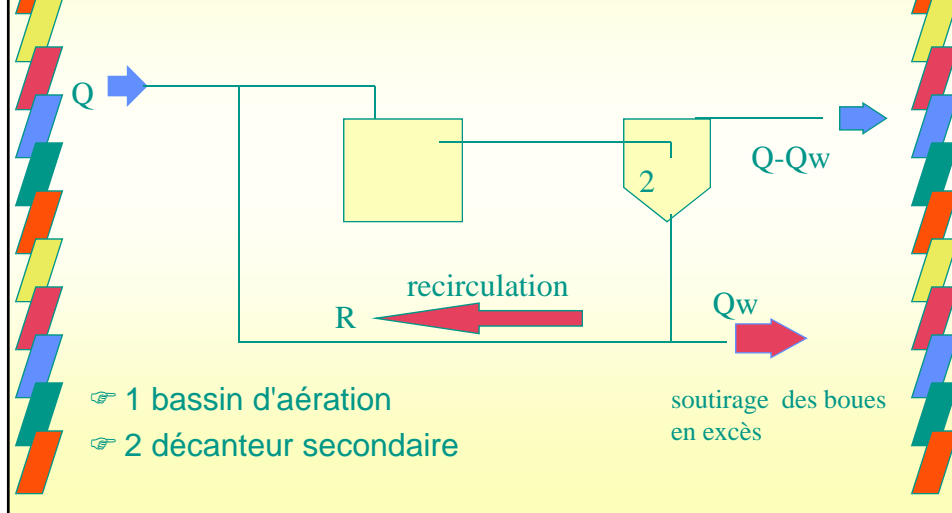
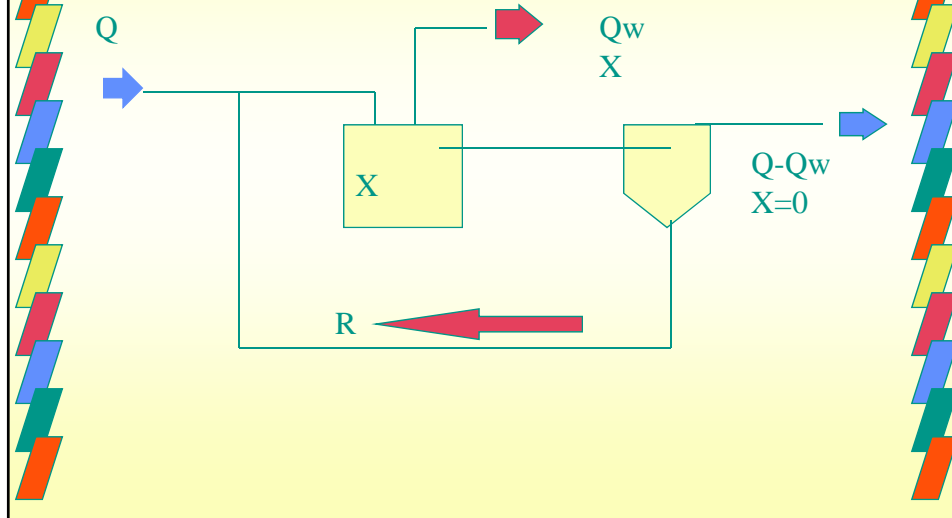


Chapitre 7 : Procédés par boues activées



option avec soutirage des boues directement dans le bassin:

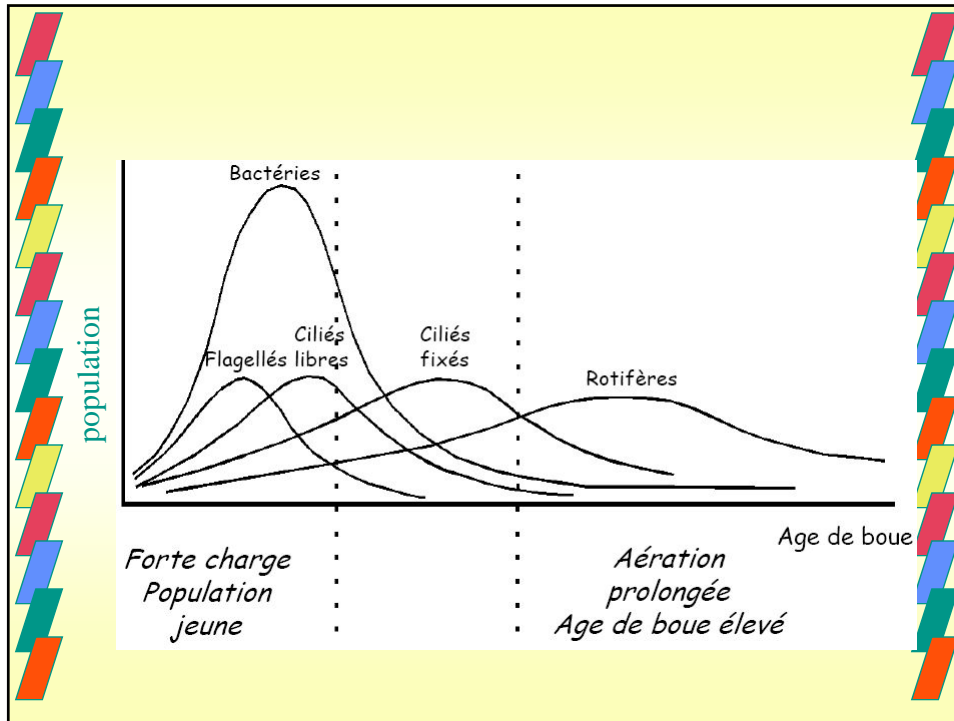


Liqueur mixte: MLSS, MLVSS

- ☞ affluent + boues recirculées = liqueur mixte.
- ☞ caractérisée
 - par une concentration en solide en suspension: MLSS
 - ou par une concentration en solide volatils en suspension: MLVSS
- ☞ MLSS ou MLVSS sont directement reliés à la quantité de biomasse présente

Micro-organismes des boues activées

- ☞ le peuplement est fonction de l'âge des boues
- ☞ bactéries, zooflagellés, ciliés libres, ciliés fixés, rotifères
(les plus gros mangent les plus petits)
- ☞ voir figure p 7-1.2



Charge massique (F/M)

(Food/Micro-organisms)

$$F / M = \frac{S_0 Q}{V X} = \frac{S_0}{\theta X}$$

<ul style="list-style-type: none"> ☞ (F/M) ☞ V ☞ X ☞ Q ☞ S₀ ☞ 	<p>charge massique [masse de DBO₅/unité de temps / (masse de MLSS)]</p> <p>volume de liqueur mixte dans le réacteur (m³)</p> <p>concentration en solide (ou solide volatil) de la liqueur mixte (mg/L) = (g/m³)</p> <p>débit de l'affluent (m³/jour)</p> <p>concentration en substrat de l'affluent (mg/L) = (g/m³)</p> <p>temps de rétention hydraulique défini par</p> $\theta = \frac{V}{Q}$
---	--

charge volumique , C.V.

$$C.V. = \frac{S_0 Q}{V}$$

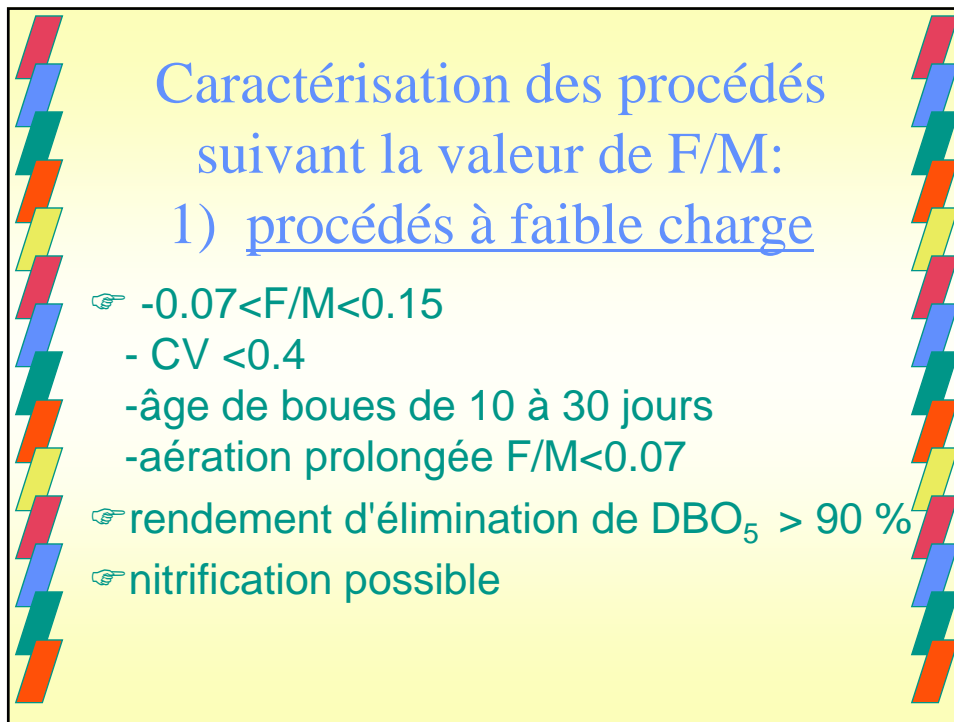
☞ C.V.: masse de DBO₅/m³ de liqueur mixte. unité de temps

