

Séminaire ARPEA – VSA – GRESE

La STEP 2050: de la station d'épuration à la station de valorisation ?

HEIA-FR, Fribourg, 19 janvier, 2017



Stations de récupération des ressources de l'eau

Intensification et bioprospection pilote à haute valeur ajoutée

Prof. David Weissbrodt

Professeur assistant | TU Delft, Pays-Bas

Chercheur invité | Aalborg University, Danemark

IWA | Ecologie microbienne et technologie de l'eau

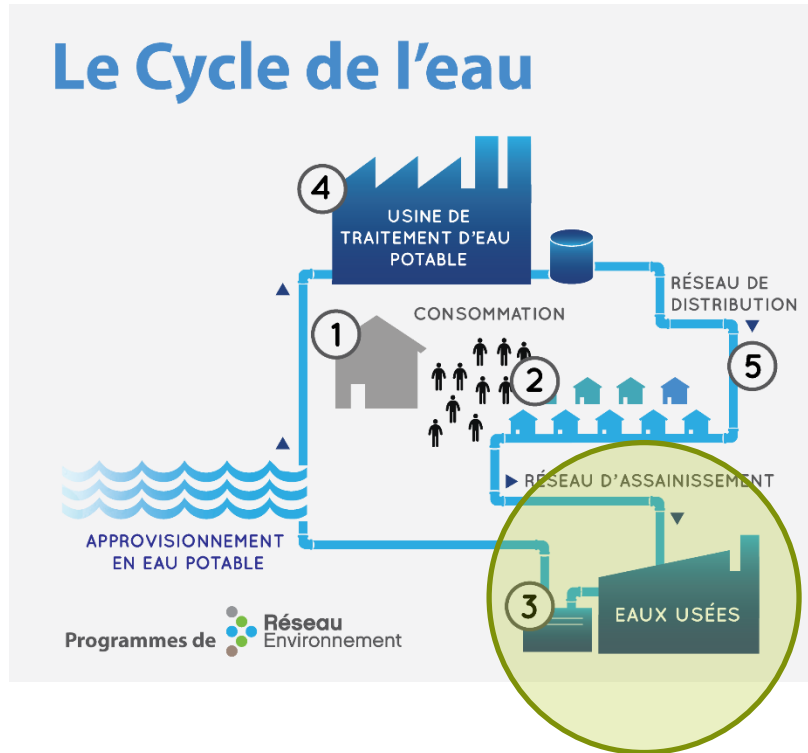
ARPEA | Bureau, Comité, Forums, Gestion Eaux, Rédaction, Prix

Ph.D. EPF | M.Sc. EPF | Dipl.-Ing. HES-SO VS – citoyen de Sion

✉ d.g.weissbrodt@tudelft.nl

Changement de paradigme

“Moi, je travaille pour les StaRRE.”



- ① Municipalité **Econ'eau**
RECONNAISSANCE ET ÉCHANGES
EN ÉCONOMIE D'EAU
- ② **PROGRAMME D'ÉCONOMIE D'EAU POTABLE**
SENSIBILISATION DES CITOYENS
- ③ PROGRAMME D'EXCELLENCE **StaRRE**
- ④ **PEXEP**
PROGRAMME D'EXCELLENCE EN EAU POTABLE
TRAITEMENT
- ⑤ **PEXEP**
PROGRAMME D'EXCELLENCE EN EAU POTABLE
DISTRIBUTION

Resources

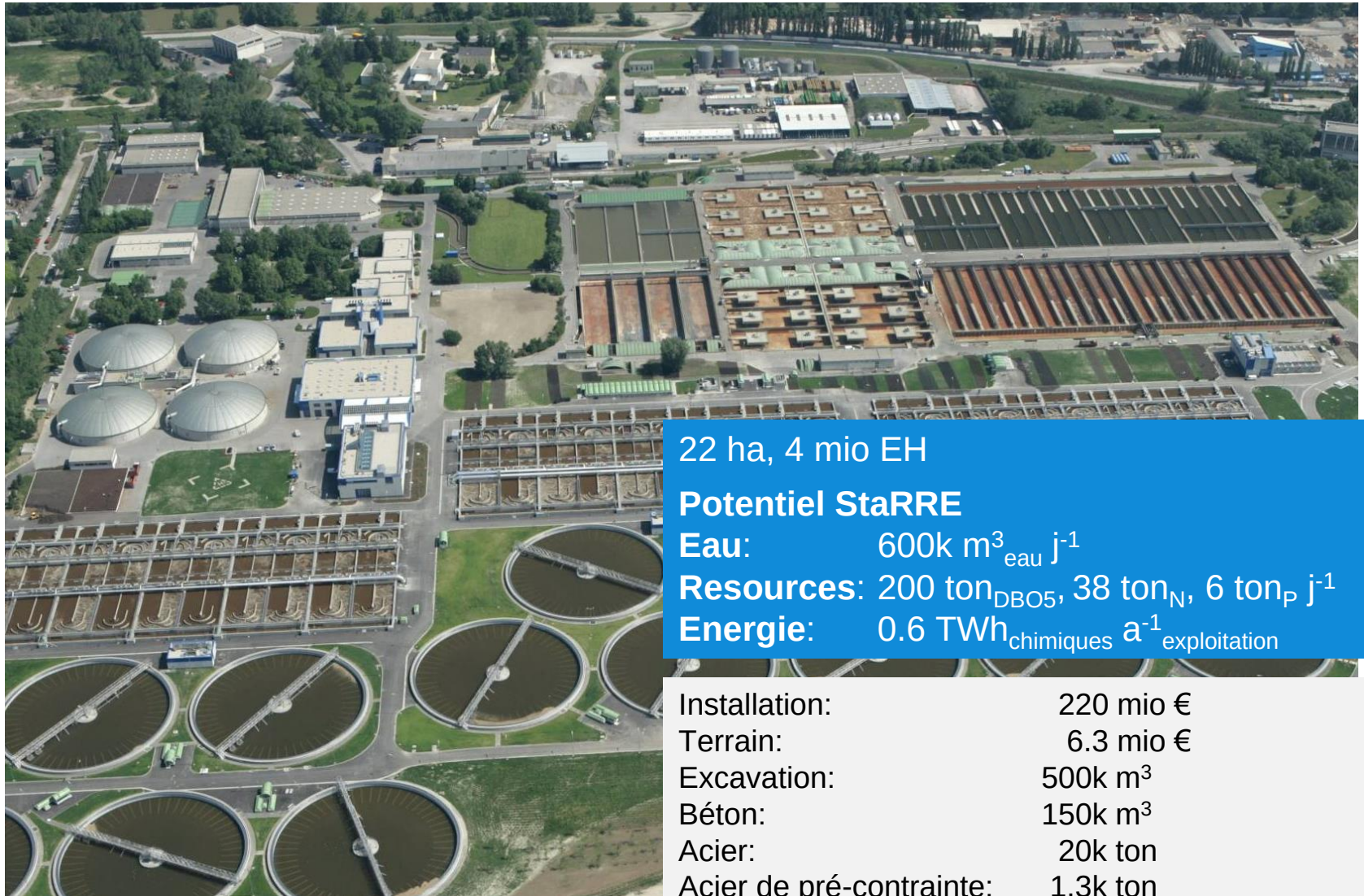
Eau



Energie

100 ans de boues activées

Le procédé biotech le plus étudié, aux dimensions les plus larges



22 ha, 4 mio EH

Potentiel StaRRE

Eau: $600\text{k m}^3_{\text{eau}} \text{ j}^{-1}$

Resources: $200 \text{ ton}_{\text{DBO}_5}$, 38 ton_N , $6 \text{ ton}_P \text{ j}^{-1}$

