

# Traitement et Valorisation des Eaux et des Déchets (ENV.304)

**Cours** Traitement biologique  
Les boues activées et le traitement du C

Nicolas DERLON |  
14.12.2023

Visualiser les points importants  
d'un bassin à boue activée

Comprendre les phénomènes  
impliqués lors de la nitrification

Savoir dimensionner un  
bassin à boue activée pour  
éliminer la pollution carbonée

Savoir dimensionner un  
bassin à boue activée pour  
éliminer la pollution azotée

Comprendre l'effet d'une  
bouée active sur l'épuration  
des ERU

Savoir calculer la qualité  
d'eau en sortie du  
traitement biologique



**OBJECTIFS  
DU COURS**

# EPFL Un siècle de traitement des ERU

TRAITEMENT  
MÉCANIQUE

Année	Polluant ciblé	Impact sur l'environnement
1920	MES	Consommateur d'oxygène, sédimentation
1950	DBO <sub>5</sub>	Consommateur d'oxygène
1965	Phosphore	Eutrophisation
1975	Ammonium	Toxicité pour poissons
1980	Métaux lourds	Accumulation dans les sols
1990	Nitrates	Eutrophisation dans la mer du Nord
2004	Prions	Présence dans les boues de STEP
2010	Micropolluants	Traitement tertiaire

# EPFL Feuille de route « Traitements des ERUs »

Catégorie	Paramètres	Unité	ERU	Valeurs relevées après			
				DP (2h)	BA (C)	BA (N)	TT
Solides	MES	mg/L	250	109			15
Pollution organique	DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	230	151			15
	DCO	mgO <sub>2</sub> /L	500	327			45
Pollution azotée	NTK	mgC/L	30	27			3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	20	20			2
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0	0			0,3
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0	0			-
Pollution phosphorée	Ptot	mg/L	6	5,4			0,8
Micropolluants	Micropolluant	%	-	< 10			80

# EPFL Un siècle de traitement des ERU

TRAITEMENT  
BIOLOGIQUE

Année	Polluant ciblé	Impact sur l'environnement	
1920	MES	Consommateur d'oxygène, sédimentation	
1950	DBO <sub>5</sub>	Consommateur d'oxygène	ÉLIMINATION DBO
1965	Phosphore	Eutrophisation	
1975	Ammonium	Toxicité pour poissons	NITRIFICATION
1980	Métaux lourds	Accumulation dans les sols	
1990	Nitrates	Eutrophisation dans la mer du Nord	DÉNITRIFICATION
2004	Prions	Présence dans les boues de STEP	
2010	Micropolluants	Traitement tertiaire	

# EPFL Approches de dimensionnement

**APPROCHE 1** | BASÉE SUR LE TEMPS DE SÉJOUR HYDRAULIQUE ( $t_{SH}$ ) empirique

$$V_{BA} = Q \times t_{SH} \quad \text{ne prend ni la charge de polluants, ni la quantité de biomasse}$$

**APPROCHE 2** | BASÉE SUR LA CHARGE VOLUMIQUE EN  $DBO_5$  ( $C_{v, DBO5}$ ) empirique

$$V_{BA} = Q \times [DBO_5] / C_{v, DBO5} \quad \text{ne prend pas en compte la quantité de biomasse}$$

**APPROCHE 3** | BASÉE SUR LA CHARGE MASSIQUE ( $C_m$ ) empirique

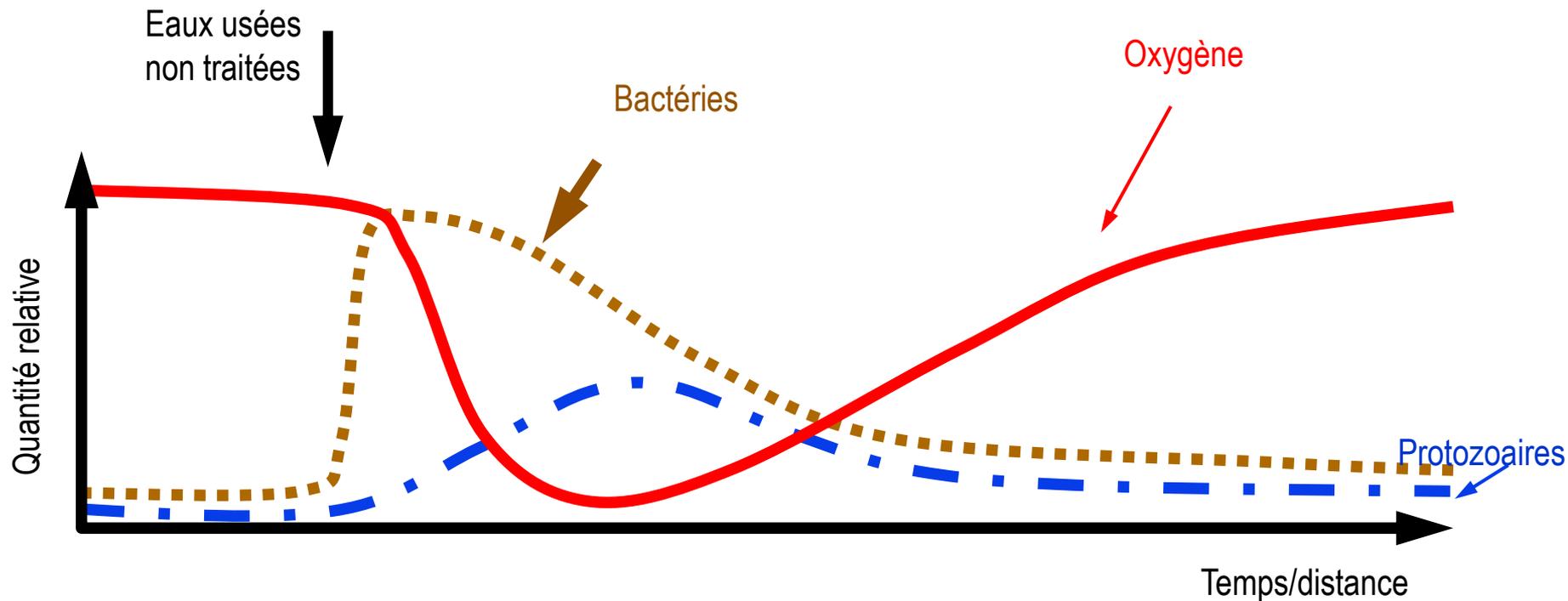
$$V_{BA} = Q \times [DBO_5] / ([MES]_{BA} \times C_m) \quad \text{ne prend pas en compte la partie inerte de la biomasse}$$

**APPROCHE 4** | BASÉE SUR L'ÂGE DE BOUES ( $\theta_x$ ) théorique

$$V_{BA} = \theta_{x,T} \times P_{x,T} / X_T \quad \text{prend en compte les cinétiques microbiennes les + lentes (nitrification)}$$

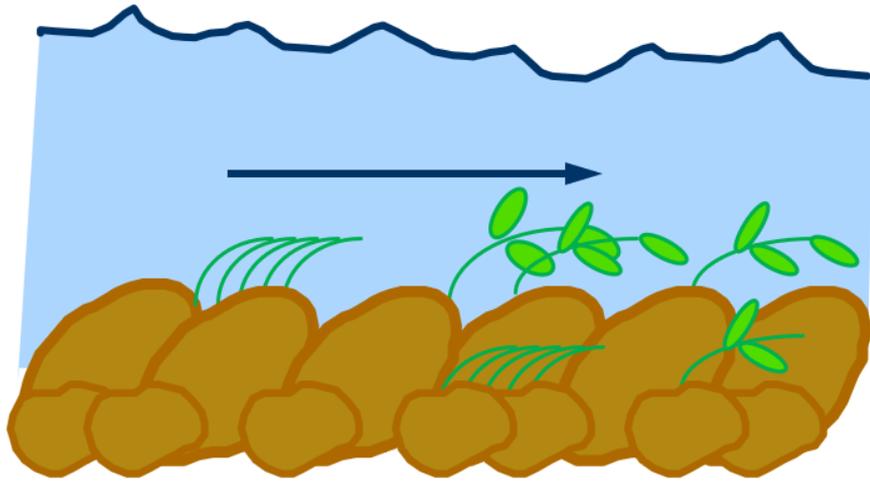
**APPROCHE 5** | MODÉLISATION ET OPTIMISATION DYNAMIQUE théorique

Méthode utilisée par les bureaux d'ingénieurs permettant d'optimiser le dimensionnement du bassin à BA. Analyse de scénario.

