



Università degli Studi di  
Napoli Federico II



Università degli  
Studi di Palermo



Università degli  
Studi di Salerno



Corso di Aggiornamento

## **BioMAc 2013**

**Bioreattori a Membrane (MBR) per la depurazione delle Acque**

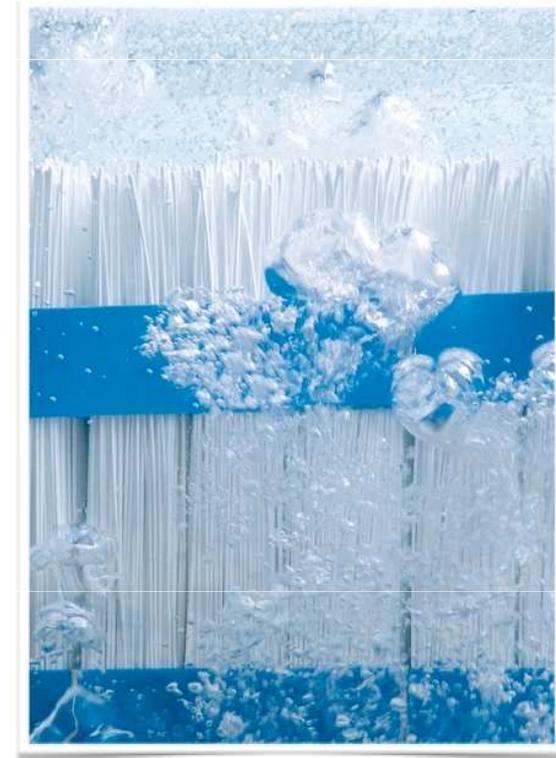
# **La cinetica delle biomasse nei reattori a membrane**

Vanni Esposito, Università di Cassino e del Lazio Meridionale

Palermo, 4-5 Luglio, 2013

# Sommario

- **Introduzione**
  - Cinetiche biologiche
- **Modellazione delle fasi biologiche**
  - Modelli tradizionali
  - Modelli per impianti MBR
- **Impianto pilota**
  - Descrizione dell'impianto
  - Illustrazione dei risultati
- **Calibrazione del modello**
  - Determinazione dei parametri
  - Verifica dei valori con prove respirometriche
- **Conclusioni**



# Cinetiche biologiche (crescita della biomassa)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt} \text{ growth} - \frac{dx}{dt} \text{ decay} = \mu * x - b * x = (\mu - b)x$$

dove:

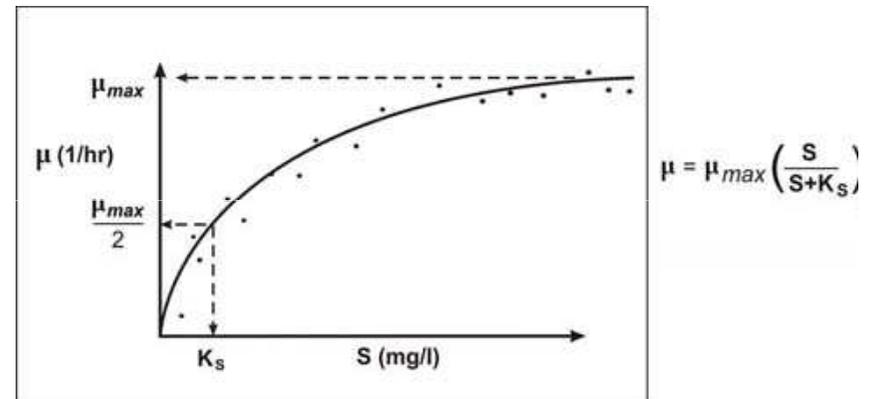
x = concentrazione di biomassa (M L<sup>-3</sup>);

μ = velocità di crescita specifica della biomassa (T<sup>-1</sup>);

b = velocità di decadimento specifica della biomassa (T<sup>-1</sup>).

se la velocità di crescita specifica della biomassa è limitata solo dalla disponibilità del substrato:

$$\mu = \hat{\mu} \frac{S}{K_s + S} \quad (\text{Monod})$$



where:

$\hat{\mu}$  = velocità massima specifica di crescita della biomassa (T<sup>-1</sup>);

S = concentrazione di substrato (M L<sup>-3</sup>);

K<sub>s</sub> = costante di semi-saturazione = conc. di substrato per cui:  $\hat{\mu} = \hat{\mu} / 2$  (M L<sup>-3</sup>).

# Cinetiche biologiche (degradazione del substrato)

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{dx}{dt} \text{ growth}$$

dove:

Y = coefficiente di resa cellulare

e quindi:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\hat{\mu}}{Y} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) x = -\hat{v} \left( \frac{S}{K_S + S} \right) x \quad (\text{Michaelis-Menten})$$

where:

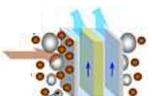
$\hat{v}$  = massima velocità specifica di rimozione del substrato ( $T^{-1}$ )

in altri termini:

$$\frac{dS}{dt} = -vx$$

con:

$$v = \hat{v} \left( \frac{S}{K_S + S} \right)$$

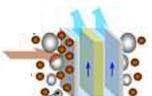
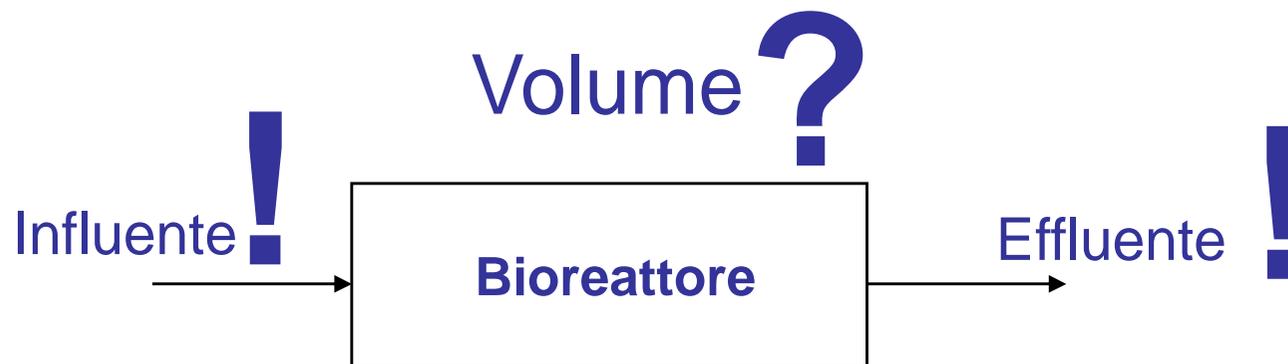


