



AGITATION - MELANGE

(Substances liquides et molles)

Prof. Koffi Armand
Professeur de Pharmacotechnie
Expert-Consultant de l'industrie pharmaceutique et cosmétique

Objectifs pédagogiques

- Mettre en œuvre une opération de mélange de substances liquides et molles aux échelles de laboratoire et industrielles;
- Choisir les équipements d'agitation adaptés aux opérations de mélange à réaliser;
- Réaliser les transpositions d'échelles du laboratoire aux ateliers pilote et industrielle ;
- Calculer les paramètres d'agitation;
- Réaliser les contrôles et la validation des opérations de mélange des formes liquides et molles.

Plan

- 1. Opérations de mélange**
- 2. Définition d'un système d'agitation**
- 3. Paramètres globaux d'un système d'agitation**
- 4. Paramètres locaux d'un système d'agitation**
- 5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation**
- 6. Choix du matériel d'agitation**
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage**

INTRODUCTION

NOTIONS GENERALES DE MELANGE

Pourquoi faire ?

- Mélange des liquides miscibles, visqueux ou non
- Homogénéiser
- Améliorer une opération
 - transfert de chaleur, refroidissement
 - favoriser le contact entre réactifs ou phases non miscibles

Avec quoi ?

- Agitateur (élément suspendu en rotation)
- Mélangeur statique
- Autres techniques : vibration, jet, pompage, ultra son

INTRODUCTION

NOTIONS GENERALES DE MELANGE

Comment ?

- En générant des mouvements au fluide
- En créant des perturbations dans l'écoulement

Applications

- Réactions chimiques
- Extraction liquide-liquide
- Extraction liquide-solide
- Dissolution
- Transfert thermique

INTRODUCTION

NOTIONS GENERALES DE MELANGE



Prendre en considération

- Les phénomènes hydrodynamiques liés à l'agitation
- Les phénomènes (physico-chimiques) indépendants de l'agitation

Phénomènes limitants

- Agitation à étudier avec soin
- Agitation minimale

D'une façon très générale, la détermination d'une unité d'agitation consiste

- soit à sélectionner l'appareil adapté à un nouveau procédé,
- soit à extrapoler (ou interpoler) les résultats obtenus avec un appareil donné dans le cadre d'une fabrication existante.

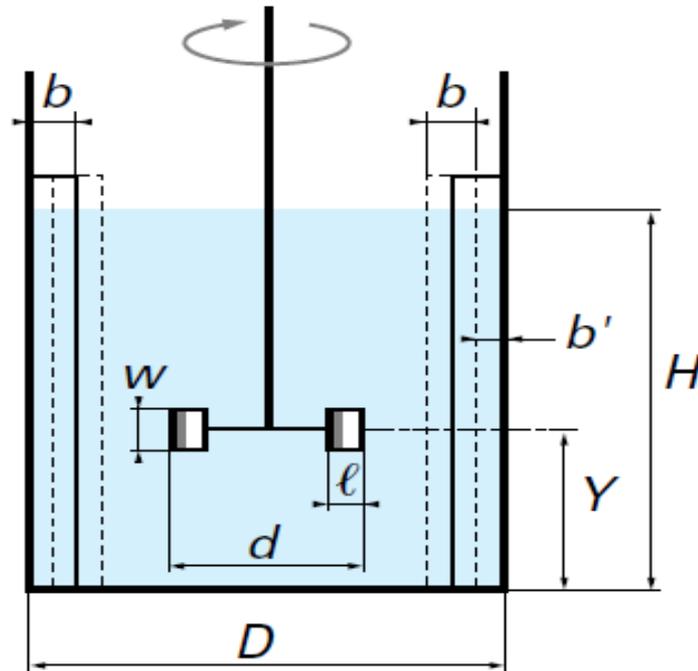
L'analyse locale du fonctionnement d'une cuve agitée (figure A) donne accès aux distributions spatiale et temporelle de la vitesse et de la turbulence.

INTRODUCTION

Cette information peut aider à **comprendre et à contrôler le mélange dans la cuve agitée et peut conduire à optimiser son fonctionnement dans différentes conditions.**

Dans tous les cas, une bonne connaissance du procédé est indispensable pour permettre le choix le plus favorable à l'accomplissement de ce procédé, notamment sur le plan économique.

Notions et Symboles



D: diamètre de la cuve agitée (m)

d: diamètre du mobile d'agitation (m)

W: largeur ou hauteur d'une pâle (m)

ℓ : longueur des pâles (m)

H: hauteur de la solution dans la cuve (m)

b: largeur des chicanes (m)

b': distance d'une chicane décollée de la paroi à la paroi (m)

Y: élévation du centre du mobile d'agitation par rapport au fond de la cuve (m)

LE PLAN

1. **Opérations de mélange**
2. **Définition d'un système d'agitation**
3. **Paramètres globaux d'un système d'agitation**
4. **Paramètres locaux d'un système d'agitation**
5. **Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation**
6. **Choix du matériel d'agitation**
7. **Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
8. **Contrôles après mélangeage**

1. OPERATIONS DE MELANGE

On peut regrouper les opérations de mélange en quatre grandes classes d'application. Chacune peut se caractériser par son aspect physique ou chimique.

Tableau 1 – Différentes opérations de mélange

Type d'application	Caractéristique physique	Caractéristique chimique
liquide-solide	suspension	dissolution
liquide-gaz	dispersion	absorption
liquide-liquide non miscibles ou miscibles	émulsion dispersion mélange	extraction réaction
circulation	pompage	transfert de chaleur

1. OPERATIONS DE MELANGE

1.1 Mélange liquide – solide

- Une des applications les plus courantes de l'agitation : lixiviations, polymérisations, fermentations, réactions en présence de catalyseur, dissolutions, stockages de pulpes ou de pâtes, etc.
- Rôle de l'agitateur : créer une **vitesse ascendante** du fluide porteur supérieure à la vitesse de chute des particules et permettre :
 - ✓ La mise en suspension du solide
 - ✓ Et le maintien en suspension

1.1 Mélange liquide – solide

1.1.1 Aspect physique

Les paramètres importants à prendre en compte :

les données initiales et la définition du résultat à obtenir.

a- Données initiales

Elles permettent d'évaluer les caractéristiques de sédimentation des solides dans le liquide. Ce sont:

- la masse volumique du liquide ;
- la masse volumique du solide ;
- le diamètre équivalent des particules et la répartition granulométrique;
- le pourcentage total des solides (en masse).

b- Définition du résultat à obtenir

- Le rôle de l'agitation varie dans de grandes proportions suivant le procédé que l'on met en œuvre. Dans certains cas (dissolution, par exemple), il suffit de maintenir les plus gros solides en mouvement sur le fond tandis que les particules plus fines sont effectivement mises en suspension plus ou moins haut dans la cuve (**figure 1 a**).

b- Définition du résultat à obtenir

- Le plus souvent, pour éviter une accumulation de solides dans la cuve, il est nécessaire de maintenir en suspension toutes les particules présentes (**figure 1 b**).
- Il est très rarement indispensable de maintenir une suspension uniforme de toutes les particules quelle que soit leur taille (**figure 1 c**).

