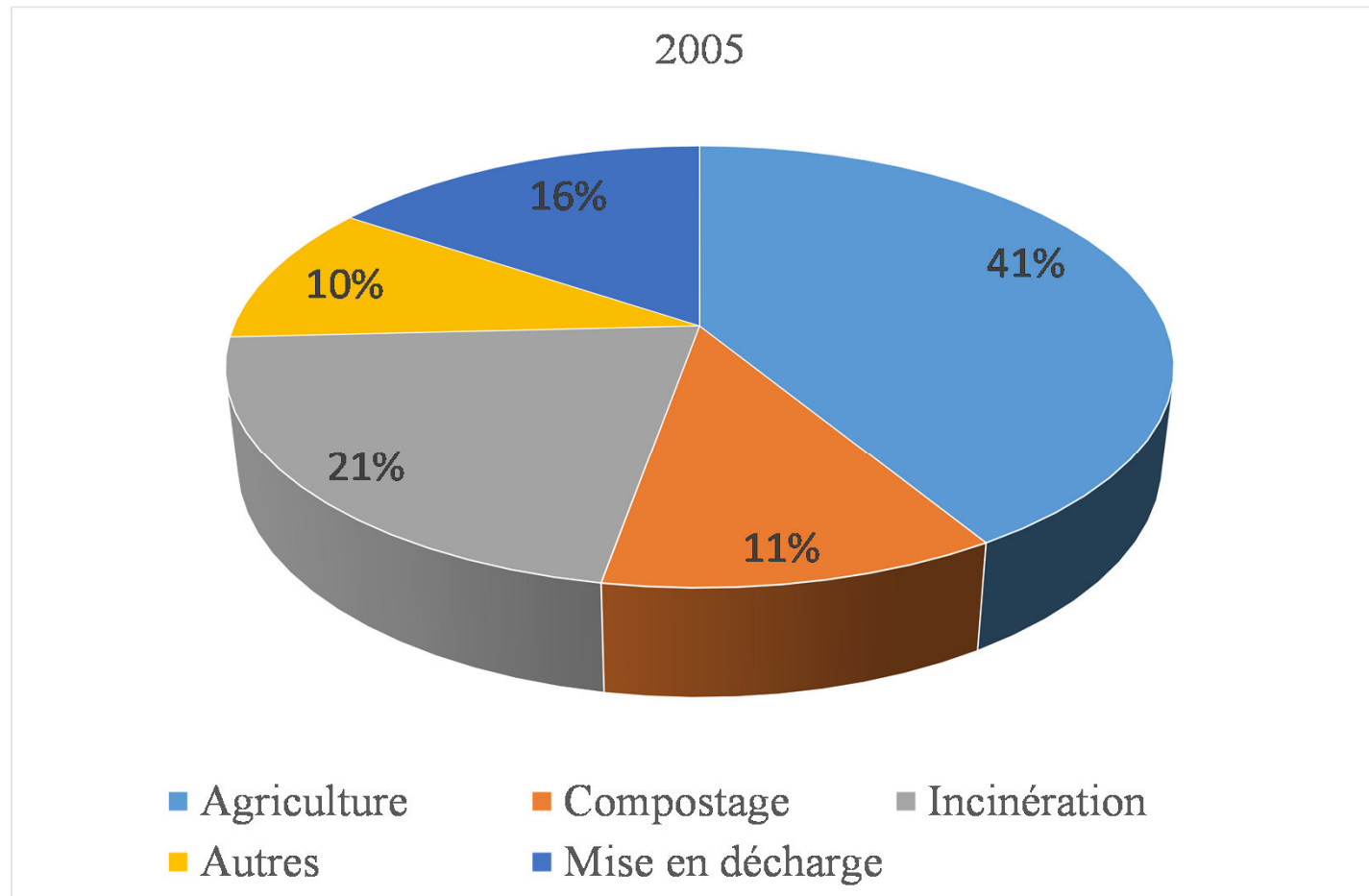


<http://www.veolia-es.be/fr/gestion-durable/hierarchie-dechets/>

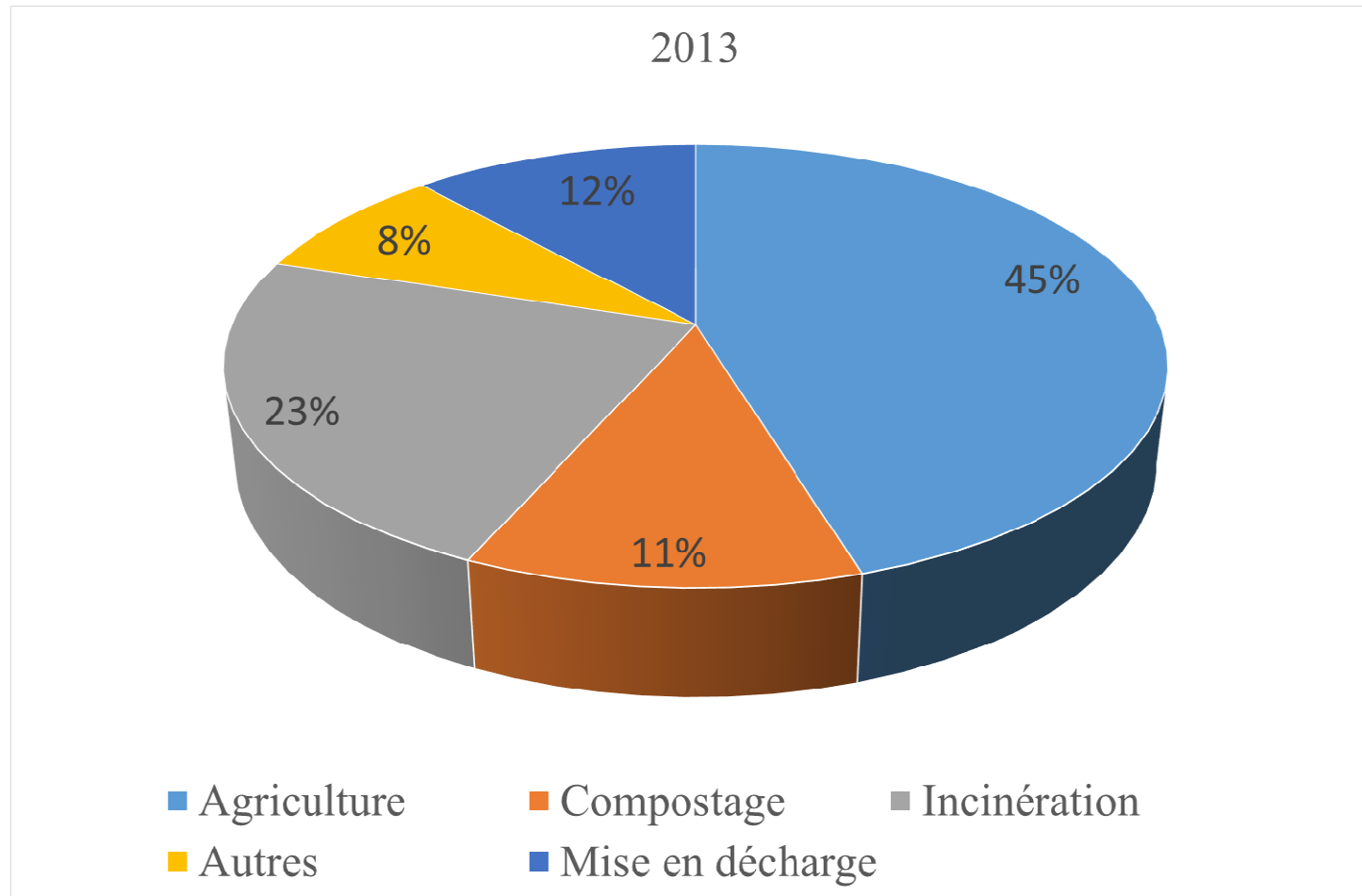
La situation avant 2000

| VALORISATION AGRICOLE | MISE EN DÉCHARGE | INCINÉRATION | REJET EN MER | |
|-----------------------|------------------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 40% | 38% | 11% | - | (ADEME et al., 1999) |
| 50-55% | 30% | 15-20% | - | (Apesa, 2000) |
| 39.5% | 40.2% | 10.6% | 9.7% | (OTV, 1997) Données décennie 1990 |

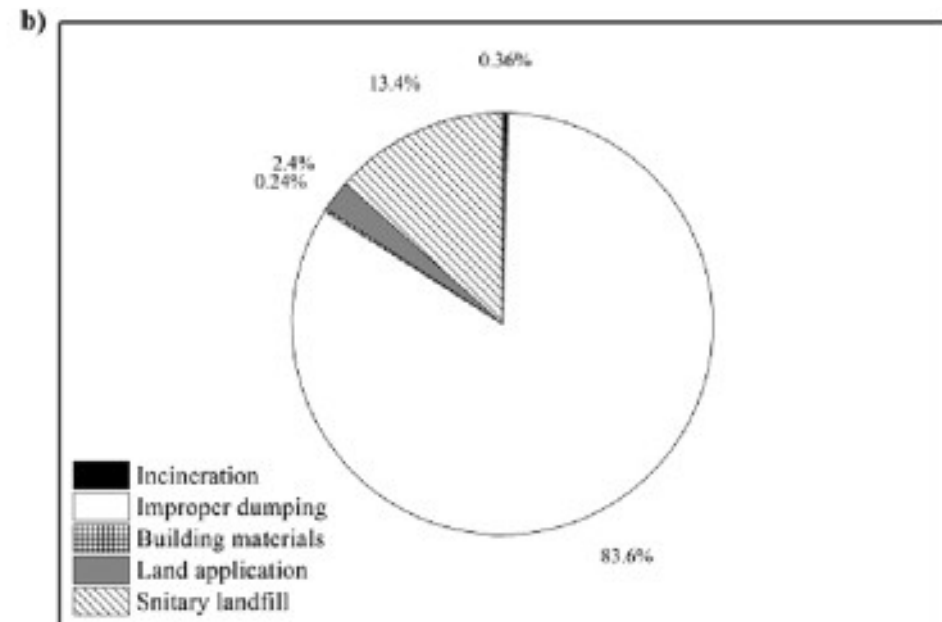
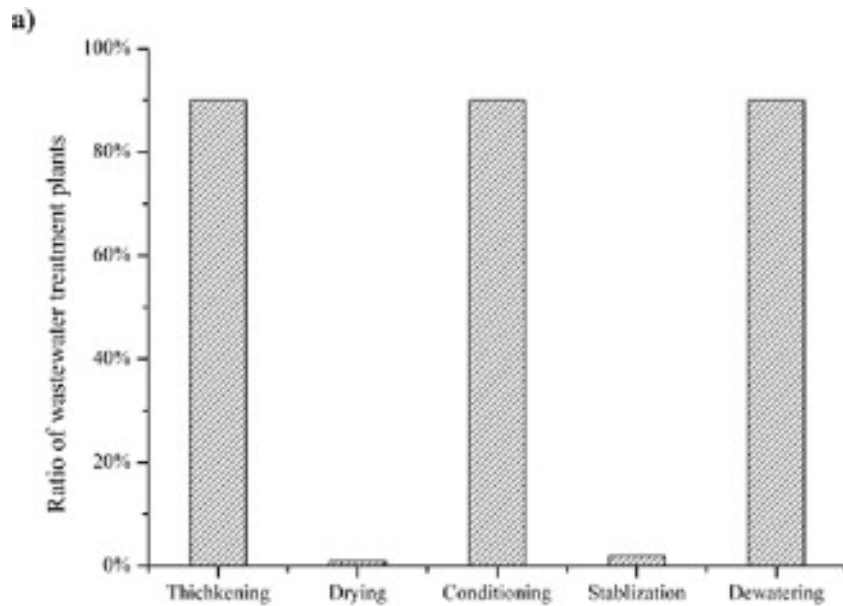
La situation en 2005 (Eurostat)



La situation en 2013 (Eurostat)



