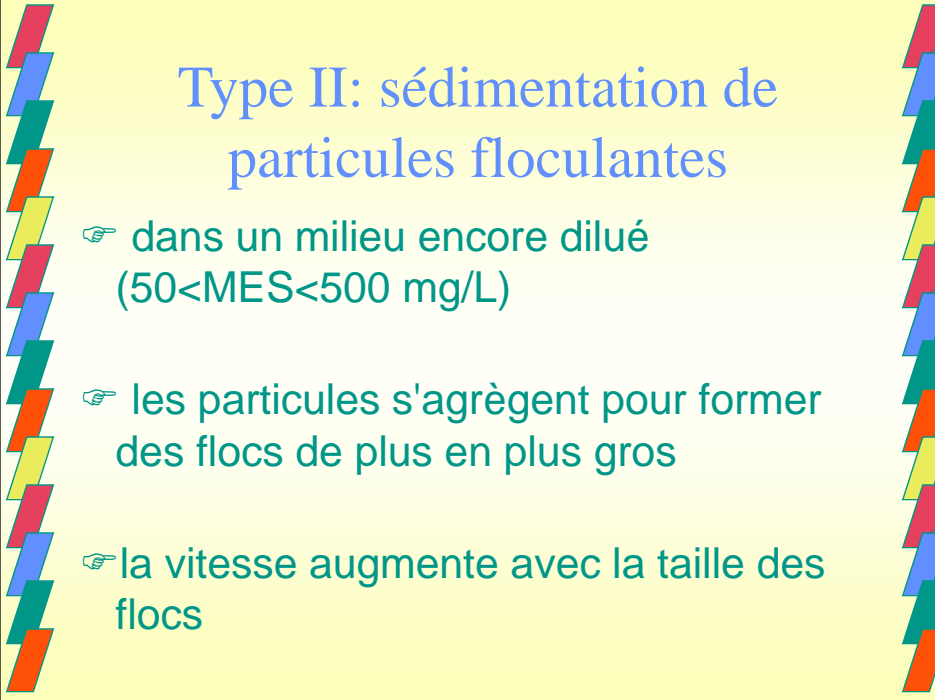


## Chapitre 3: Sédimentation

- ☞ sédimentation ou décantation: procédé d'enlèvement des matières solides décantables en suspension dans l'eau
- ☞ on met à profit les différences de densité entre les phases liquide et solide
- ☞ 4 types de sédimentation

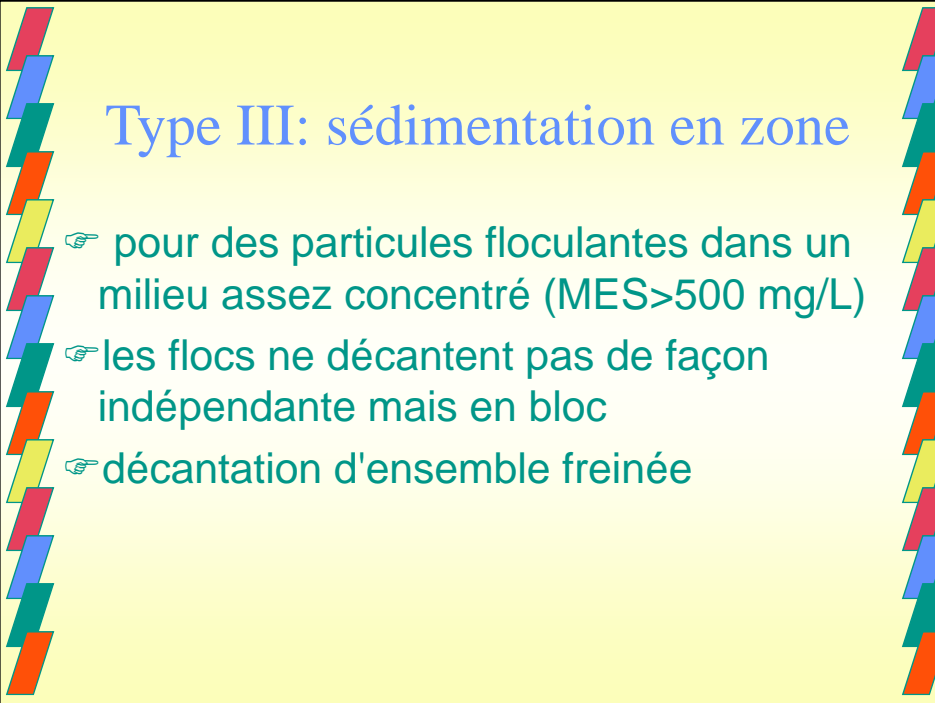
### Type I: sédimentation de particules isolées

- ☞ en milieu dilué, pour des particules non floculantes
- ☞ les particules décantent indépendamment les unes des autres
- ☞ la vitesse de chute des particules est constante: vitesse terminale de chute



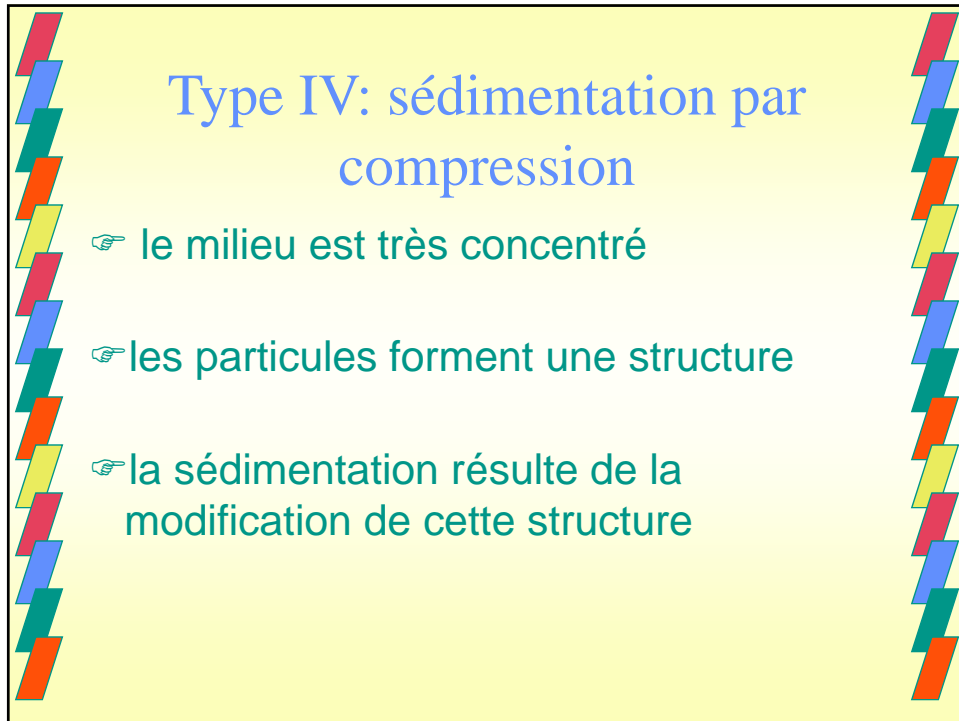
## Type II: sédimentation de particules floculantes