1.1 Mélange liquide – solide

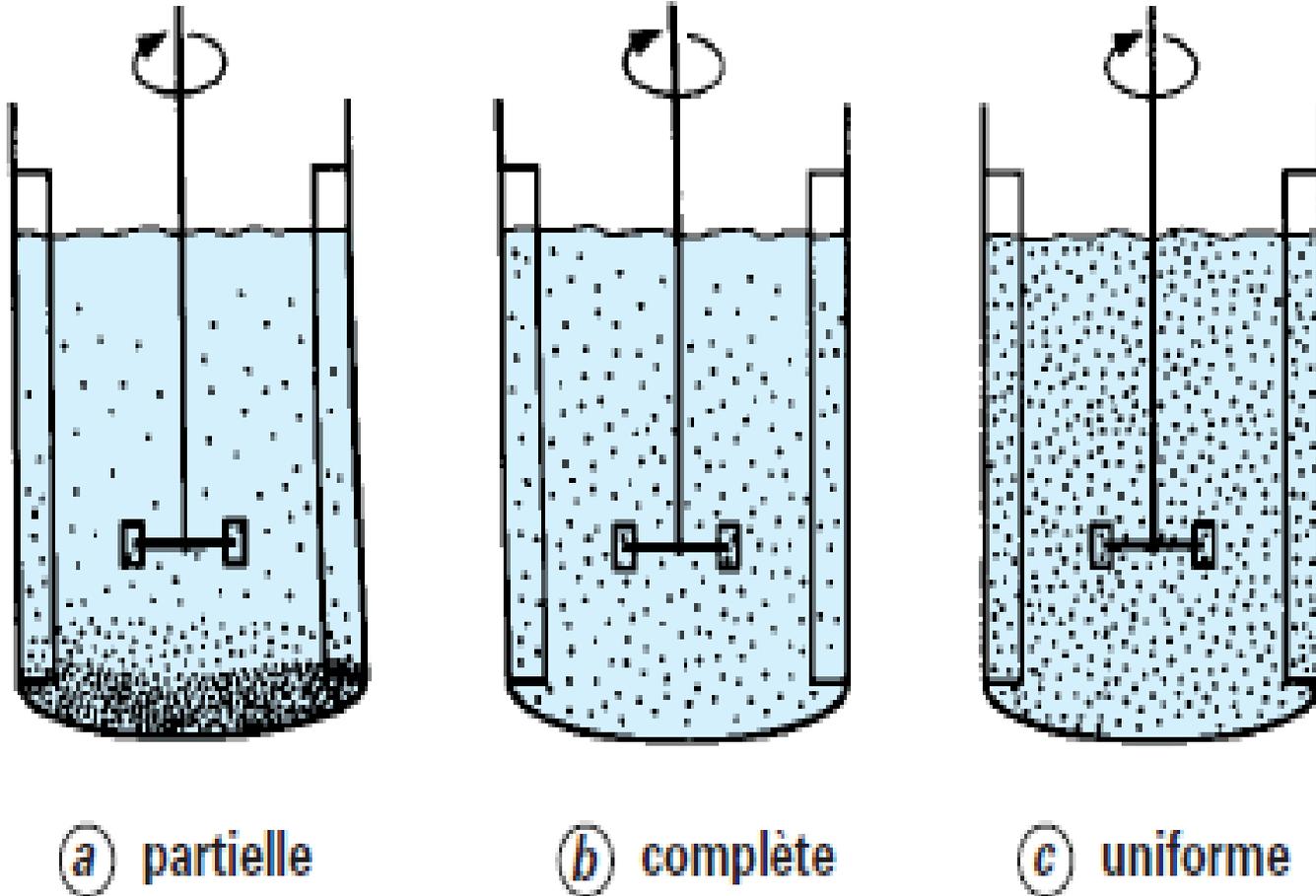


Figure 1 - Suspension solide-liquide

1.1 Mélange liquide – solide

1.1.2 Aspect chimique

- Il doit être considéré dans le cas des dissolutions, des lixiviations ou des cristallisations et il faut faire appel aux notions de **transfert de matière**.
- D'une façon générale, la quantité transférée s'exprime par :

$$N^{\circ} = kL \cdot a_i \cdot (C1 - C2) \quad (\text{formule 1})$$

- N° [$\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$] : débit de matière transférée,
- kL (m/s) : coefficient de transfert de matière côté film liquide,
- a_i (m^2/m^3 de liquide) : aire Interfaciale volumique d'échange,
- $C1 - C2$ (mol/m^3) : gradient de concentration ou facteur de potentialité.

1.1.2 Aspect chimique

$$N^{\circ} = kL \cdot a_i \cdot (C1 - C2) \quad (\text{formule 1})$$

- Lorsque tous les solides sont suspendus, l'aire volumique d'échange n'est pas affectée par l'intensité de l'agitation.
- Le gradient de concentration moyen est lui aussi indépendant de l'agitation
- **le coefficient de transfert kL** est dans certains cas fortement influencé par l'agitateur. C'est notamment le cas lorsque la concentration saturante est très élevée par rapport à la concentration moyenne dans la cuve et qu'il se crée autour de chaque particule solide en cours de dissolution une sorte de couche saturée ou sursaturée.

1.2 Mélange liquide – gaz

- Ce type d'application se rencontre par exemple dans les procédés de fermentation, d'aération d'eaux résiduaires, d'oxydation, d'hydrogénation, d'ozonisation, etc.
- Le rôle de l'agitateur est, du point de vue physique, de créer une dispersion et, du point de vue chimique, de créer une absorption.

1.2 Mélange liquide – gaz

1.2.1 Dispersion du gaz

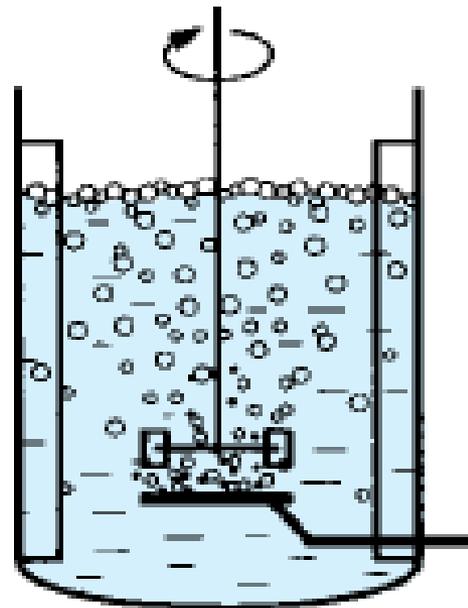
Deux sources d'énergie participent à la dispersion du gaz dans le liquide :

- la première est l'énergie propre du gaz traversant le liquide,
- la seconde est l'énergie fournie par la turbine.

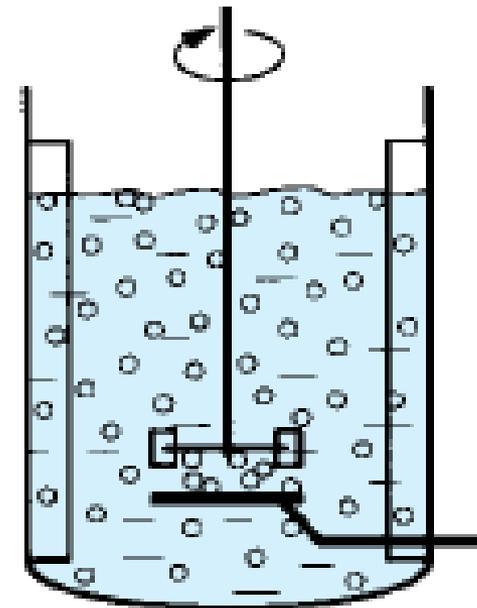
Suivant la balance entre ces deux énergies, on obtiendra un type de dispersion ou un autre et le régime hydrodynamique dans la cuve sera **gouverné par l'expansion du gaz** (*figure 2 a*) ou **par la décharge de la turbine** (*figure 2 b*).

1.2 Mélange liquide – gaz

1.2.1 Dispersion du gaz



(a) sans influence



(b) avec influence

Figure 2 – Dispersion gaz-liquide : influence de l'agitation

1.2.1 Dispersion du gaz

- **Exemple** : si on maintient dans une cuve donnée un débit d'injection de gaz constant et si on augmente progressivement la puissance d'agitation (par exemple en augmentant la vitesse de rotation de la turbine), on obtient les résultats résumés dans le tableau 2.