Energie: $0.6 \text{ TWh}_{\text{chimiques}} \text{ a}^{-1}_{\text{exploitation}}$

Installation: 220 mio €

Terrain: 6.3 mio €

Excavation: 500k m^3

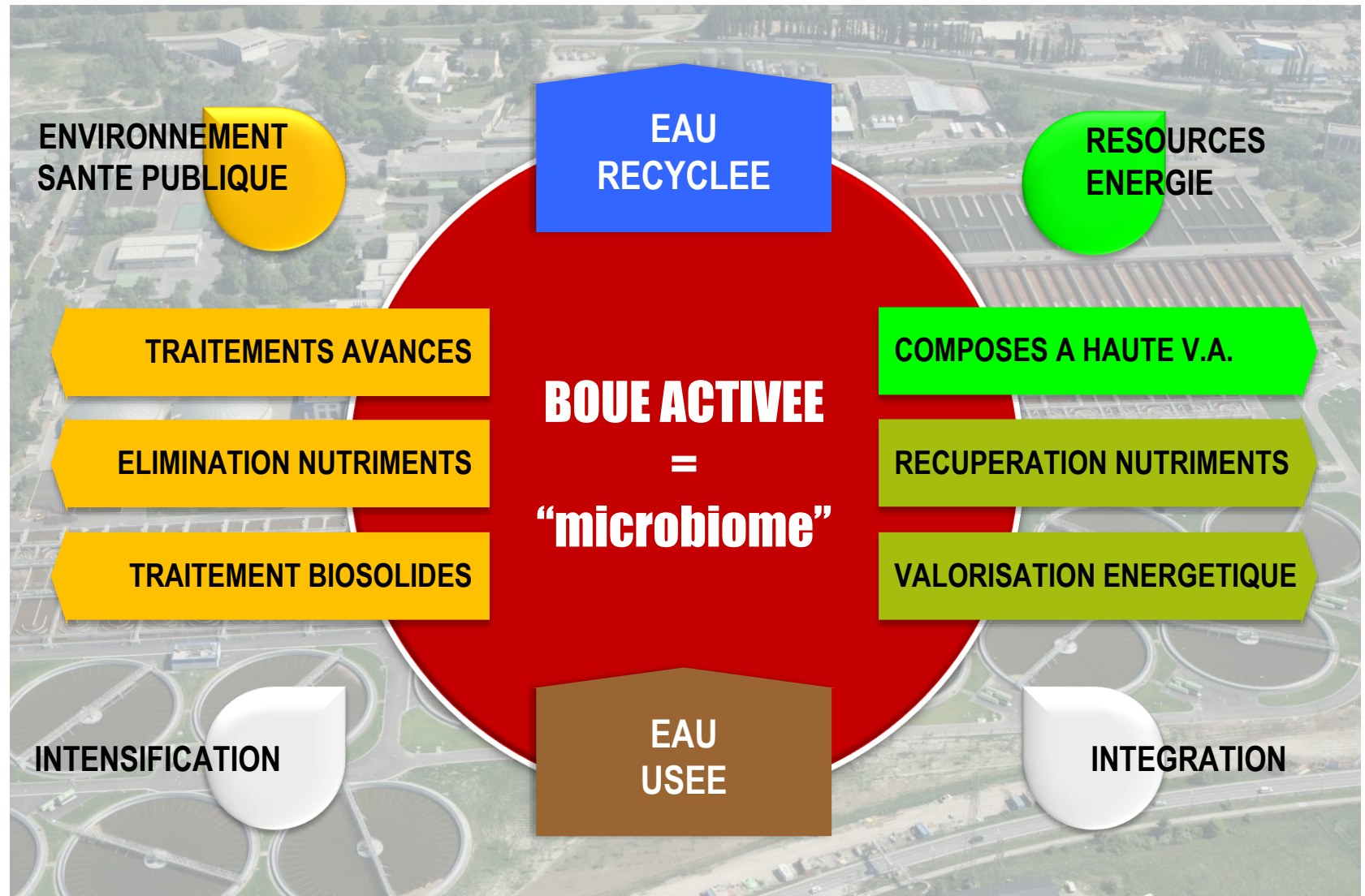
Béton: 150k m^3

Acier: 20k ton

Acier de pré-contrainte: 1.3k ton

Innovation responsable

Vers une économie circulaire bio-basée

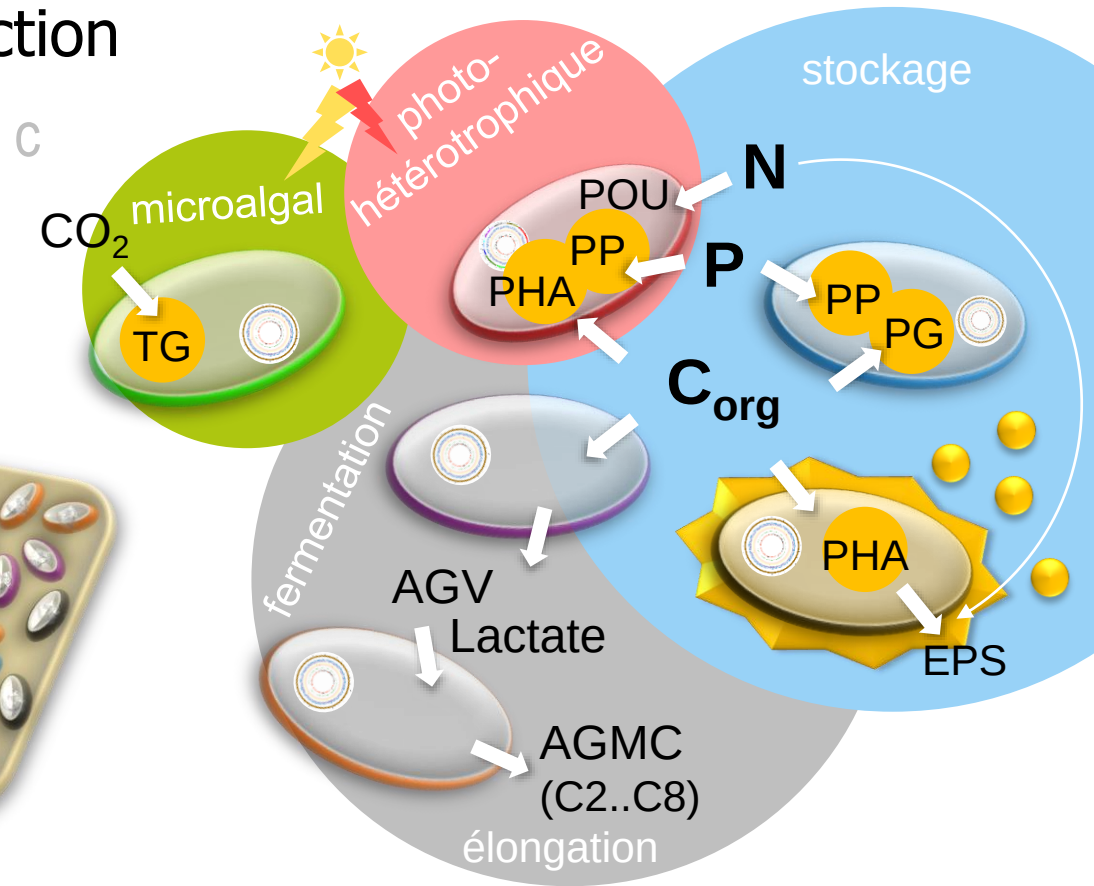
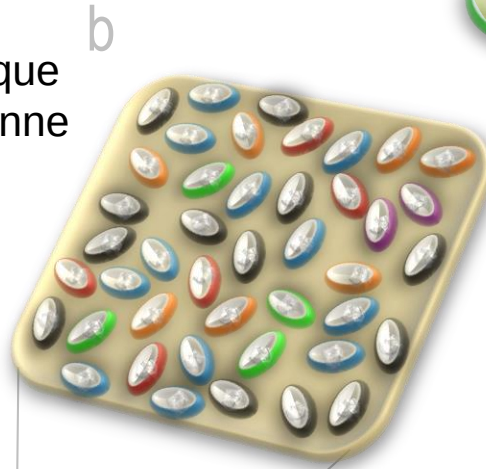
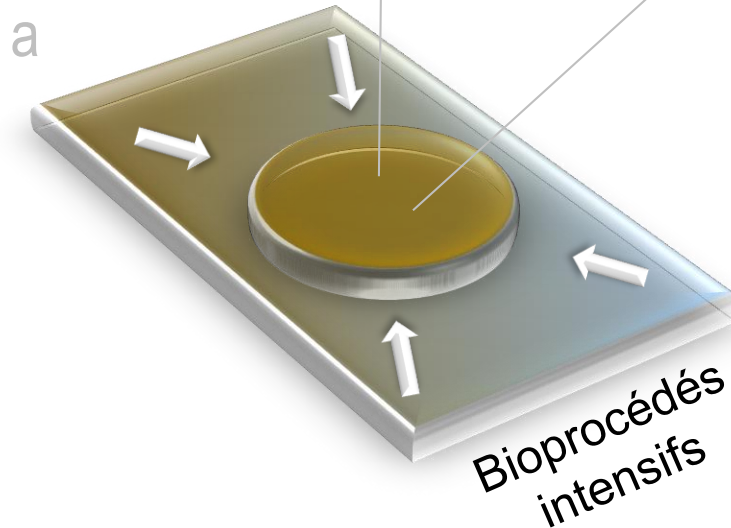