# Modellazione delle fasi biologiche – obiettivi

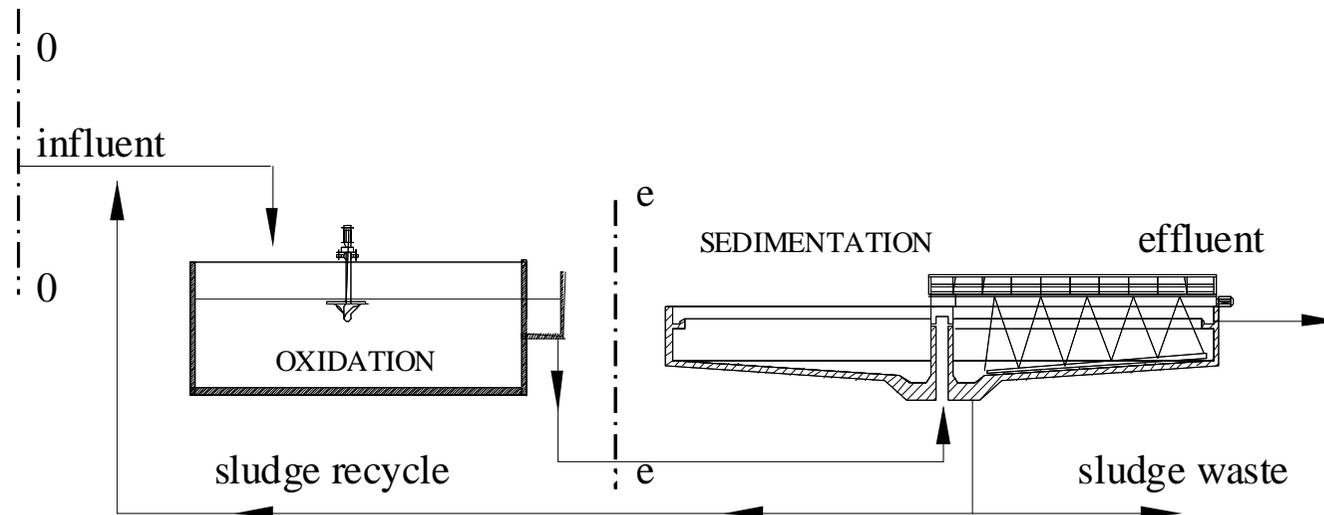
## Modello di verifica



## Modello di dimensionamento



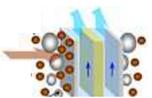
# Modellazione delle fasi biologiche – CAS



Equazioni di bilancio di massa:

$$QS_o - v_s VX = QS_e$$

$$RQ(X)_r + (v_s Y - b) VX = (R + 1) QX$$



# Modellazione delle fasi biologiche – CAS

Risultati:

Dimensionamento

Verifica

$$V = \frac{Q(S_o - S_e)}{v_s \cdot X}$$

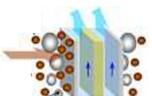
$$S_e = \frac{K_s(R + 1 - R \cdot \alpha + b \cdot HRT)}{HRT(Y\hat{v}_s - b) - (R + 1) + R \cdot \alpha}$$

$$R = \frac{1}{\alpha - 1} [1 - (Y \cdot v_s - b)HRT]$$

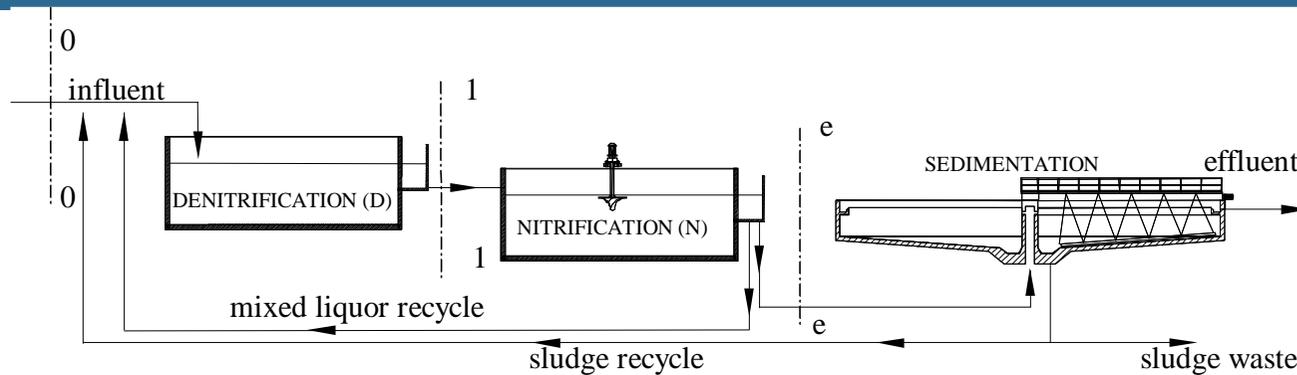
$$X = \frac{Q(S_o - S_e)}{v_s \cdot V}$$

where:

$$\alpha = (X)_r / X$$



# Modellazione delle fasi biologiche – pre-denitrificazione



$$QS_o + (R_1 + R_2)QS_e - \omega v_D V_D (X_H)_D + v_P V_D (X_H)_D = (R_1 + R_2 + 1)QS_1$$

$$QP_o + R_1 Q[(X_H)_r / (X_H)_N] P_e + R_2 QP_e - v_P V_D (X_H)_D = (R_1 + R_2 + 1)QP_1$$

$$Q(NH_4)_o + (R_1 + R_2)Q(NH_4)_e - \varepsilon \omega v_D V_D (X_H)_D = (R_1 + R_2 + 1)Q(NH_4)_1$$

$$(R_1 + R_2)Q(NO_3)_e - v_D V_D (X_H)_D = (R_1 + R_2 + 1)Q(NO_3)_1$$

$$(R_1 + R_2 + 1)QS_1 - v_S V_N (X_H)_N + v_P V_N (X_H)_N = (R_1 + R_2 + 1)QS_e$$

$$(R_1 + R_2 + 1)QP_1 - v_P V_N (X_H)_N = (R_1 + R_2 + 1)QP_e$$

$$(R_1 + R_2 + 1)Q(NH_4)_1 - v_N V_N (X_{AUT})_N - \varepsilon v_S V_N (X_H)_N = (R_1 + R_2 + 1)Q(NH_4)_e$$