- ☞ dans un milieu encore dilué ( $50 < \text{MES} < 500 \text{ mg/L}$ )
- ☞ les particules s'agrègent pour former des floccs de plus en plus gros
- ☞ la vitesse augmente avec la taille des floccs



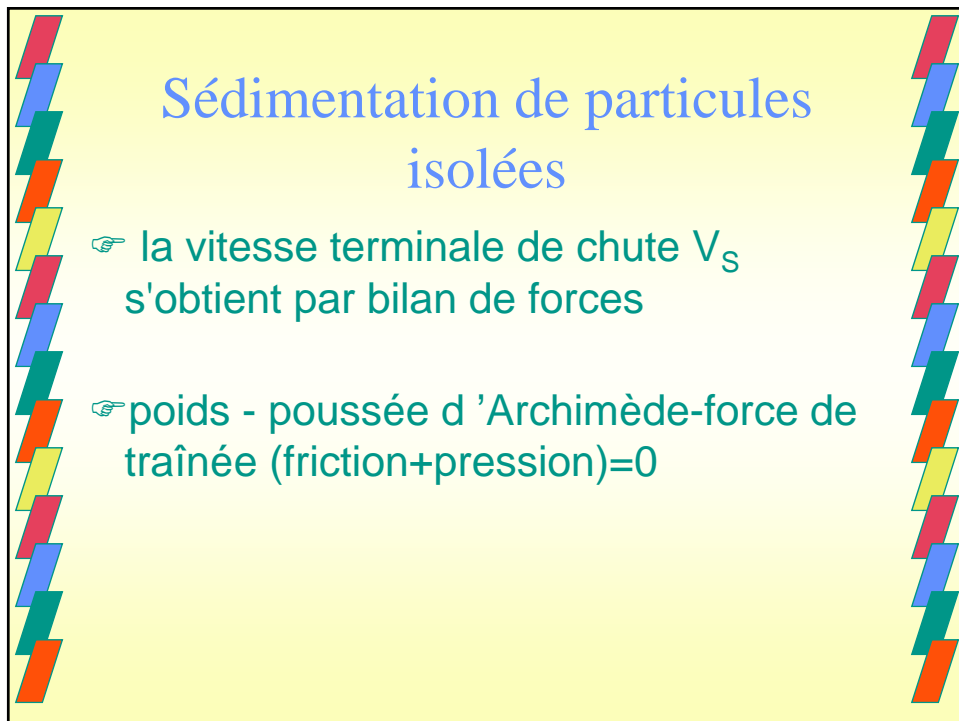
## Type III: sédimentation en zone

- ☞ pour des particules floculantes dans un milieu assez concentré ( $\text{MES} > 500 \text{ mg/L}$ )
- ☞ les floccs ne décantent pas de façon indépendante mais en bloc
- ☞ décantation d'ensemble freinée



### Type IV: sédimentation par compression

- ↳ le milieu est très concentré
- ↳ les particules forment une structure
- ↳ la sédimentation résulte de la modification de cette structure



### Sédimentation de particules isolées

- ↳ la vitesse terminale de chute  $V_s$  s'obtient par bilan de forces
- ↳ poids - poussée d'Archimède - force de traînée (friction + pression) = 0

## Bilan de forces:

$$F_G = (\rho_s - \rho_L)g V_{vol} = F_{Drag} = C_D A \frac{\rho_L V_S^2}{2}$$

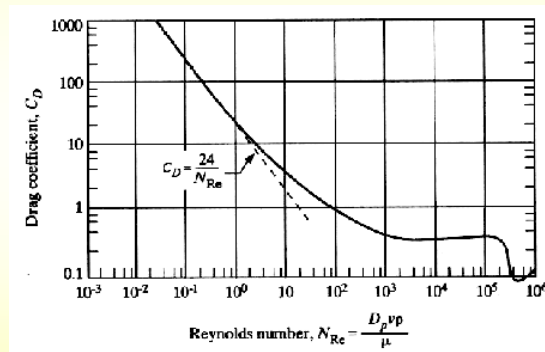
$$V_S = \left[ \frac{2g (\rho_s - \rho_L) V_{vol}}{C_D \rho_L A} \right]^{1/2} = \left[ \frac{4g d (\rho_s - \rho_L)}{3 C_D \rho_L} \right]^{1/2}$$

## Coefficient de traînée $C_D$

$$\Rightarrow C_D = b / (Re)^n$$

- ☞  $Re = \text{nombre de Reynolds} = \rho_L V_S d / \mu_L$
  - ☞  $b$  et  $n$  fonction du régime d'écoulement
  - ☞ laminaire  $Re < 2$        $n=1$     $b=24$
  - ☞ transition  $2 < Re < 500$     $n=0.6$     $b=18.5$
  - ☞ turbulent  $Re > 500$        $n=0$     $b=0.4$
- ☞ voir figure p 3-2.1

## $C_D$ vs Reynolds pour une sphère



## Résolution pour trouver $V_s$ vitesse de sédimentation

- ☞ méthode générale itérative
- ☞ supposer  $V_s$
- ☞ identifier le régime et choisir n et b
- ☞ calculer  $V_s$  et vérifier si valeur égale à l'estimé initial