Intensification et Bioprospection

Biotechnologie en culture mixte

Microorganismes

- Diversité métabolique
- Sélection microbienne

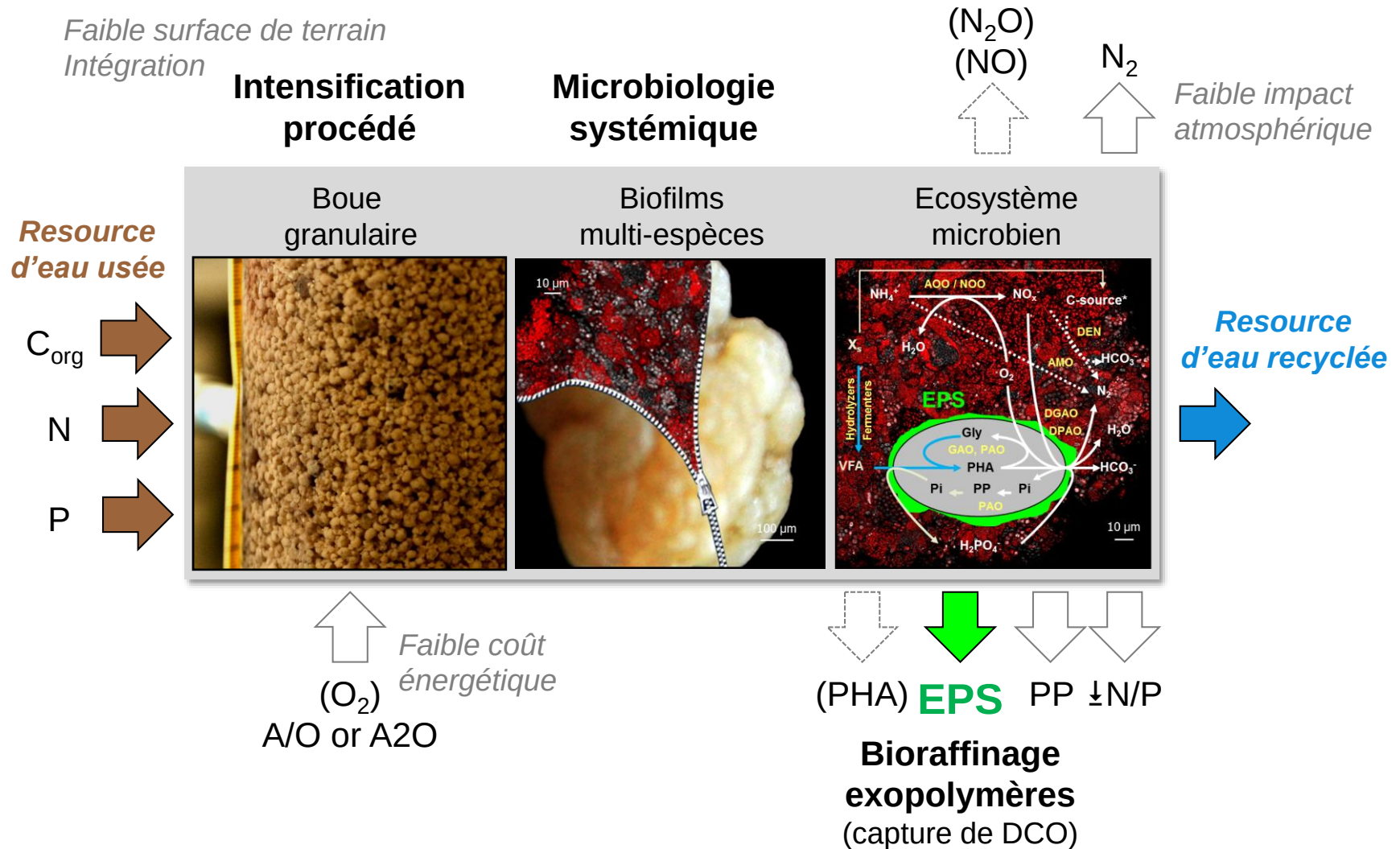


Biopolymères et composés de stockage
= Haute valeur ajoutée, Faible entropie

Polyphosphates (PP)
Polyesters, polyhydroxyalcanoates (PHA)
Polysaccharides, polyglucose (PG)
Exopolymères, exopolysaccharides (EPS)
Lipides, triglycérides (TG)
Carboxylates → Acides gras à moyenne chaîne (AGMC)