Tableau 2 – Dispersion du gaz à débit de gaz constant et puissance d'agitation croissante			
Puissance d'agitation	Aspect de la surface	Dispersion	Résultats
Faible	Bouillonnement	Libre montée du gaz	Mauvaise dispersion
Moyenne	Surface uniforme	Dispersion du gaz vers les parois	Dispersion moyenne
		Régime hydraulique de la turbine dominant	Dispersion améliorée
Forte	Surface uniforme	Teneur en gaz maximale	Très bonne dispersion uniforme

1.2.2 Absorption du gaz

Le transfert de masse d'un gaz à un liquide se heurte à plusieurs résistances :

- diffusion à travers le film gazeux, à travers le film liquide entourant la bulle de gaz,
- transfert dans le liquide
- et, suivant les cas, résistance de réaction ou d'absorption de la molécule d'origine gazeuse par le liquide ou un solide.

1.2.2 Absorption du gaz

De ces différentes résistances dépend la cinétique globale du système.

Le plus souvent l'étape limitant est constituée par le transfert au travers du film liquide entourant la bulle de gaz.

Comme dans le cas du transfert liquide-solide le paramètre important est le facteur $k_L a_i$ de la formule (1).

Contrairement aux applications liquide-solide, l'agitateur est généralement sans effet sur k_L ; par contre, son influence sur la surface d'échange a_i est extrêmement importante.

1.3 Mélanges liquide-liquide

Applications les plus fréquentes.

1.3.1 Liquides miscibles

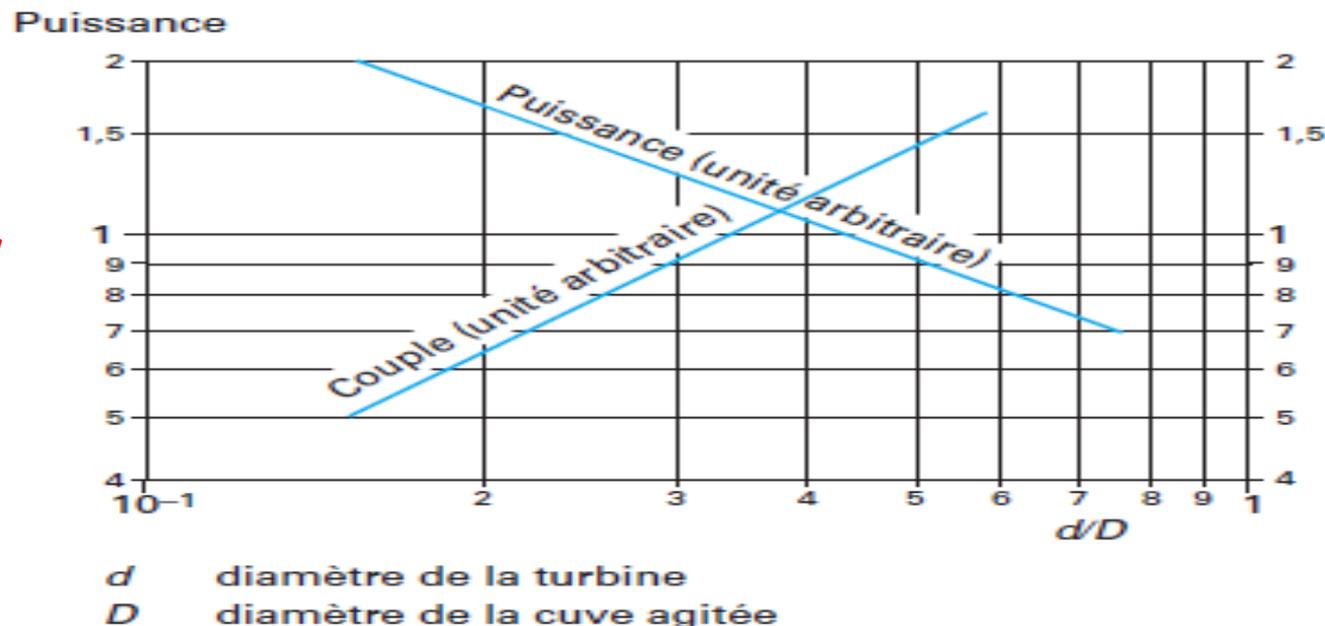
Rôle de l'agitateur: homogénéisation

La caractéristique principale de l'agitateur destiné à une telle application : une capacité de pompage importante.

Pour une même puissance installée, la **capacité de pompage est plus importante avec une grande turbine tournant lentement** qu'avec une petite turbine tournant rapidement.

1.3.1 Liquides miscibles

Sur la figure ci-dessous sont représentées les variations de la puissance et du couple en fonction du rapport diamètre de turbine/diamètre de cuve pour un résultat identique (même temps et même qualité de mélange, par exemple).



L'élément déterminant du choix sera donc souvent une balance économique entre frais d'investissement et frais de fonctionnement de l'unité.

1.3.2 Liquides non miscibles

- Par certains aspects, ce type d'application peut se rapprocher du mélange liquide-gaz. **En effet, le rôle de l'agitateur consiste à disperser l'une des phases dans l'autre pour, le plus souvent, provoquer un transfert de masse.**
- La dimension des gouttelettes et leur distribution dépendent aussi bien
 - ✓ des caractéristiques physiques et chimiques des produits
 - ✓ du type d'agitation
 - ✓ et du régime hydraulique.

1.3.2 Liquides non miscibles

- Si l'augmentation de l'aire superficielle d'échange est un paramètre important d'un mélange liquide-liquide, il ne faut pas en conclure que la création ***d'un cisaillement important*** est la seule fonction de l'agitateur. En effet, il faut également faire circuler les gouttelettes une fois brisées, et cela requiert ***une capacité de pompage parfois élevée.***

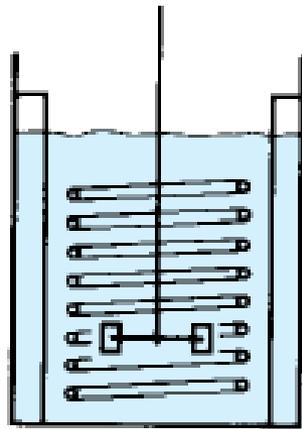
1.3.2 Liquides non miscibles

- Il faut éviter que l'énergie fournie par agitation forme des particules de taille inférieure à la taille stable (émulsion).
- Si l'on a recours à des essais pilotes, les notions de taux de cisaillement moyen et maximal, ainsi que la taille relative des différents éléments en présence, prennent toute leur importance lors de l'extrapolation.

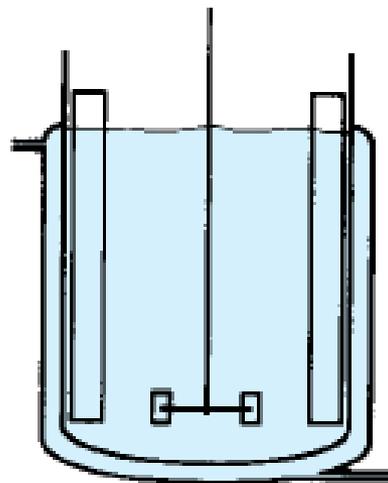
1. OPERATIONS DE MELANGE

1.4 Circulation

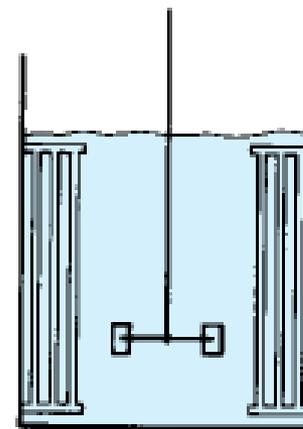
Le principal et vaste domaine de cette application concerne *le transfert de chaleur*. Les cuves destinées à ce genre d'opération sont généralement équipées soit d'un réseau de serpentins intérieurs, soit de tubes verticaux intérieurs, soit d'une double enveloppe extérieure.