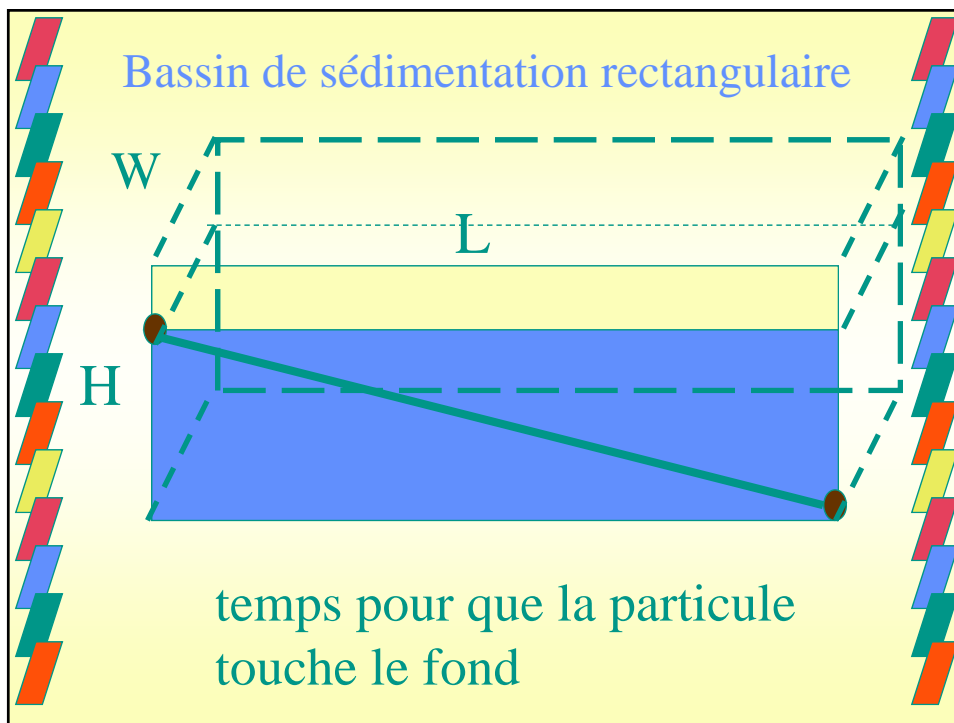
Autre corrélation de Haider et Levenspiel (1989)  
valable aussi pour particule non sphérique:

Diamètre de la sphère  
équivalente de même volume

$$d^* = d_{sph} \left[ \frac{g \rho_L (\rho_S - \rho_L)}{\mu_L^2} \right]^{1/3}$$

$$u^* = \left( \frac{18}{d^{*2}} + \frac{2.3348 - 1.7439\phi}{\sqrt{d^*}} \right)^{-1}$$

Facteur de forme:  
(aire sphère équivalente)/(aire de la particule)

$$V_t = u^* \left[ \frac{g \mu_L (\rho_S - \rho_L)}{\rho_L^2} \right]^{1/3}$$


## Bassin de sédimentation rectangulaire à flux horizontal

- ↳ largeur  $W$ , hauteur  $H$ , longueur  $L$
- ↳ pour une particule:
  - la vitesse horizontale est:  $V_H = Q/(WH)$
  - la vitesse verticale =  $V_S = V_0$
- ↳ la particule sédimente si elle atteint le fond du bassin durant son passage ( $t_R$ )
- ↳ cas limite si la particule arrive à la hauteur  $H$

## les équations:

- ↳  $H = V_0 \cdot t_R$  et  $V_H = Q/(WH)$
- ↳  $L = V_H \cdot t_R = Q/(WH) t_R$
- ↳  $L = Q/(WH) (H / V_0)$
- ↳  $V_0 = Q/(WL) = Q/A$
- ↳  $V_0$  taux de débordement (ou charge hydraulique)

taux de débordement d'un bassin  
ou charge hydraulique,  $V_0$

- ↳ vitesse de sédimentation des particules de plus petite taille qui sont enlevées en totalité lors de leur passage dans le bassin (ne dépend pas de H)
- ↳ les particules dont  $V_s > V_0$  seront enlevées en totalité
- ↳ les particules dont  $V_s < V_0$  seront enlevées dans la proportion  $V_s/V_0$  (si répartition uniforme sur la hauteur)

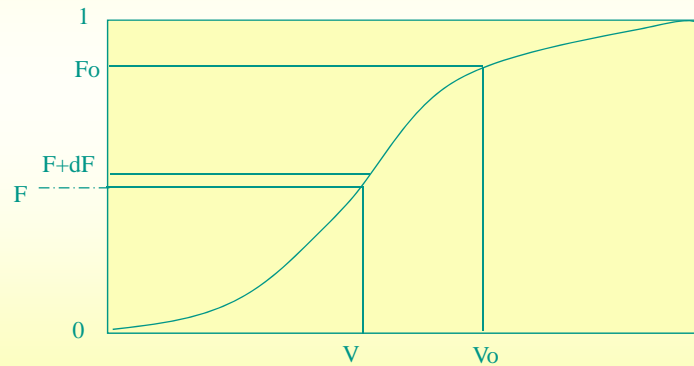
cas de mélange de particules de  
différents diamètres : R fraction enlevée

- ↳  $F(V)$  fraction des particules ayant  $V_s < V$
- ↳ voir figure 9.10 p 3.2.2
- ↳  $F_0 = F(V_0)$ : fraction de particules de  $V_s < V_0$
- ↳  $dF$ : fraction de particules de  $V_s$  comprise entre  $V$  et  $V+dV$