Intensification de bioprocédé et bioraffinage

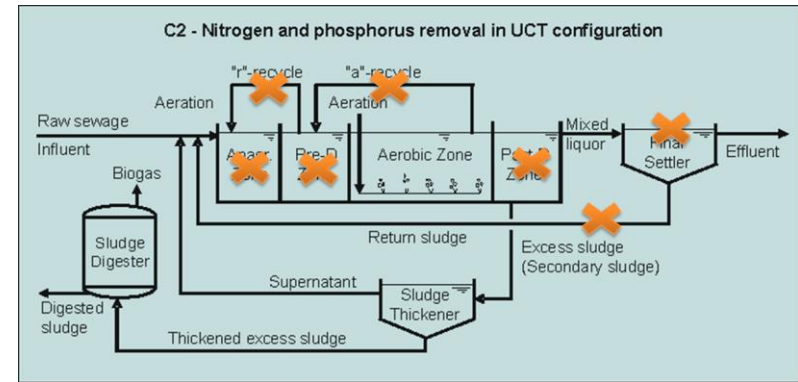
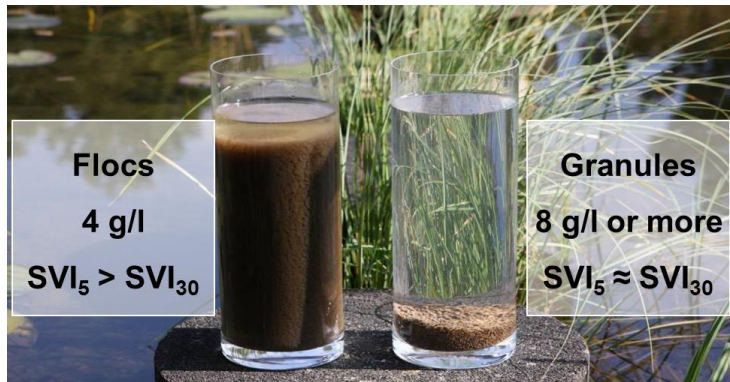
Concept en procédé à boues granulaires



Intensification pour le traitement des nutriments

Procédé à boues granulaires (biomasse à haute densité)

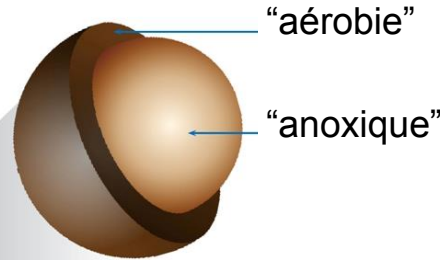
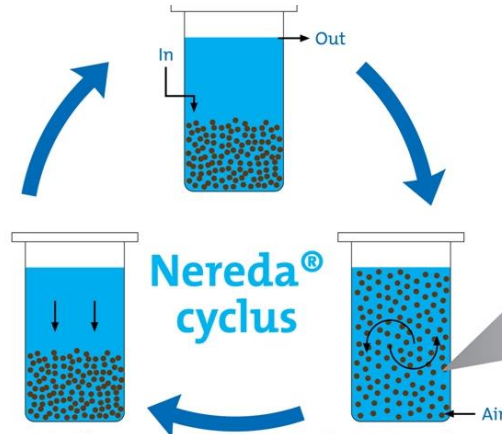
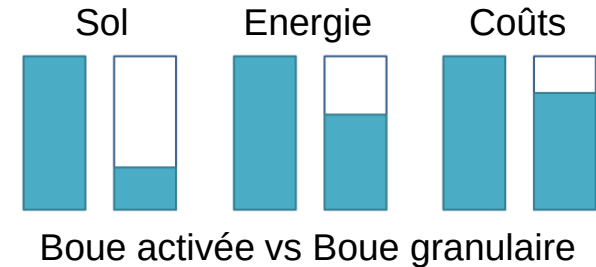
a



b

Alimentation/Evacuation
(conditions "anaérobies")

Modèle conceptuel
d'un biofilm granulaire



Nitrification-Dénitrification simultanée (ou alternée)
en phase de "réaction"

Sédimentation Réaction/Aération

BioP: alternance alimentation anaérobiose / aération

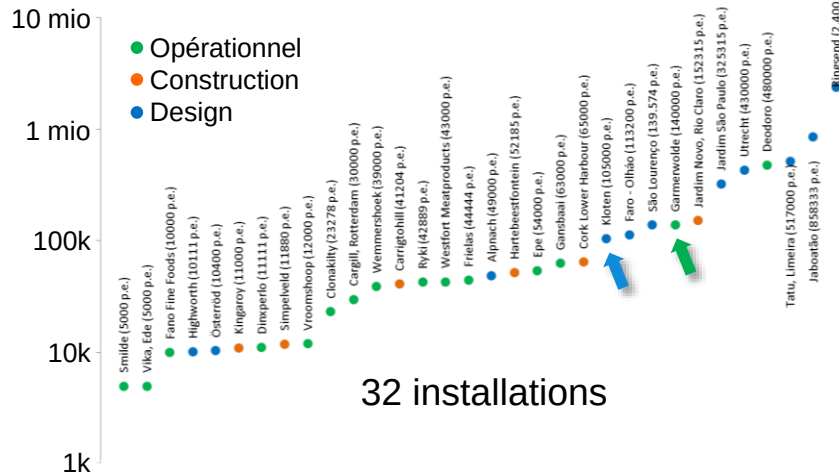
Alternatives: hydrocyclones,
tamis (sélection mécanique)

Procédé intensif à boues granulaires

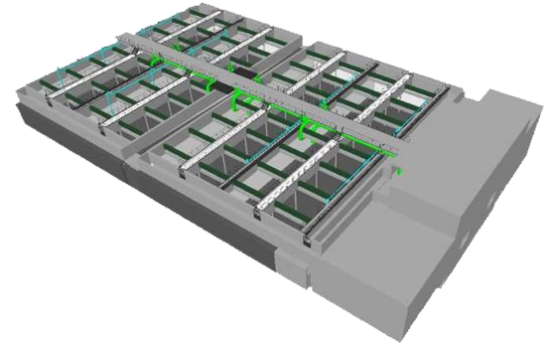
Vers un nouveau standard?

a

Capacité (EH_{BOD})



b



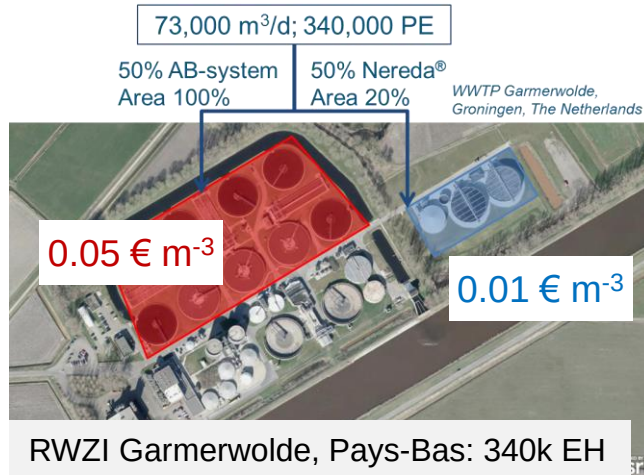
Retrofit ARA Kloten-Opfikon

même emprise au sol / double capacité

125k EH, 26k m³ d⁻¹ (dts), Q_{max} 790 L s⁻¹
15 mg_{BOD5}, 2 mg_{N-NH4}, 15 mg_{Ntot}, 1 mg_{Ptot}, 15 mg_{TSS} L⁻¹

Comparaison ARA Sarneraatal

Volume Nereda® = 50-60% SBR traditionnel



Intensification du traitement biologique des eaux usées : technologie à boues granulaires et gestion des ressources bactériennes

David Weissbrodt et Christof Holliger
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté de l'Environnement Naturel,
Architectural et Construit, Institut d'Ingénierie de l'Environnement,
Laboratoire de Biotechnologie Environnementale.