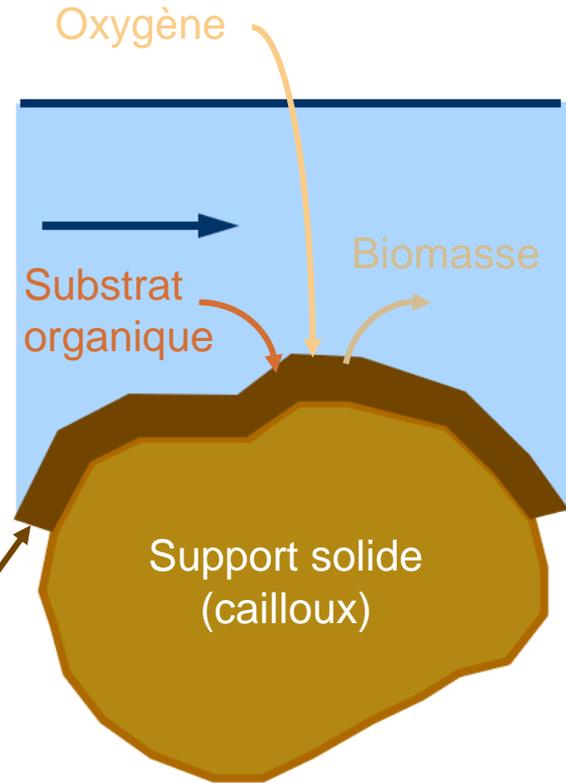


Traitement des eaux usées = intensification de ces processus microbiens observés dans la nature – temps/distance raccourcis

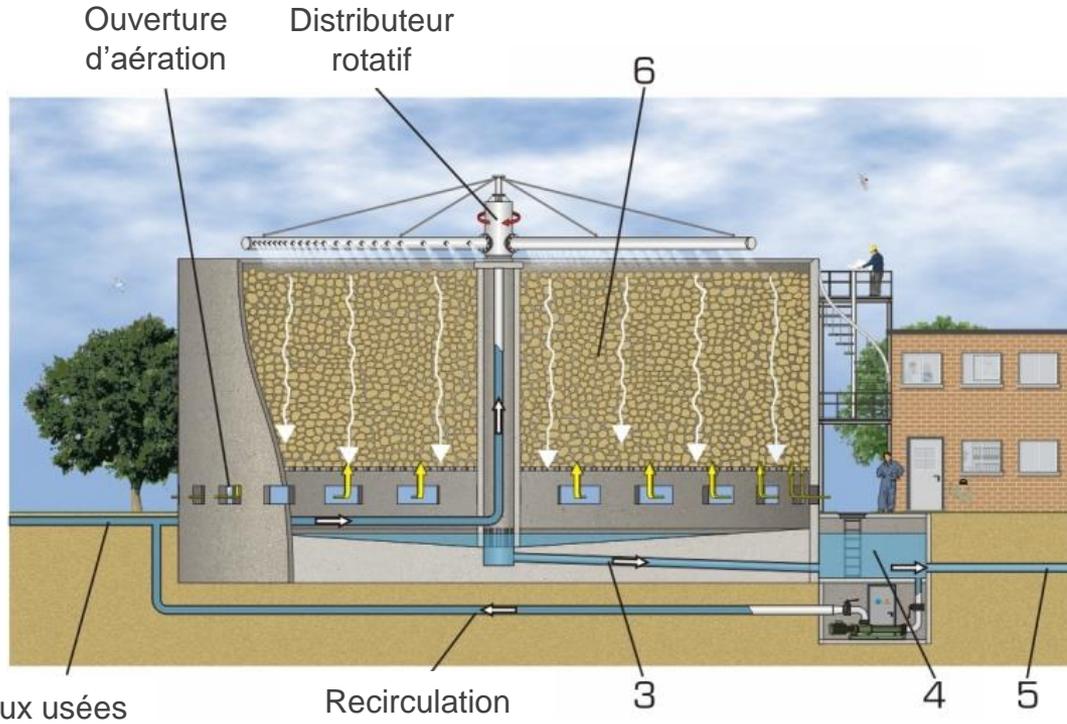
# EPFL Le traitement biologique Dans les cours d'eau



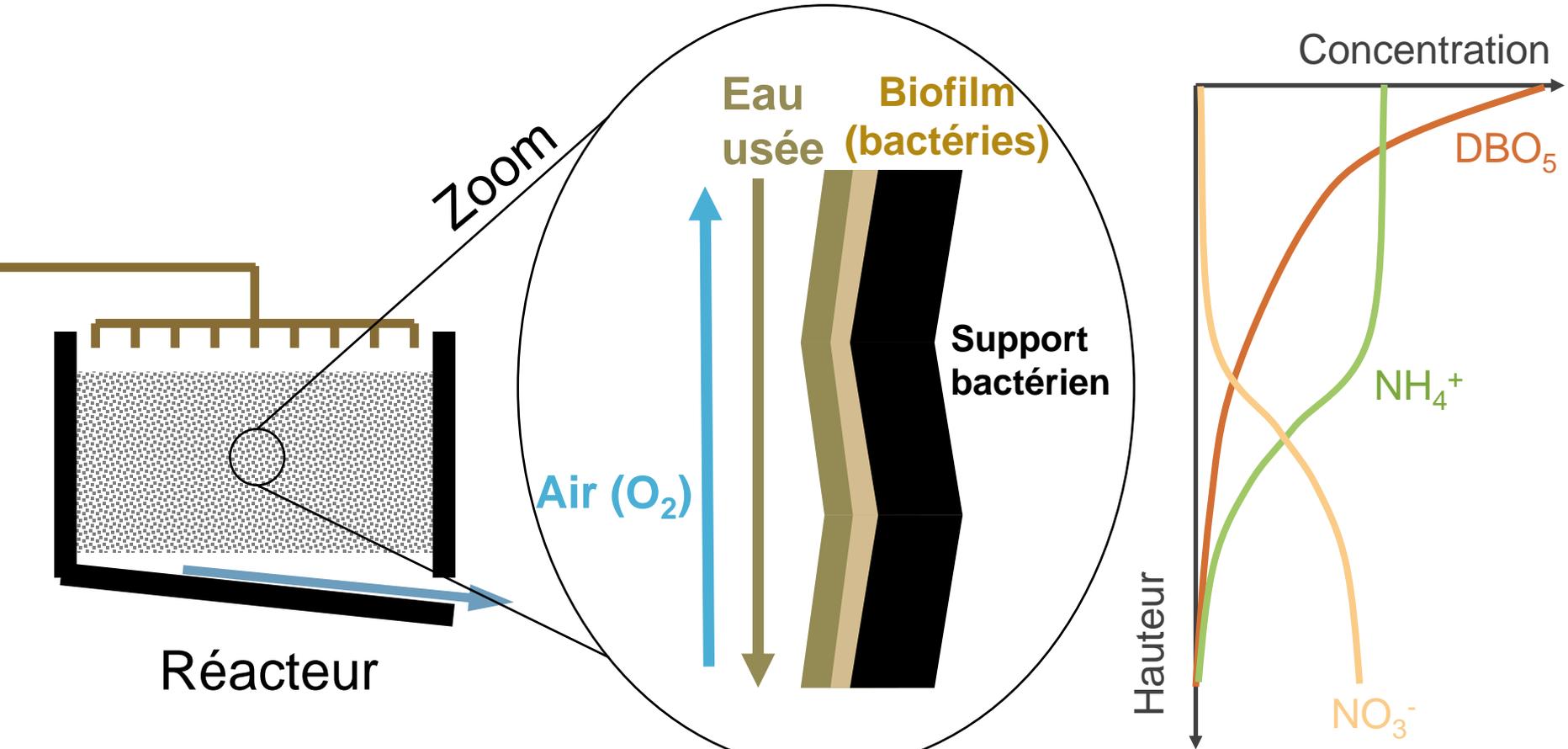
Biofilm ou bactéries  
attachées à une  
surface solide