$$(R_1 + R_2 + 1)Q(NO_3)_1 + v_N V_N (X_{AUT})_N = (R_1 + R_2 + 1)Q(NO_3)_e$$

$$R_1 Q(X_H)_r + R_2 Q(X_H)_N + (v_D Y_D - b_{H_D}) V_D (X_H)_D = (R_1 + R_2 + 1)Q(X_H)_D$$

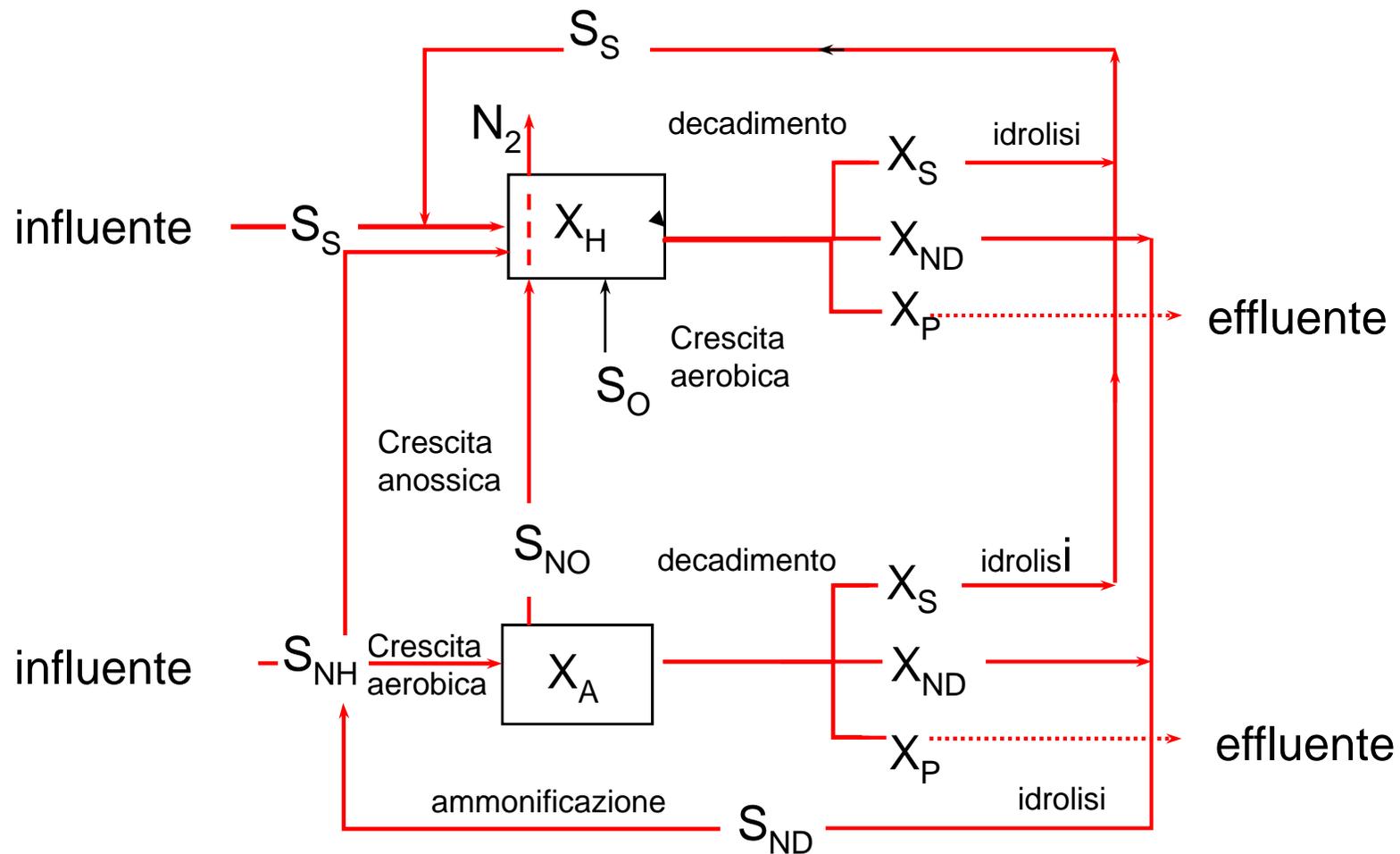
$$(R_1 + R_2 + 1)Q(X_H)_D + (v_S Y_H - b_{H_N}) V_N (X_H)_N = (R_1 + R_2 + 1)Q(X_H)_N$$

$$R_1 Q[(X_H)_r / (X_H)_N] (X_{AUT})_N + R_2 Q(X_{AUT})_N = (R_1 + R_2 + 1)Q(X_{AUT})_D$$

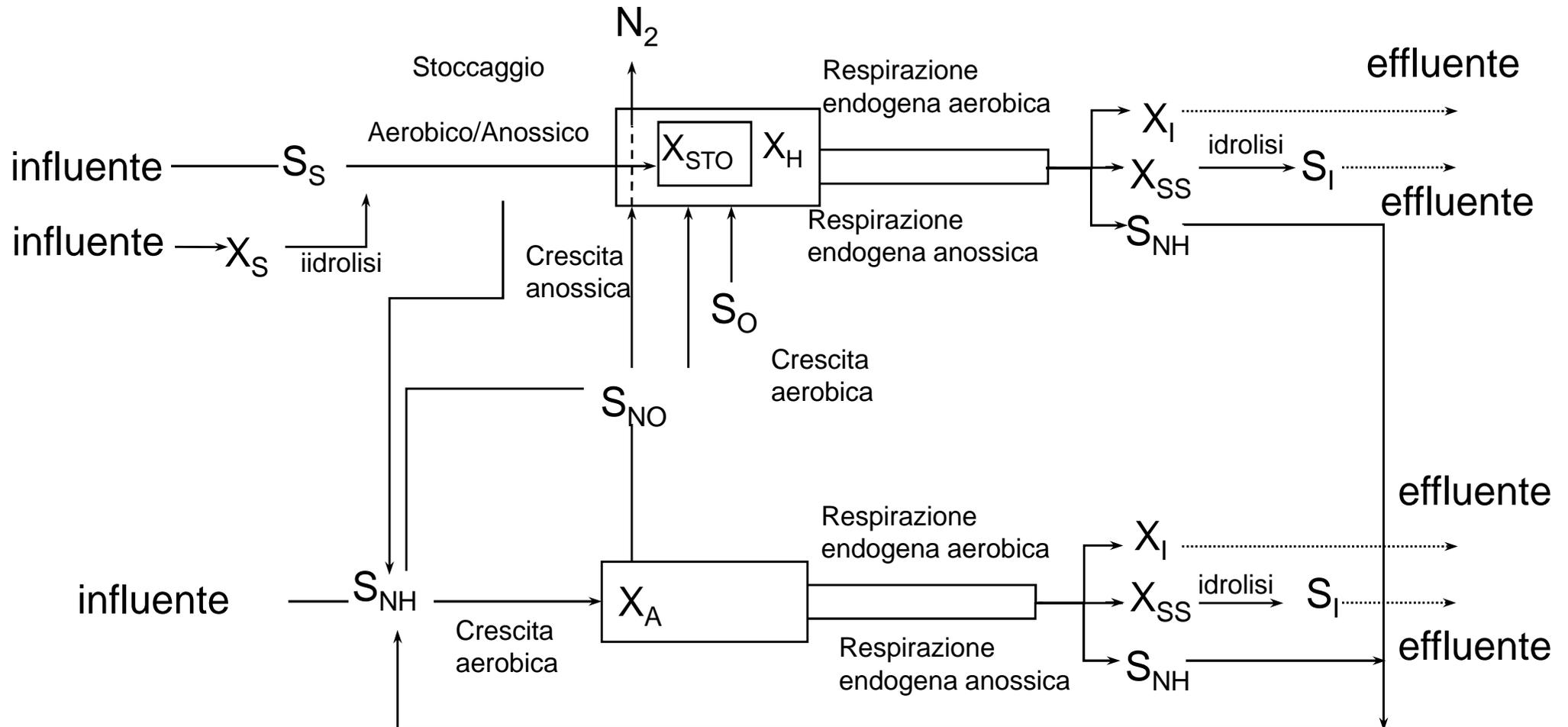
$$(R_1 + R_2 + 1)Q(X_{AUT})_D + (v_N Y_{AUT} - b_{AUT}) V_N (X_{AUT})_N = (R_1 + R_2 + 1)Q(X_{AUT})_N$$