(a) cuve avec serpentin



(b) cuve avec double enveloppe



(c) cuve avec tubes verticaux

1.4 Circulation

- **Le rôle de l'agitateur** : provoquer une turbulence importante le long des surfaces d'échange.
- Il n'est pas toujours possible d'utiliser l'agitateur optimal du point de vue du transfert de chaleur dans la mesure où d'autres applications peuvent être prépondérantes dans la cuve. ***Un bon transfert de chaleur sera favorisé par une grande capacité de pompage, autrement dit par une turbine de grand diamètre.***

1.4 Circulation

- Afin d'améliorer le régime hydraulique et les turbulences au voisinage des surfaces d'échange, le nombre, la position et les dimensions des chicanes doivent être étudiés avec précision, de même que le diamètre et l'espacement des tubes dans le cas de serpentins ou de tubes verticaux.

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. **Définition d'un système d'agitation**
3. Paramètres globaux d'un système d'agitation
4. Paramètres locaux d'un système d'agitation
5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation
6. Choix du matériel d'agitation
7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle
8. Contrôles après mélangeage

Mélangeurs industriels



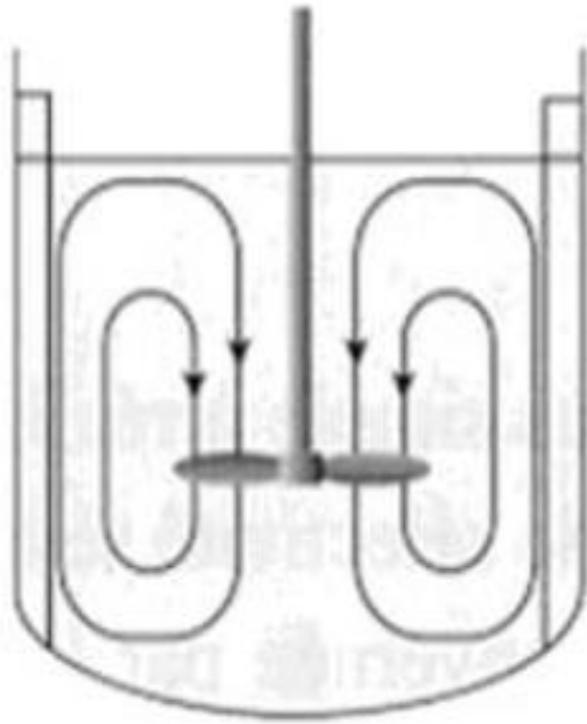
- <https://www.youtube.com/watch?v=eaLdOHMdals>
- https://www.youtube.com/watch?v=y3epU6Xj_iA

2. DEFINITION D'UN SYSTÈME D'AGITATION

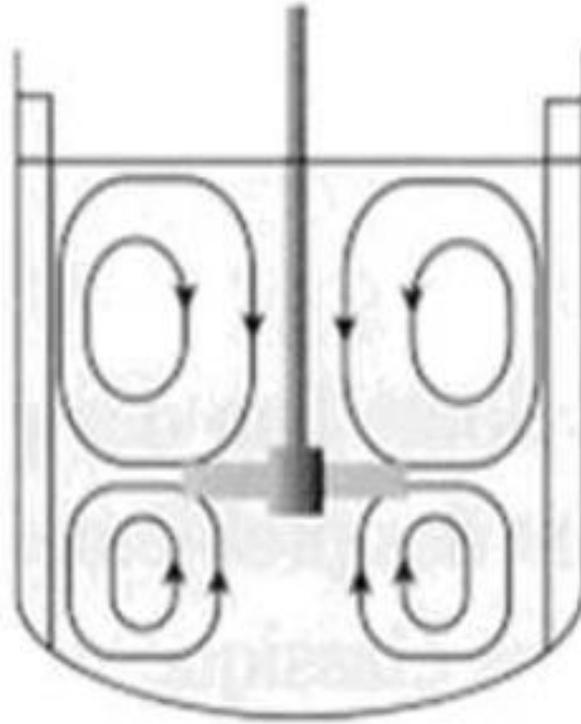
2.1 Description des mobiles

Il existe trois principales grandes classes de mobiles d'agitation suivant le mouvement des fluides engendré dans la cuve par rapport à l'axe de rotation du mobile :

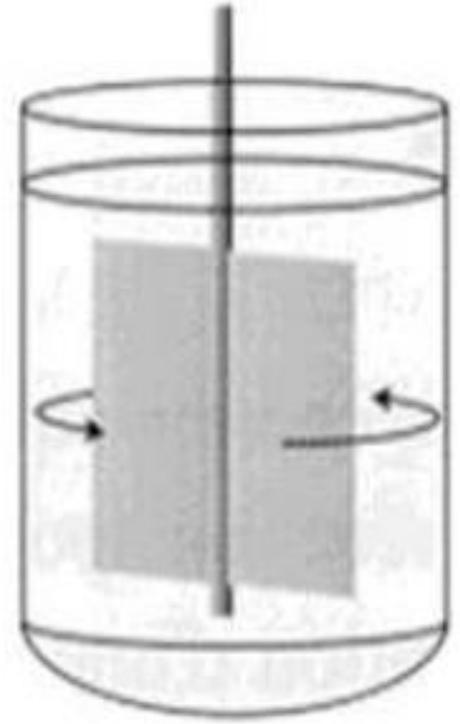
- ✓ les mobiles à écoulement **axial** ;
 - ✓ les mobiles à écoulement **radial**;
 - ✓ les mobiles à écoulement **tangentiel**
-
- Mais il existe aussi les mobiles à écoulement **mixte** (axial/radial) : **Turbines à pales inclinées**