La situation en 2013 en Chine



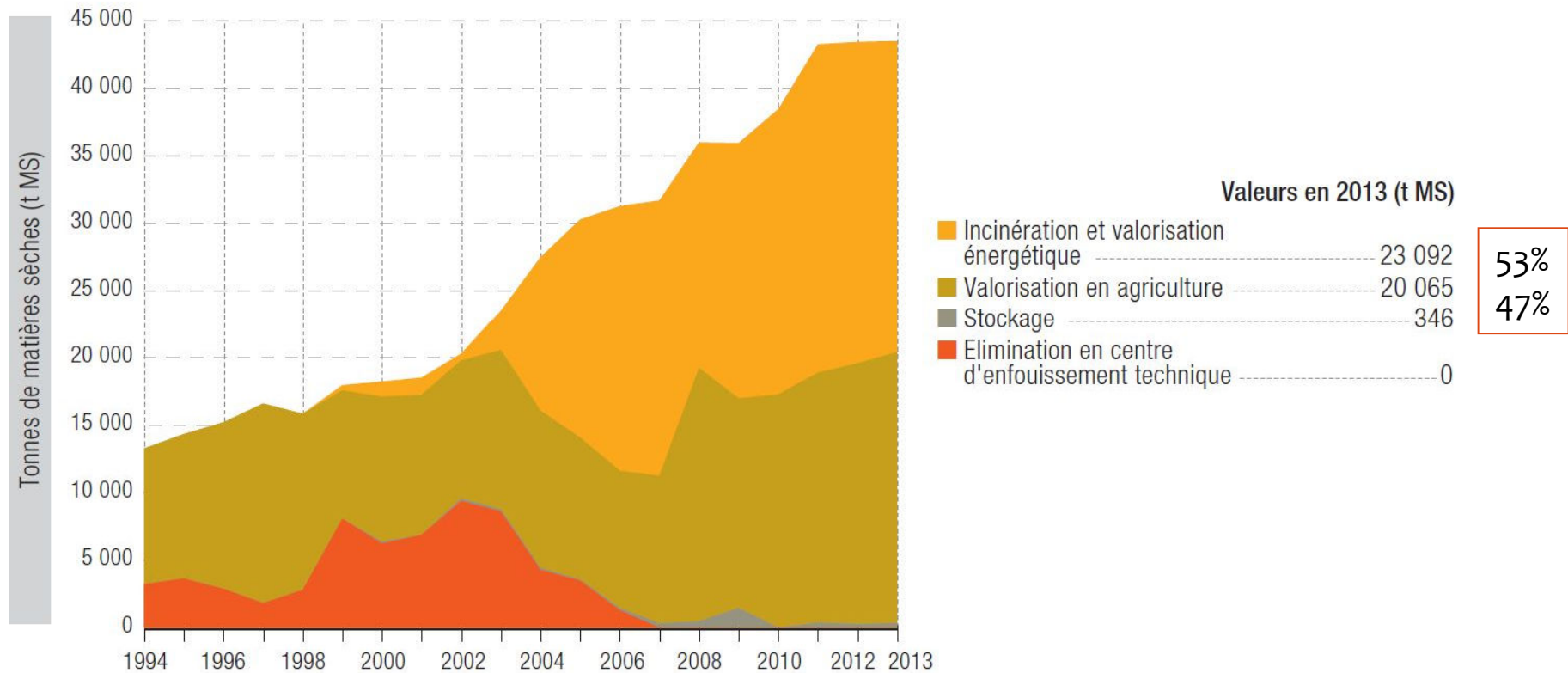
[Water Res. 2015 Jul 1;78:60-73](#)

Les données les plus récentes

- Environ 50% des pays UE 27 utilisent la voie agricole à > 50%
 - 21 pays utilisent la valorisation agricole directe
 - 18 utilisent le compostage avant usage agricole
 - Utilisation en sylviculture et réhabilitation de sites dégradés (végétalisation)
- 18 pays utilisent l'incinération
 - Différentes technologies entre mono ou co-incinération
- Sauf exceptions, technologies innovantes comme pyrolyse ou gazéification restent à l'état de recherche ou pilote
- Oxydation par voie humide à Bruxelles Nord, Epernay, Aix-en-Provence, Truccazzano (Athos™)

Focus sur la Wallonie

Fig. 7-7 Gestion des boues de stations d'épuration collectives en Wallonie



ICEW 2014 – Sources : SPGE ; SPW - DG03 - DSD (déclarations des OAA à la SPGE)

Les tendances pour 2020

- 44% en agriculture (= + 18% en masse)
- 32 % incinération
- 14% mise en décharge
- + autres voies mineures de valorisation
 - Suit la logique de hiérarchisation de traitement des déchets
- Mais encore
 - Récupération du phosphore
 - Diminution mise en décharge
 - Développement de l'incinération en UE 12
 - Nouvelles stations UE 12 : thermolyse + digestion

Deux filières dominantes

- Valorisation agricole
 - ❑ Directe : boue liquide ou déshydratée (+ chaulage éventuel)
 - ❑ Après compostage
 - ❑ Après séchage
- Valorisation énergétique
 - ❑ Incinération dans four spécifique → séchage préalable
 - ❑ Co-incinération avec déchets ménagers
 - ❑ Co-incinération en cimenterie (+ valorisation matière)