$$R = (1 - F_0) + \int_0^{F_0} \frac{V}{V_0} dF$$

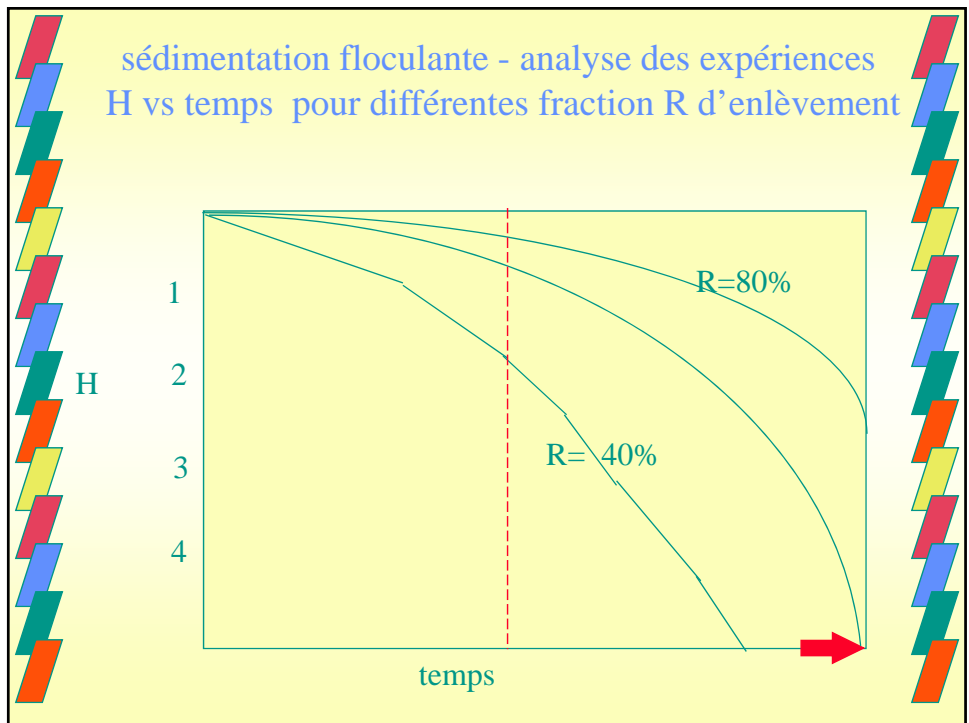
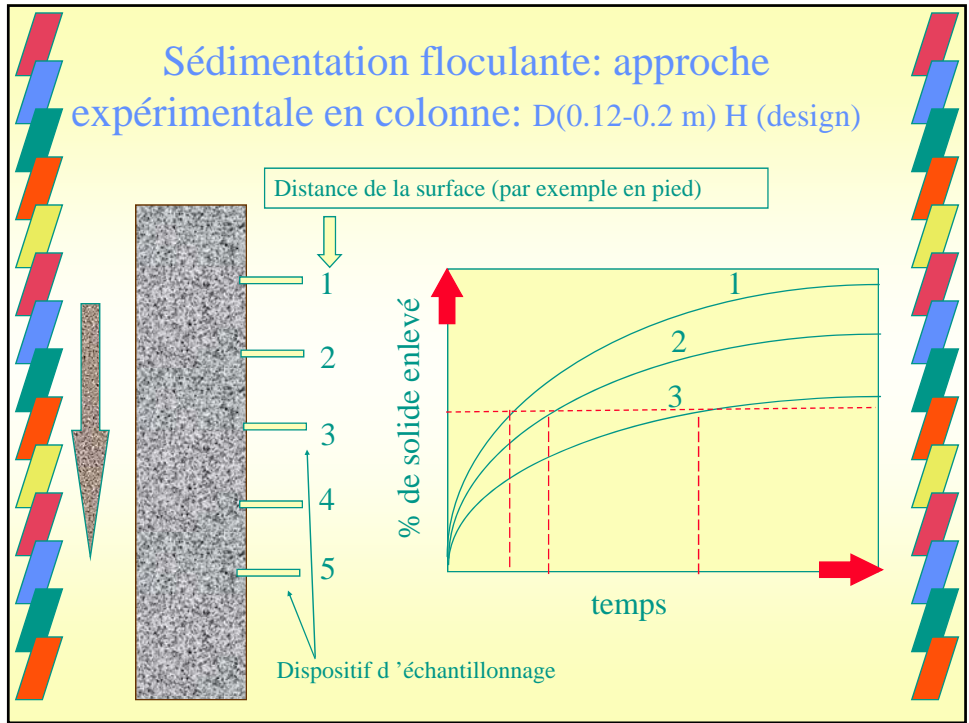


Fraction des particules,  $F$ , ayant une vitesse de sédimentation  $< V$



## Type II: sédimentation de particules floculantes

- ☞ dans un milieu encore dilué ( $50 < \text{MES} < 500 \text{ mg/L}$ )
- ☞ les particules s'agrègent pour former des floccs de plus en plus gros
- ☞ la vitesse augmente avec la taille du floccs, la trajectoire n'est plus rectiligne
- ☞ analyse théorique complexe ....  
=> **essais en laboratoire**



## Sédimentation floculante: approche expérimentale

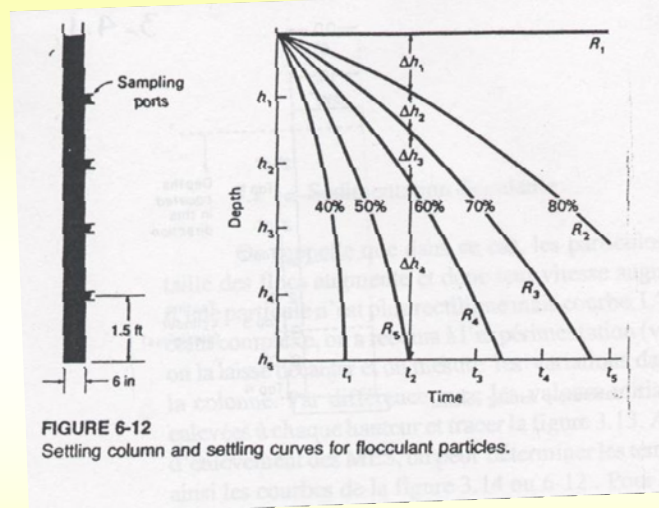
☞ voir figure p 3-4.2

☞ pour chaque temps de sédimentation,  $t_s$

$$R_{H, t_s} = \frac{1}{H} \int_{h=0}^H R(h, t_s) dh$$

$$R_{H, t_s} = \sum_{n=1}^I \frac{\Delta h_n (R_n + R_{n+1})}{H \cdot 2}$$

☞ et tracer la courbe R vs  $t_s$

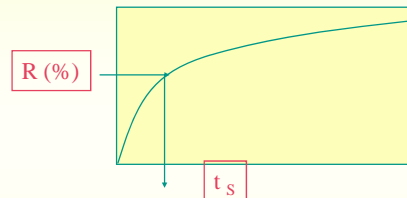


$$R_{H, t_s} = \sum_{n=1}^4 \frac{\Delta h_n (R_n + R_{n+1})}{h_5 \cdot 2}$$

(page 3.4-2)

## courbe R(%) vs $t_s$

☞ pour une valeur de R % fixée par le concepteur, on trouve  $t_s$  (fig.3.16 p3.4.2)