Âge des boues ou temps de séjour

$$\theta_c = \frac{V X}{Q_w X_w}$$

Masse de boues dans le bassin
Débit massique de soutirage

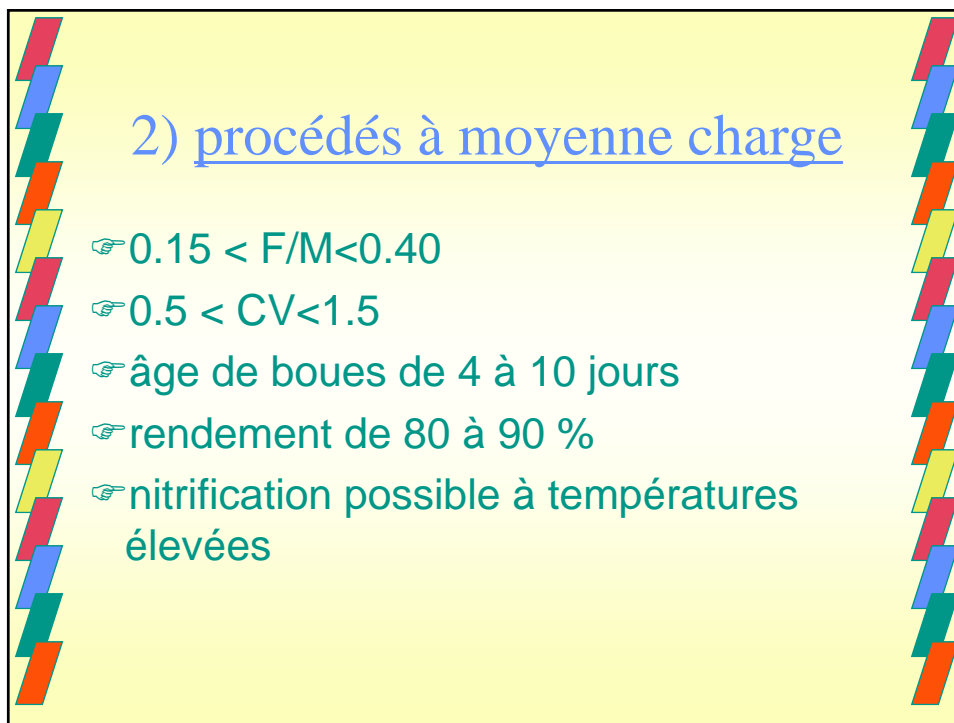
- ☞ V volume de liqueur mixte dans le réacteur (m³)
- ☞ X concentration en solide (ou solide volatil) de la liqueur mixte (mg/L)
- ☞ Q_w débit d'évacuation des boues (m³/h)
- ☞ X_w concentration en solide (ou solide volatil) des boues soutirée (mg/L)
- ☞ θ_c âge des boues (h)



Caractérisation des procédés
suivant la valeur de F/M:

1) procédés à faible charge

- ☞ $-0.07 < F/M < 0.15$
- CV < 0.4
- âge de boues de 10 à 30 jours
- aération prolongée $F/M < 0.07$
- ☞ rendement d'élimination de $DBO_5 > 90 \%$
- ☞ nitrification possible



2) procédés à moyenne charge

- ☞ $0.15 < F/M < 0.40$
- ☞ $0.5 < CV < 1.5$
- ☞ âge de boues de 4 à 10 jours
- ☞ rendement de 80 à 90 %
- ☞ nitrification possible à températures élevées

3) Procédés à fortes charges

- ☞ $0.4 < F/M < 1.2$
- ☞ $1.5 < CV < 3$.
- ☞ âge de boues 1.5 à 4 jours
- ☞ rendement $< 80\%$

7.2 Modèle pour réacteur batch parfaitement mélangé avec cinétique de pseudo 1er ordre

- ☞ substrat et biomasse sont initialement introduits dans le réacteur
- ☞ on souhaite prédire la variation dans le temps des concentrations.
- ☞ Le bilan sur le substrat S (exprimé en COT, ou DBO_5 ou MLSS ou MLVSS) s'écrit:

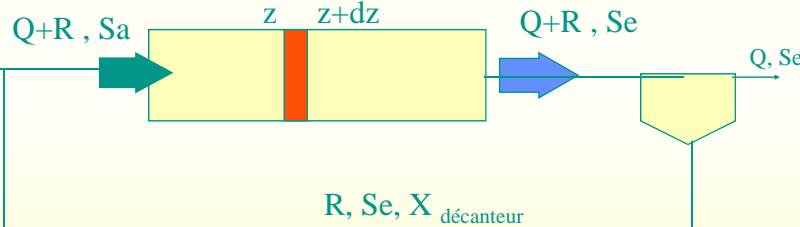
$$\frac{dS}{dt} = -K X S \quad \Rightarrow \quad \frac{S_t}{S_0} = e^{-K \bar{X} t}$$

- ☞ X ne varie pas trop et on le suppose constant \bar{X}

7.2 (suite) Constantes de vitesse

- ☞ On peut déterminer facilement les constantes de vitesse par mesure en laboratoire. On trace la variation $\text{Log } S(t)$ vs (x,t) : si c'est une droite alors on a bien une cinétique du pseudo-premier ordre et la pente vaut $(-K)$.
- ☞ valeurs de K en $L/(g\text{-MLVSS}\cdot h)$ pour divers effluents à 25°C (tableau p7-3.1)
 - pâte et papier 0.375, 0.528
 - raffineries 0.5, 0.6
 - pétrochimie 0.6-1.3
 - eaux urbaines 1.717