+ couplage avec biométhanisation possible

Filière agricole

Boue épaisse

Déshydratation
mécanique

Epandage

Déshydratation
mécanique

Compostage

Epandage

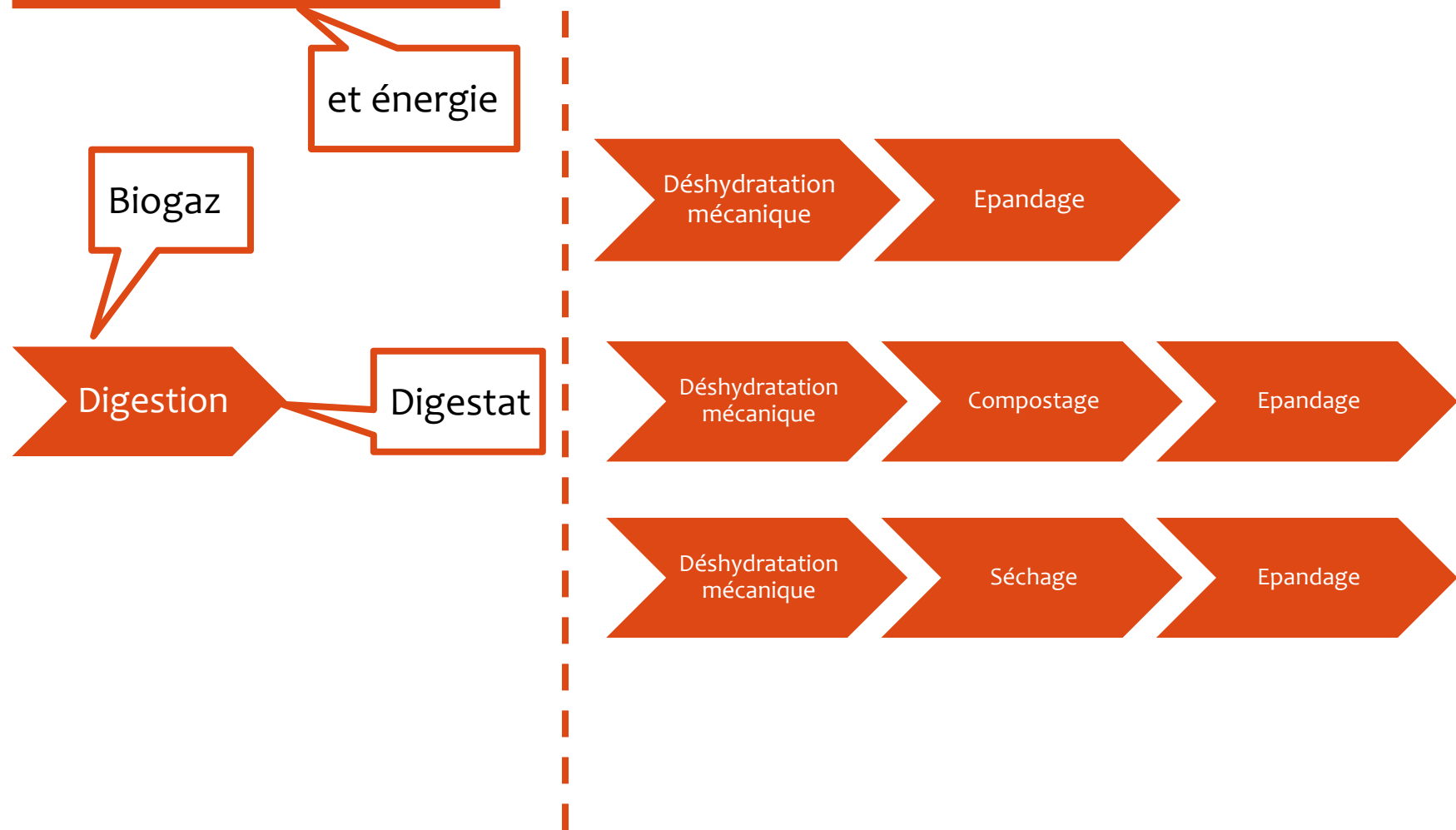
Déshydratation
mécanique

Séchage

Epandage

+ pré ou post chaulage éventuel

Filière agricole



Filière énergie

et matière

Boue épaisse

Récupération P

Récupération P dans les cendres

Déshydratation
mécanique

Valorisation
énergétique

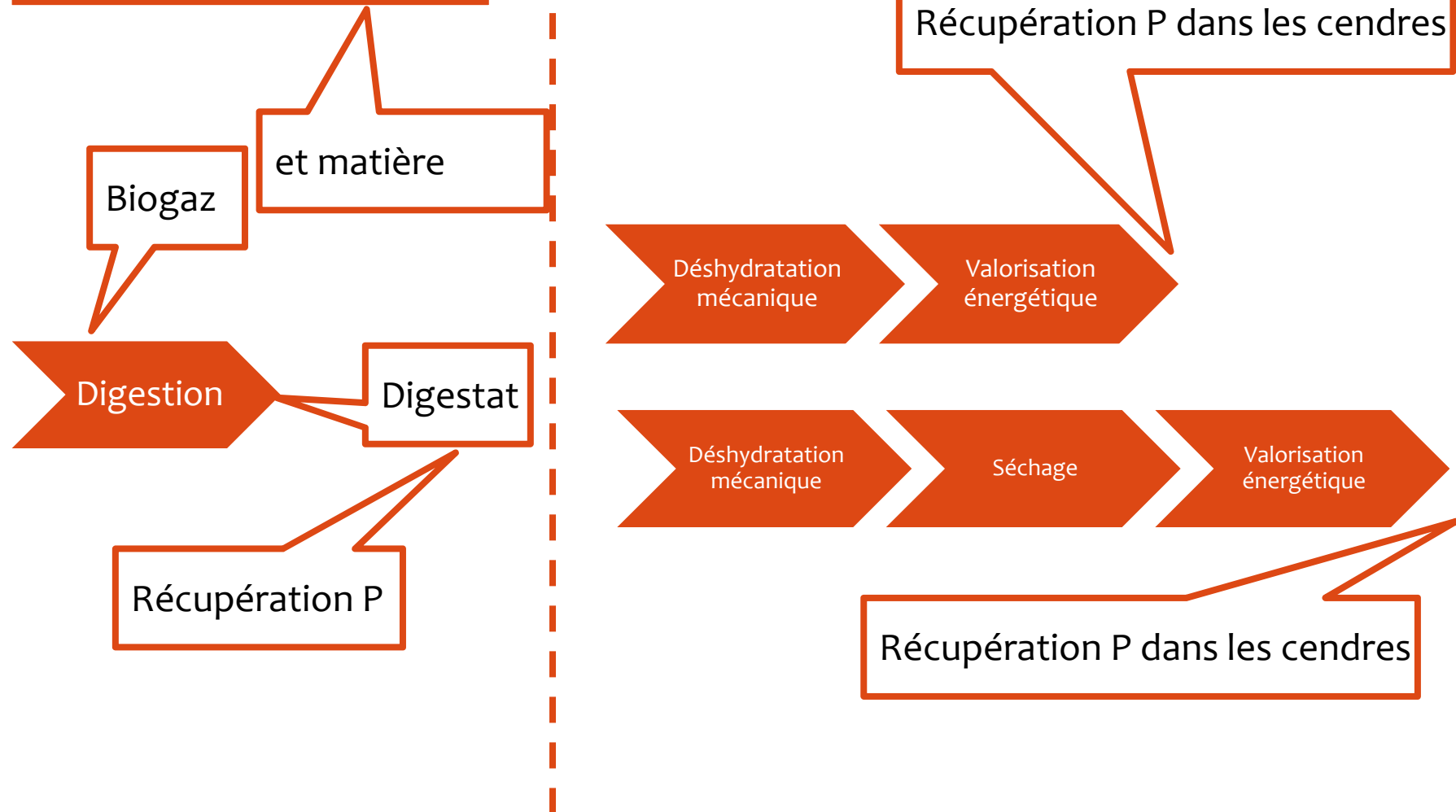
Déshydratation
mécanique

Séchage

Valorisation
énergétique

Récupération P dans les cendres

Filière énergie



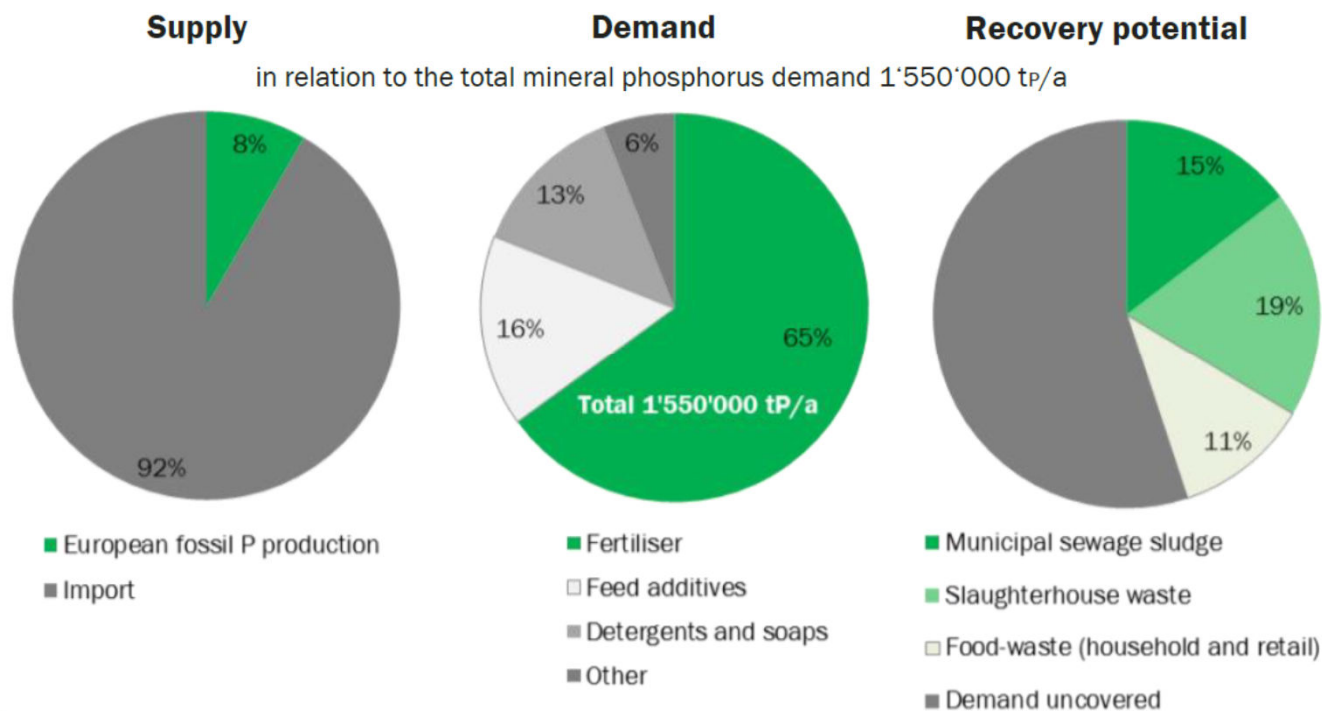
Trois grands axes de recherche

- Minimiser la production de boue
 - Digestion
 - Prétraitement avant digestion
 - + voie biologique
- Optimisation/développement de nouvelles voies de valorisation
 - Récupération phosphore
 - Conversion thermochimique (gazéification ou pyrolyse)
 - Substances à haute valeur ajoutée
 - + voies diverses (PHA, ...)
- Optimisation de la filière de traitement dans son entièreté
 - En lien avec séchage thermique

La récupération du phosphore

Récupérer le phosphore

- Récupération phosphore = élément essentiel à la vie
 - 90% P → industrie des fertilisants à partir de la transformation de roches phosphatées → épuisement de la ressource
 - Boues et eaux usées = alternative plausible



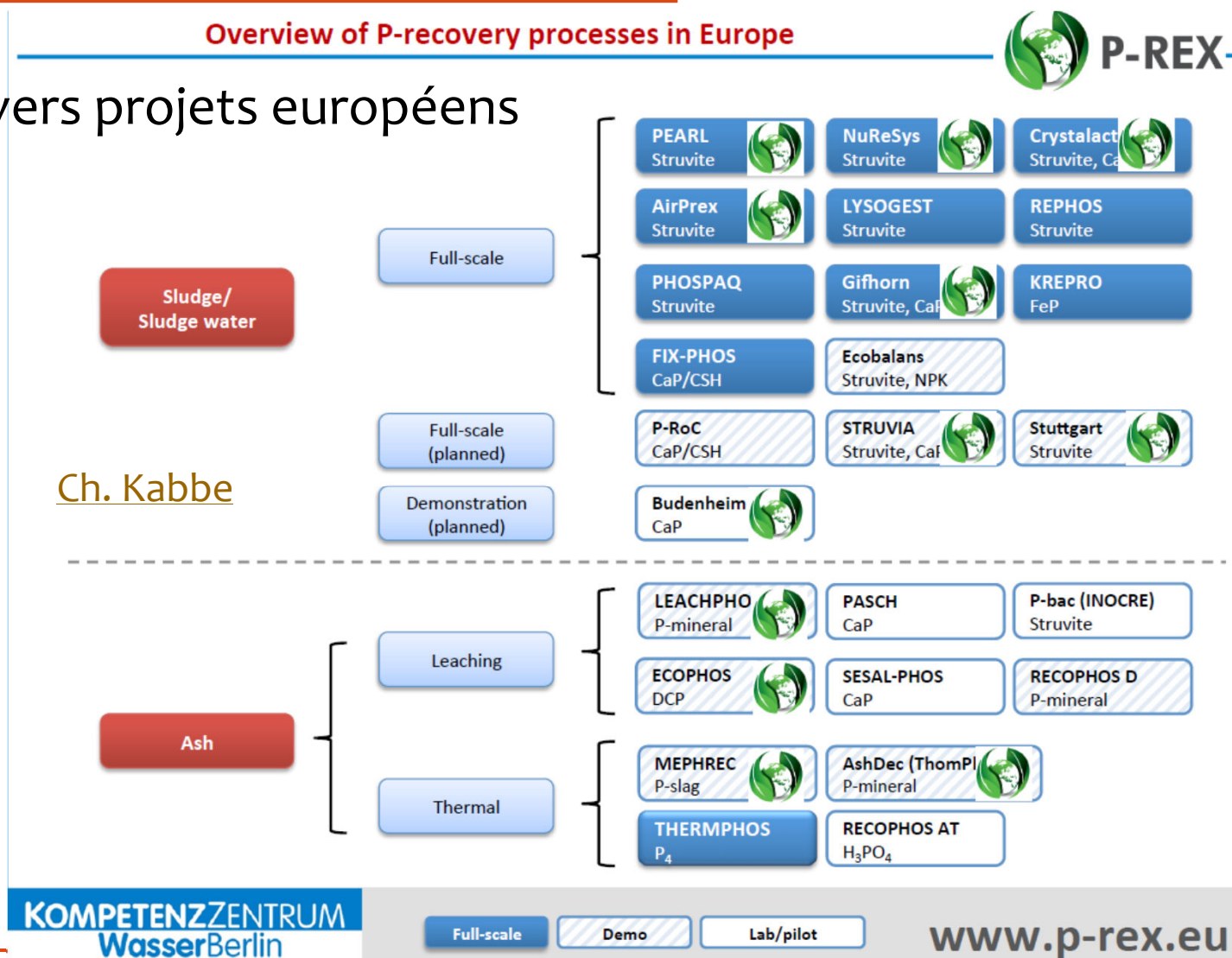
Data sources: European production¹⁰, demand 10-13, recovery potentials⁹

Récupérer le phosphore

Overview of P-recovery processes in Europe



■ Divers projets européens



Récupérer le phosphore

- Implémentation industrielle
 - Construction usine Ecophos à Mardyck près de Dunkerque

<http://www.nordfranceinvest.com/news/detail/ecophos-invests-EUR60-million-in-innovative-dunkerque-plant.html>



Phos4You



Welcome to the Phos4You Partnership



Phos4You

Interreg 
North-West Europe
Phos4You
European Regional Development Fund

Associated by:



Phos4You

Current mineral P-demand in NWE: app. 430,000 tonnes P/year (EUROSTAT).

Recovery potential from sewage water: app. 112,909 tonnes P/year.

Municipal sewage sludge covers app. 0 % of mineral P-demand in NWE.

EU-Sovereignty regarding P-supply is app. 8%.

When project ends

3,5% of the P-recovery potential in NWE is tapped (4,000 tonnes P/y).
6 demonstrators are implemented. 20 innovative waste processes are designed. 44 enterprises are supported and cooperate with research.
10 enterprises are supported to introduce new-to-market-products.

After 5 years

35% of P-recovery potential in NWE is tapped (40.000 tonnes P).
9 territories have implemented the most feasible P recovery solution. 5 recycling solutions are implemented in 11 territories.

After 10 years

90% of P- recovery potential from NWE sewage water is tapped (101,618 tonnes P). Another 12 territories have taken up P recovery solutions.
EU-sovereignty of imported P-rock is about 45%.

Raise awareness



Demonstrate that P recovery from waste water is feasible

=> Experts must be sensitized about finite P sources and options to recover P from municipal waste water

Influence attitude



Demonstrate that the fertilizer value chain is ready to make use of 2^{ary} raw P

=> End users must be convinced that innovative P fertilizers are ready to be brought to the market

Increase knowledge



Close the gap between P recovery and recycling

=> Involved stakeholders must be informed about new findings concerning P recovery technologies and recycling options

Optimisation de la filière 'boue'

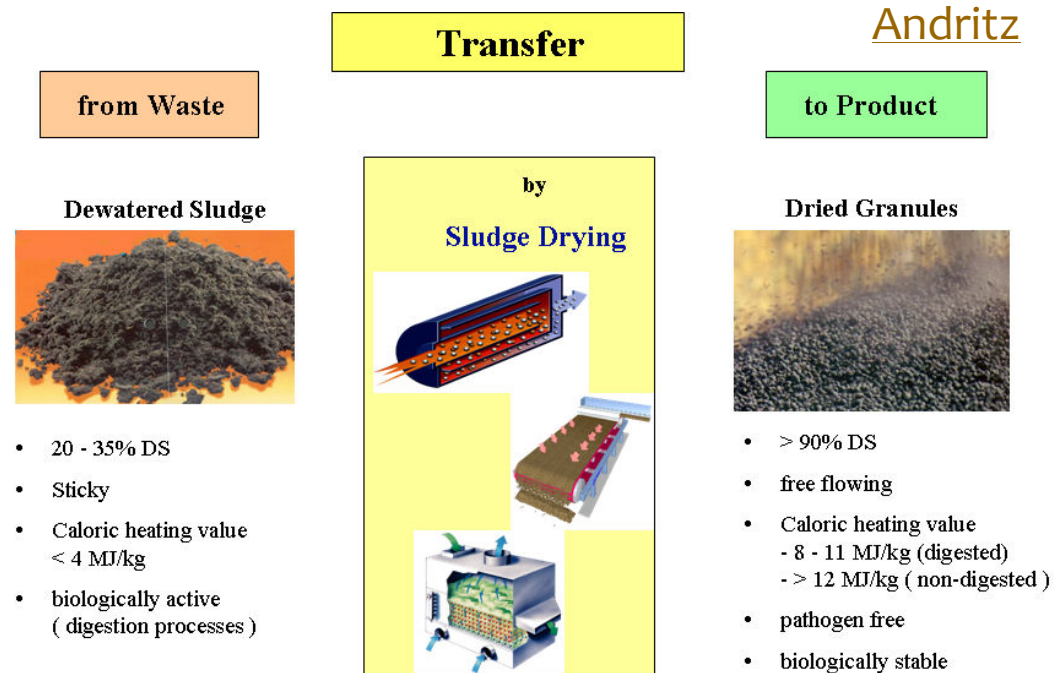
Optimisation de la filière complète

- Place croissante du séchage
- Opération complexe et énergivore → intégration énergétique
- Performances dépendent de l'amont
 - Nature et dosage du flocculant
 - Présence ou non de digestion
 - Type de déshydratation mécanique
 - Transport (pompes, convoyeurs, ...)
 - Chaulage (pré, post)
 - Stockage
 - ...
- Peu de constructeurs spécialisés
 - Adaptation de technologies existantes
 - Mauvaise connaissance du produit → erreurs de design
 - Diffusion de codes de bonnes pratiques !!