☞ vitesse horizontale x temps = longueur

$$\text{☞ } L = V_H \cdot t_s = Q/(WH) t_s$$

$$\text{☞ } A = L \cdot W \Rightarrow L = A / W = Q/(WH) t_s$$

$$\text{☞ } \star Q/A = V_o \text{ (taux de débordement)} = H/t_s$$

## Facteur de sécurité pour le design

☞ temps de sédimentation = 1.5 à 2  $t_s$

☞ charge hydraulique = 0.65  $V_o$

☞ Surface = débit / charge hydraulique

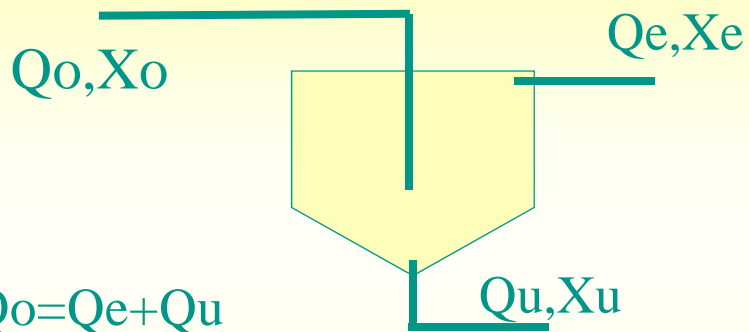
☞  $H(\text{effective}) = \frac{\text{débit} \times \text{temps de sédimentation}}{\text{surface}}$

## Bassin circulaire:

☞ la trajectoire des particules n'est plus rectiligne (fig. p 3.2.)

☞ on peut démontrer que  $V_0=Q/A$   
idem bassin rectangulaire

## Bilan sur un décanteur



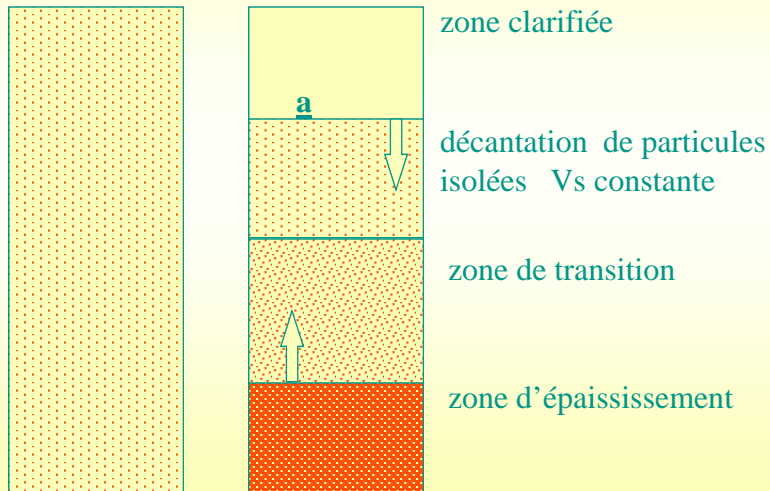
$$Q_o = Q_e + Q_u$$

$$Q_o X_o = Q_e X_e + Q_u X_u$$

$$X_e \sim 0$$

### 3.4 Décantation en zone

☞ dans un milieu concentré MES > 500 mg/L



### Décantation:

☞ clarification: on veut obtenir un effluent sans MES

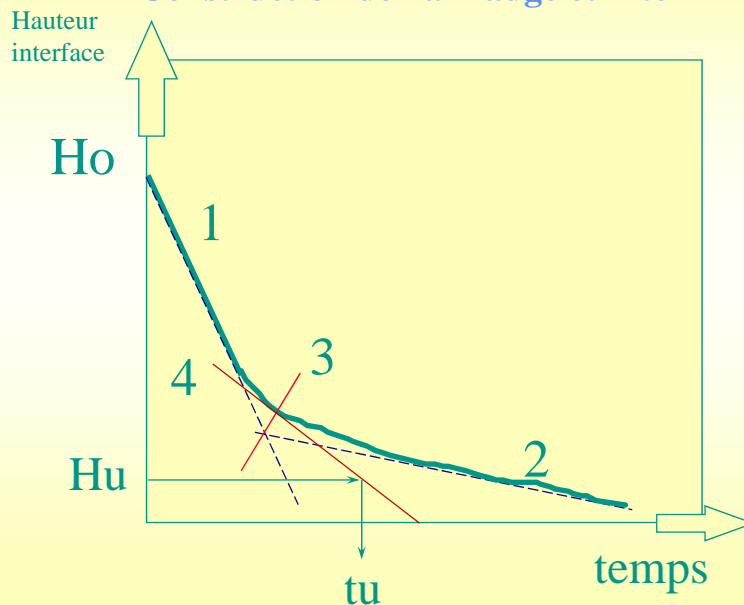
☞ épaississement: on veut obtenir en pied de décanteur une boue aussi concentrée que possible (souvent étape contrôlante dans le design)

## Méthodes de dimensionnement

### ☞ Méthode 1 de Talmadge et Fitch

- 1) on fait une expérience de sédimentation en colonne et on trace la variation de la hauteur de l'interface  $a$  vs  $t$  (courbe C)
- 2) construction graphique
  - bissectrice B aux 2 droites (*extrapolées dans les zones linéaires de C*)
  - tangente à la courbe au point d'intersection de B et C
- 3) on trouve  $t_u$  pour  $H=H_u=H_o C_o/C_u$
- 4)  $A=Q_o \cdot t_u/H_o$

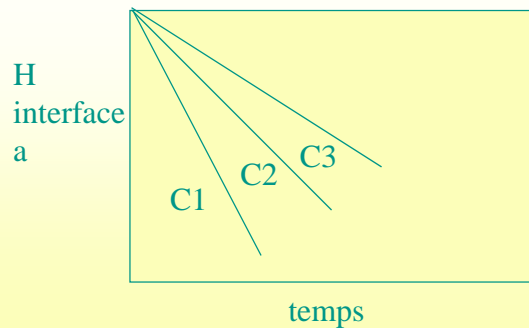
## Construction de Talmadge et Fitch



## Méthodes de dimensionnement

### ➔ Méthode 2 avec la théorie des flux

On a besoin de plusieurs expériences de sédimentation en colonne pour différentes charges en solide ( $C_1 < C_2 < C_3$ ) et on trouve  $V_s$