Un développement majeur de la réflexion liée à la problématique du traitement des eaux usées, dans une perspective de protection des eaux et de durabilité, est nécessaire. L'élimination biologique des nutriments carbonés, azotés, et phosphorés est très généralement associée à un investissement en terrain et à des coûts importants. La technologie des boues granulaires aérobies utilise des biofilms particuliers, auto-agrégés sans support, mobiles, et rapidement décantables, appelés « granules », et permet un traitement intensif des nutriments par voie biologique et une clarification de l'eau traitée en réacteurs discontinus séquentiels. Selon des gains référencés de 75% sur l'investissement en terrain, de 20% en coûts de construction, et de 20% en coûts opératoires, la mise en application de cette technologie pourrait résulter en un gain théorique de CHF 0.45 par m³ d'eau usée, soit jusqu'à CHF 6 mio par an pour une station d'épuration de 200 000 équivalents-habitants. En parallèle à l'implantation de cette technologie à l'échelle réelle, l'intérêt fondamental de la présente recherche a porté sur les mécanismes de sélection et d'association bactérienne au sein des systèmes à biofilms granulaires. Une méthodologie de gestion des ressources bactériennes est proposée pour une efficacité optimale de procédé.

Réorganisation du secteur des eaux usées : impact sur les stations d'épuration

Dans les pays industrialisés, un développement majeur de la réflexion liée à la problématique du traitement des eaux usées est requis dans une perspective intégrée de protection environnementale et de durabilité (Zehnder et al. 2003). En Suisse, l'infrastructure d'assainissement doit faire face à des impératifs de renouvellement, d'extension, et de réorgani-

sation pour une efficacité accrue du secteur des eaux usées (Maurer and Jordi 2013). Les coûts annuels de l'assainissement des eaux usées atteignent plus de 2.2 milliards de CHF, dont 48% liés aux stations d'épuration. De nombreuses municipalités sont notamment confrontées à la nécessité de regrouper leurs eaux usées pour un traitement centralisé. Dans le cadre du projet de révision de l'Ordonnance fédérale sur la protection des eaux, l'attention porte sur l'élimination des substances xénobiotiques micropolluantes (OFEV 2009). L'élimination des nutriments carbonés, azotés,

et phosphorés qui mènent à l'eutrophisation des milieux récepteurs reste essentielle, mais associée à des coûts importants.

Les stations d'épuration dimensionnées pour le traitement intégral des nutriments par voie biologique telles que la station d'épuration de Thunersee (Uetendorf, Suisse, 3 ha, 200 000 équivalents-habitants – EH) comprennent un volume de bassin à boues activées jusqu'à 15 fois plus important que pour le traitement unique de la matière organique. L'extension de la station d'épuration de Vienne en Autriche (4 millions EH, 22 ha) réalisée en 2005 pour le traitement de l'azote par nitrification et dénitrification par boues activées a coûté 220 millions d'euros. Un traitement optimal des nutriments est également requis en amont des procédés physicochimiques de traitement des micropolluants (Aebegglen and Siegrist 2012). Une étape de nitrification totale de l'ammonium en nitrate s'avère essentielle afin d'augmenter le rendement de biodégradation de certains composés, et d'optimiser la consommation d'ozone requise pour l'oxydation avan-

cée des micropolluants (Margot et al. 2011). Les stations d'épuration devront ainsi optimiser leur emprise au sol lors de leur extension. L'intensification des procédés de traitement des eaux usées est un impératif.

Intensification du traitement biologique des eaux usées : l'utilité des biofilms granulaires

De nouveaux procédés intensifs de traitement des eaux usées sont actuellement développés pour augmenter les capacités de conversion des nutriments et de séparation de biomasse, tout en optimisant l'investissement initial, l'efficacité énergétique, et les coûts opératoires. Les bioréacteurs membranaires, bioréacteurs à biofilms à lit mobile, biofiltres, et réacteurs à charge séquentielle (sequencing batch reactors, SBR) à boues granulaires aérobies sont des exemples notoires. Cet article focalise sur cette dernière technologie qui a récemment suscité l'attention du monde de l'innovation technologique (Radauer et al. 2012).

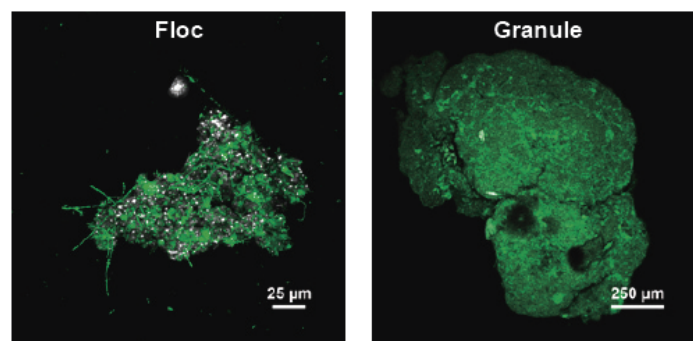
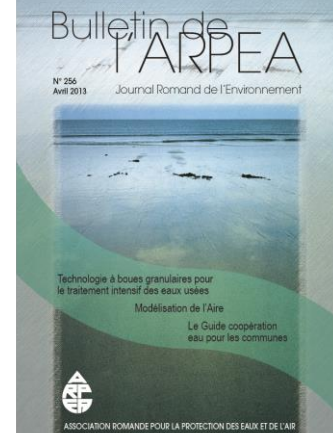