Pourquoi sécher ?

- Valorisation agricole : épandage
 - ❑ Stabilisation, réduction odeur (MS > 90%)
 - ❑ Réduction masse et volume
 - ❑ Concentration des éléments nutritifs
 - ❑ Hygiénisation
 - ❑ Texture pâteuse → texture solide



Pourquoi sécher ?

- Valorisation énergétique
 - Séchage \Rightarrow Augmentation Pouvoir Calorifique Inférieur

$30 < MS < 45\%$: auto-combustibilité

\Rightarrow Incinération four spécifique

$60 < MS < 90\%$: PCI \cong ordures ménagères (8400 kJ/kg)

\Rightarrow Co-incinération

$MS > 85\%$ \Rightarrow pyrolyse ou gazéification

Les boues, un matériau complexe

- Boue = matériau rhéologiquement complexe

Transition entre états liquide – pâteux – solide en cours de séchage

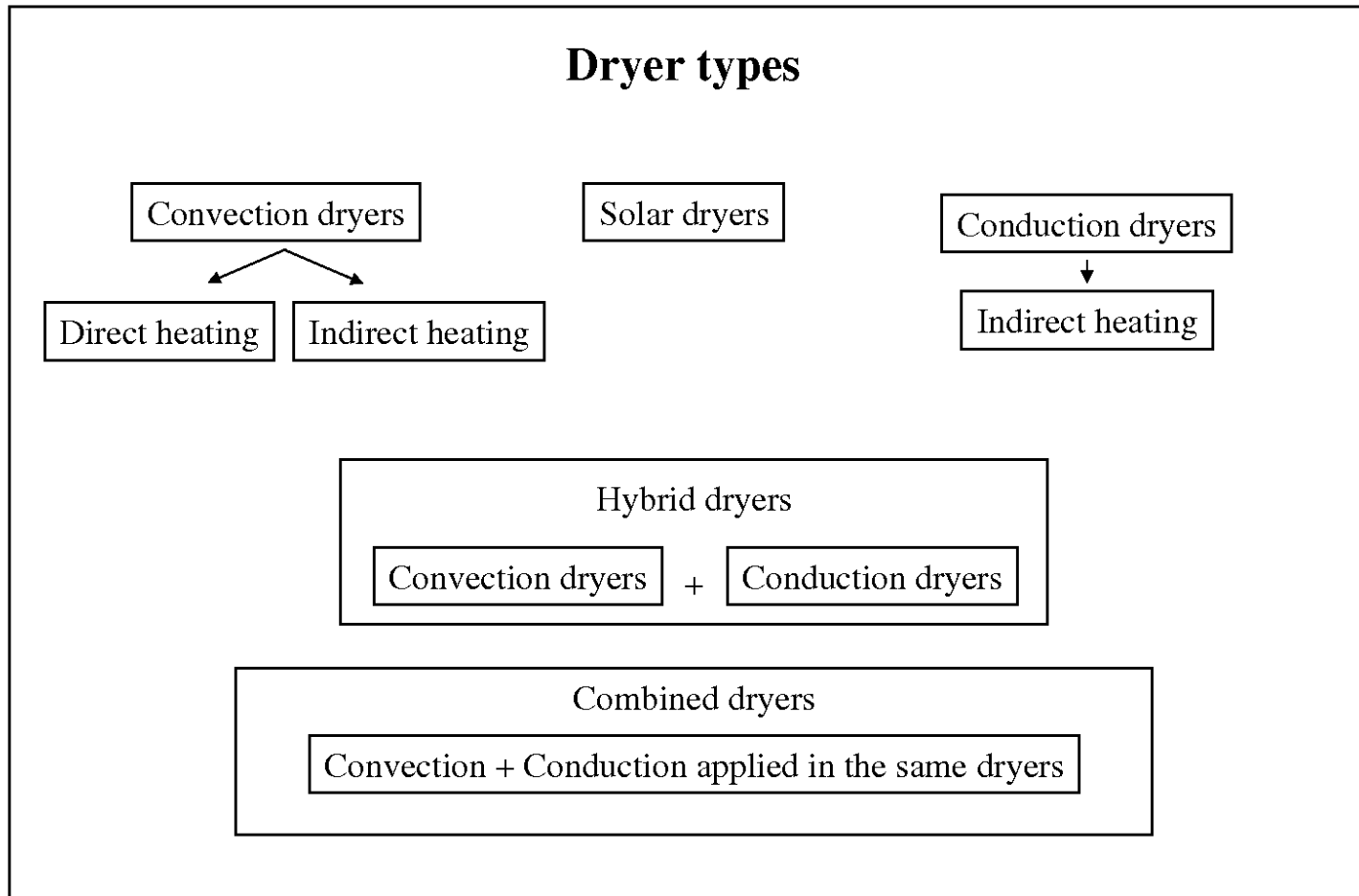
| Siccité croissante | | | | | |
|--------------------|---------|---------------------------|---------------------------------------|------------|------|
| (% MS) | < 10 | 10 - 40 | 40 - 60 | 60 - 90 | > 90 |
| Etat | Liquide | Liquide visqueux - pâteux | Collant, difficile à manipuler | Granulaire | Sec |

Le comportement rhéologique d'une boue (et les transitions entre états) est extrêmement variable :

Il dépend : de la nature chimique et biologique de la boue
des conditions de prétraitement (stabilisation)
des conditions de pompage, de stockage, ...