# EPFL Le traitement biologique Procédé à cultures fixées



# Dans lit bactérien (filtre à ruissèlement)



Modifié de E. Morgenroth

# Lit bactérien réacteur, système de distribution



Source: Wikipedia

Source: IndiaMart

# Lit bactérien garnissage, distribution

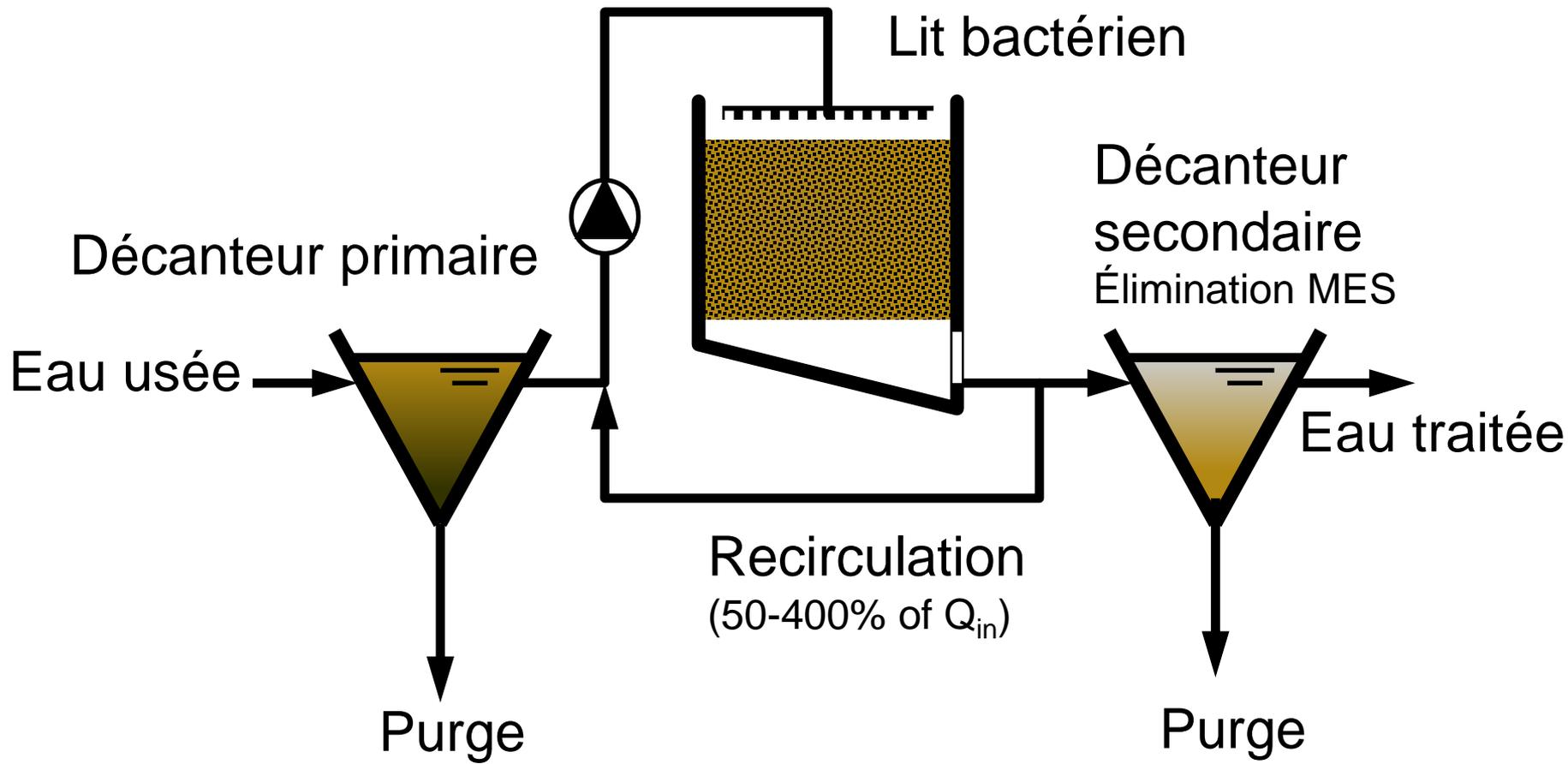


Source: brentwoodindustry



Source: hamon

# Schéma de STEP avec lit bactérien



# EPFL EXERCICE 1. Épuration en systèmes naturels vs. systèmes d'ingénierie

## Lit bactérien

- **Épaisseur du film d'eau** usée (L): 0,1 mm. Distance que les polluants doivent parcourir pour être en contact avec la biomasse épuratrice
- **Hauteur de garnissage** (distance parcourue par l'eau pour être épurée):  $H = 3$  m

Ratio  $H/L = 3/100 \cdot 10^{-6} = 30\ 000$  transposé à:

## Ruisseau

- Profondeur: 20 cm
- Distance requise pour épurer l'eau?

## Fleuve

- Profondeur: 3,3 m (Rhin)
- Distance requise pour épurer l'eau'

# EPFL EXERCICE 1. Épuration en systèmes naturels vs. systèmes d'ingénierie

## Lit bactérien

- **Épaisseur du film d'eau** usée (L): 0,1 mm. Distance que les polluants doivent parcourir pour être en contact avec la biomasse épuratrice
- **Hauteur de garnissage** (distance parcourue par l'eau pour être épurée):  $H = 3 \text{ m}$

Ratio  $H/L = 3/100 \cdot 10^{-6} = 30\,000$  transposé à:

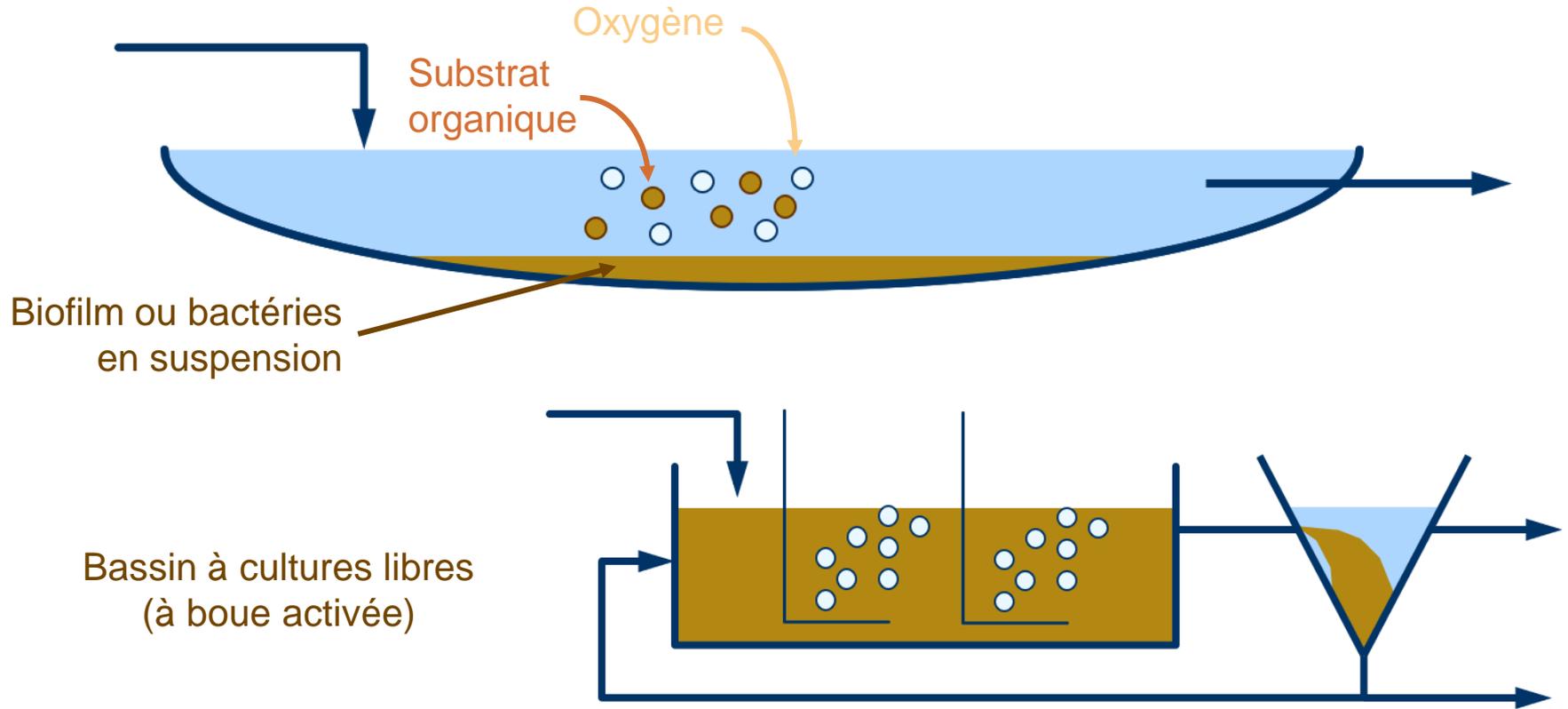
## Ruisseau

- Profondeur: 20 cm
- Distance requise pour épurer l'eau? **6 km**

## Fleuve

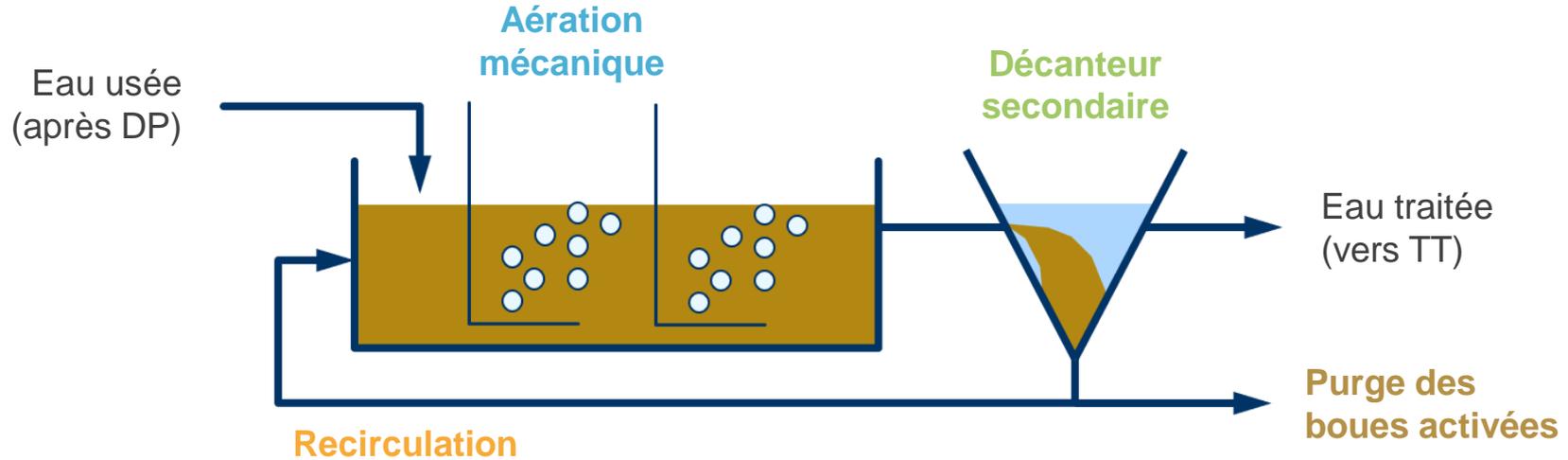
- Profondeur: 3,3 m (Rhin)
- Distance requise pour épurer l'eau? **100 km!**

# EPFL Le traitement biologique Dans les cours d'eau



# Le traitement biologique Procédés à cultures libres

Bassin à boues activées (procédé le plus utilisé en traitement biologique)



**Aération mécanique** | croissance des bactéries pour élimination de la pollution carbonée

**Décanteur secondaire** | récupération de la biomasse et clarification de l'eau

**Recirculation** | maintien d'une concentration importante en biomasse (âge de boues)

**Purge des BA** | renouvellement de la biomasse pour éviter l'accumulation des bactéries (décès)

# EPFL Le traitement biologique Bassin à boues activées

**Définition** | Bassin avec une concentration en bactéries très élevée, formant une **boue**, maintenue par un apport en oxygène élevé afin de garder les bactéries **actives** à un taux de croissance maximal

**Concentration** | 2 à 4 gMES/L dont une grande fraction de MVS (difficile de conserver une concentration supérieure à 4 gMES/L à cause de problème de décantation ultérieure)

# EPFL Le traitement biologique Bassin à boues activées



**STATION EPURATION | 3'000 EH**  
Seine et Marne



**STATION EPURATION | > 500'000 EH**  
STEP de Werdhölzli

# Traitement biologique bassin à boues activées

*STEP de Vienne*  
*18 m<sup>3</sup>/s*  
*3,5 Millions EH*



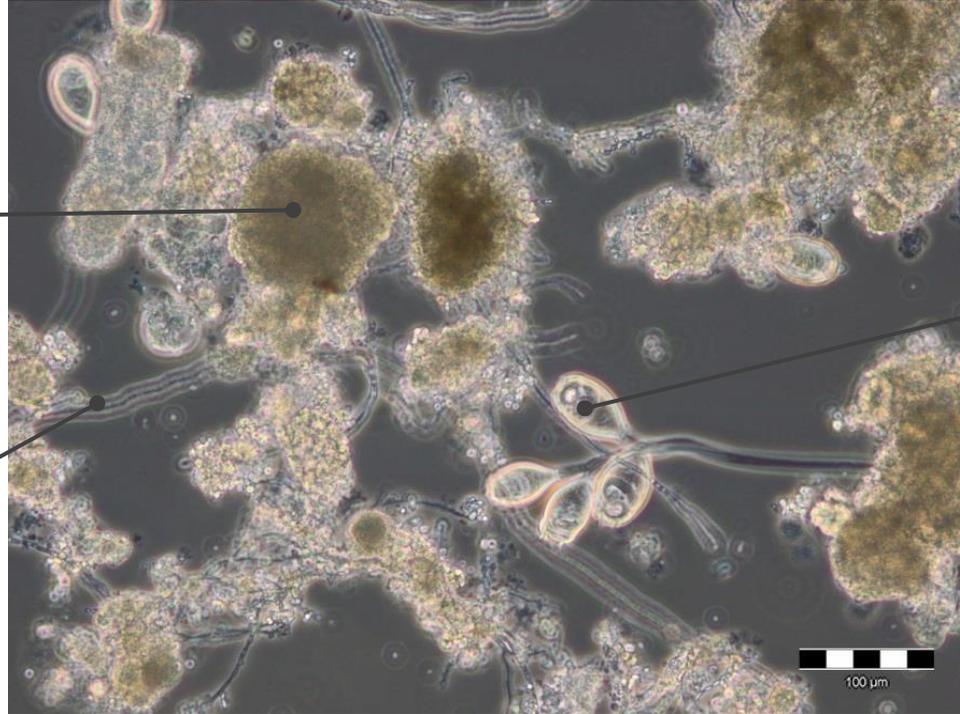
# Bassin de boues activées



# EPFL Composition d'une boue activée

**Floc bactérien  
(bactéries =  
procaryotes)**  
(faible taille | ~ 100 µm)

**Fibre cellulose  
(papier toilettes)**

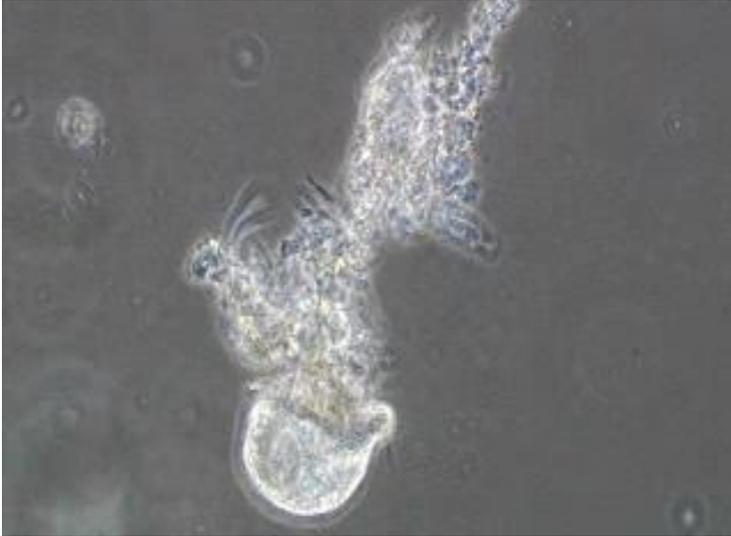


**Protozoaires et  
métazoaires  
(eucaryotes)**

# EPFL Composition d'une boue activée

## PROTOZOAIRES SUR UN FLOC

Boue activée = ensemble de microorganismes



## PROTOZOAIRES CAPABLE DE SE DÉPLACER

Microorganismes pouvant aller chercher de la nourriture



# EPFL Processus d'élimination biologique de la DBO<sub>5</sub>

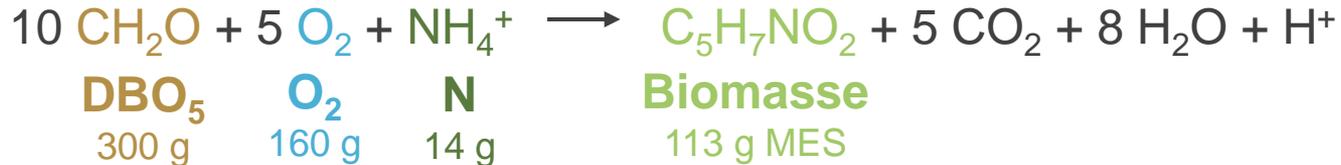
**CATABOLISME** | dégradation de molécules et production d'énergie



**ANABOLISME** | croissance de la biomasse et assimilation de nutriments



**CATABOLISME + ANABOLISME** | réaction complète



CH<sub>2</sub>O | formule simplifiée des sucres (deux atomes de H pour 1 atome de C et O)

C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub> | formule simplifiée de la biomasse

# EPFL Bassin à boues activées Dimensionnement

$$C_m = \frac{Q \times [DBO_5]}{[MES]_{BA} \times V_{BA}} = \frac{\text{Food}}{\text{Microorganism}}$$

$C_m$  | Charge massique en  $DBO_5$  [ $\text{kg}DBO_5/(\text{kg} \text{MES} \cdot \text{j})$ ]

$Q$  | Débit d'eau usée [ $\text{m}^3/\text{j}$ ]

$[DBO_5]$  | Concentration en  $DBO_5$  dans l'eau usée [ $\text{kg}DBO_5/\text{m}^3$ ]