Écoulement axial



Écoulement radial

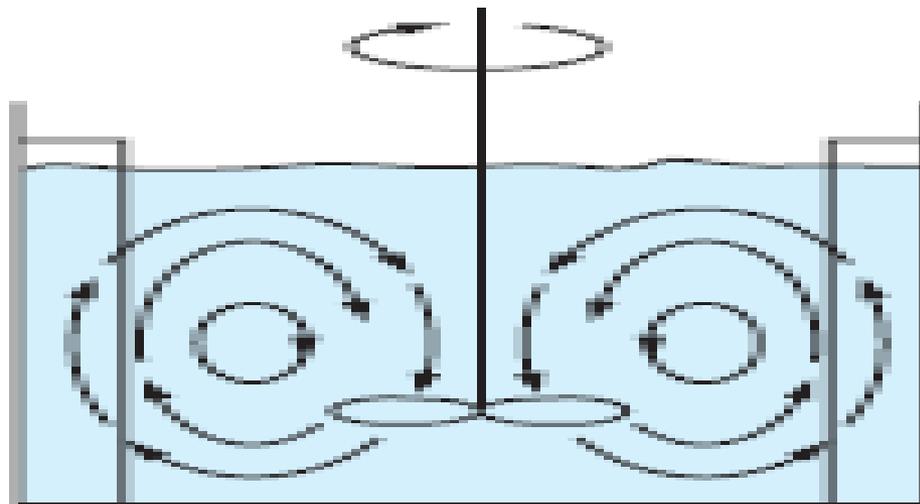


Écoulement tangentiel

2.1 Description des mobiles

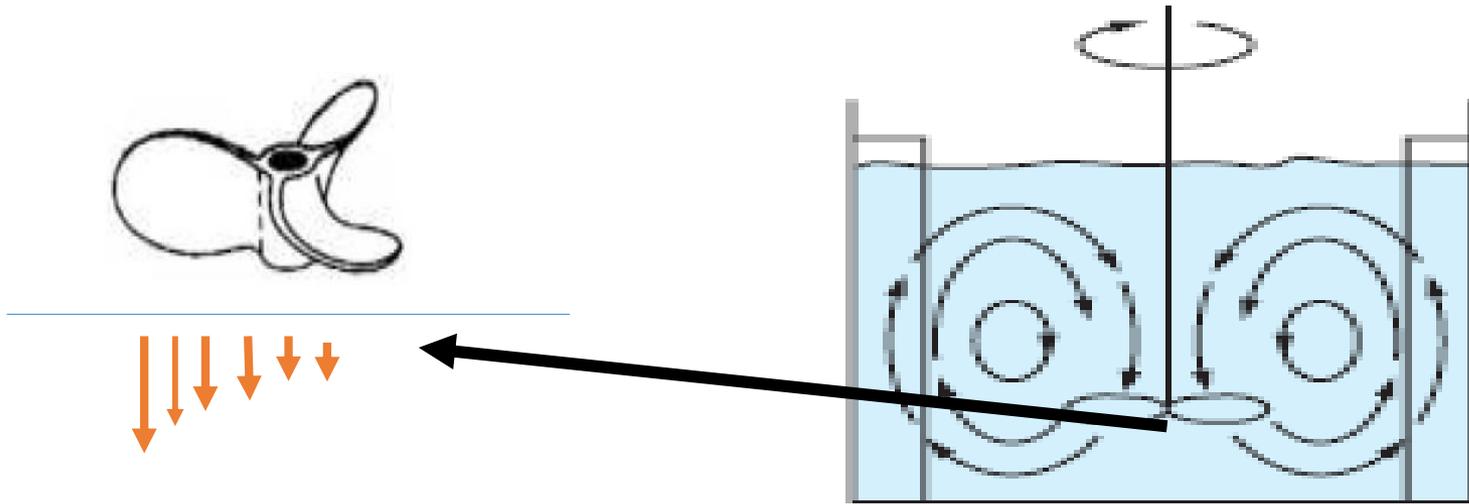
2.1.1 Mobiles à débit axial (Hélices)

Ces mobiles créent un mouvement des fluides dans une ***direction axiale*** (vers le haut ou vers le bas). Ils assurent **une circulation du fluide importante**. Cependant, certains mobiles présentent, en plus de la composante axiale prépondérante, une composante radiale.



débit axial

2.1.1 Mobiles à débit axial (Hélices)



Refoulement sous les pâles

(a) débit axial

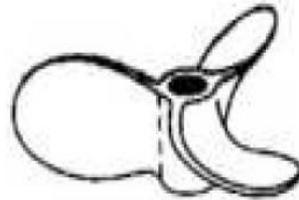
- Mouvement au refoulement de l'agitateur:
- **Axial**, de haut en bas près de l'axe
de bas en haut près des parois.
 - Développement d'**1 boucle de circulation**

Les hélices sont généralement utilisées pour homogénéiser des mélanges qui soient à faibles voire moyenne viscosité (de l'ordre de 1 Pa.s).

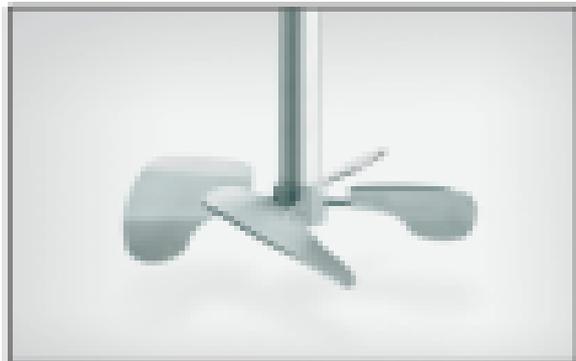
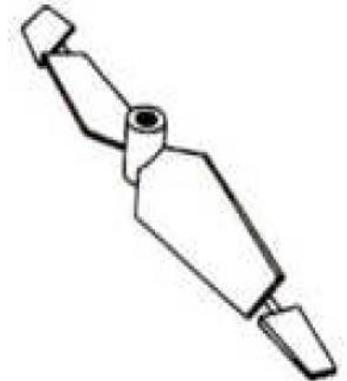
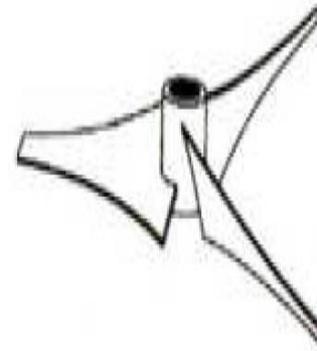
Hélice classique



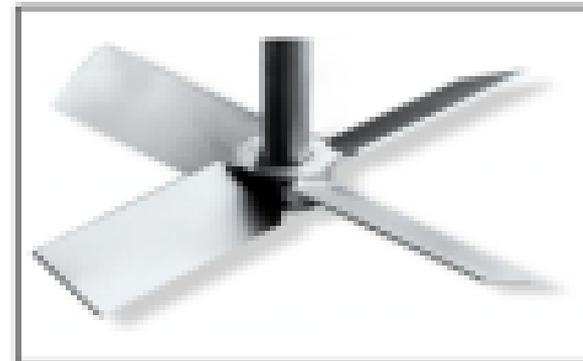
Hélice marine



Hélice à pale mince **Hélice à double flux**



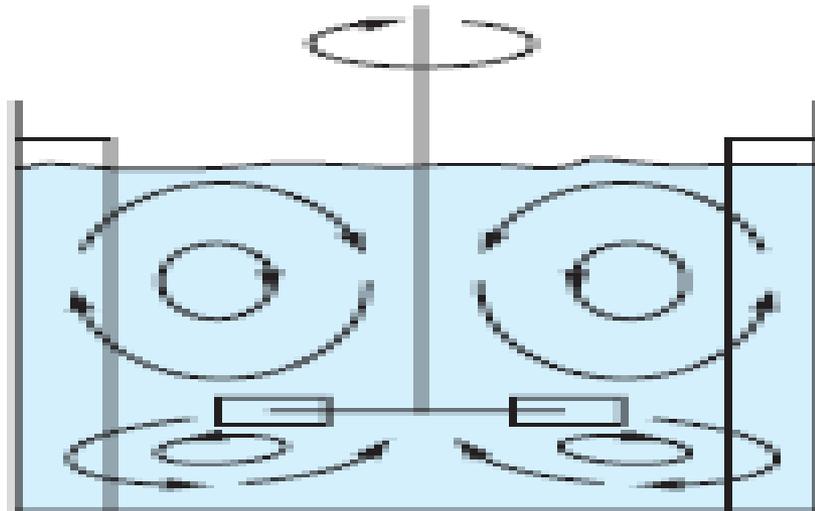
Hélice



Turbine à pales inclinées

2.1.2 Mobiles à débit radial (Turbines)

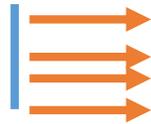
Ces mobiles fournissent *un débit perpendiculaire à l'arbre d'agitation*. Ils créent des effets de **cisaillement relativement importants**. Ce sont des mobiles de **turbulence**. Certains mobiles utilisés pour des produits visqueux ont une composante tangentielle.