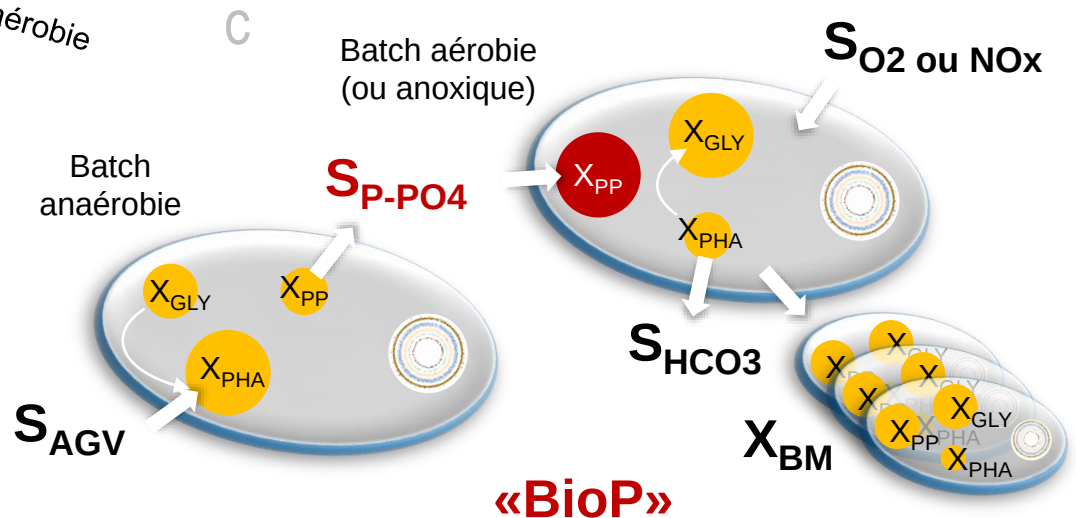
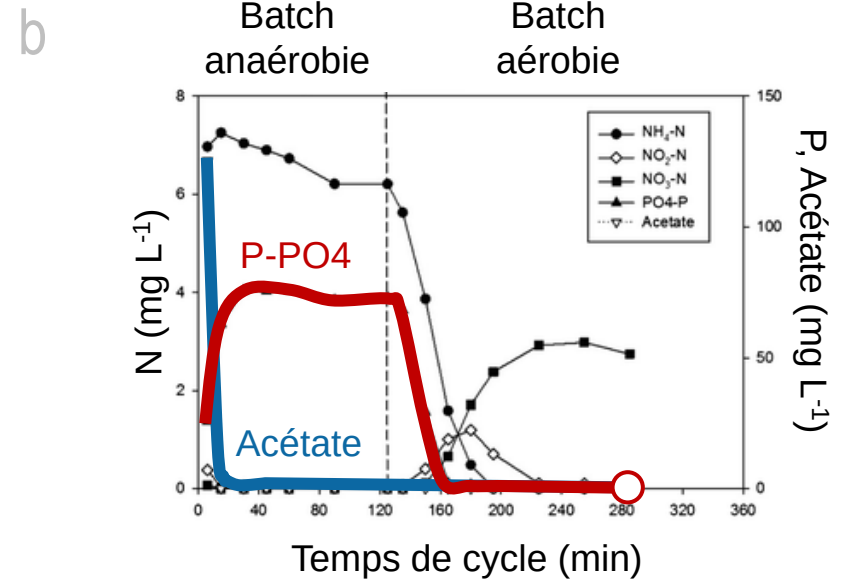
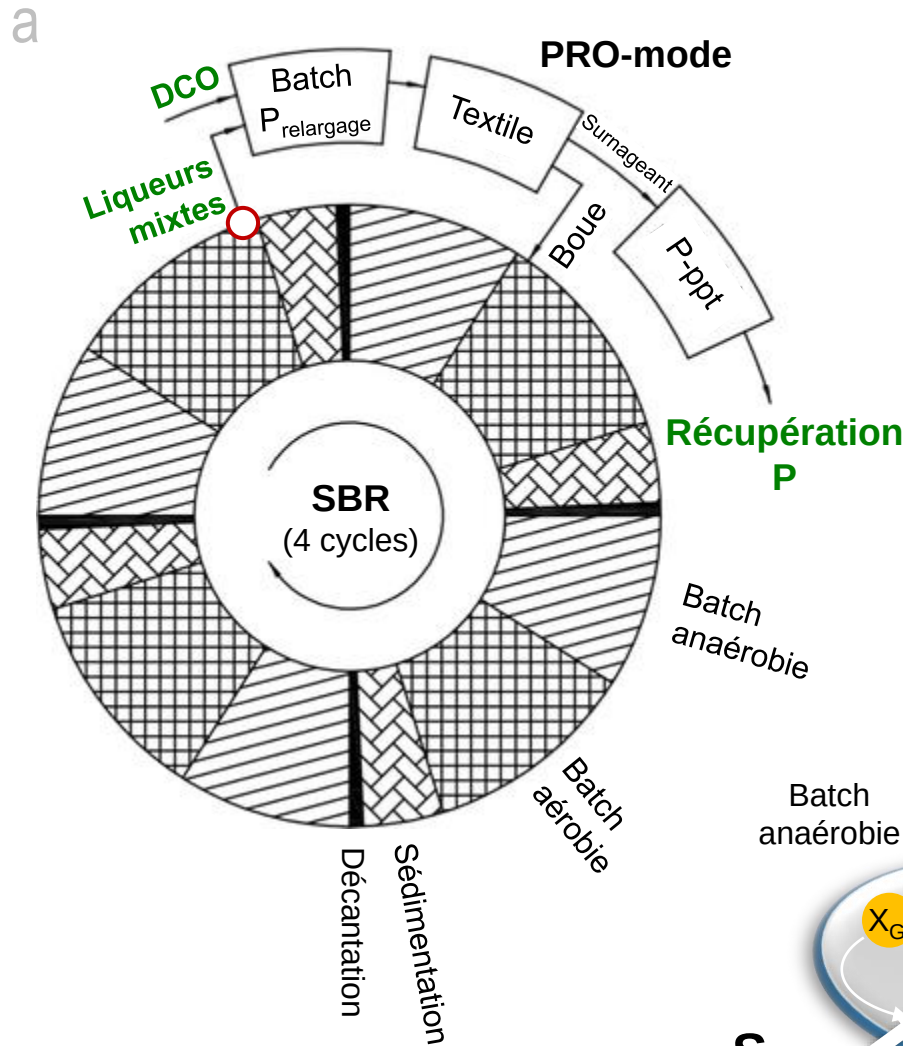
Figure 1. Comparaison de l'agrégation de biomasse sous forme de flocs amorphes présents dans les boues activées conventionnelles (A) et de biofilms granulaires compacts exhibant un facteur de taille 10x supérieur (B) mesurée par microscopie confocale à balayage laser (CLSM) (Weissbrodt 2012). Couleurs : biomasse (vert), structure globale (gris, signal de réflexion).

PROTECTION DES EAUX



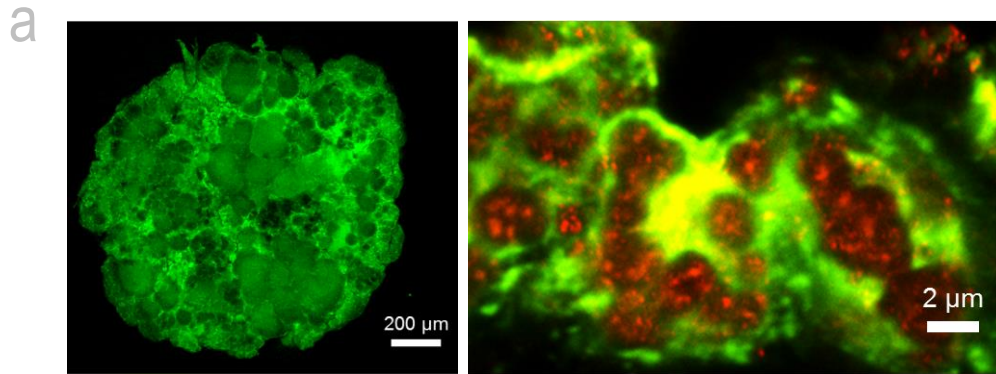
Granules et récupération du phosphore

BioP "for free"