$[MES]_{BA}$  | Concentration en MES dans le bassin de boues activées [ $\text{kg}MES/\text{m}^3$ ]

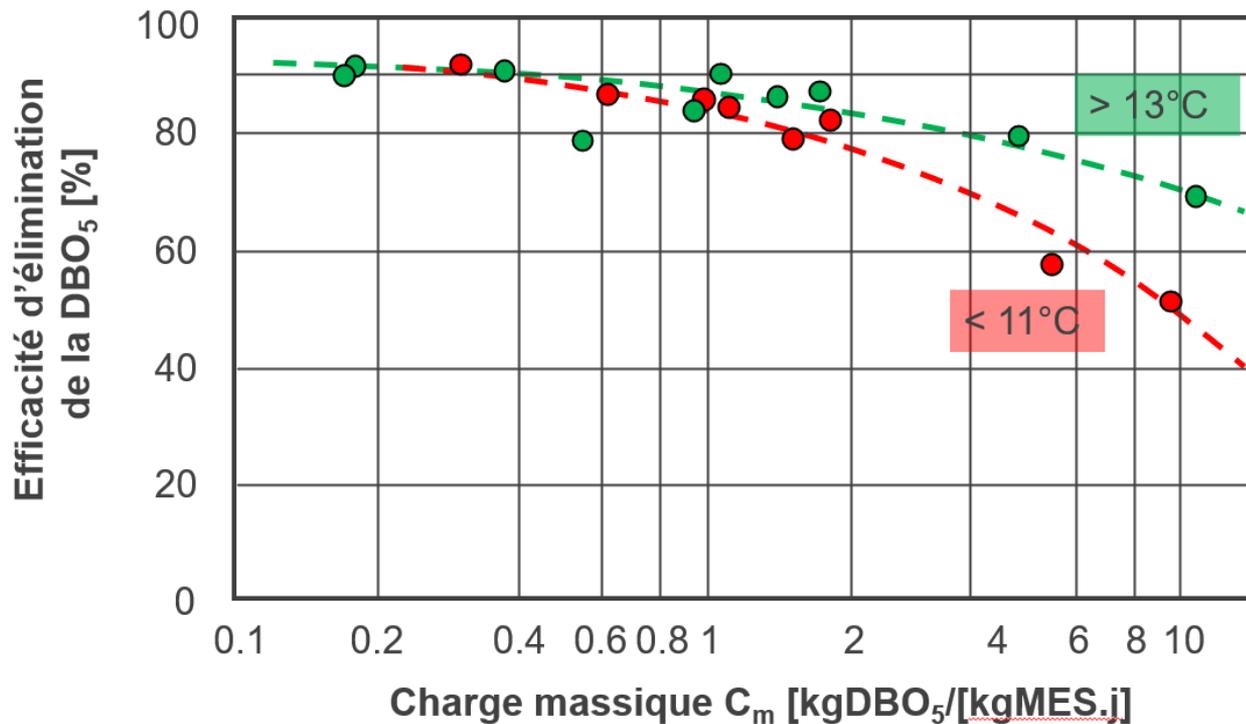
$V_{BA}$  | Volume du bassin de boues activées [ $\text{m}^3$ ]

# Avantages/inconvénient de l'approche charge massique (ou F/M ratio)

- Simple et intuitif
- Facile à expliquer
- Basé sur des mesures classiques (MES, DBO<sub>5</sub>, etc.) et donc empirique (basé sur l'expérience)
  
- **MES ≠ quantité de biomasse active** (MES inclut matières minérales)
- Composition MES variable d'une STEP à l'autre
- MVS quelques fois utilisée à la place des MES
- **MVS également ≠ de la quantité de biomasse active** (MVS inclut débris cellulaires, EPS, etc.)

# Bassin à boues activées

*Performance = f(charge massique)*



**Charge massique |  $C_m$** 

Élimination de la  $DBO_5$  seule | 0,30 kg $DBO_5$ /(kgMES.j)

(forte charge)

Élimination de la  $DBO_5$  + nitrification | 0,15 kg $DBO_5$ /(kgMES.j)

(faible charge)

Stabilisation des boues | 0,05 kg $DBO_5$ /(kgMES.j)

**Concentration en biomasse |  $[MES]_{BA}$** 

Bassin boues activées | 3,0 kgMES/m<sup>3</sup>

Avec traitement physico-chimique | 3,5 kgMES/m<sup>3</sup>

Sans décanteur primaire | 4,5 kgMES/m<sup>3</sup>

	Charge massique $C_m$ kgDBO <sub>5</sub> /(kgMVS.j)	Temps séjour hydraulique $t_{SH}$ h	Traitement
<b>Très faible charge*</b>	< 0,1	> 20	DBO <sub>5</sub> + nitrification
<b>Faible charge**</b>	0,1 – 0,25	8-10	DBO <sub>5</sub> + nitrification
<b>Moyenne charge**</b>	0,25 – 0,5	4-6	DBO <sub>5</sub> + nitrification partielle
<b>Forte charge**</b>	0,5 – 1,5	2-4	DBO <sub>5</sub> uniquement
<b>Très forte charge*</b>	> 1,5	1,0	DBO <sub>5</sub> uniquement

\*: sans décantation primaire

\*\* : avec décantation primaire

# EPFL EXERCICE 1. Calcul du temps de séjour hydraulique

La STEP d'Yverdon-les-Bains utilise des **bassins à boue activée faible charge** pour le **traitement du carbone et de l'ammonium** de ses eaux usées **après une étape de décantation primaire** et **sans traitement physico-chimique du phosphore** par ajout de chlorure ferrique.

$$C_m = 0.15 \text{ kg DBO}_5 \text{ kg}^{-1} \text{ MES d}^{-1}$$

$$\text{DBO}_5 = 150 \text{ g m}^{-3}$$

$$\text{MES}_{\text{BA}} = 3 \text{ kg MES m}^{-3}$$

**Q1. Calculer le temps de séjour hydraulique ( $t_{\text{SH}}$ ) des bassins à boues activées**

# EPFL EXERCICE 1. Calcul du temps de séjour hydraulique

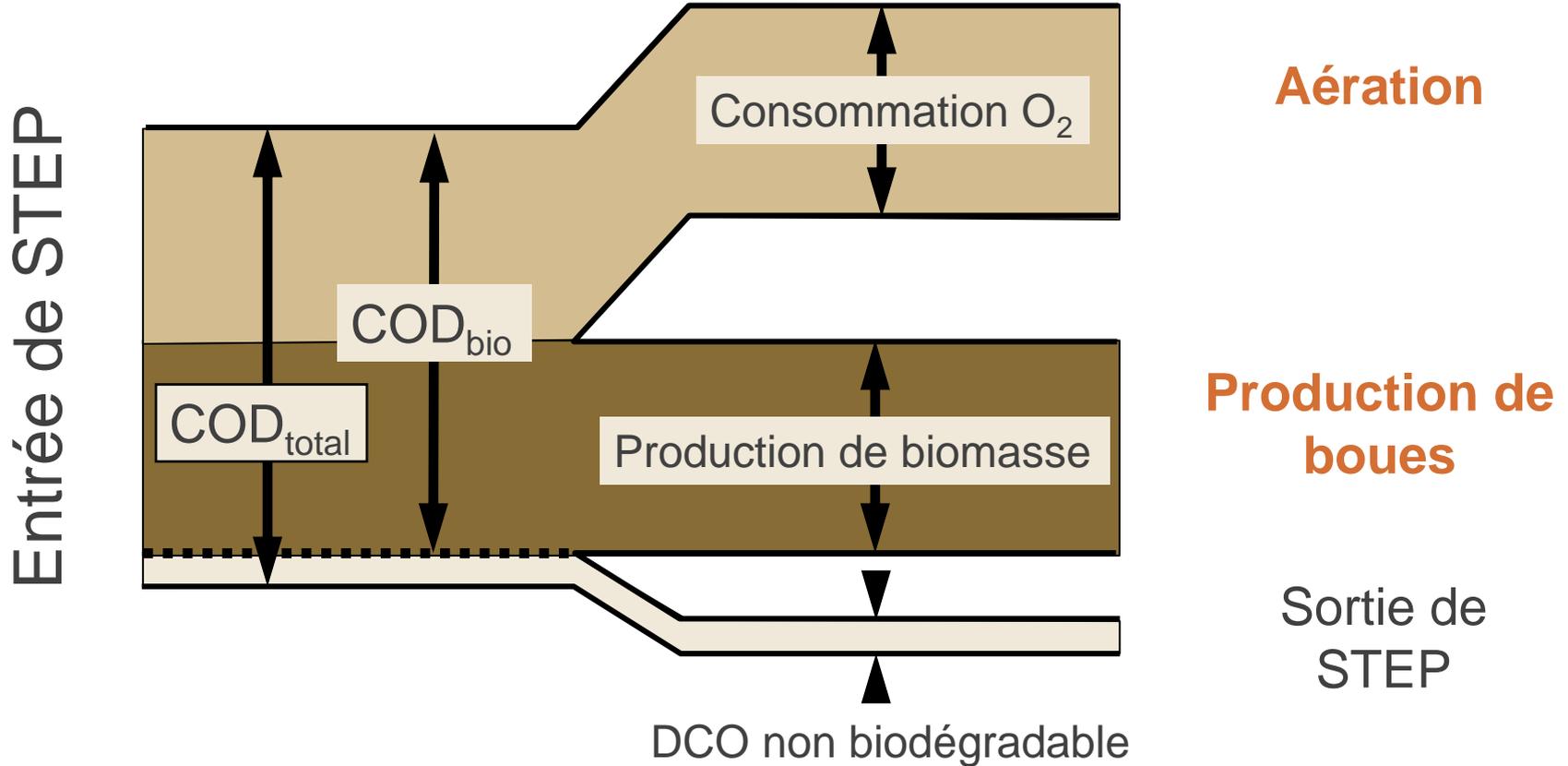
La STEP d'Yverdon-les-Bains utilise des **bassins à boue activée faible charge** pour le **traitement du carbone et de l'ammonium** de ses eaux usées **après une étape de décantation primaire** et **sans traitement physico-chimique du phosphore** par ajout de chlorure ferrique.