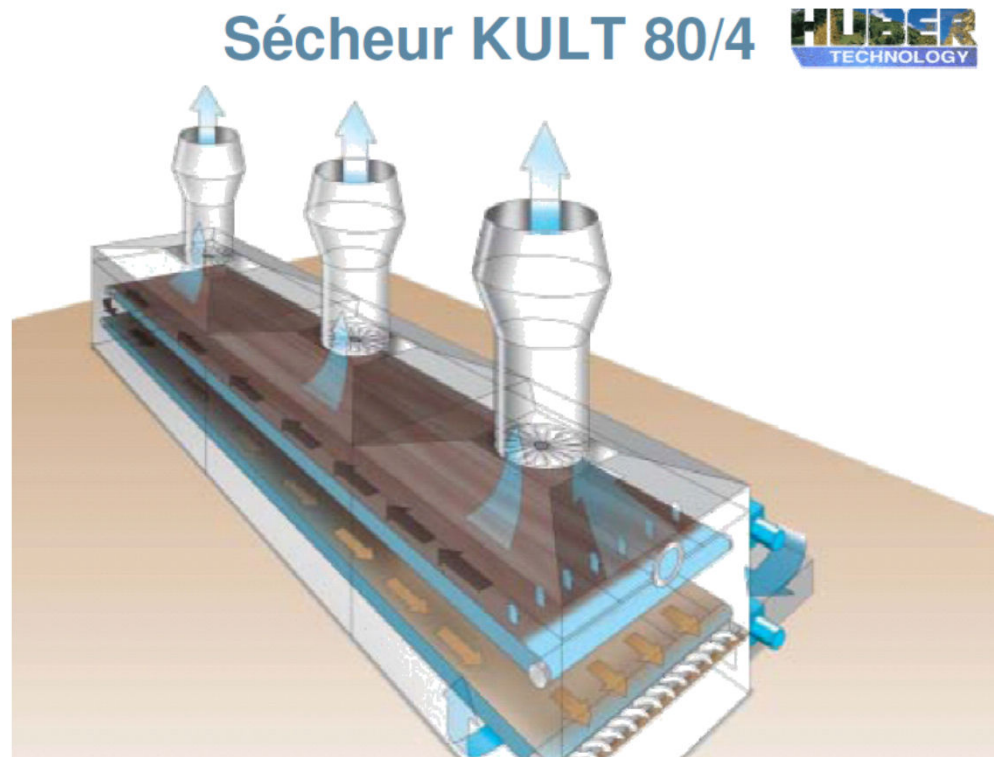
«Histoire»
de la boue

Les technologies de séchage



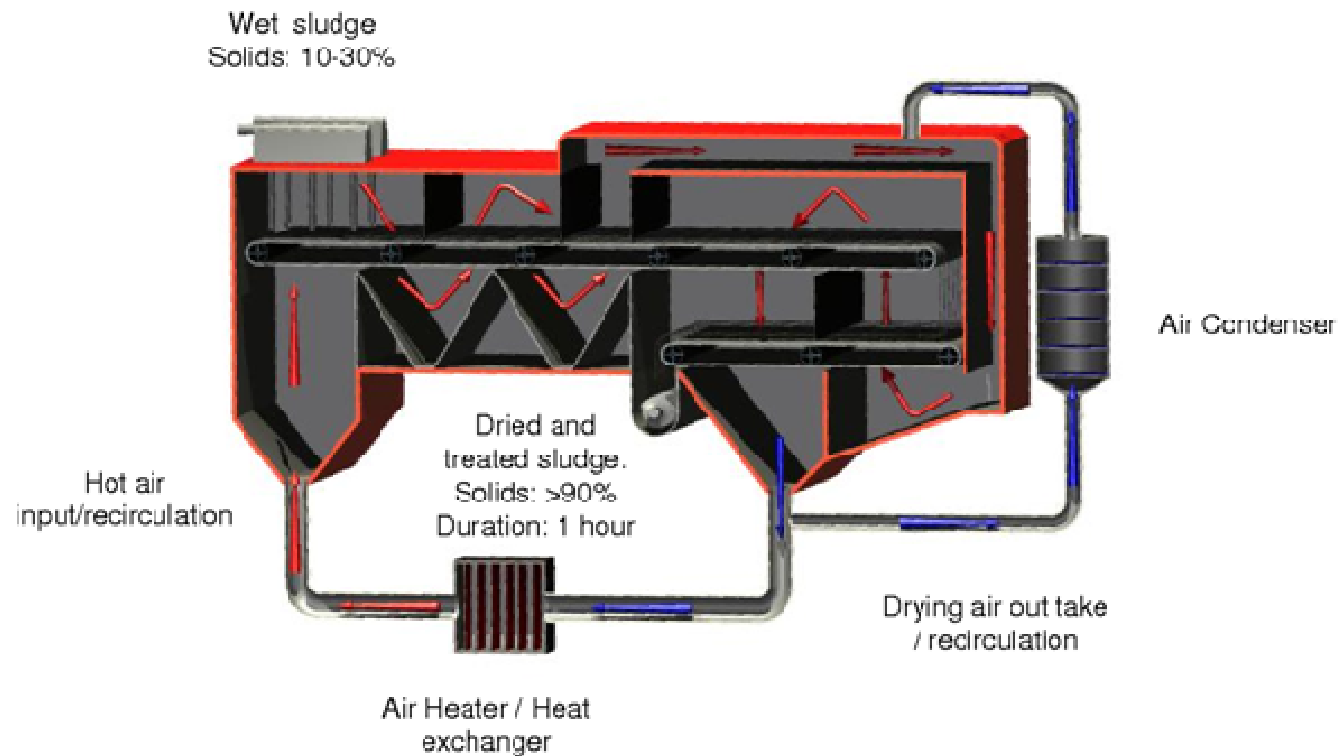
Technologies de séchage

- Convoyeur à bandes : Tenneville - Huber



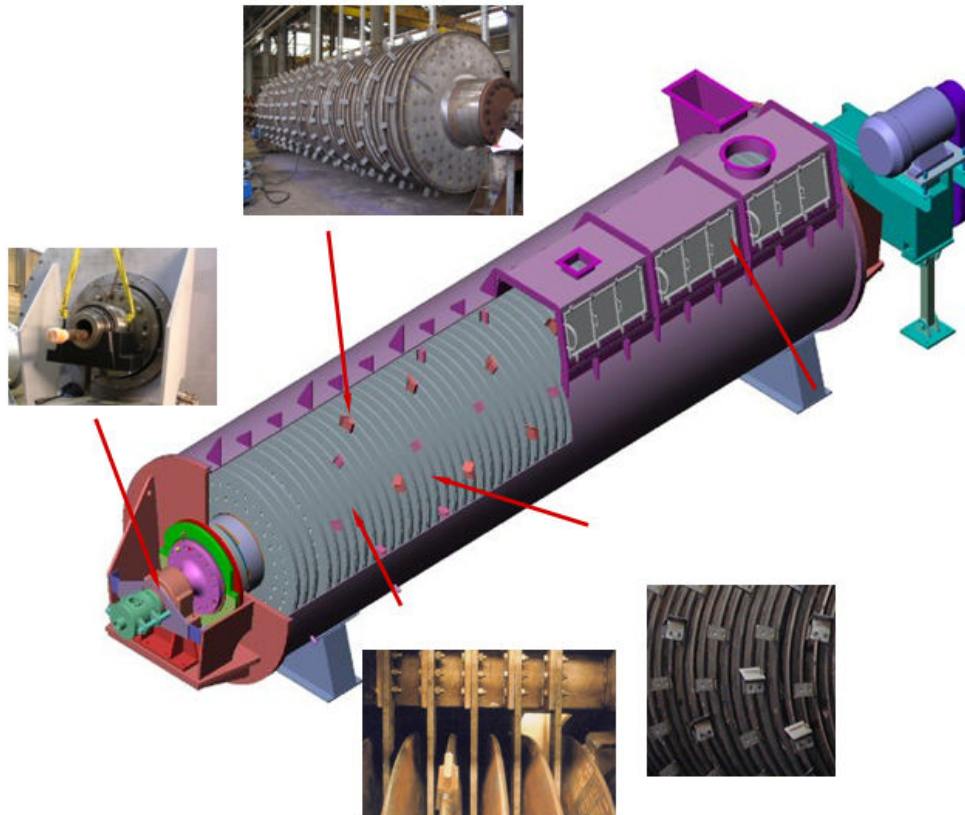
Technologies de séchage

- Convoyeur à bandes : BioCon® - Krüger (USA)



Technologies de séchage

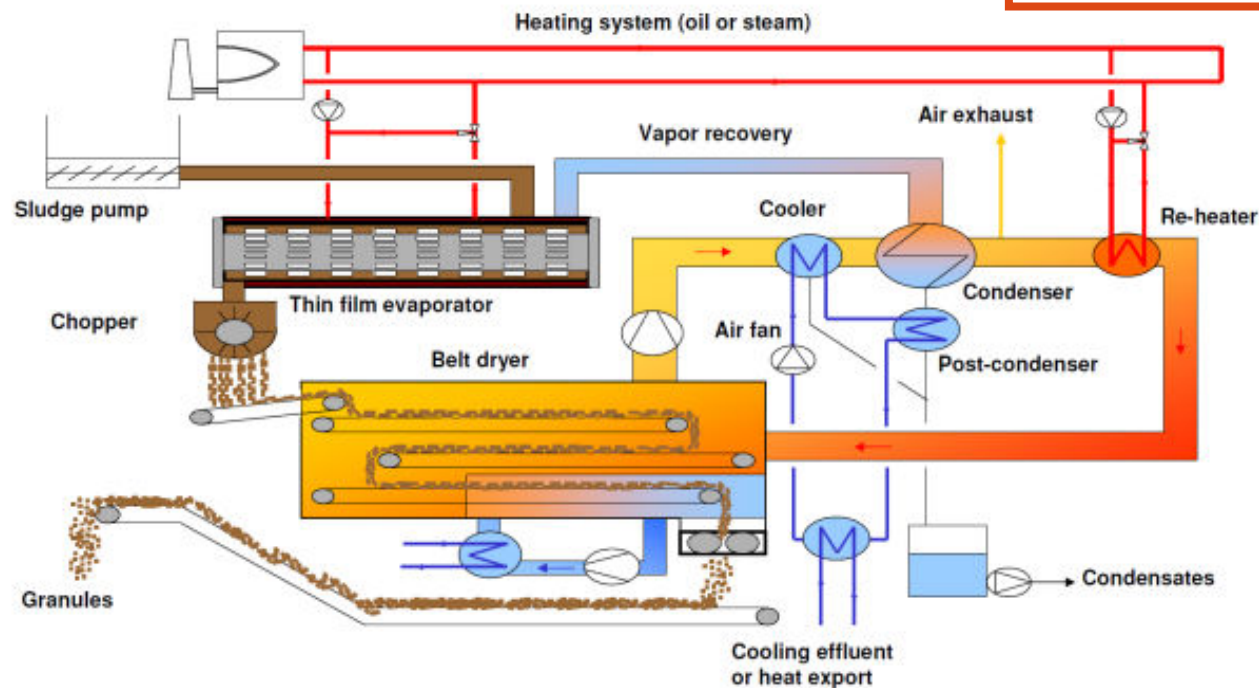
- Sécheurs conductifs – SIL (France)



Technologies de séchage

- Système hybride : évaporateur à film mince + convoyeur à bandes

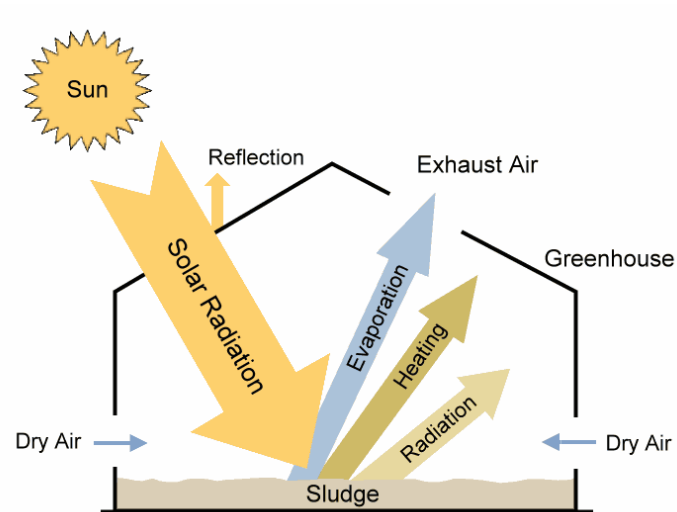
INNODRY 2E® drying process



700 à 900 kWh/t EE – 0.5 à 4 t/h

Technologies de séchage

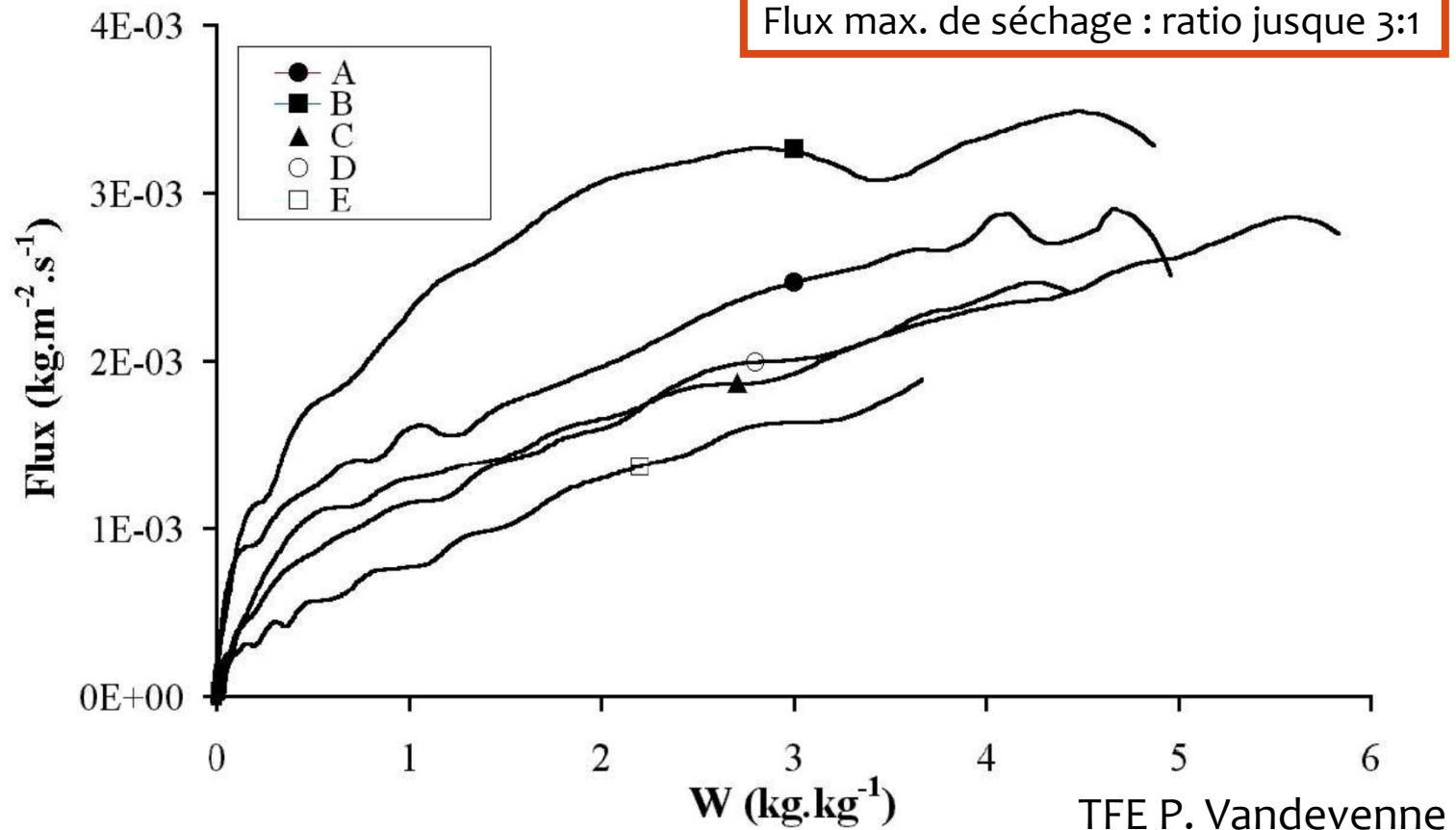
- Sécheurs solaires
 - Serres fermée, ouverte, avec plancher chauffant