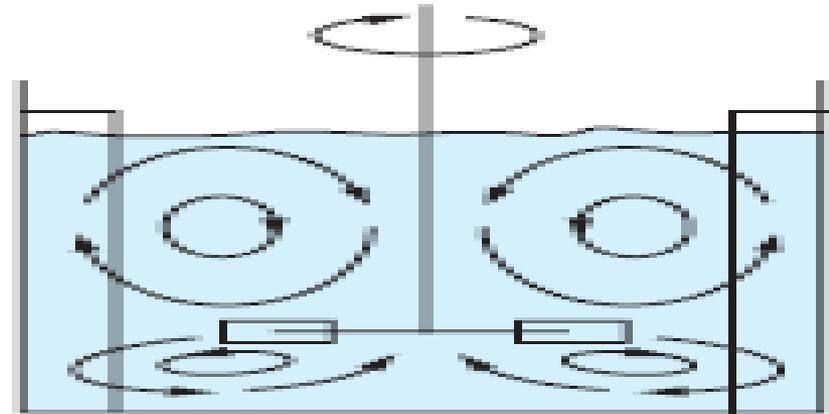
(b)

débit radial

2.1.2 Mobiles à débit radial (Turbines)



Refoulement à la périphérie

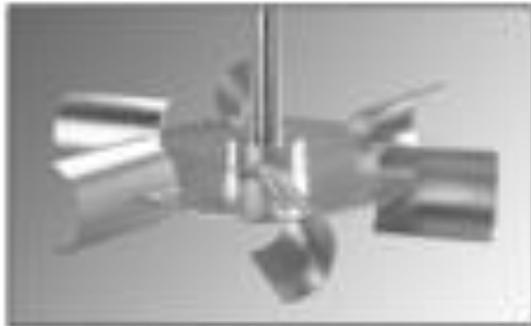


débit radial

Mouvement au refoulement de l'agitateur:

- **Radial**, de l'agitateur vers les parois.
- Développement de **2 boucles de circulation**:
 - petite sous l'agitateur
 - grande au dessus

Utilisation dans des procédés tels que la **fermentation**, les **réactions chimiques gaz-liquide** ou encore dans la fabrication **d'émulsion**. Ces processus nécessitent un apport d'énergie lequel est assuré par la rotation très rapide d'agitateur au design permettant la création d'écoulements fortement turbulents.



Turbine radiale

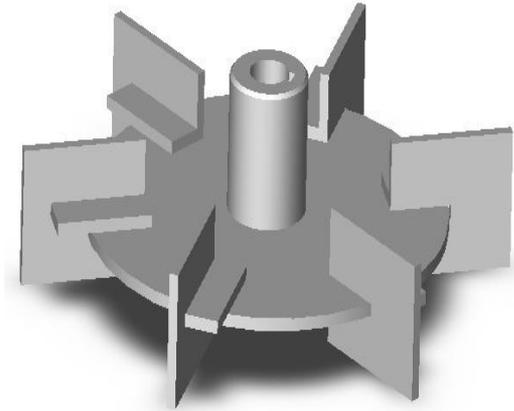


Disque dilacérateur



Ancre

Turbines à disque (de Rushton)

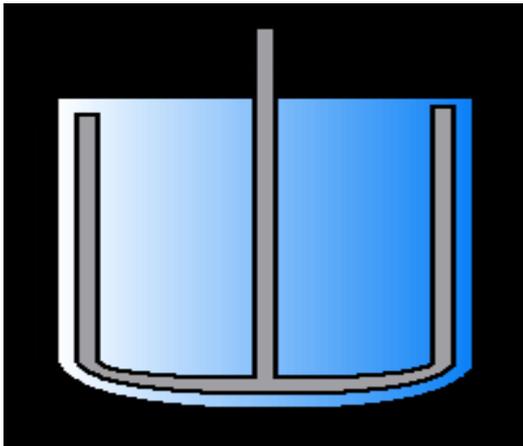


Turbines sans disque à pâles droites ou incurvées

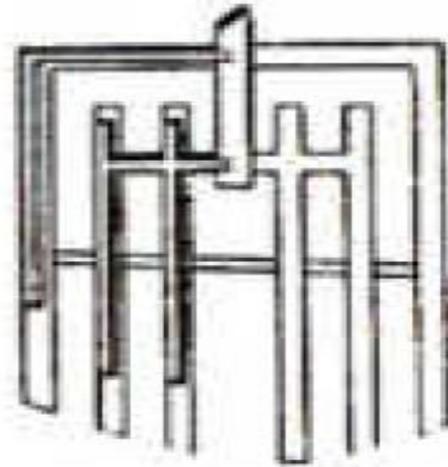
2.1.3 Mobiles à débit tangentiel (ancres ou barrières)

Leur structure particulière permet de racler les fluides très visqueux aux parois de cuves afin de s'assurer de la non formation de zones mortes et d'assurer les échanges thermiques pour certains procédés où l'influence de la température est importante.

Ancres



Barrières



2.1.4 Mobiles à écoulement mixte

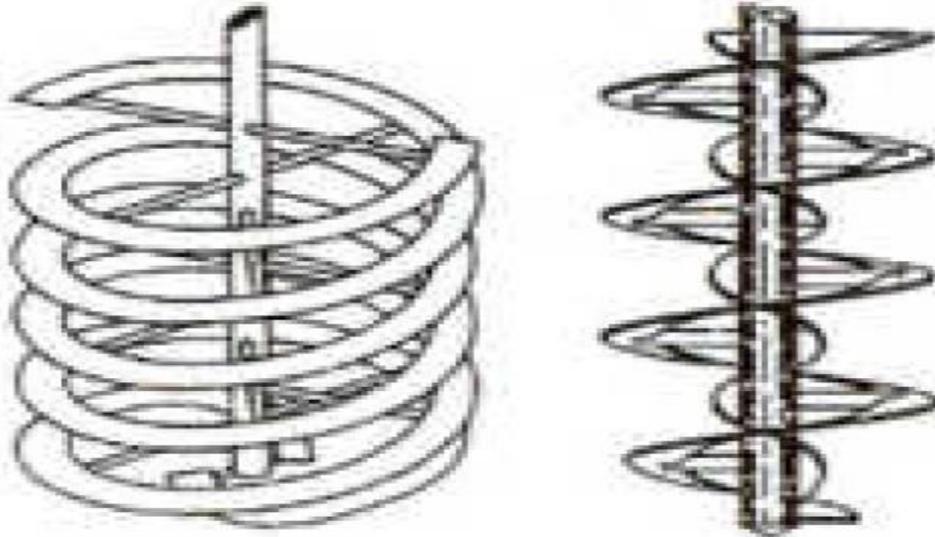
Turbines sans disque à pâles droites ou incurvées



Refoulement sur 3 cotés

D'autres mobiles à écoulement existent dans l'industrie.
Exemples : les vis et rubans hélicoïdaux conçus pour assurer le mélange de fluide très visqueux par un pompage axial ascendant et les agitateurs avec rotor/stator conçus pour mélanger par la création de cisaillement très fort.