7.3 Modèle pour un écoulement piston en régime permanent avec cinétique pseudo-premier ordre



- ☞ bilan en substrat sur le volume $A \cdot dz$
 A , section du réacteur

Bilan sur le substrat:

$$(Q + R)[S(z) - S(z + dz)] - K \bar{X} S(z) A dz = 0$$

$$\frac{dS}{dz} = -K \bar{X} S \frac{A}{Q + R}$$

$$\frac{dS}{S} = -K \bar{X} \frac{A}{Q + R} dz$$

$$\text{Ln} \frac{S_e}{S_a} = -K \bar{X} \frac{AL}{Q + R} = -K \bar{X} \theta$$

Temps de rétention hydraulique
de la liqueur mixte = $V/(R+Q)$

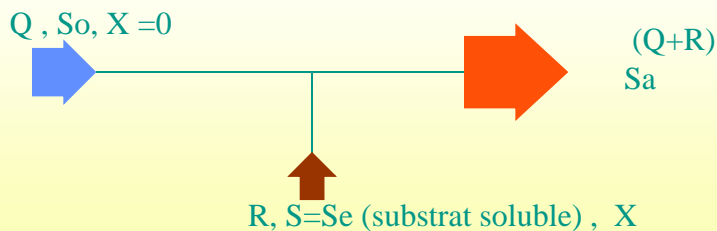
$$\frac{S_e}{S_a} = e^{-K \bar{X} \theta}$$

7.3 écoulement piston (suite)

☞ Calcul de la concentration en substrat S_a

☞ bilan en substrat avant et après mélange
avec la recirculation des boues:

$$Q \cdot S_o + R \cdot S_e = (Q + R) S_a$$

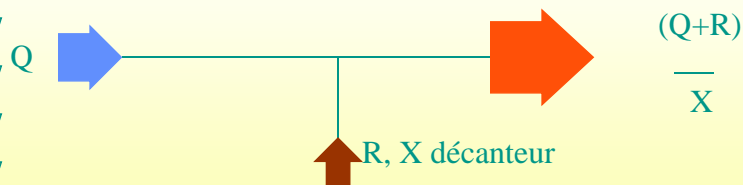


7.3 (suite) Concentration en biomasse dans le réacteur

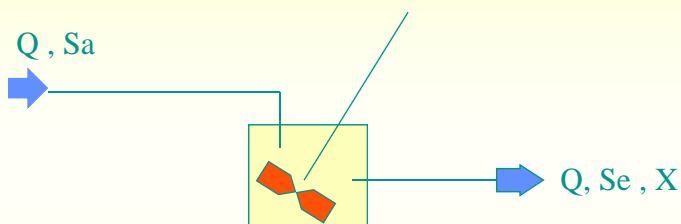
☞ variable de design (on la fixe à une certaine valeur)

☞ bilan sur la biomasse:

$$Q \cdot (0) + R \cdot X_{\text{décanteur}} = (Q+R) \bar{X}$$



7.4 Modèle pour un réacteur CSTR en régime permanent avec cinétique du pseudo-premier ordre sans recyclage



bilan sur substrat

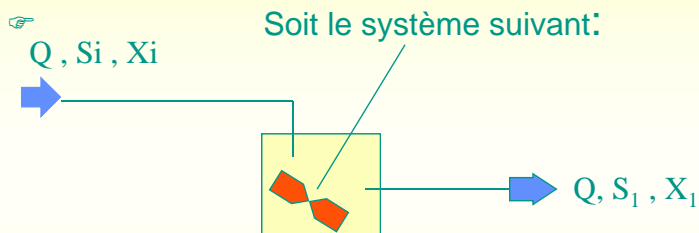
$$Q(S_a - S_e) - VKX S_e = 0 \Rightarrow S_a - S_e = \frac{V}{Q} KX S_e$$

$$S_a - S_e = \theta KX S_e \Rightarrow \frac{S_a - S_e}{X\theta} = K S_e$$

7.4 (suite) Étude cinétique:

À partir d'expérience au laboratoire, on peut étudier le comportement du réacteur pour différentes conditions d'opération. Si le tracé de $(S_a - S_e)/(X \cdot \theta_i)$ vs S_e est linéaire, alors la cinétique est bien du pseudo-premier ordre et la pente de la droite vaut K . On trouvera dans le tableau 6.3 les valeurs, non pas de K (en L/mg.hr) mais de (KS_a) en hr^{-1} pour différents effluents