$$\text{TSH} = V_{\text{BA}} / Q$$

$$\rightarrow \text{TSH} = V_{\text{BA}} / Q = \text{DBO}_5 / (C_m \cdot \text{MES}) = 150 / (0,15 \times 3000) = 0,33 \text{ d} =$$

8h

# Élimination DBO – métabolisme cellulaire



# EPFL Production de boues ( $P_x$ ) Dimensionnement

$$P_x = a_m \times Q \times [\text{DBO}_5]_{\text{élim}}$$

- $P_x$  | Production de boue en excès [kgMES/j]  
 $a_m$  | Coefficient spécifique de production de boue [kgMES/kgDBO<sub>5,élim</sub>]  
 $Q$  | Débit d'eau usée [m<sup>3</sup>/j]  
 $[\text{DBO}_5]_{\text{élim}}$  | Concentration éliminée en DBO<sub>5</sub> [kgDBO<sub>5,élim</sub>/m<sup>3</sup>]

# EPFL Production de boues ( $P_x$ ) Valeurs empiriques

	Charge massique $C_m$ kgDBO <sub>5</sub> /(kgMVS.j)	Coefficient production de boues $a_m$ kgMES/kg <sub>DBO5,élim</sub>	Traitement
<b>Très faible charge*</b>	< 0,1	<0,3	DBO <sub>5</sub> + nitrification
<b>Faible charge**</b>	0,1 – 0,25	0,8	DBO <sub>5</sub> + nitrification
<b>Moyenne charge**</b>	0,25 – 0,5	0,9	DBO <sub>5</sub> + nitrification partielle
<b>Forte charge**</b>	0,5 – 1,5	1,0	DBO <sub>5</sub> uniquement
<b>Très forte charge*</b>	> 1,5	1,5	DBO <sub>5</sub> uniquement

# EPFL Demande en oxygène (DO) Dimensionnement

$$DO = DO_{\text{DBO}_5} + \frac{DO_{\text{nitrification}}}{\text{coefficient}} = a_{\text{O}_2} \times Q \times [\text{DBO}_5]_{\text{éliminée}} \times f_{\text{DBO}}$$

DO	Demande en oxygène total [kgO <sub>2</sub> /j]
DO <sub>DBO5</sub>	Demande en oxygène pour oxyder la DBO <sub>5</sub> [kgO <sub>2</sub> /j]
a <sub>O2</sub>	Coefficient spécifique de besoin en oxygène [kgO <sub>2</sub> /kg <sub>DBO5</sub> ]
Q	Débit d'eau usée [m <sup>3</sup> /j]
[DBO <sub>5</sub> ] <sub>élim</sub>	Concentration éliminée en DBO <sub>5</sub> dans l'eau usée [kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> ]
f <sub>DBO5</sub>	Coefficient de sécurité prenant en compte les variations journalière [-]



Le coefficient de sécurité (f<sub>DBO5</sub>) est généralement choisi entre 1,2 et 1,3

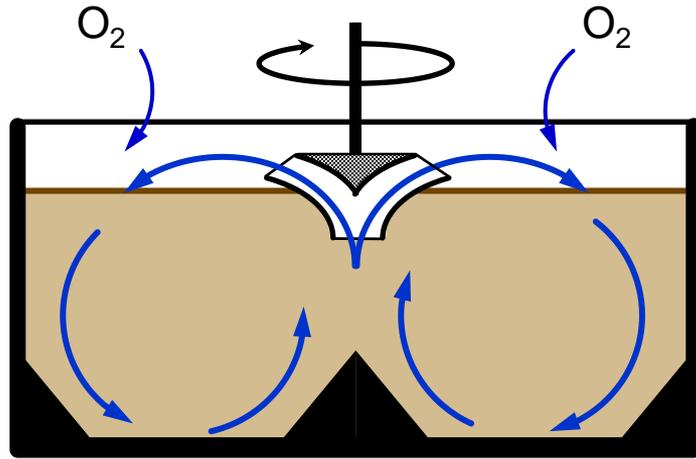
# EPFL Demande en oxygène (DO) Valeurs empiriques

	Charge massique $C_m$ kgDBO <sub>5</sub> /(kgMVS.j)	Coefficient spécifique besoin O <sub>2</sub>   aO <sub>2</sub> [kgO <sub>2</sub> /kgDBO <sub>5</sub> , élim]	Traitement
Très faible charge*	< 0,1	1,6 – 1,9	DBO <sub>5</sub> + nitrification
Faible charge**	0,1 – 0,25	1,3 – 1,5	DBO <sub>5</sub> + nitrification
Moyenne charge**	0,25 – 0,5	0,8 – 1,1	DBO <sub>5</sub> + nitrification partielle
Forte charge**	0,5 – 1,5	0,7 – 0,8	DBO <sub>5</sub> uniquement
Très forte charge*	> 1,5	0,6 – 0,7	DBO <sub>5</sub> uniquement

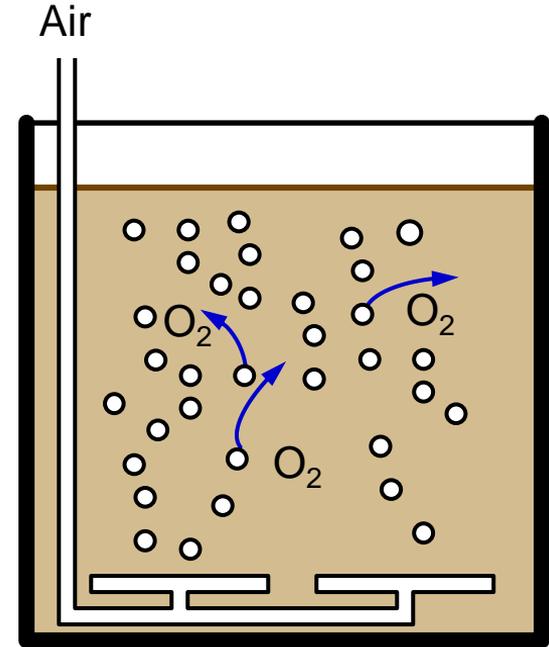
Le coefficient spécifique de besoin en O<sub>2</sub> (aO<sub>2</sub>) est inversement proportionnelle à l'évolution de la production de boue



**EPFL** Bassin à boues activées Aération de surface



Aération de surface  
(turbine)