Rubans hélicoïdaux et vis

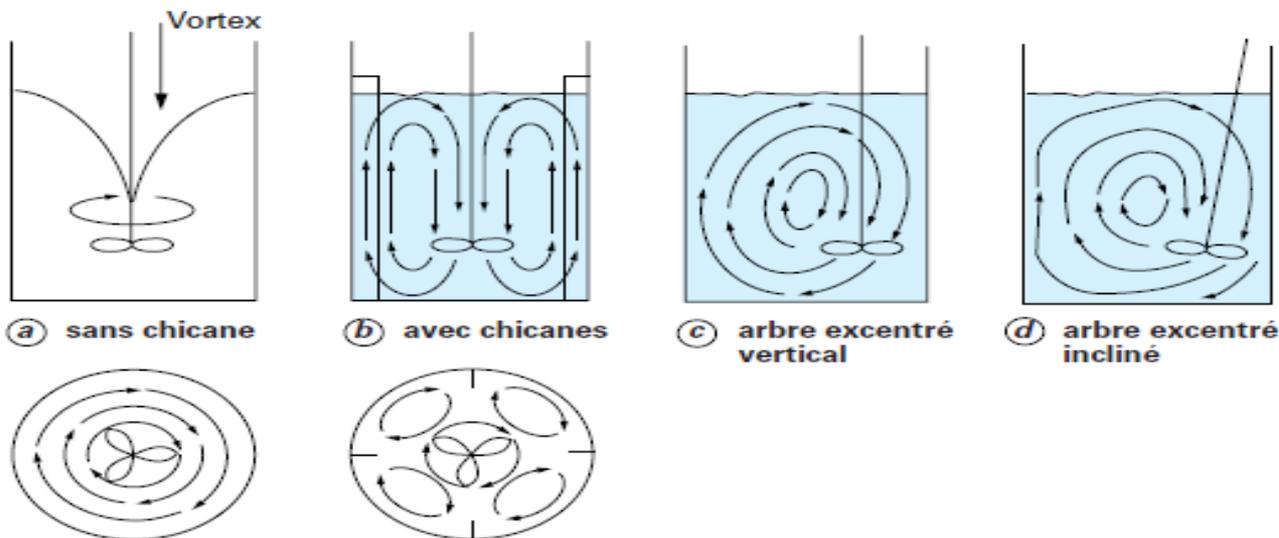


2.2 Régimes hydrodynamiques

Le régime hydraulique créé dépend non seulement du type de mobile d'agitation mais aussi de facteurs géométriques concernant la cuve :

- présence ou non de chicanes ;
- excentration de l'arbre ;
- inclinaison de l'arbre ;
- dimension de la cuve.

Pour chaque mobile d'agitation, il existe donc une infinité de configurations possibles. Sur la figure ci-dessous sont indiquées les formes de courant créées dans plusieurs cas par un mobile à débit axial.



2.2 Régimes hydrodynamiques

- Quel que soit le type de turbine, si la cuve n'est pas munie de chicanes et si l'axe de l'agitateur est confondu avec l'axe de la cuve (*figure 7 a*), le liquide est mis en rotation et les composantes verticales de vitesse seront extrêmement faibles. Il y a par ailleurs formation d'un **vortex** qui présente l'inconvénient de limiter la puissance dissipée et de ne pas favoriser l'homogénéisation des fluides.
- La présence de chicanes fixées sur les parois de la cuve empêche la formation d'un vortex (*figure 7 b*). En général, on dispose 3 ou 4 chicanes de largeur $b = 10^{-1} D$ (avec D diamètre de la cuve agitée), collées ou décollées de la paroi (distance de la chicane à la paroi : $b' = 2 \times 10^{-2} D$).

2.2 Régimes hydrodynamiques

- On peut aussi, pour éviter la formation d'un vortex dans une cuve exempte de chicanes, monter ***l'arbre d'agitation excentré mais vertical (figure 7 c)*** ou ***bien incliné sur la verticale (figure 7 d)***.

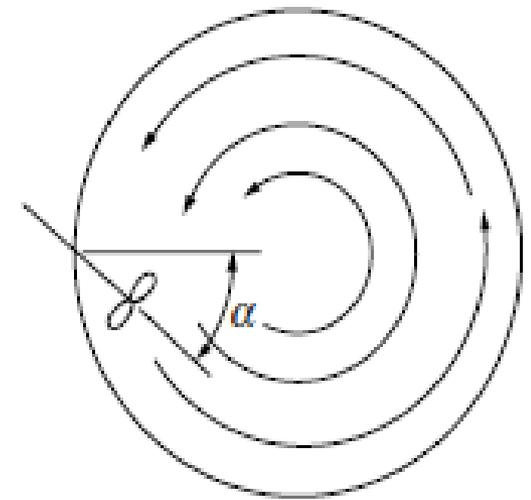
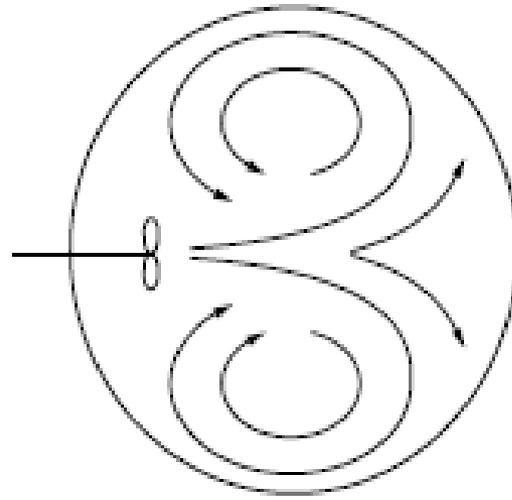
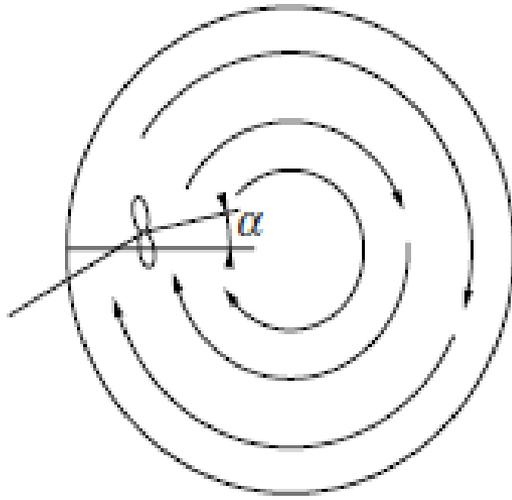
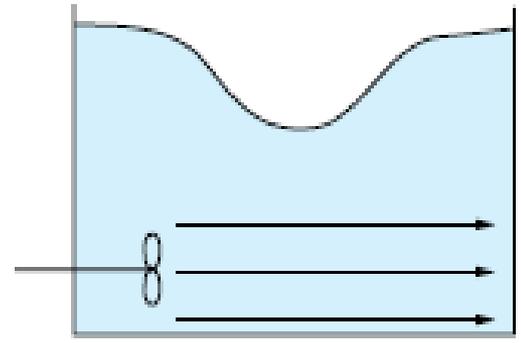
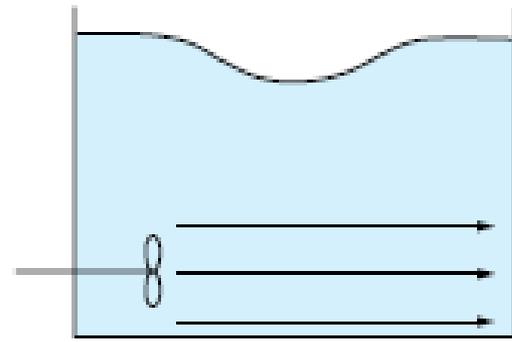
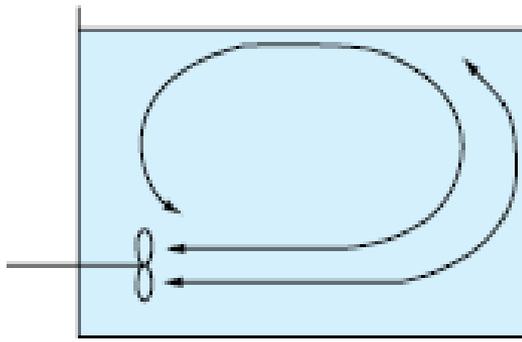
Il est important de noter que ces deux dernières dispositions induisent des contraintes mécaniques importantes et donc qu'elles ne sont pas utilisables pour de fortes puissances (≈ 3 kW) ou de grandes longueurs d'arbre (≈ 1 à 2 m).

2.2 Régimes hydrodynamiques

Pour des grands réservoirs, ayant jusqu'à 150 000 à 200 000 m³ de volume, contenant des liquides de faible viscosité ($< 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), on place l'arbre d'agitation horizontalement et un peu incliné par rapport au rayon (angle α).