30 à 200 kWh/t EE – jusque 1000 si désodorisation chimique

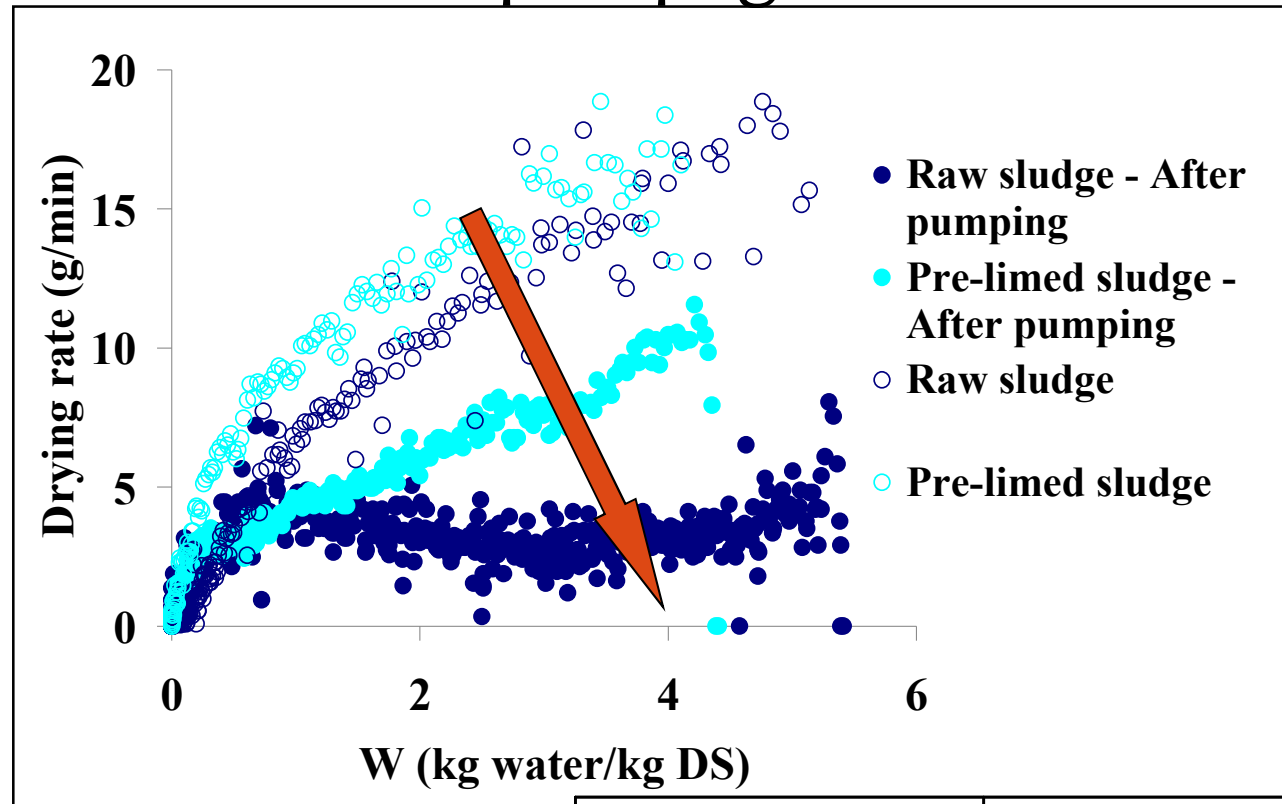
Séchage des boues = une opération complexe

■ Influence de l'origine



Séchage des boues = une opération complexe

■ Influence du pompage

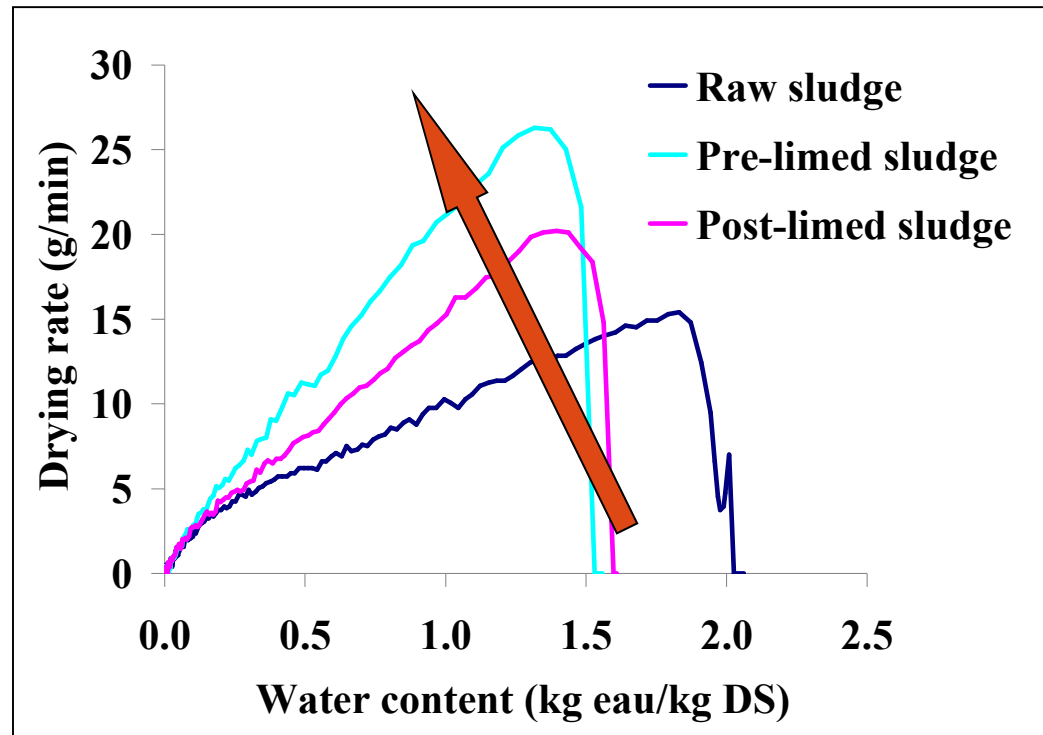


| | Specific evaporation capacity (kg/m ² h) |
|---------------|---|
| Raw sludge | 21.4 |
| Pumped sludge | 9.9 |

Séchage des boues = une opération complexe

■ Influence du chaulage

Stage Y. Huron

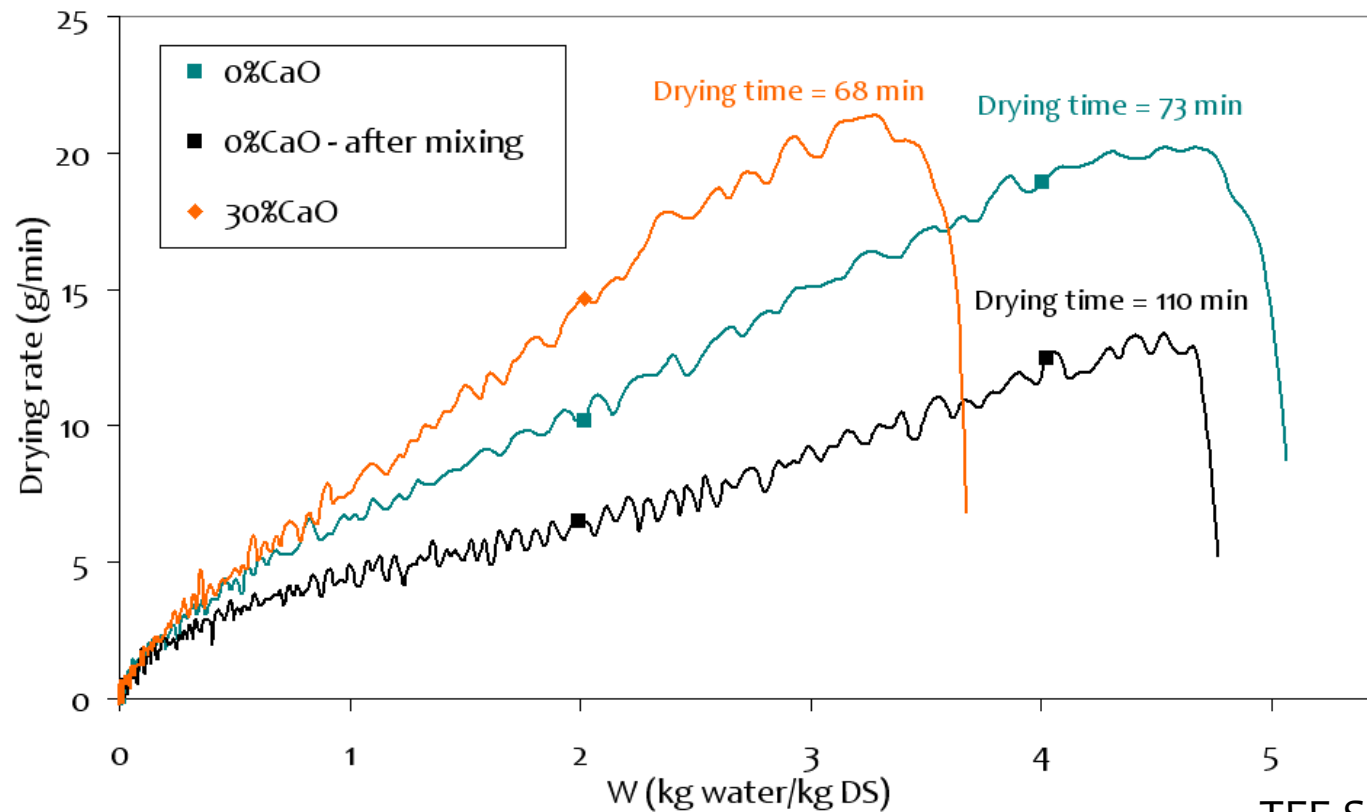


| | Specific evaporation capacity (kg/m ² h) |
|-------------|---|
| Raw sludge | 24.3 |
| Post-liming | 28.9 |
| Pre-liming | 37.0 |

Séchage des boues = une opération complexe

■ Influence du mélange

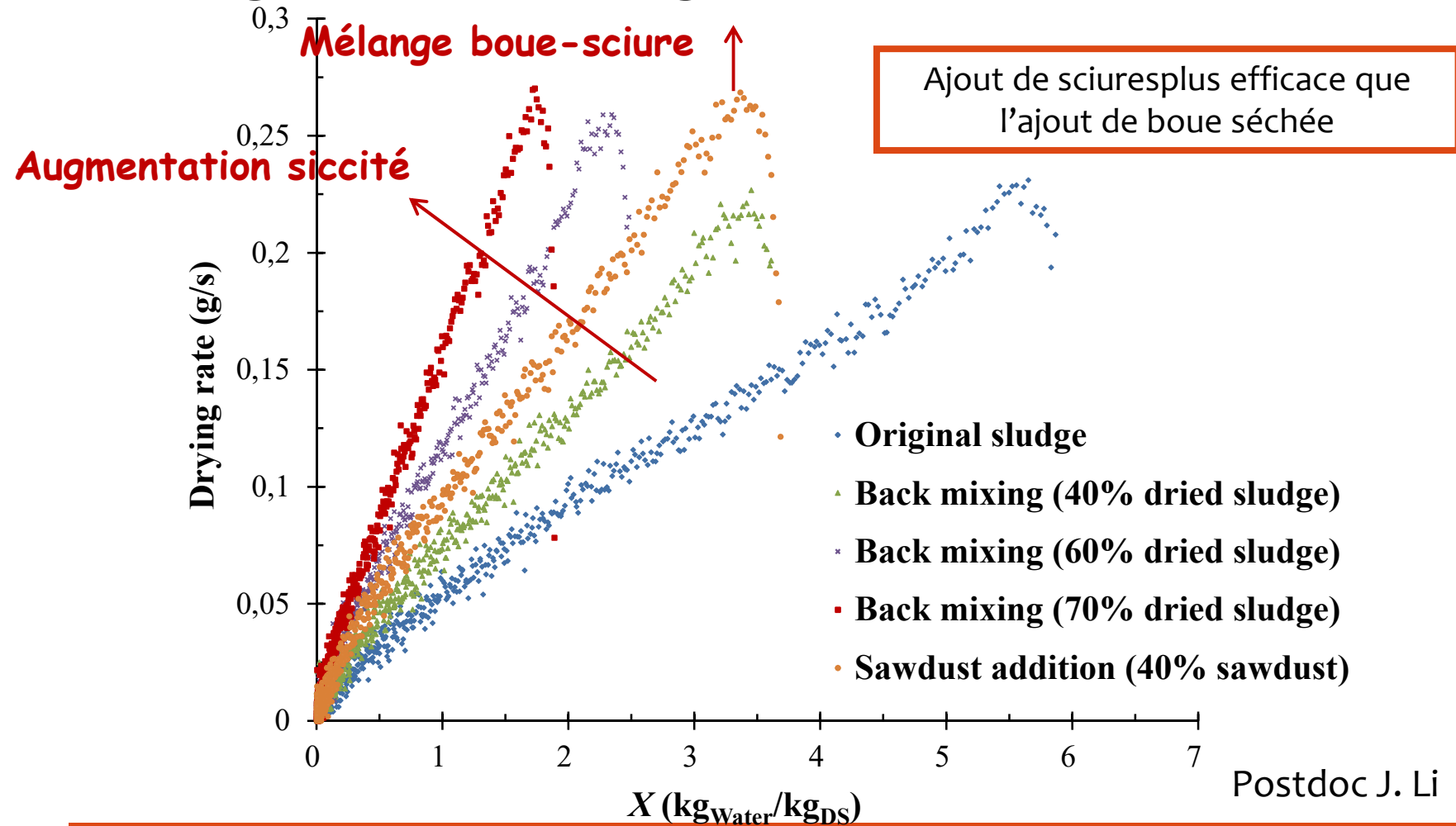
Mélange → augmentation de la durée de séchage
30% CaO post-chaulage → “récupération” du comportement initial