Bioraffinage à haute valeur ajoutée

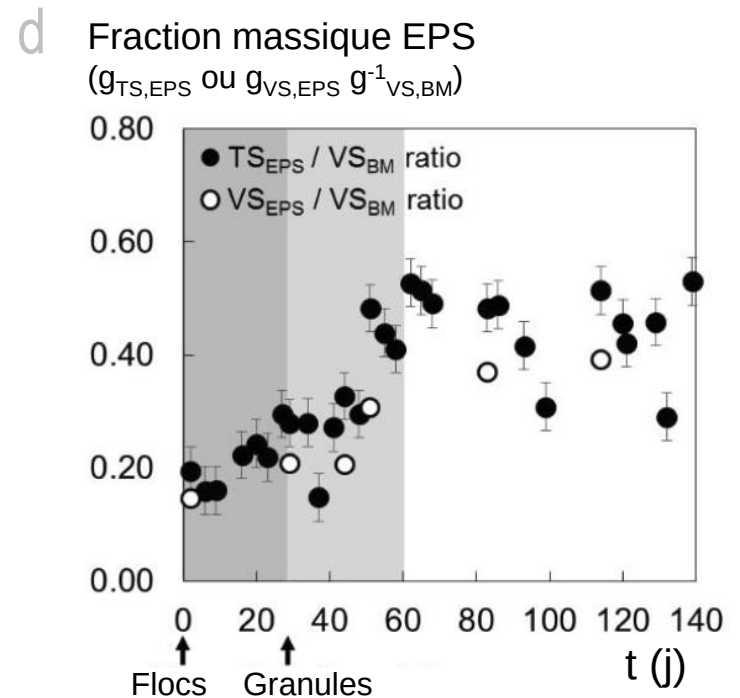
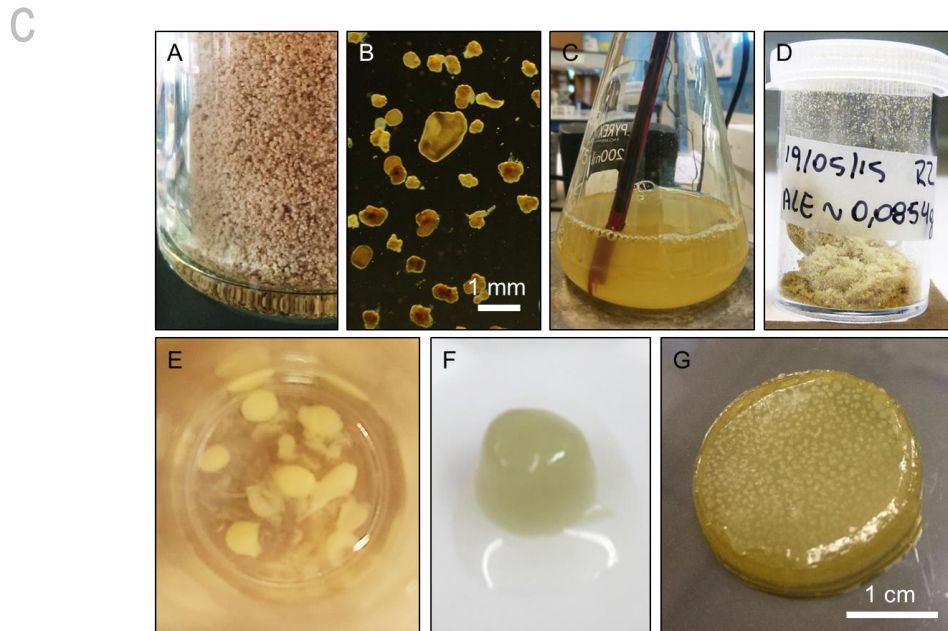
Exopolymères à caractéristique d'alginate



^a Weissbrodt *et al.* 2013



^b van der Roest *et al.* 2015, Lin *et al.* 2008



^{c,d} Weissbrodt & Guimarães, *et al.*, Keynote IWA LET 2016

Valorisation d'exopolymères

"Resource factory": filière et coûts

a



Développement d'une filière et d'un marché ALE (industries béton, coatings, papier)



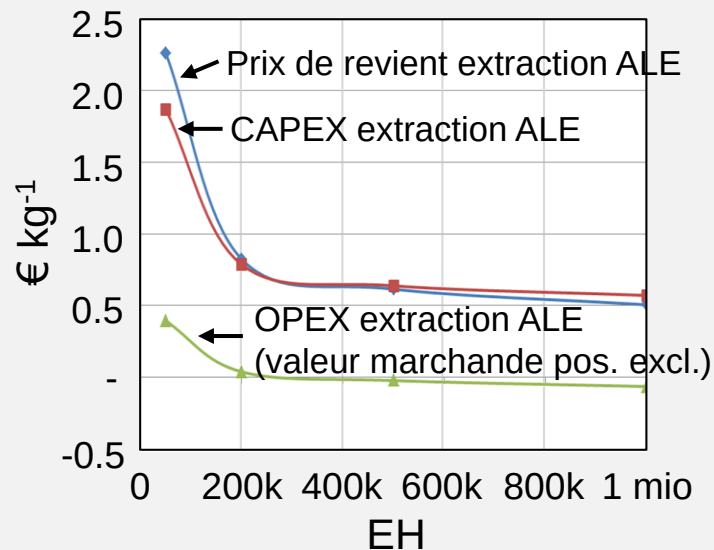
2017: 3 unités de production d'ALE ("alginate-like exopolymers")

(NEO – Nereda[®] extracted organic alginate: Zutphen, Apeldoorn, Amsterdam, Pays-Bas)

b

Modèle de gains positifs via commercialisation

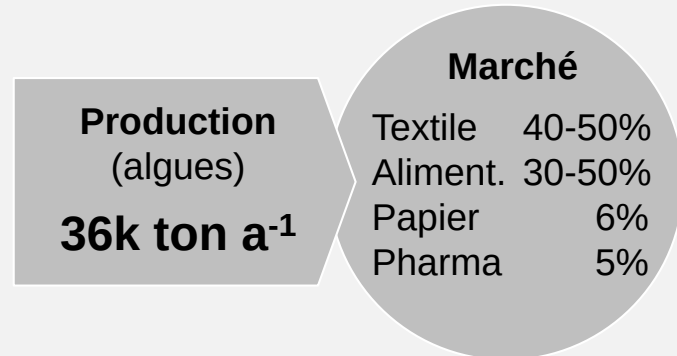
Prix du marché: 1.0-3.5 € kg⁻¹



c

Marché mondial d'alginate commercial

3'000 € ton⁻¹ (5-10× éthanol, acétate)



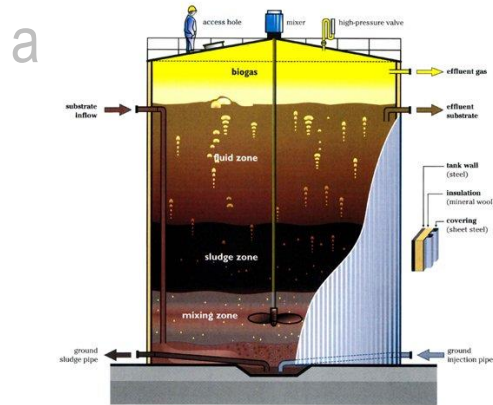
RWZI Utrecht (480k EH)
potentiel 2k ton a⁻¹ plant⁻¹