7.5 Modèle pour réacteur CSTR et cinétique de Monod: cas sans recyclage



bilan sur la biomasse:

$$Q(X_i - X_1) + \mu X_1 V - k_e V X_1 = 0 \text{ mais } X_i = 0 \Rightarrow \frac{Q}{V} + k_e = \mu$$

$$\frac{V}{Q} = \theta_i \Rightarrow \mu = \frac{1}{\theta_i} + k_e \quad (a1)$$

Bilan sur le substrat:

$$Q(S_i - S_1) - \frac{V\mu X_1}{Y} = 0 \Rightarrow \mu = \frac{QY(S_i - S_1)}{VX_1}$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{Y(S_i - S_1)}{X_1 \theta_i} = \frac{1}{\theta_i} + k_e \quad (a2)$$

sans recyclage: âge des boues = temps de rétention hydraulique

$$\mu = \frac{Y(S_i - S_1)}{X_1 \theta_c} = \frac{1}{\theta_c} + k_e$$

$$X_1 = \frac{Y(S_i - S_1)}{1 + k_e \theta_c} \quad (a3)$$

Cette dernière équation permet le calcul de la concentration de biomasse nécessaire pour permettre une certaine épuration connaissant les paramètres Y, k_e et l'âge des boues

on introduit dans (a2) l'équation du modèle de Monod avec $S=S_1$ et $\theta_i = \theta_c$

$$\mu = \frac{1}{\theta_i} + k_e \quad (a2)$$

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_1}{K_S + S_1} \right) - k_e \quad (a4)$$

$$\Rightarrow S_1 = \frac{K_S(1 + k_e \theta_c)}{\theta_c(\mu_{\max} - k_e) - 1} \quad (a5)$$

Équations pour le design:



(a3) - (a4) - (a5)

les valeurs de Y et k_e sont obtenues à partir d'expériences: on peut réarranger (a2)

$$\mu = \frac{Y(S_i - S_1)}{X_1 \theta_i} = \frac{1}{\theta_i} + k_e \quad (a2)$$

pour avoir:

$$\frac{S_i - S_1}{X_1 \theta_i} = \frac{k_e}{Y} + \frac{1}{Y \theta_i} \quad \text{de la forme } y = b + mx$$

Le tracé de $(S_i - S_1)/(X_1 \theta_i)$ en fonction de $1/\theta_i$ doit être une droite dont la pente vaut $1/Y$ (Y rendement de conversion) et l'intercepte à l'origine (k_e/Y) .

paramètres du modèle de Monod à partir des expériences:

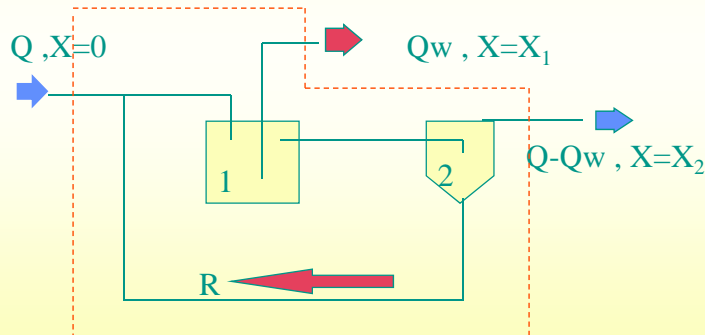
à partir de l'équation (a1) $\mu = \frac{1}{\theta_i} + k_e$ (a1) et de celle de Monod, on peut obtenir l'expression

$$\left(\frac{\theta_i}{1 + k_e \theta_i} \right) S_1 = \frac{K_S}{\mu_{\max}} + \frac{1}{\mu_{\max}} S_1$$

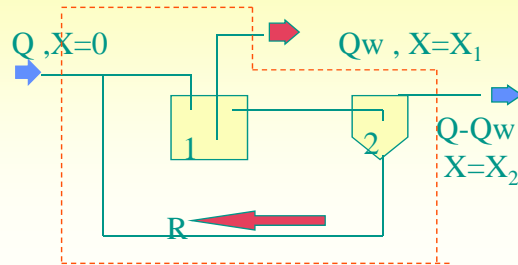
droite $y=f(S_1)$, de pente $1/\mu_{\max}$ (taux maxi de croissance)
d'intercepte K_S/μ_{\max} (constante de Monod)

7.6 Modèle pour réacteur CSTR avec cinétique de Monod: cas avec recyclage

Bilan sur la biomasse (sur pointillé rouge):
[ce qui entre - ce qui sort + ce qui est produit - ce qui disparaît = 0]



bilan sur la biomasse:



$$V \mu X_1 - V k_e X_1 - Q_w X_1 - (Q - Q_w) X_2 = 0$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{Q_w X_1 + (Q - Q_w) X_2}{V X_1} + k_e \quad (b1)$$

Âge des boues:

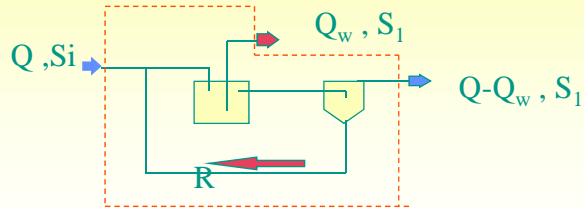
☞ par définition:

$$\theta_c = \frac{V X_1}{Q_w X_1 + (Q - Q_w) X_2} \quad (b2)$$

(b1) s'écrit alors: $\mu = \frac{Q_w X_1 + (Q - Q_w) X_2}{V X_1} + k_e \quad (b1)$

$$\mu = \frac{1}{\theta_c} + k_e \quad (b3)$$

Bilan sur le substrat:



$$Q S_i - Q_w S_1 - (Q - Q_w) S_1 - \frac{V \mu X_1}{Y} \text{ mais } \theta_i = \frac{V}{Q}$$

$$\mu = \frac{Y}{X_1} \left(\frac{S_i - S_1}{\theta_i} \right) \quad (b4)$$

Équations (suite)

☞ de b3 et b4 on en déduit:

$$X_1 = \frac{\theta_c Y (S_i - S_1)}{\theta_i (1 + k_e \theta_c)} \quad (b5)$$

$$\theta_i = \frac{\theta_c Y (S_i - S_1)}{X_1 (1 + k_e \theta_c)} \quad (b6)$$

équations (suite)

☞ on utilise l'expression du modèle de Monod dans (b3):

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S_1}{K_S + S_1} \right) - k_e \quad (b7)$$

$$\Rightarrow S_1 = \frac{K_S(1 + k_e \theta_c)}{\theta_c(\mu_{\max} - k_e) - 1} \quad (b8)$$

Équations de design du bassin

- ☞ S_1 est fixé, μ_{\max} , K_S , Y et k_e sont déterminés par des études cinétiques expérimentales.
- ☞ L'âge des boues est calculé avec (b7).
- ☞ Une valeur de X_1 étant fixée, la relation (b6) donne la valeur du temps de rétention hydraulique et on en déduit le volume du réacteur $V=Q \cdot \theta$;

Études cinétiques:

☞ des relations b3 et b4, on déduit

$$\frac{S_i - S_l}{X_l \theta_i} = \frac{k_e}{Y} + \frac{1}{Y} \frac{1}{\theta_C}$$

☞ A partir de plusieurs expériences à différentes valeurs de θ_C , le tracé de $(S_i - S_l)/(X_l \theta_i)$ en fonction de $1/\theta_C$ doit être une droite dont la pente vaut $1/Y$ et l'intercepte à l'origine

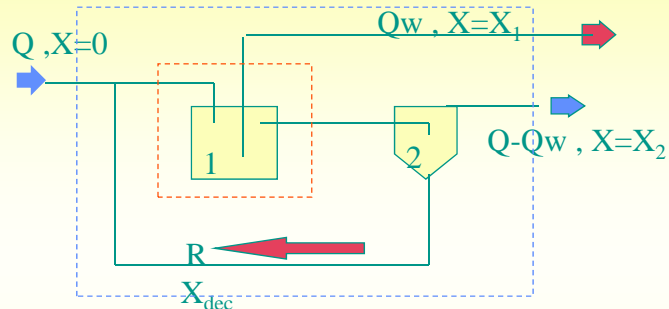
$$\frac{S_i - S_l}{X_l \theta_i} = \frac{k_e}{Y} + \frac{1}{Y} \frac{1}{\theta_C} \quad \text{de la forme } y = b + mx$$

Études cinétiques (suite)

☞ De même à partir de l'équation (b3) et de celle de Monod, on peut obtenir l'expression d'une droite de pente $1/\mu_{\max}$ et d'intercepte K_S/μ_{\max} :

$$\left(\frac{\theta_C}{1 + k_e \theta_C} \right) S_l = \frac{K_S}{\mu_{\max}} + \frac{1}{\mu_{\max}} S_l$$

Débit de recyclage:

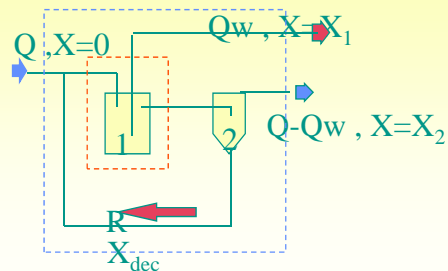


☞ bilan total en biomasse sur pointillé bleu
ce qui est produit - ce qui disparaît = ce qui est soutiré

$$\text{Biomasse production nette} = Q_w X_1 + (Q - Q_w) X_2$$

☞ bilan en biomasse sur pointillé rouge:
in - out + ce qui est produit - ce qui disparaît = 0

recyclage (suite)



$$\text{in} - \text{out} + \text{ce qui est produit (net)} = 0$$

$$R X_{dec} - Q_w X_1 - (Q + R - Q_w) X_1 + (Q - Q_w) X_2 + X_1 Q_w = 0$$

$$R = \frac{(Q - Q_w)(X_1 - X_2)}{(X_{dec} - X_1)} = \frac{Q X_1 - [Q_w X_1 + (Q - Q_w) X_2]}{(X_{dec} - X_1)}$$

recyclage (suite)

en utilisant la définition de l'âge des boues (équation 15)

$$Q_W X_1 + (Q - Q_W) X_2 = \frac{V X_1}{\theta_c}$$

et en utilisant le temps de rétention hydraulique $\theta_i = (V/Q)$:

Remarque: expression valable aussi pour soutirage en pied de décanteur

$$\frac{R}{Q} = \frac{1 - \frac{\theta_i}{\theta_c}}{\frac{X_{dec}}{X_1} - 1}$$

7.7 Écoulement piston et modèle de Monod

☞ équations b5 et b6 valables

☞ âge de boues:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{\mu_{\max} (S_i - S_1)}{(S_i - S_1) + CK_S} - k_e$$

$$\text{avec } C = (1 + \alpha) \text{Ln} \frac{\alpha S_1 + S_i}{(1 + \alpha) S_1} \text{ et } \alpha = \frac{R}{Q}$$

piston (suite)

☞ si $\theta_c < 1$ alors:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{\mu_{\max} (S_i - S_l)}{(S_i - S_l) + K_S \text{Ln}\left(\frac{S_i}{S_l}\right)} - k_e$$

7.8 Modèle cinétique avec limitation d'oxygène:

☞ Les modèles précédents supposent une concentration d'oxygène suffisante pour ne pas être limitante. Dans le cas où les variations de teneurs en oxygène sont importantes, on peut utiliser un modèle de croissance qui introduit en plus du substrat un effet de l'oxygène comme le modèle (IAWPRC)

International Association on Water Pollution Research and Control

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{C_o}{K_o + C_o}$$

7.9 Production de boues:

☞ Il est important de connaître la quantité de boues produites par un procédé car il faudra être capable d'en disposer. Pour l'exemple du paragraphe 7.6, la quantité de boues soutirée est donnée par le produit ($Q_w X_1$) Celui-ci peut s'exprimer à l'aide de la relation (b1) en supposant que X_2 est proche de 0:

$$[Q_w X_1] = [\mu V X_1] - [k_e V X_1]$$

or la relation (b4) nous donne

$$[\mu X_1 V] = [Y(S_i - S_1)Q]$$

Production des boues (suite)

☞ on peut donc exprimer la quantité de boues produites en fonction des quantités de substrat consommé et de boues dégradées par les processus endogènes

$$[Q_w X_1] = [YQ(S_i - S_1)] - [k_e V X_1]$$

☞ relation qu'on peut exprimer par:

$$\Delta X_w = Y\Delta S_r - k_e X_{TOT}$$

Besoin en oxygène:

☞ oxygène pour l'oxydation du substrat, la respiration endogène et la nitrification

$$M_{O_2} = Y' \Delta S_r + k_e' X_{TOT} + M_{(O_2 \text{ pour nitrification})}$$

$$Y' = \frac{\text{masse d'O}_2 \text{ consommé pour biodégradation / (unité de temps)}}{\text{masse de substrat enlevé / (unité de temps)}}$$

$$k_e' = \frac{\text{masse de O}_2 \text{ pour respiration endogène / (unité de temps)}}{\text{masse de biomasse}}$$

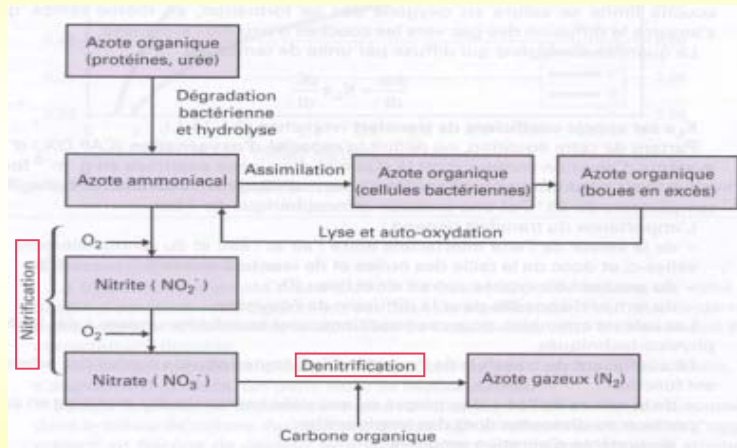
Nitrification-dénitrification

☞ azote sous formes:

- réduites, azote organique et ammoniacal $N - NH_4^+$
- oxydées, nitrites (NO_2^-); nitrates (NO_3^-)

☞ l'azote organique des effluents urbains (urée, acides aminés) est facilement transformé en azote ammoniacal NH_4^+

Nitrification et dénitrification biologique



Nitrification (suite)

☞ azote NH_4^+ dommageable pour l'environnement: l'oxydation de 1 mg de N- NH_4^+ nécessite 4 fois plus d'oxygène qu'un mg de DBO → eutrophication

☞ l'azote consommé pour l'activité biologique est faible

Nitrification (suite)