12 equazioni in 12 incognite

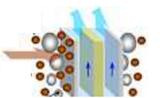
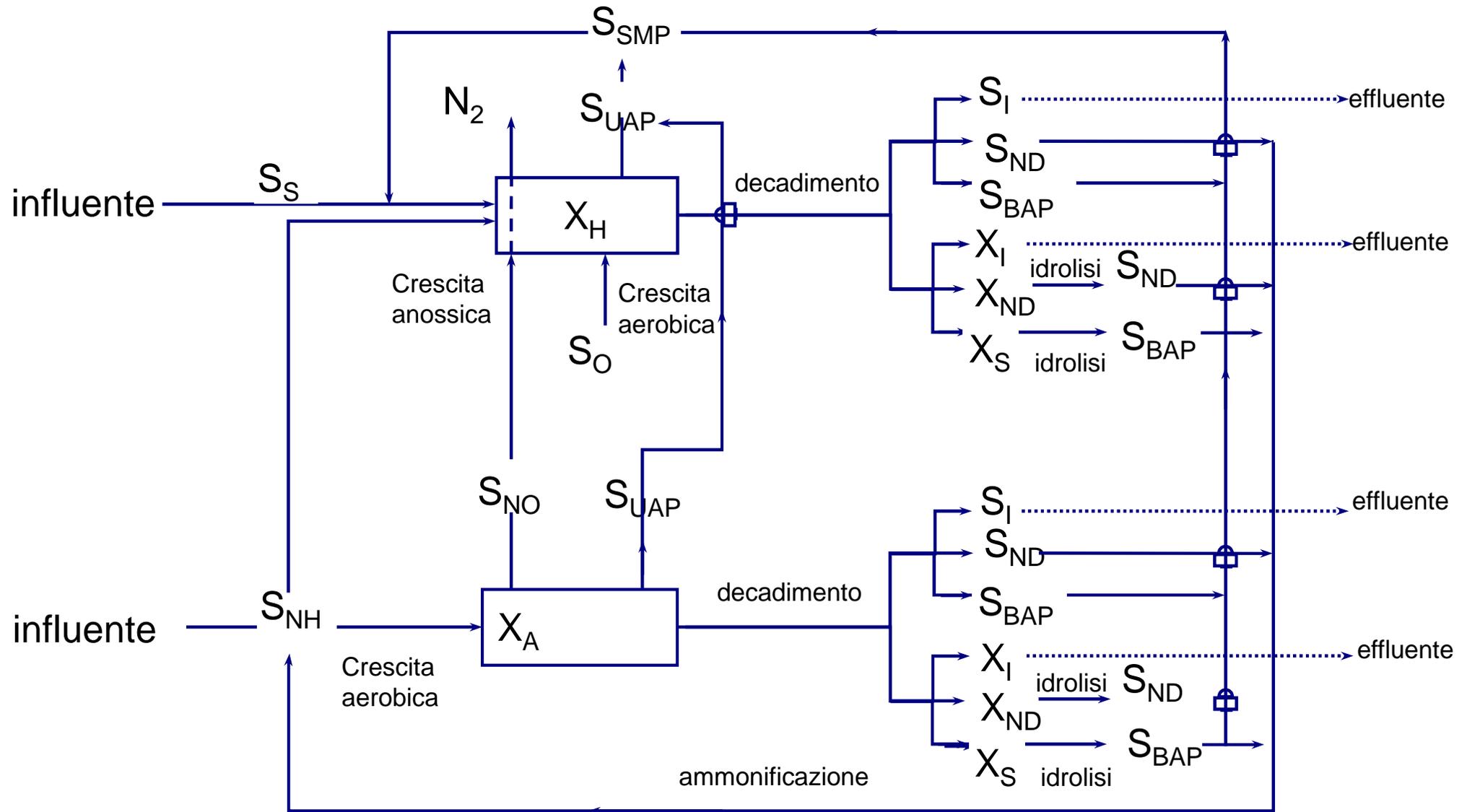
# Modellazione delle fasi biologiche – ASM1



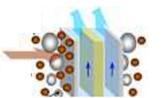
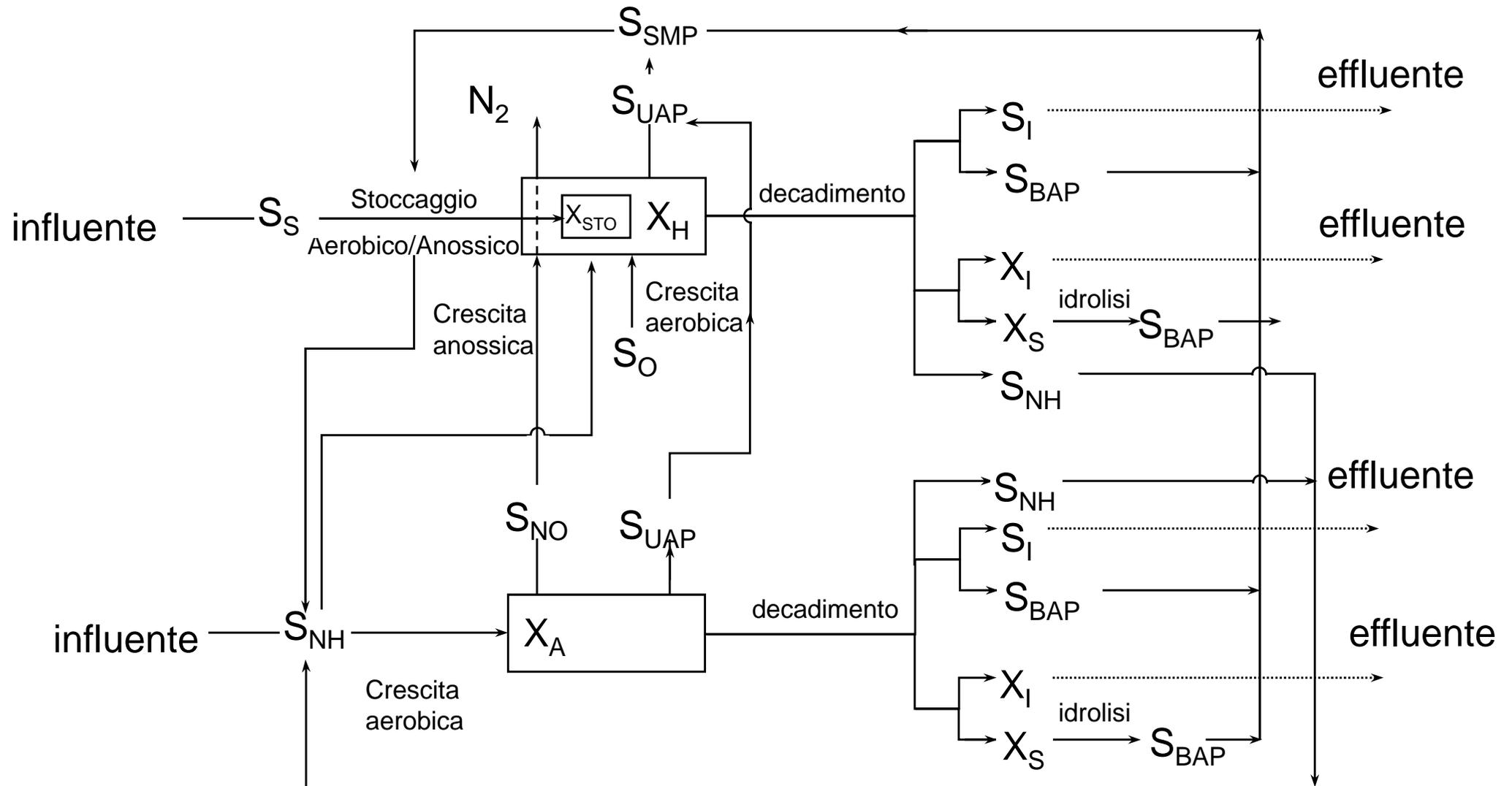
# Modellazione delle fasi biologiche – ASM3