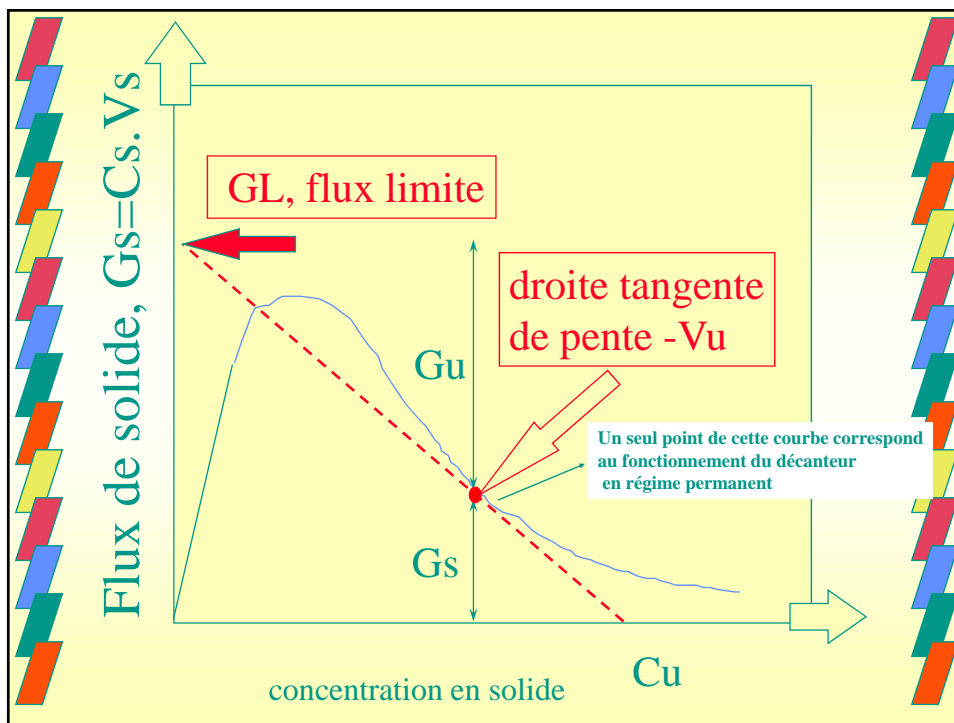


## Théorie des flux

- ➔ le déplacement vers le bas des solides résulte de 2 contributions
- ➔ la sédimentation:  $G_s = C_s \cdot V_s$
- ➔ le soutirage en pied de décanteur  
 $G_u = C_s \cdot V_u$  ( $V_u = Q_u / A$ )
- ➔ flux total =  $G_T = C_s V_s + C_s V_u$
- ➔ il y a un flux limite  $G_L$
- ➔ Calcul:  $A = Q_0 C_0 / G_L$



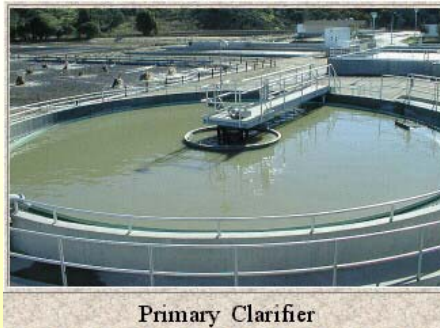
- ☞ dans le bas du décanteur la vitesse de sédimentation étant négligeable alors le flux total de solide est donné par  $C_u V_u$
- ☞ la résolution du problème revient à trouver la valeur  $V_u$  qui satisfait l'équation des flux:  $C_u V_u = C_s V_s + C_s V_u$
- ☞ graphiquement, on trace la droite passant par  $(C_u, 0)$  et tangente à la courbe  $G_s$  vs  $C$ , sa pente est  $(-V_u)$  et son intersection avec l'axe  $y$ =flux limite  $G_L$



## Les équipements de décantations

- ☞ décanteurs rectangulaires ou circulaires avec un dispositif de raclage pour enlever les boues (voir figure 3.32)
- ☞ diamètre 10 -60 m, H 3-5 m

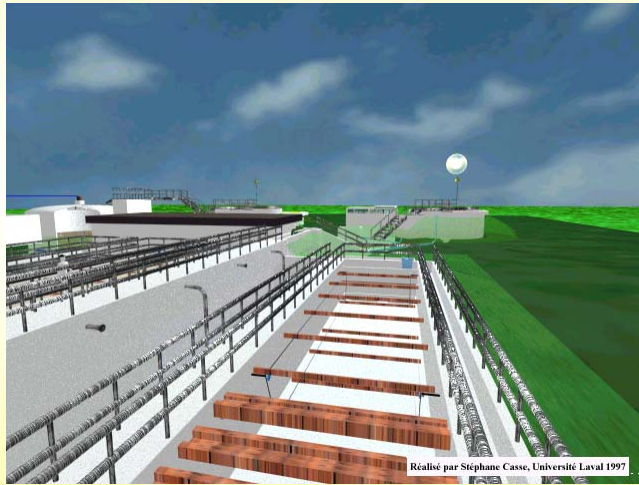
<http://www.ci.camarillo.ca.us/csd/pritreat.html>



## Décanteur horizontal:

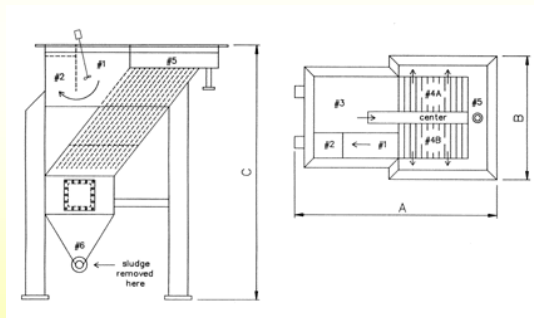


## Décanteur horizontal:



## Les équipements de décantations

- ☞ décanteurs lamellaires: ajout de surface de décantation (fig. p3.7.3) Cas des procédés physico-chimiques (ex: usine d'eau potable de Ste Foy)