- ☞ N-NH₄⁺ est oxydé par des bactéries nitrifiantes autotrophes en deux étapes:
- ☞ nitrification -> NO₂⁻ (*Nitrosomonas*)
- ☞ nitrification NO₂⁻ => NO₃⁻ (*Nitrobacter*)
- ☞ nitrification contrôlée

Nitrification (suite)

- ☞ les bactéries autotrophes nitrifiantes ont une vitesse de croissance plus faible que les hétérotrophes
- ☞ nécessité d'avoir des âges de boues élevés

$$\theta_c^{\text{MIN}} = 2.13 e^{0.098(15-T)}$$

θ en jour et T °C

facteur de sécurité de 2.5 recommandé

Fraction de biomasse nitrifiante:

$$f_n = \frac{Y_n N_r}{Y_n N_r + Y S_r}$$

- ☞ Y_n rendement de conversion des nitrifiants (masse de cellules nitrifiantes/masse de substrat azoté)
- ☞ N_r substrat azoté nitrifié enlevé mg/L
- ☞ Y rendement de conversion (masse MLVSS/masse de substrat)
- ☞ S_r substrat carboné enlevé (i.e. DBO_5) mg/L

Vitesse de nitrification:

- ☞ À 20°C, la vitesse de nitrification est de l'ordre de 1.04mg N-NH₄⁺ oxydé par mg de biomasse nitrifiante et par jour. La vitesse globale de nitrification, R_n , est donc donnée à cette température

$$R_n = 1.04 f_n X_v$$

- ☞ R_n vitesse en mg de N-NH₄⁺/L.jour
- ☞ X_v solide volatil dans la liqueur mixte (MLVSS) mg/L

Effet de la température

$$R_n = 1.04 \theta^{(T-20)} f_n X_v$$

avec θ entre 1.03 et 1.15

Teneur en oxygène recommandée OD > 2 mg/L

4.19 kg d'oxygène pour 1 kg de N-NH4

Effets inhibiteurs:

- charges élevées en matière organique
- composés toxiques organiques (voir tableaux 6-10 et 6-11, dont les composés à base de soufre comme la thiourée en particulier connue pour être un violent inhibiteur de la nitrification)
- métaux lourds (Ni, Cu, Pb Ag)

Dénitrification

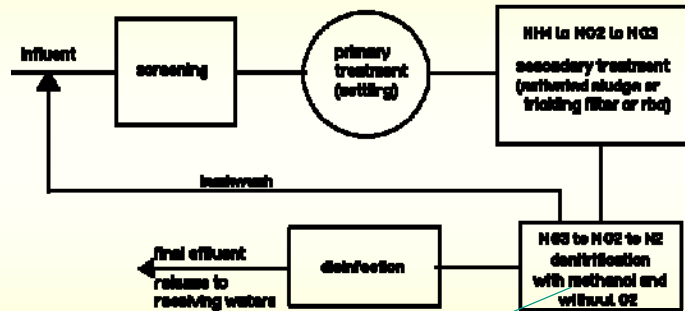
- ☞ certaines bactéries hétérotrophes aérobies facultatives utilisent l'oxygène des nitrates en l'absence d'oxygène dissous (conditions d'anoxie)
- ☞ réduction des nitrates en azote moléculaire relargé dans l'atmosphère

Dénitrification (suite)

$$R_{dn} = K_{dn} X_v 1.09^{(T-20)} (1 - D.O.)$$

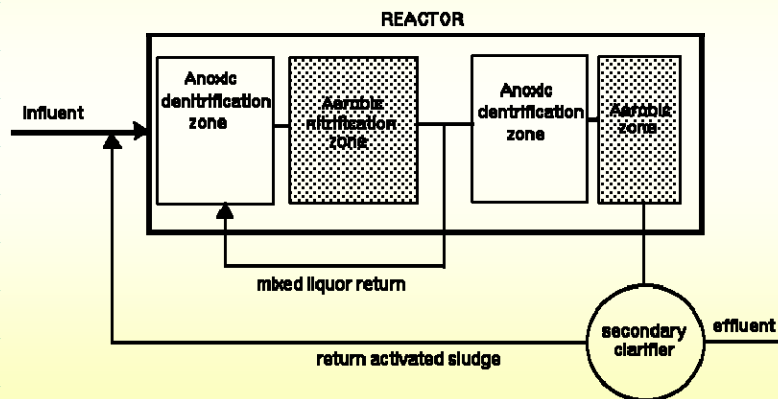
- ☞ K_{dn} vitesse spécifique de dénitrification
mg N-NO₃/ mg de biomasse.jour
- ☞ X_v biomasse mg/L
- ☞ D.O. oxygène dissous inférieur à 1
- ☞ 3 à 5 mg de DBO sont consommés pour enlever 1 mg de N-NO₃ (zone d'anoxie en tête)

Dénitrification: exemple après traitement secondaire



Ajout de méthanol comme source de carbone

Procédé Bardenpho: nitrification + dénitrification 90% d'enlèvement de l'azote (et utilisation du carbone de l'effluent pour la dénitrification)



Schémas de dénitrification