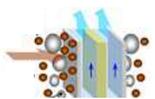
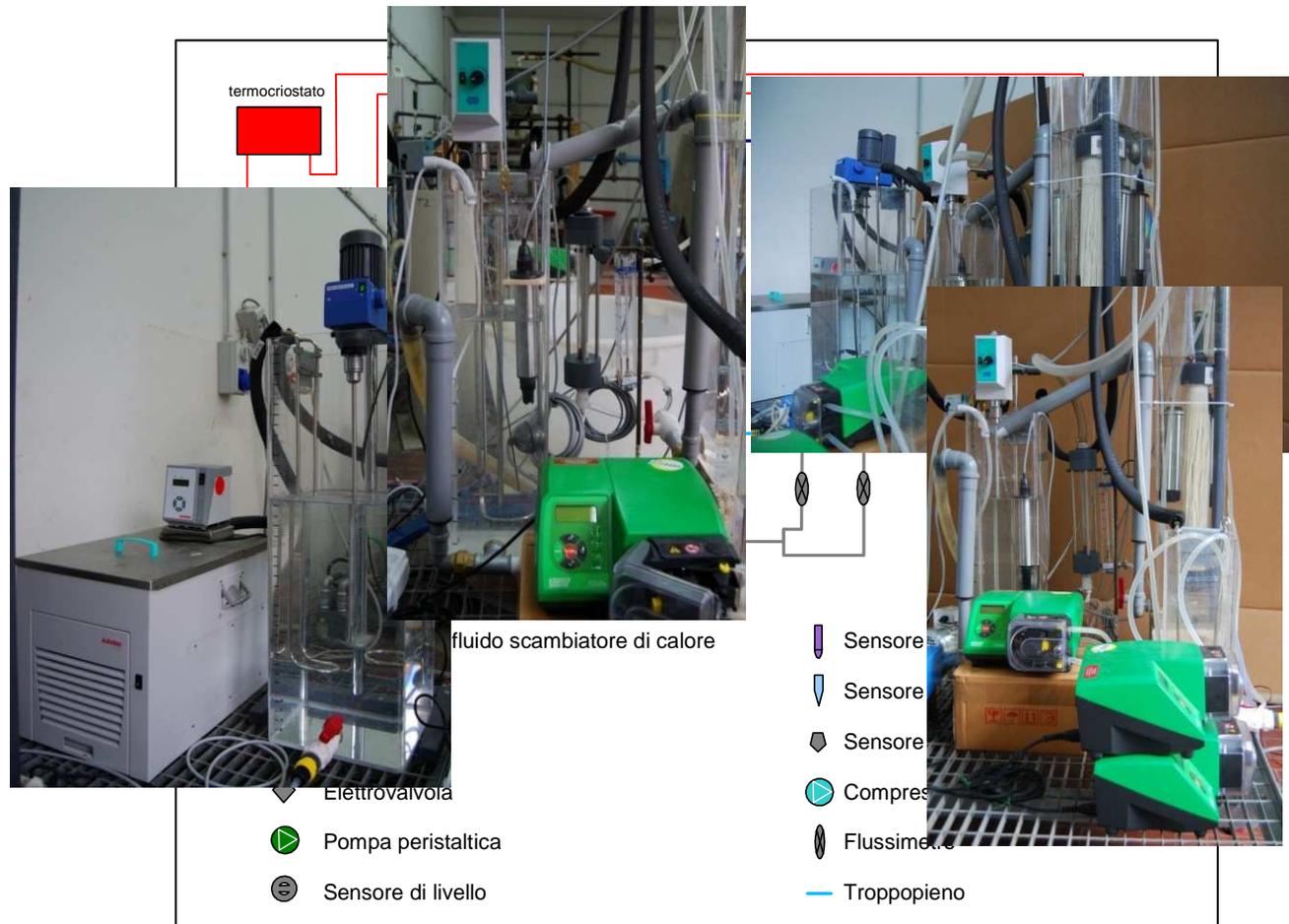
# Modellazione delle fasi biologiche – SMP



# Modellazione delle fasi biologiche – MBR



# Impianto pilota – Descrizione



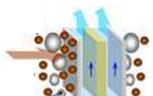
# Impianto pilota – Funzionamento

## *Caratteristiche principali del refluo*

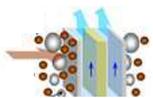
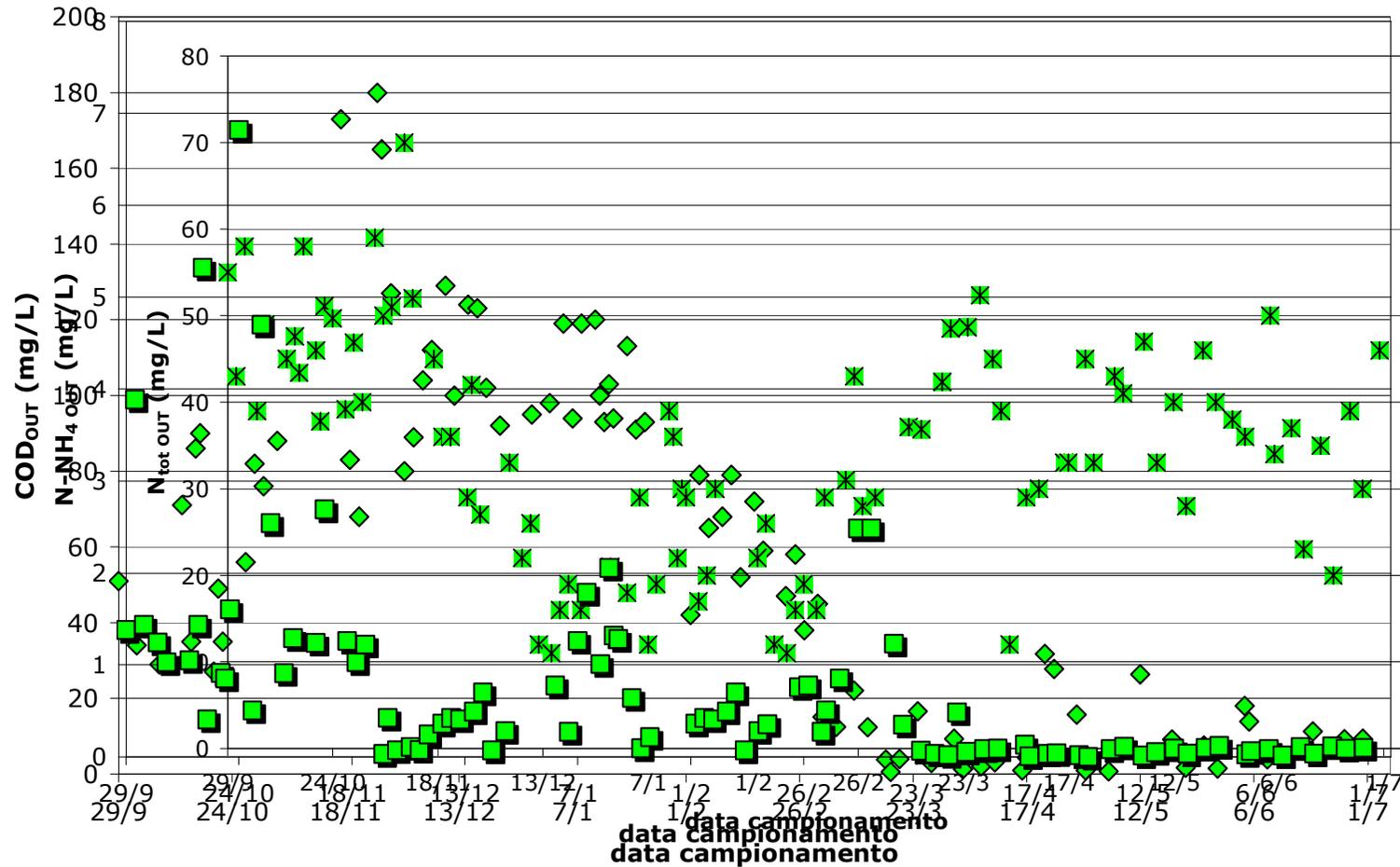
COD ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	420
COD solubile ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	176,5
N-NO <sub>2</sub> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0
N-NO <sub>3</sub> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1,87
N-NH <sub>4</sub> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	4,6
TN ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	54,96
P-PO <sub>4</sub> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7,76
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	34
Carboidrati ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	36,88
Proteine ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	11,73
pH	7,2