TFE S. Royer

Séchage des boues = une opération complexe

- Mélange, rétro-mélange et ajout de sciures de bois

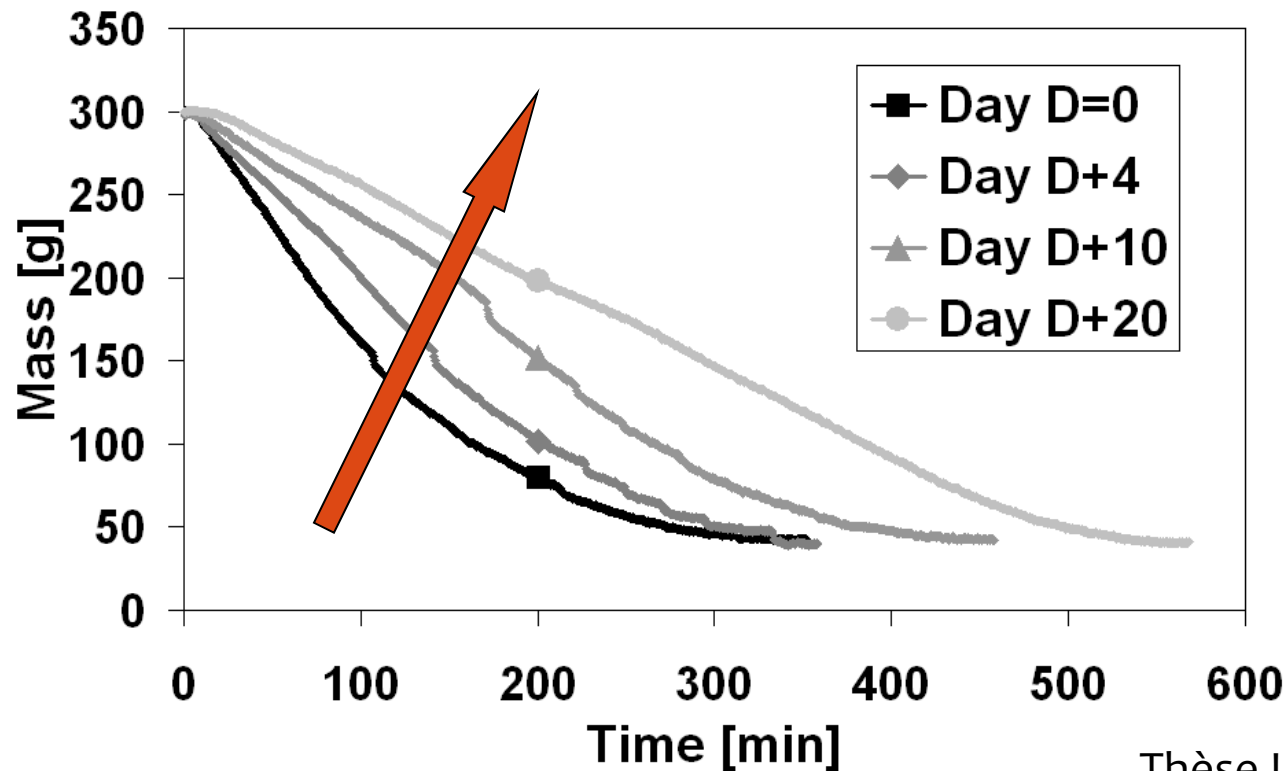


Postdoc J. Li

Séchage des boues = une opération complexe

■ Influence du stockage

Ralentissement du séchage avec des durées de stockage croissantes

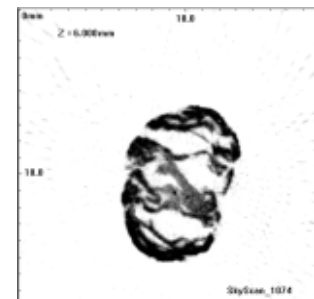
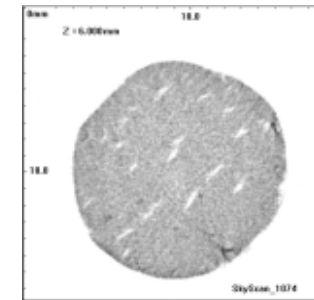


Thèse L. Fraikin

Séchage des boues = une opération complexe

■ Impact du conditionnement

| | Essais (XgPAX, YgFloc.) | Masse initiale [g] | Masse finale [g] | Teneur en eau initiale [g/kg _{MS}] | Quantité eau évap. 95%MS [g] | Temps séchage 95%MS [s] | Vitesse séchage 10 ⁻⁴ [g/s] | Vitesse séchage normal. [-] |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|--|------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| Conditionnement PAX-14/640 LH | A(0;3) | 2.386 | 0.317 | 6.527 | 2.052 | 4850 | 4.232 | 0.851 |
| | B(0;12) | 2.386 | 0.355 | 5.721 | 2.012 | 6100 | 3.299 | 0.664 |
| | D(8;12) | 2.383 | 0.504 | 3.728 | 1.852 | 3155 | 5.872 | 1.181 |
| | E(8;3) | 2.388 | 0.410 | 4.824 | 1.956 | 3640 | 5.375 | 1.081 |
| | C _i (4;6) | 2.387 | 0.399 | 4.982 | 1.967 | 3957 | 4.971 | 1.000 |

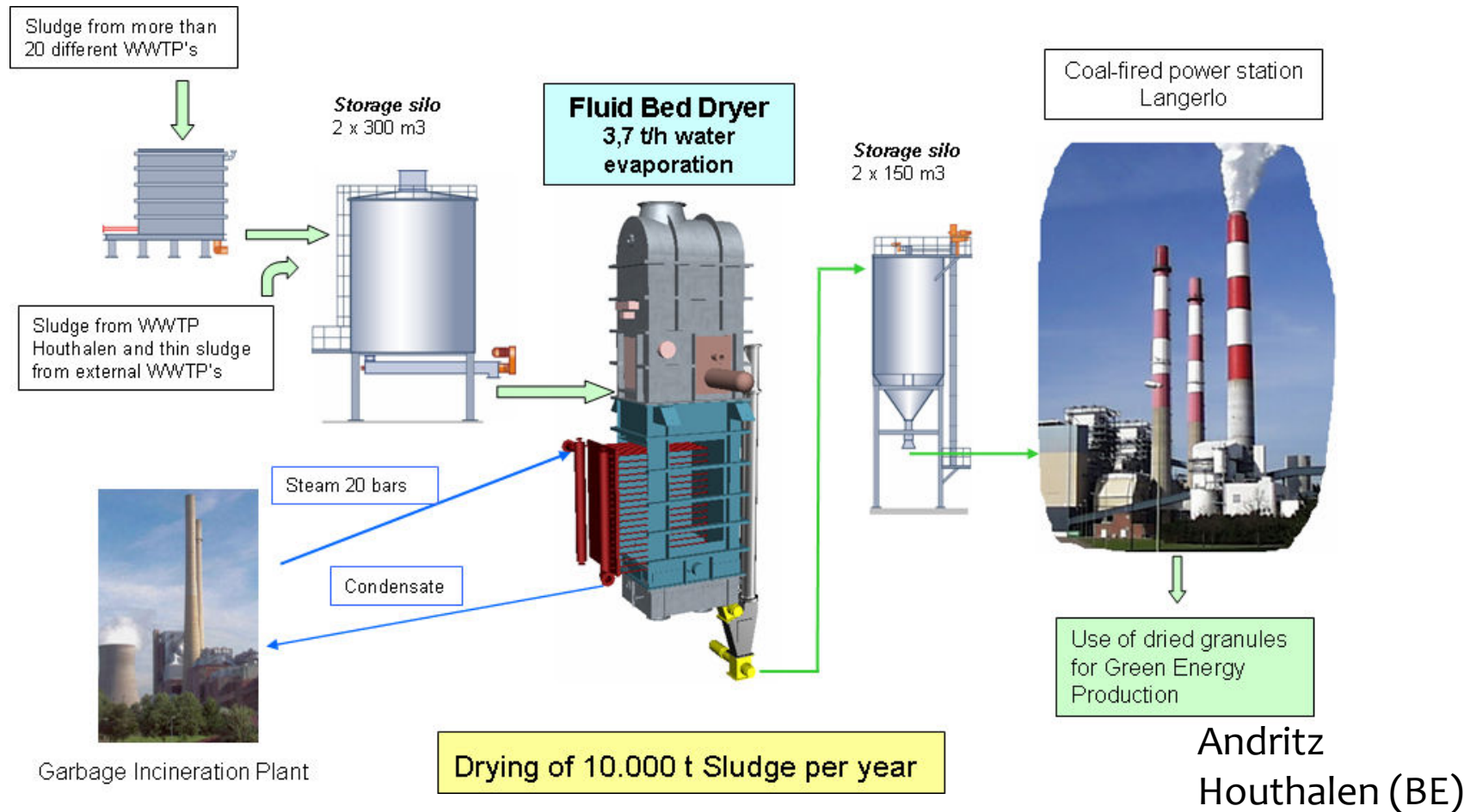


Amélioration cinétique en présence de PAX

Thèse Y.B. Pambou

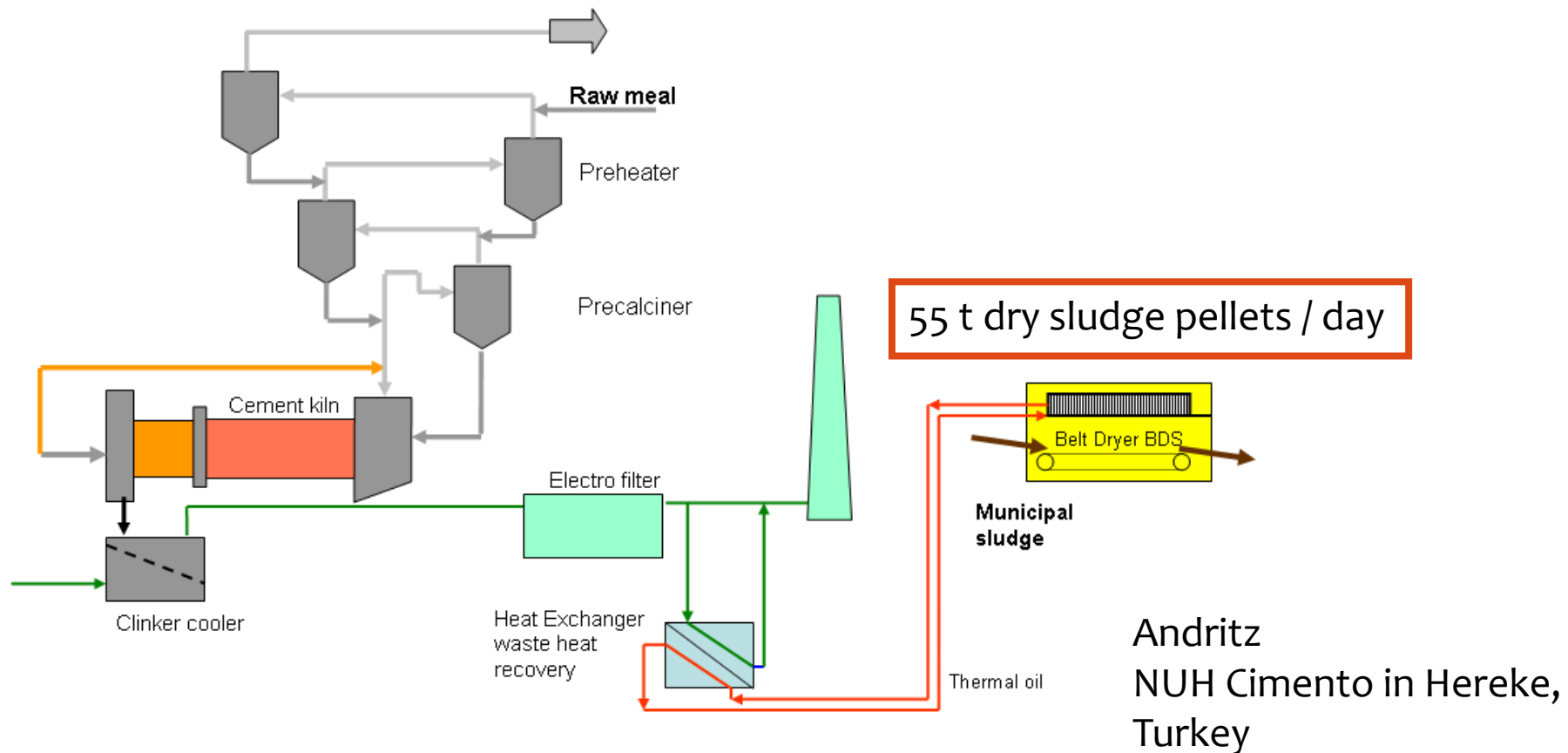
Exemple d'optimisation de la filière complète