^{a,b} Adapté et traduit de (amabilité): Royal HaskoningDHV, Pays-Bas

^c Base: van Loosdrecht & Brdjanovic 2015

Plateforme Carboxylates: digestion anaérobie sans biogaz

Contrôle du spectre de produits à l'aide du microbiome

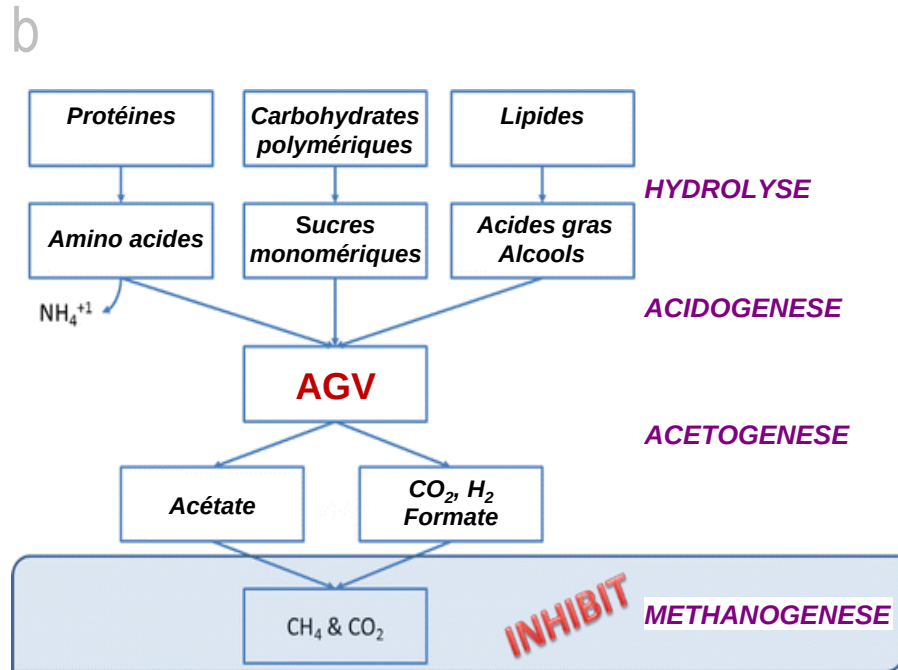


c

Fermentation à culture mixte
Production intensive d'AGV

Charge > $100 \text{ kg}_{\text{DCO}} \text{ j}^{-1} \text{ m}_{\text{R}}^{-3}$

Produit: > $10 \text{ g}_{\text{AGV}} \text{ L}^{-1}$



Fermentation(s) primaire(s)

↓
AGV

↓
AGV, EtOH, Lactate

↓

↓

Fermentation(s) secondaire(s)

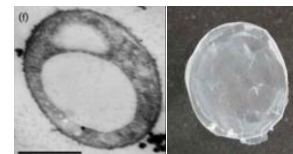
Poly-esterification

Elongation de chaîne



↓
PHA

↓
n-Caproate (C6)
n-Caprylate (C8)



Bioplastiques

Biocarburants

2'100
\$ ton⁻¹

^a Repris de: Darling 2013

^{b,c} Adapté de: Kleerebezem *et al.* 2015, Rozendal 2014 & Paques BV, The Netherlands, Jiang *et al.* 2011, Shalin *et al.* 2013, Angenent *et al.* 2016

Combinaison biologique / physicochimique novatrice

Thermoplastique “carbone-négatif” à haute performance à partir de méthane

a



⇒ Méthane ⇒

Digesteur anaérobie
(BIOPAQ®UASB)

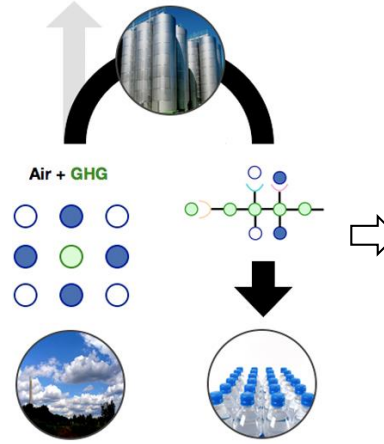
b

Air ⇒



AirCarbon®

- Catalyseur (concentrer C)
- PHA polymérase (polymériser C)

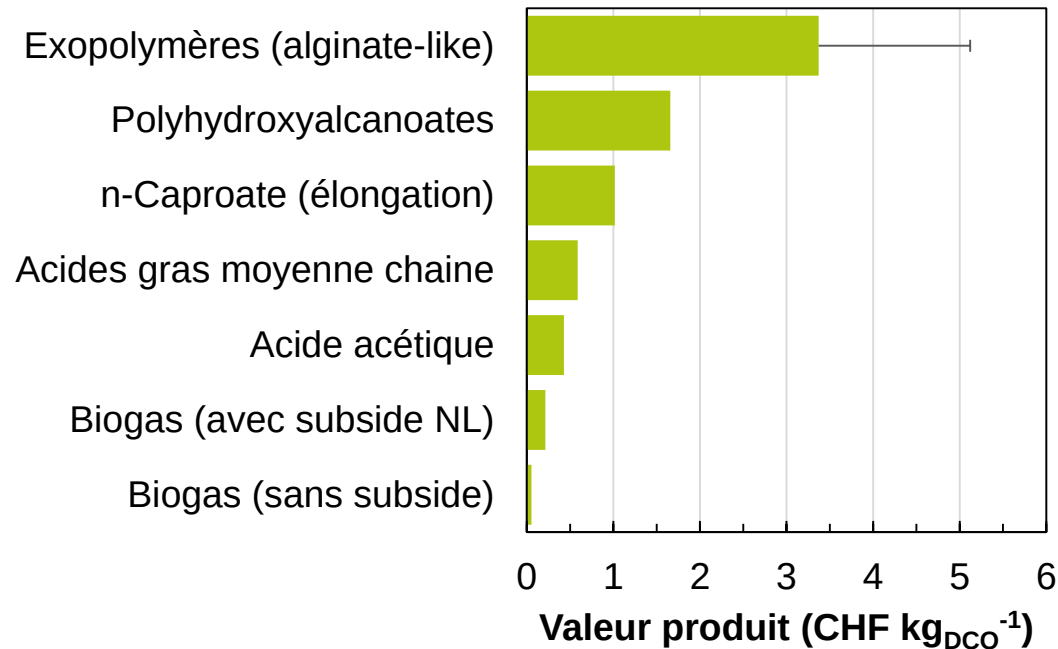


^a Repris et adapté de: Rozendal 2014 & Paques BV, The Netherlands

^b Repris et adapté de: Newlight Technologies LLC, USA

Vers l'identification d'un marché spécifique

Y a-t-il un marché pour le produit recouvré?



Conclusions – Horizon 2050

“Moi, je travaille pour les StaRRE.”

- Filière Eau | Energie | Ressources à vitesse de croisière
- Technologies de concentration des ressources
- Approche de biotechnologie et chimie industrielle
- Manufacture de produits (semi-)finis à haute valeur ajoutée
- Site industriel intégré (plant integration, lean manufacturing, saisonalités)
- Design hors-sol, modélisation de site industriel
- Apprentissage de technologie en production environnementale

Séminaire ARPEA – VSA – GRESE

La STEP 2050: de la station d'épuration à la station de valorisation ?

HEIA-FR, Fribourg, 19 janvier, 2017



Remerciement



FONDS NATIONAL SUISSE
SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
FONDO NAZIONALE SVIZZERO
SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION



Sjoerd Kerstens (RHDHV)

Claudio Lehmann (Wabag)

Stations de récupération des ressources de l'eau

Intensification et bioprospection pilote à haute valeur ajoutée

Prof. David Weissbrodt

Professeur assistant | TU Delft, Pays-Bas

Chercheur invité | Aalborg University, Danemark

IWA | Ecologie microbienne et technologie de l'eau

ARPEA | Bureau, Comité, Forums, Gestion Eaux, Rédaction, Prix

Ph.D. EPF | M.Sc. EPF | Dipl.-Ing. HES-SO VS – citoyen de Sion

✉ d.g.weissbrodt@tudelft.nl



**Lorena
Guimarães**



**Nina
Gubser**



**Jules
Rombouts**



**Rebeca
Pallares
Vega**



IDEA League