## *Condizioni di funzionamento*

Portata influente ( $\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$ )	105
Portata di ricircolo ( $\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$ )	315
Portata di supero ( $\text{l}\cdot\text{d}^{-1}$ )	0,8
Volume fase anossica (l)	13,6
Volume fase aerobica (l)	30,8
Età del fango (d)	55,5

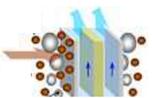


# Impianto pilota – Risultati



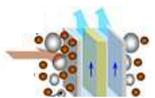
# Impianto pilota – Effluente fase anossica

REATTORE ANOSSICO	
COD solubile ( $\text{gCOD}\cdot\text{m}^{-3}$ )	72
N- $\text{NO}_3$ ( $\text{gN-NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$ )	12
N- $\text{NH}_4$ ( $\text{gN-NH}_4\cdot\text{m}^{-3}$ )	13
SSV ( $\text{gCOD}\cdot\text{m}^{-3}$ )	7.000



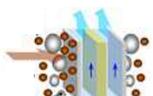
# Impianto pilota – Effluente fase aerobica

REATTORE AEROBICO	
SMP (gCOD·m <sup>-3</sup> )	33
COD solubile (gCOD·m <sup>-3</sup> )	54
N-NO <sub>3</sub> (gN-NO <sub>3</sub> ·m <sup>-3</sup> )	36
N-NH <sub>4</sub> (gN-NH <sub>4</sub> ·m <sup>-3</sup> )	0,3
SSV (gCOD·m <sup>-3</sup> )	9.000



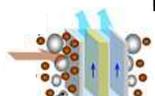
# Calibrazione del modello – Coefficienti stechiometrici

COEFFICIENTI STECHIOMETRICI		VALORE	
		CAL.	LETT.
Coefficiente di rendimento per la biomassa eterotrofa in fase aerobica	$Y_{H,O}$	0,55	0,67
Coefficiente di rendimento per la biomassa eterotrofa in fase anossica	$Y_{H,NO}$	0,58	0,54
Coefficiente di rendimento per la biomassa autotrofa	$Y_A$	0,24	0,24
Coefficiente di rendimento dello stoccaggio aerobico	$Y_{STO,O}$	0,95	0,85
Coefficiente di rendimento dello stoccaggio anossico	$Y_{STO,NO}$	0,85	0,8
Coefficiente di formazione di UAP ad opera della biomassa eterotrofa	$\gamma_{UAP,H}$	0,65	0,38
Coefficiente di formazione di UAP ad opera della biomassa autotrofa	$\gamma_{UAP,A}$	1,25	1,6



# Calibrazione del modello – Costanti cinetiche

COSTANTI CINETICHE		VALORE	
		CAL	LET
Velocità di stoccaggio	$k_{STO}$	4,2	5
Velocità di idrolisi	$k_h$	3	3
Velocità massima di crescita della biomassa eterotrofa	$\mu_{H,max}$	6	6
Velocità massima di crescita della biomassa autotrofa	$\mu_{A,max}$	0,85	0,8
Costante di semisaturazione per il prodotti microbici	$K_{SMP}$	106	/
Costante di semisaturazione per l'NH <sub>4</sub>	$K_{NH}$	0,95	1
Tasso decadimento biomassa eterotrofa con formazione di sostanze sospese	$b_H$	0,15	0,22
Tasso decadimento biomassa eterotrofa con formazione di sostanze solubili	$b_{BAP,H}$	0,28	0,4
Tasso decadimento biomassa autotrofa con formazione di sostanze sospese	$b_A$	0,03	0,05
Tasso decadimento biomassa autotrofa con formazione di sostanze solubili	$b_{BAP,A}$	0,1	0,1
Perdita di X <sub>STO</sub> per decadimento della biomassa	$b_{STO}$	0,13	0,2



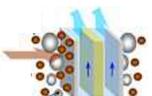
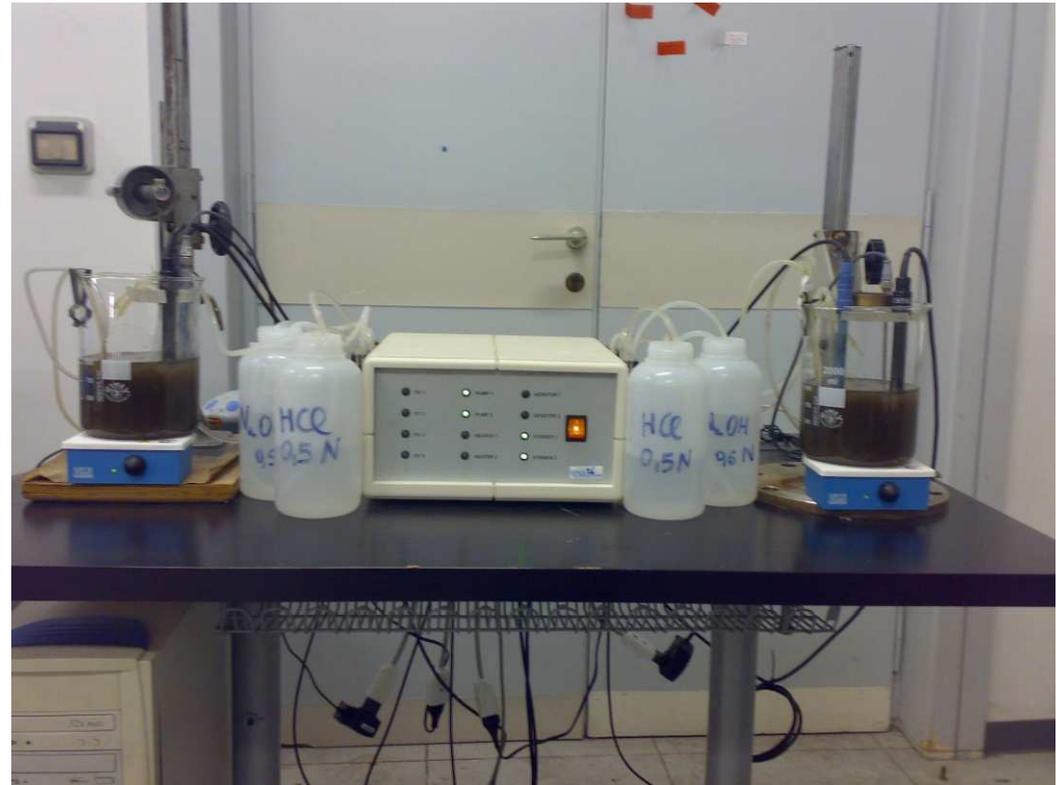
# Calibrazione del modello – Confronto dei risultati