■ Valorisation de chaleur 'perdue' d'un incinérateur



Exemple d'optimisation de la filière complète

- Récupération de chaleur dans une cimenterie

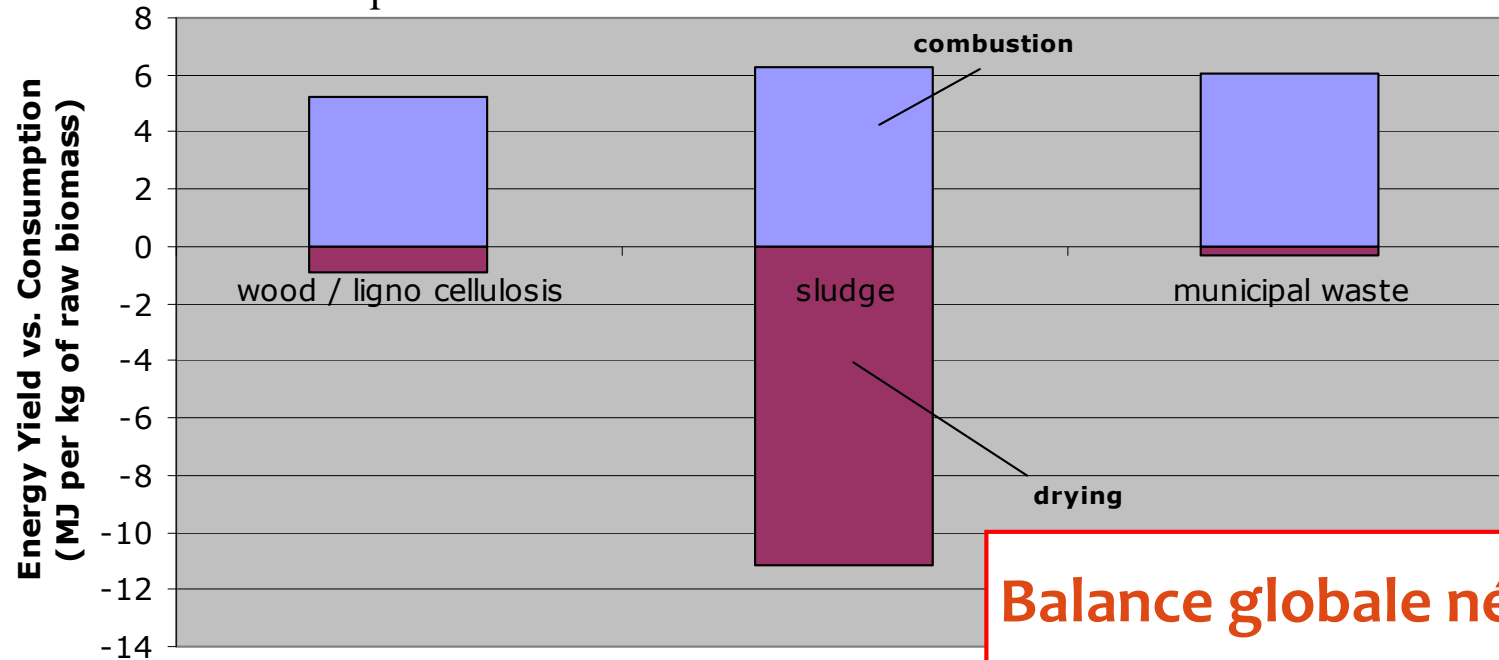


Importance des performances du sécheur

- Sécheur considéré comme 'efficace'

$$R_D = \frac{\text{Consumed energy}}{\text{Latent heat of vaporisation}} = 1.25$$

LHV = 8 MJ/kg pour chaque combustible

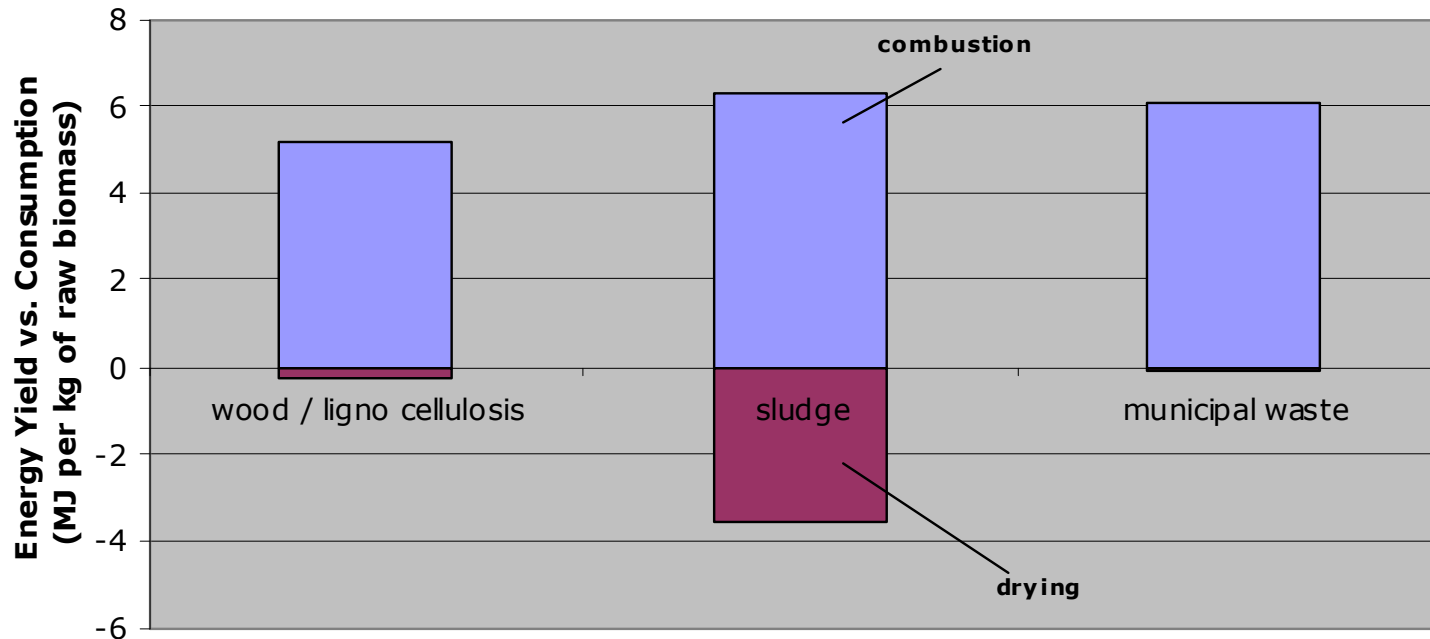


A. Léonard et al., Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization, Modern drying technology, Vol. 4

Importance des performances du sécheur

- Optimisation positive couplée déshydratation/séchage → balance

$$R_D = \frac{\text{Consumed energy}}{\text{Latent heat of vaporisation}} = 0.4$$

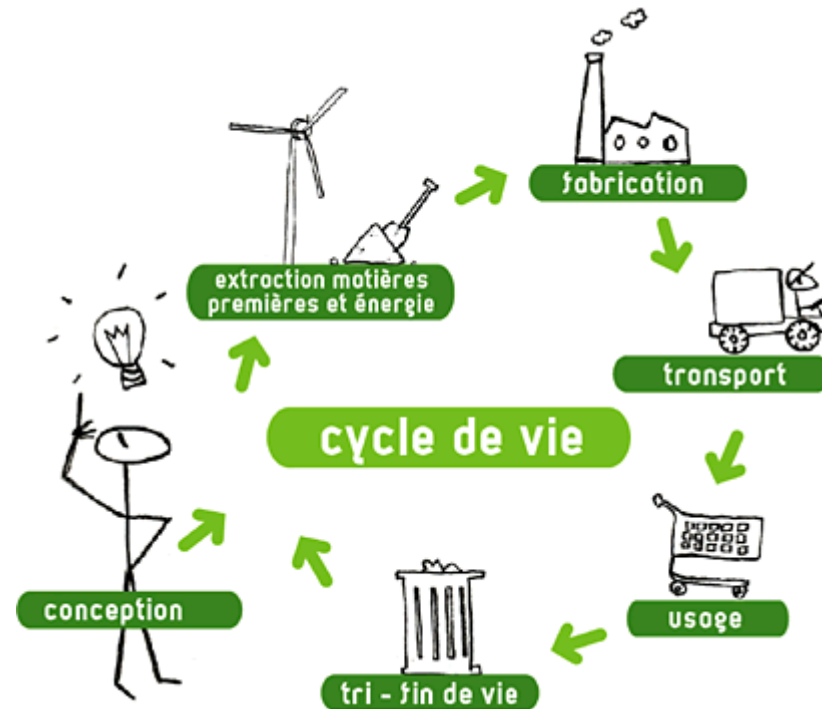


A. Léonard et al., Efficient sludge thermal processing: from drying to thermal valorization, Modern drying technology, Vol. 4

Impact environnemental ?

Analyse de cycle de vie

- Associée à la plupart des projets européens
- Existence de diverses études
 - Au niveau de IRSTEA (pour ONEMA)
 - Au niveau de la DGO3 (cycle de vie de l'eau anthropique)
- Complexité à divers niveaux
 - Inventaire
 - Allocations
 - ...
- A poursuivre !



Pour terminer

Quelques messages

- Prédominance des voies ‘classiques’ agricole et énergétique
 - ❑ Frilosité des industriels
 - ❑ Peu de valeur ajoutée dans les boues
- Boue = source de P → amener à se développer
- Valorisation agricole = choix à privilégier dans une optique d'économie circulaire et selon échelle de Lansink
 - ❑ OK si contrôle qualité → ex. Ecofert, SEDE
 - ❑ Autres voies si qualité KO
 - ❑ Quid pression du secteur agroalimentaire ? Présence de polluants organiques persistants ? Micropolluants ?
- Complexité méconnue de l'histoire de la boue sur son comportement au séchage → impact énergétique, opérationnel

Références

Production scientifique

- Plus de 20 articles ‘boues’ → orbi.ulg.ac.be
- 2 chapitres dans la série ‘Modern Drying Technology’
- 25 présentations dans des conférences internationales
 - + séminaires, conférences de vulgarisation, ...

Prochains rendez-vous

- ECSM « European Conference on Sludge Management »
 - 2008 : Liège
 - 2010 : Budapest
 - 2012 : Leon
 - 2014 : Izmir
 - 2017: Aix en Provence
- EuroDrying'2017
 - Liège, 19-21 juin 2017

Merci pour votre attention !