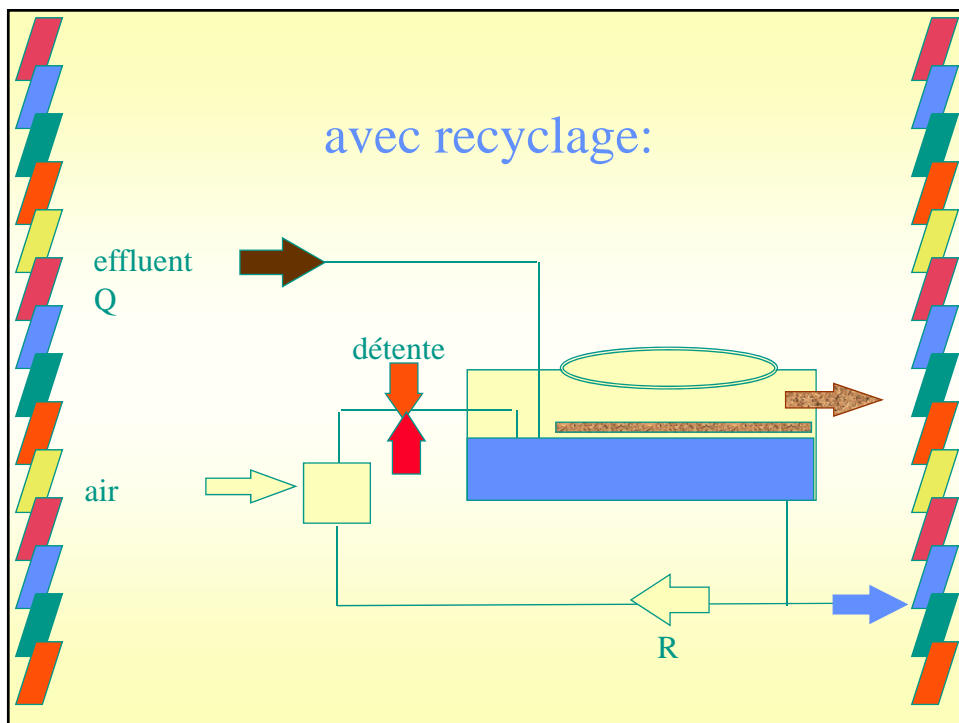
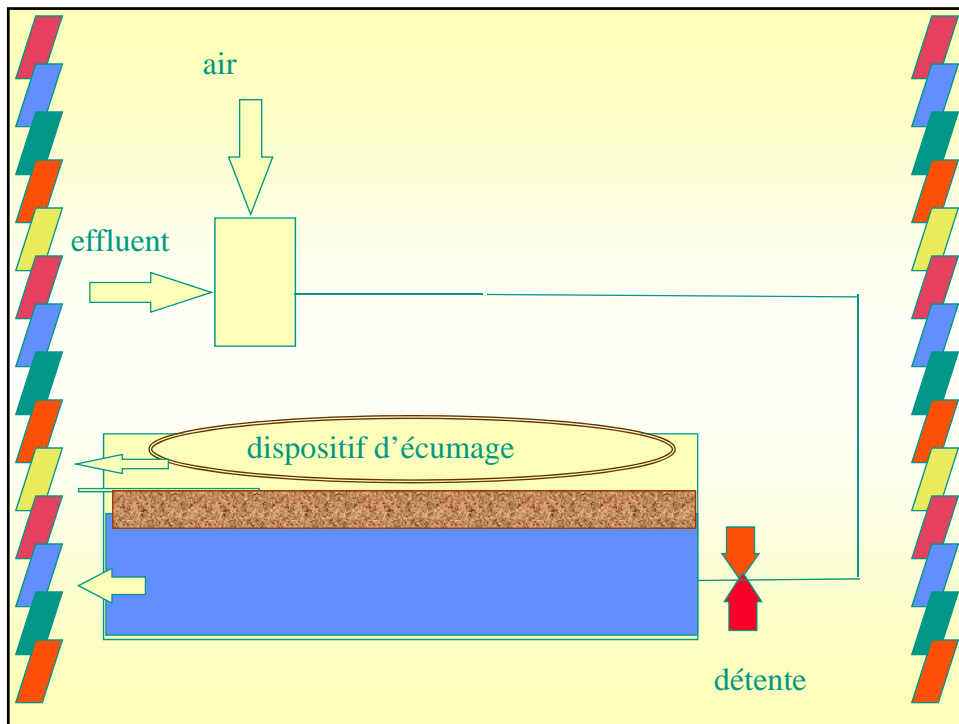


## Flottation à air dissous (FAD)

- ☞ L'effluent est mis sous pression (de 3.4 à 4.8 atm) en présence d'air qui se solubilise. Par détente, l'air dissous est relargué sous forme de petites bulles de gaz (30-80  $\mu\text{m}$ ) auxquelles certaines MES peuvent s'attacher et être ainsi entraînées dans l'ascension.

## Flottation à air dissous (suite)

- ☞ Le système peut fonctionner avec ou sans recyclage. (voir figure)  
Le recyclage évite de soumettre l'effluent aux conditions de pressurisation qui peuvent endommager la qualité de certains floccs.
- ☞ L'effluent clarifié est récupéré en pied de l'unité de flottation.



## Flottation à air dissous (FAD)

pour enlever ou récupérer dans des eaux usées industrielles:

- ☞ fibres
- ☞ huiles minérales ou végétales
- ☞ graisses, protéines
- ☞ des pigments
- ☞ algues (lagunage)
- ☞ hydroxydes métalliques

## Exemple de récupération de produits valorisables

Industrie	Produit récupéré valorisable	Paramètres de fonctionnement		Rendement de récupération
		vitesse m/h	% de recirculation	
Raffineries de pétroles	hydrocarbures	3-8	15-25	>90
Papeteries	fibres	4-8	15-30	85-90
Huileries	corps gras	2-4.5	10-20	75-99
Abattoirs	graisses et protéine	1-3	30-50	80-95
Fabriques de gélatine	graisses	3-6	10-20	85-95

## Flottation:

☞ l'air relargué est fonction de la pression P ( $P_a = P_{\text{atmosphérique}}$ )

$$s = s_a \frac{P}{P_a} - s_a \quad [mL / L]$$

voir solubilité  $S_a$  au tableau p 3.10

☞ pour une eau usée facteur f (0.85-0.9)

$$s = s_a \left( \frac{fP}{P_a} - 1 \right) \quad [mL / L]$$

☞ avec  $P_a = 1$  en atm.:

$$s = s_a (fP - 1) \quad [mL / L]$$

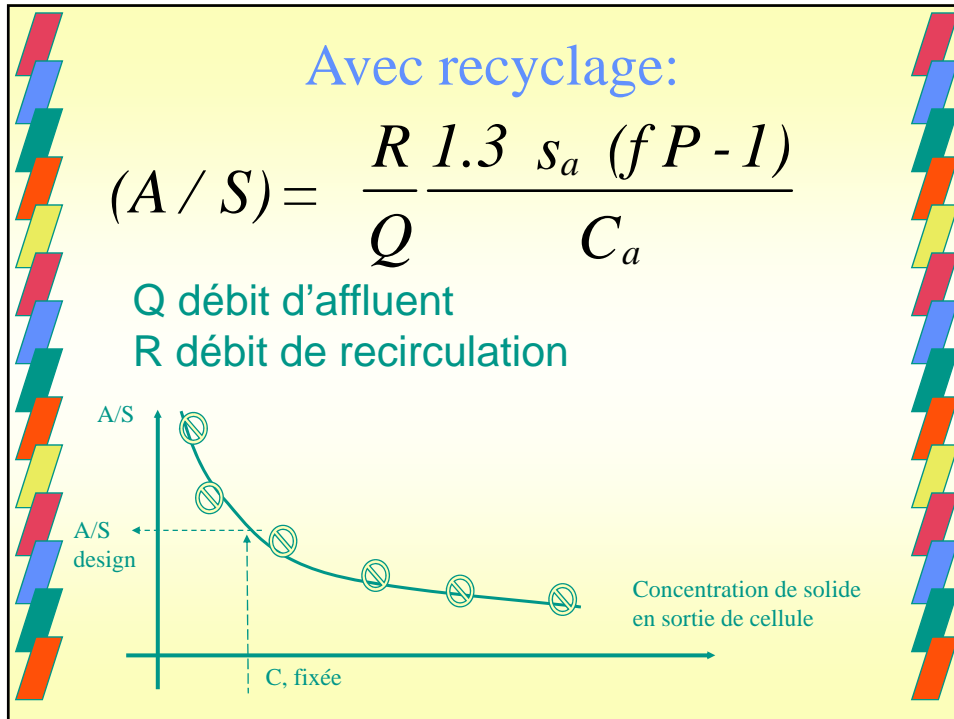
☞ caractéristique d'une cellule A/S

A = Air relargué mg/L      S = Solide mg/L

$$(A / S) = \frac{1.3 s_a (fP - 1)}{C_a}$$

(mg d'air relargué /L) / (mg de solide/L)

masse volumique de l'air: environ 1.3 mg/mL d'air



- Surface,  $A_c$ , d'une cellule de flottation
- ☞ Débit à traiter  $Q$  ( $m^3/h$ )
  - Charge hydraulique:  $V_0$  ( $m^3/m^2 \cdot h = m/h$ )
  - ☞ Sans recirculation  $A_c = Q/V_0$
  - ☞ Avec recirculation  $A_c = (Q+R) / V_0$



## Compagnie Mabarex: Procédé de flottation pour abattoir



[http://www.mabarex.com/3\\_3a3\\_6a.html](http://www.mabarex.com/3_3a3_6a.html)

Lunenburg (Nouvelle-Écosse) - 13 septembre 2003

### OUVERTURE DE L'USINE DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Lunenburg a ouvert officiellement son usine de traitement des eaux usées qui a coûté 7,3 millions de dollars. L'installation quand elle sera entièrement opérationnelle, éliminera environ 90 pour cent de bactéries et d'autres contaminants qui se déversent dans le port. Environ 2,27 millions de litres des eaux usées brutes sont déversées dans l'eau chaque jour. C'est la première usine au Canada à employer un système de flottation à l'air dissous, dans lequel les bulles d'air font flotter la boue à la surface pour traiter les eaux usées brutes. Le site de traitement, une ancienne décharge de la ville à l'extrémité de la rue Starr ne se situe pas dans la partie résidentielle de la ville, comme prévu auparavant.

Les gens se sont opposés à cette idée vue que l'usine aurait été trop près des maisons. Le remplacement de l'usine a augmenté le prix par 1 million de dollars. Ottawa a contribué avec 1,7 millions de dollars au projet, et la province avec environ 2,5 millions de dollars. Le fonds d'investissements écologique municipal a fourni un prêt de 1,2 millions de dollars à un taux d'intérêt réduit. La balance sera rééquilibrée par des frais annuels d'assainissement de 200 \$ par maison.

[http://www.cwwa.ca/pdf\\_files/octobre03.pdf](http://www.cwwa.ca/pdf_files/octobre03.pdf)

## Exemple de FAD chez Cascades (1/3)

Ref. Léon Marineau conférence du 1<sup>er</sup> novembre 2006

[http://cemr.ca/ici\\_photos/Contenu/conferences.html](http://cemr.ca/ici_photos/Contenu/conferences.html)

Plus de 35 équipements FAD en fonction qui, jumelés à d'autres technologies d'épuration efficaces, ont permis:

- ☞ De maximiser la réutilisation de l'eau clarifiée dans des applications aussi restrictives que pour les douches des machines à papier.
- ☞ De rejeter 1,1 kg/t de MES comparativement à 3,0 kg/t pour l'industrie canadienne.  
Entrée: 500 à 5000 ppm Sortie: 10 à 150 ppm  
Efficacité d'enlèvement typique: 90 - 97%
- ☞ D'économiser de l'énergie sur le chauffage de l'eau
  - ☞ T° de l'eau fraîche (eau de rivière): 5-15°C
  - ☞ T° de l'eau de procédé: 40-55°C
- ☞ De réutiliser jusqu'à 40 fois la même eau avec le rejet à l'effluent final.
- ☞ De réduire nos consommations d'eau à un débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/t versus 55 m<sup>3</sup>/t pour l'industrie dont:
  - ☞ 14 usines avec moins de 10 m<sup>3</sup>/t
  - ☞ 7 usines avec moins de 5 m<sup>3</sup>/t

## FAD chez Cascades (2/3): avantages

- ☞ Équipement beaucoup plus compact et plus facile à intégrer dans une usine existante sans être obligé de construire de nouvelles bâtisses.
- ☞ Équipement préfabriqué qui s'installe très rapidement.
- ☞ En installant un FAD à côté de l'endroit où est produite l'eau blanche, on agit à la source avant que cette eau soit mélangée avec d'autres eaux (réduction à la source).

### FAD chez Cascades (3/3) inconvénients

- ☞ Ajout de produits chimiques pour flocculer les particules
  - ☞ 0,02 à 0,15\$/m<sup>3</sup> dépendamment des applications
- ☞ Ajout d'air dissous ce qui requiert de l'énergie
  - ☞ 0,1 à 0,2 kW / m<sup>3</sup>
  - ☞ un peu moins de 0,005\$ / m<sup>3</sup>
- ☞ Peu de capacité tampon lors de variation soudaine de débit.