Parametro	Mis	Sim	Componente modello
REATTORE AEROBICO			
SMP (gCOD·m <sup>-3</sup> )	33	34	$S_{SMP}$
COD solubile (gCOD·m <sup>-3</sup> )	54	55	$S_S + S_{SMP} + S_I$
N-NO <sub>3</sub> (gN-NO <sub>3</sub> ·m <sup>-3</sup> )	46	37	$S_{NO}$
N-NH <sub>4</sub> (gN-NH <sub>4</sub> ·m <sup>-3</sup> )	0,3	0,3	$S_{NH}$
SSV (gCOD·m <sup>-3</sup> )	9.000	9.000	$X_H + X_A$
REATTORE ANOSSICO			
COD solubile (gCOD·m <sup>-3</sup> )	72	72	$S_S + S_{SMP} + S_I$
N-NO <sub>3</sub> (gN-NO <sub>3</sub> ·m <sup>-3</sup> )	12	11	$S_{NO}$
N-NH <sub>4</sub> (gN-NH <sub>4</sub> ·m <sup>-3</sup> )	13	16	$S_{NH}$
SSV (gCOD·m <sup>-3</sup> )	7.000	7.000	$X_H + X_A$

# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche

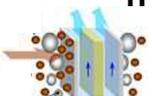
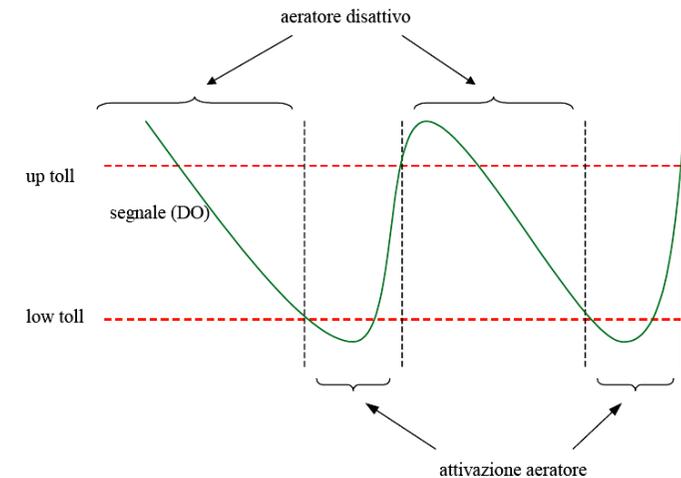
## Componenti:

- Reattori in vetro;
- Supporti sonde;
- Stirrer non riscaldato (completa miscelazione);
- Compressore per l'ossigenazione;
- Sonde (ossigeno disciolto, pH, T, potenziale redox);
- Elettrovalvole (controllo pH con rilascio di acido o base);
- Unità di controllo (MARTINA).



# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche

- Con aerazione discontinua il tasso di respirazione della biomassa (OUR) si ricava dalla pendenza di un tratto decrescente di ossigeno disciolto (DO) ad aerazione spenta;
- Parametri da impostare: tolleranza superiore ed inferiore (*up toll* e *low toll*), il numero di punti su cui calcolare l'OUR, il *mse* (*mean square error*);
- Steps per la determinazione dell'OUR:
  - Aereazione fino ad un valore di DO superiore ad *up toll*;
  - Raccolta dati fino ad un OUR calcolato sufficientemente preciso ( $mse < mse_{\text{imposto}}$ );
  - Nuova aereazione fino all'*up toll* se DO è inferiore a *low toll* o se si ottiene il valore di OUR



# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $Y_H$

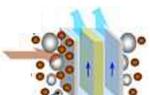
Coefficiente di resa cellulare ( $Y_H$ ):

- Durata prova 24-48 ore (funzione del tempo impiegato per raggiungere la fase endogena);
- Tre iniezioni di substrato sintetico (la seconda dopo l'acclimatazione della biomassa al substrato);
- Determinazione dell'area sottesa al diagramma di OUR tramite "Metodo dei trapezi":

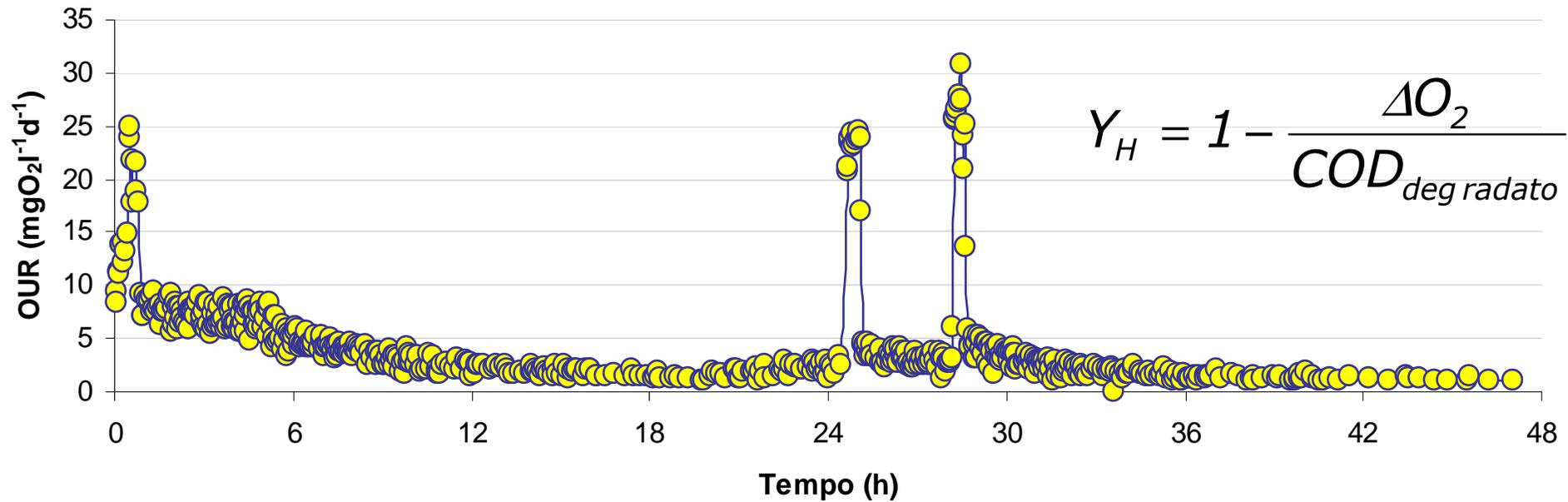
$$AREA = \frac{(OUR_1 + OUR_2) \cdot \Delta t}{2}$$

- Determinazione di  $Y_H$  tramite il consumo di ossigeno, al netto dell'endogeno:

$$Y_H = 1 - \frac{\Delta O_2}{COD_{degradato}}$$

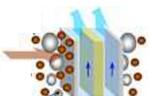


# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $Y_H$



$Y_H = 0,53$

Calibrato :  $Y_H = 0,55$

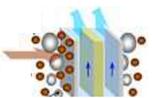


# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $b_H$

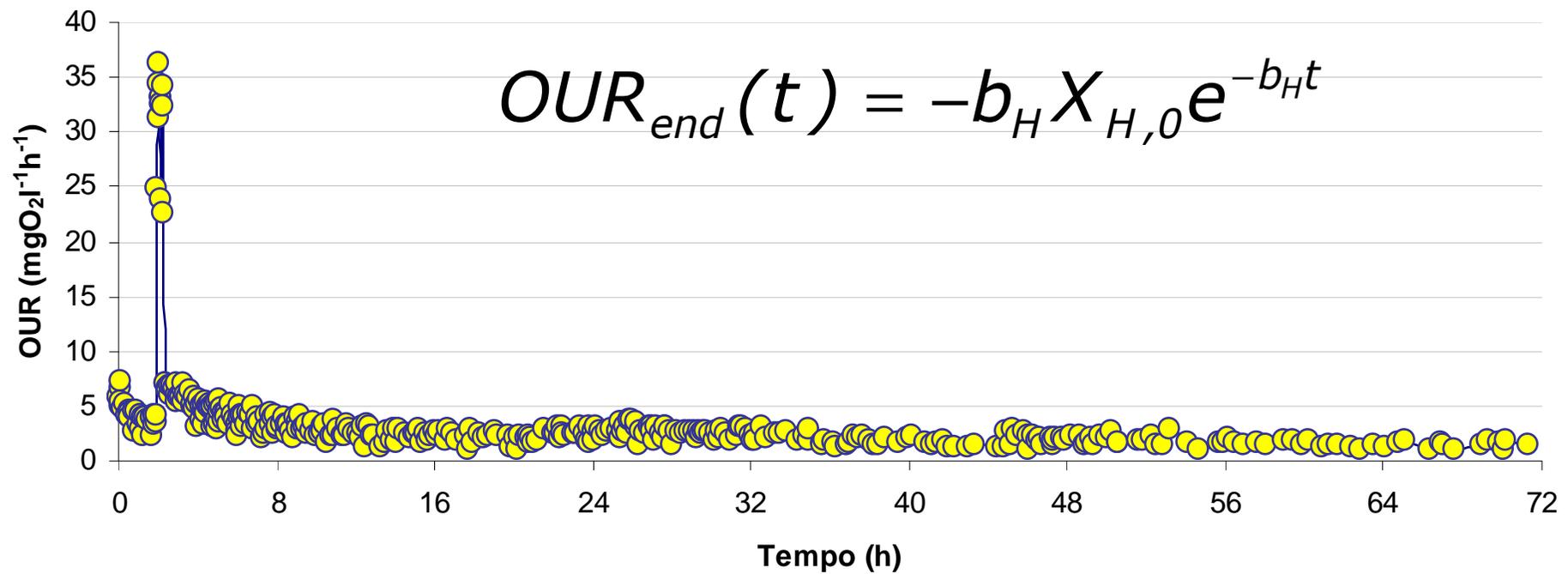
Velocità di decadimento cellulare ( $b_H$ ):

- Durata prova 72 ore (Raggiungimento della fase endogena);
- Iniezione iniziale di substrato sintetico;
- Interpolazione dei punti di OUR appartenenti alla sola fase endogena e determinazione di  $b_H$ :

$$OUR_{end}(t) = -b_H X_{H,0} e^{-b_H t}$$

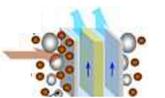


# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $b_H$



$b_H = 0,22 \text{ d}^{-1}$

Calibrato :  $b_H = 0,15 \text{ d}^{-1}$

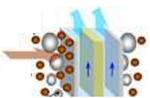


# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $\mu_H$

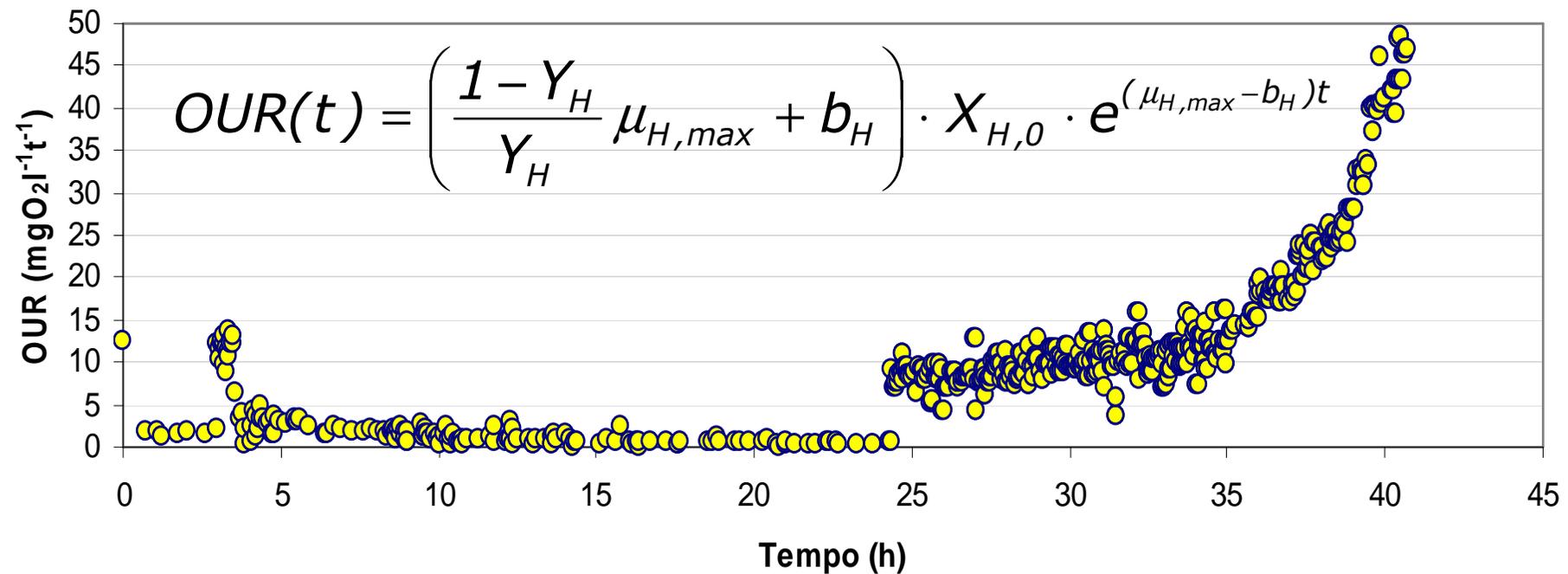
Velocità di crescita della biomassa ( $\mu_H$ ):

- Durata prova circa 48 ore (funzione del tempo impiegato per raggiungere la fase endogena);
- Iniezione di substrato sintetico tale da assicurare un rapporto substrato/biomassa superiore a 4 (affinché il substrato non sia limitante per la crescita microbica);
- Determinazione di  $\mu_{H,max}$  dall'equazione della linea di tendenza nella fase di crescita microbica (eliminando la fase iniziale e quella endogena):

$$OUR(t) = \left( \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_{H,max} + b_H \right) \cdot X_{H,0} \cdot e^{(\mu_{H,max} - b_H)t}$$

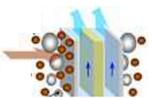


# Calibrazione del modello – Analisi respirometriche: $\mu_H$



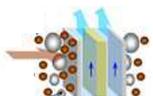
$\mu_{H,max} = 5,7 \text{ d}^{-1}$

Calibrato :  $\mu_{H,max} = 6 \text{ d}^{-1}$



# Calibrazione del modello – Confronto con dati di letteratura

COSTANTI CINETICHE		VALORE	
		MIS	LET
Velocità massima di crescita della biomassa eterotrofa	$\mu_{H, max}$	5,7	6
Coefficiente di rendimento per la biomassa eterotrofa in fase aerobica	$Y_H$	0,53	0,67
Tasso decadimento biomassa eterotrofa con formazione di sostanze sospese	$b_H$	0,22	0,22



*Grazie per l'attenzione*



**Massimiliano Fabbricino**

*Università degli Studi di Napoli Federico II*

*E-mail: [fabbrici@unina.it](mailto:fabbrici@unina.it)*



**Giovanni Esposito**

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Merdionale*

*E-mail: [giovanni.esposito@unicas.it](mailto:giovanni.esposito@unicas.it)*