Aération à bulles

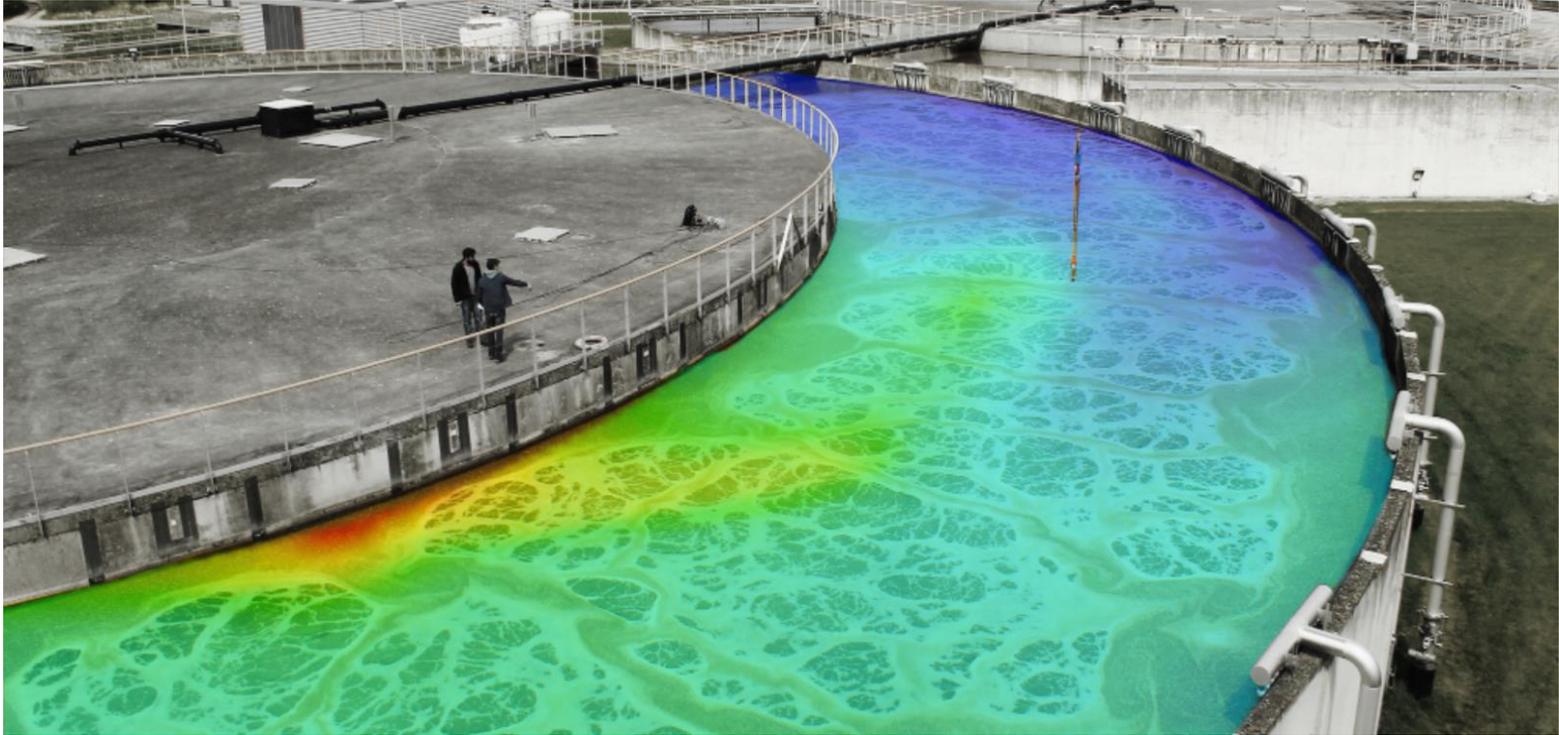
# EPFL Bassin à boues activées Aération de surface



# EPFL Bassin à boues activées Aération fines bulles



# EPFL Optimisation modélisation des zone aérobie



# EPFL Sécurité zone aérée = faible flottabilité



# EPFL Le cauchemar des exploitants

## BACTÉRIES FILAMENTEUSES

*Nocardia spp* et *Microthrix parvicella*



## FORMATION DE MOUSSES TRÈS LÉGÈRES

Fait chuter dramatiquement la concentration en biomasse



# EPFL Quid de l'azote et phosphore?

## Bilan sur l'azote

- $\Delta NTK = 0,045 \cdot \Delta DBO_5$
- $0,045 \text{ gN}_{\text{assimilé}} / \text{gDBO}_{5,\text{élim}}$
- $\Delta TKN =$  Élimination de l'azote par incorporation dans la biomasse (boues), entrée – sortie

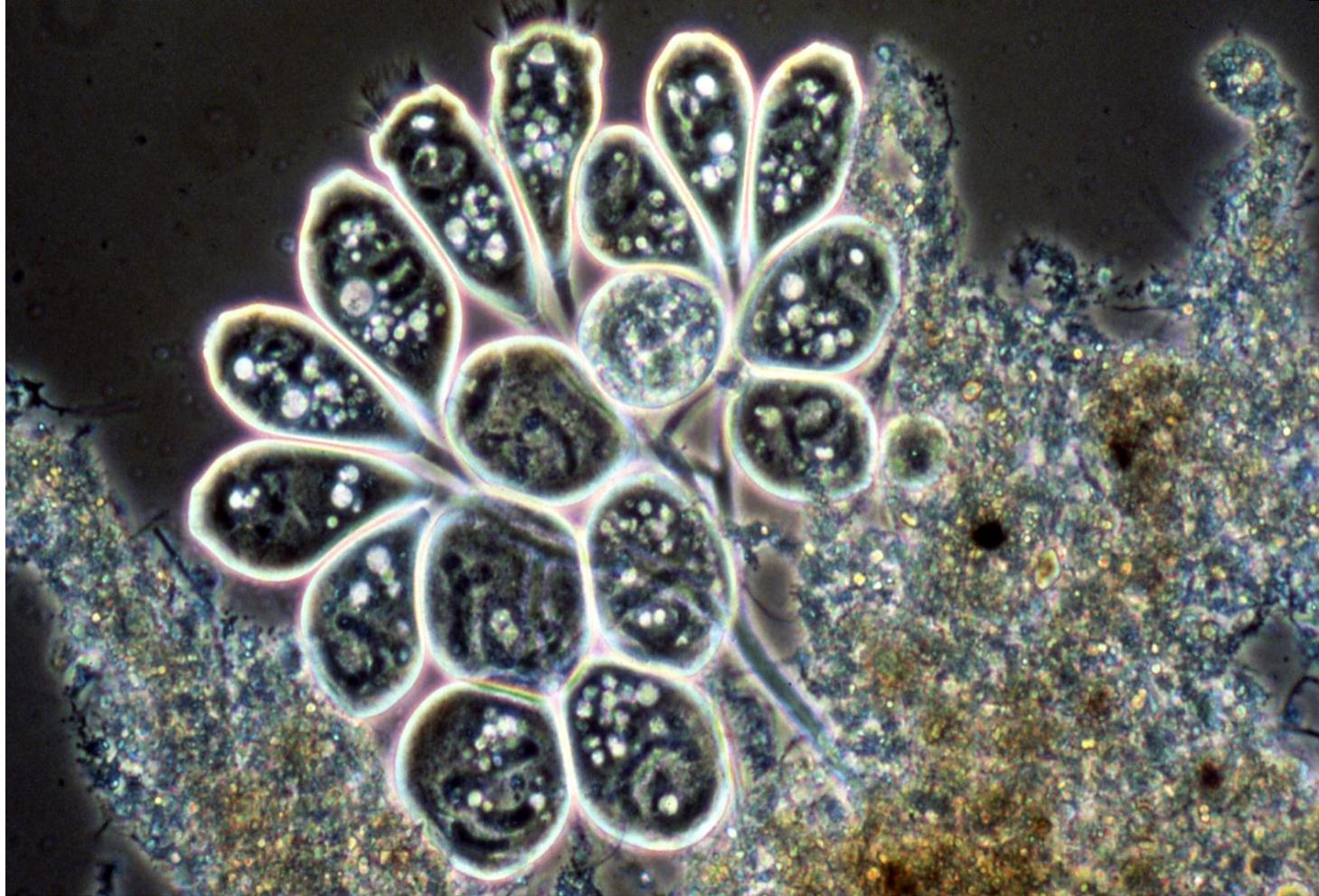
## Bilan sur la phosphore

- $\Delta TP = 0,01 \cdot \Delta DBO_5$
- $0,01 \text{ gP}_{\text{assimilé}} / \text{gDBO}_{5,\text{élim}}$
- $\Delta TP =$  élimination du phosphore par incorporation dans la biomasse (boues), entrée - sortie

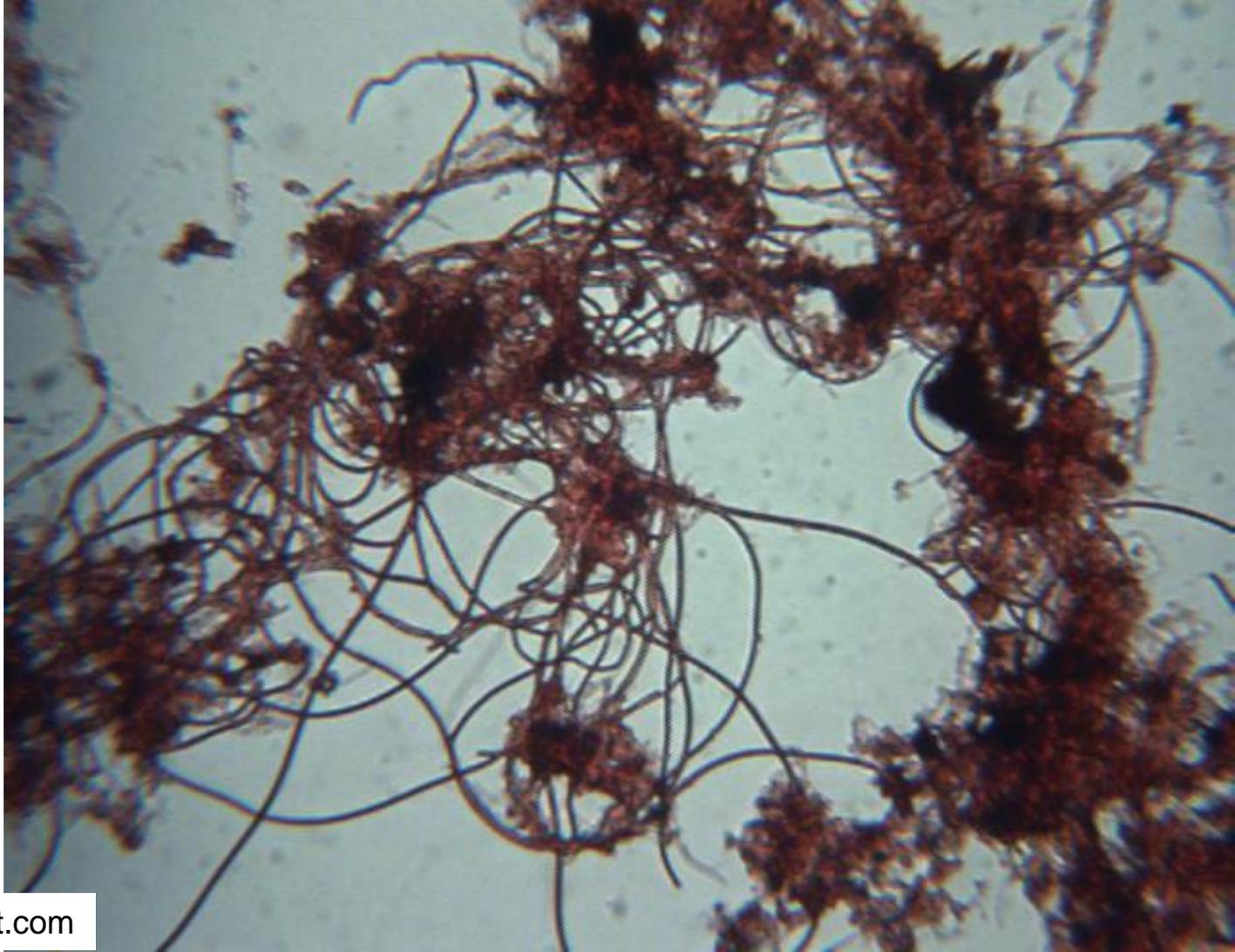
# EPFL Feuille de route « Traitements des ERUs »

Catégorie	Paramètres	Unité	ERU	Valeurs relevées après			
				DP (2h)	BA (C)	BA (N)	TT
Solides	MES	mg/L	250	109	< 15		15
Pollution organique	DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	230	151	< 15		15
	DCO	mgO <sub>2</sub> /L	500	327	< 45		45
Pollution azotée	NTK	mgC/L	30	27	20,9		3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	20	20	13,9		2
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0	0	0		0,3
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0	0	0		-
Pollution phosphorée	Ptot	mg/L	6	5,4	4		0,8
Micropolluants	Micropolluant	%	-	< 10	< 20		80

**Seulement  
des  
bactéries  
dans les  
boues  
activées?**



# Bactéries filamenteuses



# Problème des filamenteuses



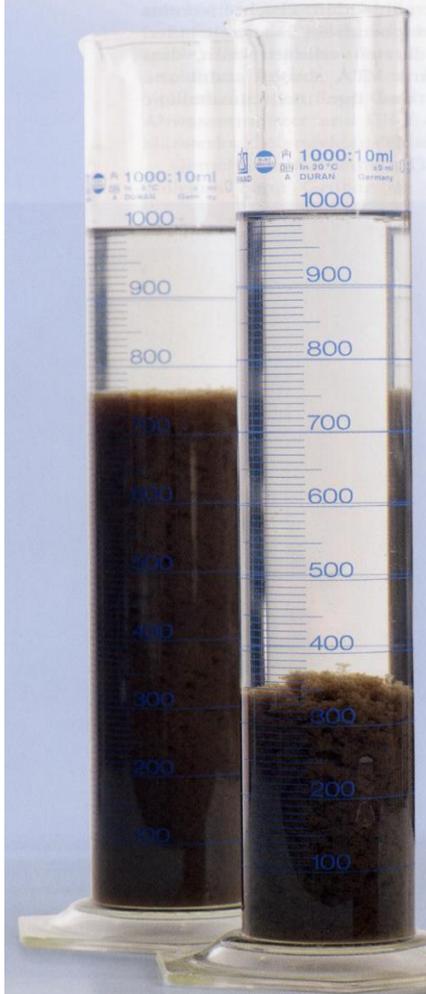
# Indice de sédimentation des boues (ISB)

$$\text{ISB} = \frac{V_{\text{sédimenté}}}{\text{MES}_{\text{échantillon}} \cdot V_{\text{échantillon}}} \text{ en mL g}_{\text{MES}}^{-1}$$

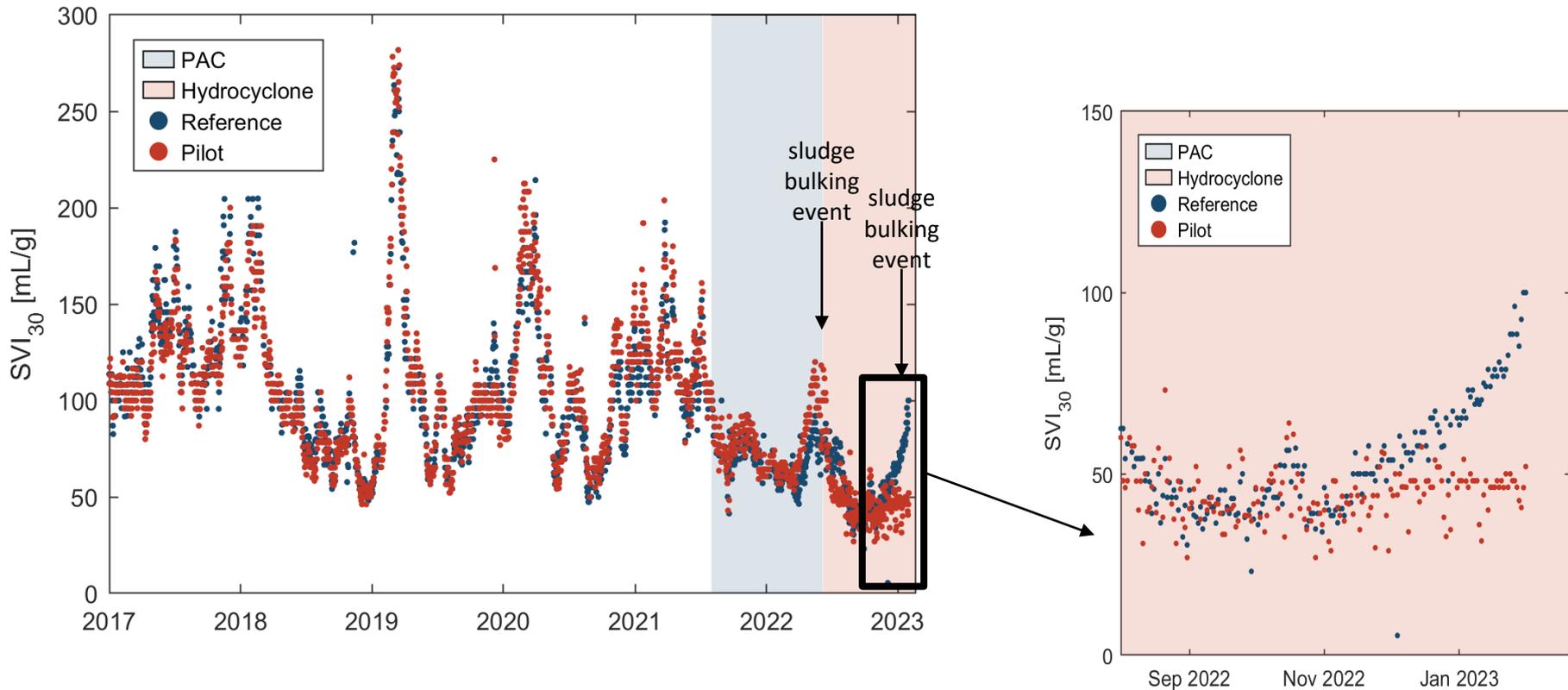
Généralement mesuré après 30min

Valeurs typiques ( $\text{g}_{\text{MES}} / \text{L}$ ):

- sans décanteur primaire: 75-100
- avec décantation primaire: 100-150
- Moussage des boues: 150-1000



# Indice de sédimentation des boues (ISB)



# Boues granulaires aérobie

*agrégats bactériens denses,  $d > 250 \mu\text{m}$ , caractérisés par une vitesse de sédimentation très élevée*