Si l'on place l'agitateur dans l'une des positions des **figures 8 b ou 8 c**, il se forme un vortex. Cette technique peut également être utilisée dans des petits réservoirs ou dans des applications particulières.

2.2 Régimes hydrodynamiques



(a) position correcte
 $7 < \alpha < 12^\circ$

(b) position incorrecte
(car la valeur de α n'est pas respectée),
formation de vortex

(c) position incorrecte

Ordre de grandeur des grands réservoirs : = 100 m³ jusqu'à 150 000 à 200 000 m³
suivant l'opération de mélange

2.3 Turbulence et Pompage

- En général, deux actions bien distinctes sont demandées à un mobile d'agitation :
 - **une action de pompage ;**
 - **une action de turbulence.**
- Suivant la forme et le type du mobile, les proportions relatives de turbulence et de débit de pompage peuvent varier considérablement.
- Sur la figure ci-dessous il est représenté la proportion entre débit de pompage et turbulence pour différents types d'agitateurs consommant une puissance donnée. **Les deux notions, pompage et turbulence, vont conditionner la sélection d'un mobile d'agitation en fonction de l'opération de mélange à réaliser**

2.3 Turbulence et Pompage

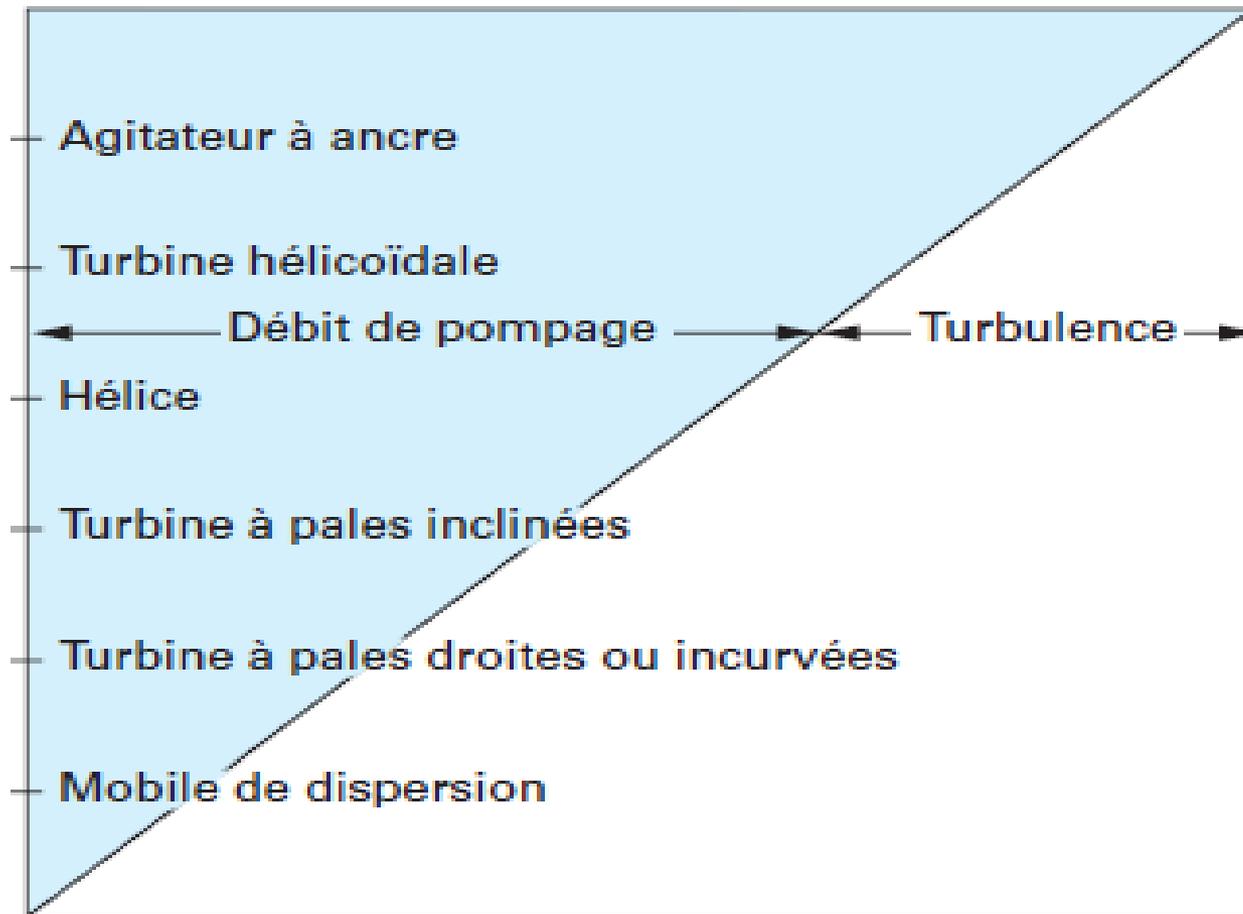


Figure 9 – Proportion entre débit de pompage et turbulence suivant le mobile d'agitation

2.4 Géométrie d'un système d'agitation

Lors de ses travaux sur l'agitation, Rushton a défini une cuve dite standard.

- Les **dimensions de cette cuve standard** sont :
 - diamètre de la cuve = hauteur du liquide, soit $D = H$;
 - diamètre du mobile d'agitation $d = D/3$;
 - hauteur du mobile par rapport au fond de la cuve $Y = d = D/3$;
 - chicanes de largeur $b = 10^{-1} D$ collées ou décollées de la paroi avec $b' = 2 \times 10^{-2} D$.
- En réalité toutes les cuves ne sont pas standard ; en particulier les rapports d/D s'écartent plus ou moins de la valeur $1/3$ et les rapports H/D peuvent être supérieurs à 1. Si $H/D > 1$, plusieurs mobiles d'agitation peuvent être placés sur l'arbre.

2.5 Régimes d'écoulement

En mécanique des fluides, l'écoulement d'un fluide de vitesse U (m/s), de masse volumique ρ (kg/m³), de viscosité dynamique η (Pa · s), dans un tube de diamètre d , est caractérisé par le **nombre de Reynolds défini par :**

$$Re = \frac{Udp}{\eta} = \frac{Ud}{\nu} \quad (2)$$

avec

U : vitesse d'écoulement,

ν : viscosité cinématique : $\nu = \eta / \rho$,

d : diamètre de la conduite.

2.5 Régimes d'écoulement

Pour un mobile d'agitation de diamètre donné d , *tournant à une vitesse N , la vitesse périphérique est proportionnelle à Nd .*

Le nombre de Reynolds de l'agitateur se définira par :

$$Re = \frac{Nd^2}{\nu} \quad (3)$$

Selon la valeur de Re , *on pourra distinguer trois régimes hydrodynamiques : laminaire, intermédiaire, turbulent.*

$Re < 10$ régime laminaire,

$10 < Re < 10^4$ régime intermédiaire,

$10^4 < Re$ régime turbulent.

2.5 Régimes d'écoulement

- Le régime laminaire se traduit par l'absence de mouvement du fluide dans une direction différente de celle imposée par le mobile d'agitation. Le seul mélange qui puisse se faire entre les couches parallèles au courant est dû uniquement à la diffusion moléculaire et est indépendant de la puissance fournie qui, d'ailleurs, est dissipée sous forme de chaleur.
- Le régime turbulent se caractérise par des mouvements dans toutes les directions et donc par un bon mélange des filets fluides.
- Le nombre de Reynolds correspondant au début du régime turbulent dépend du type de mobile d'agitation et de la configuration du système d'agitation.
 - Pour les mobiles à **débit radial** : $Re \approx 10^4$.
 - Pour les mobiles à **débit axial** : $Re \approx 10^5$.

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. Définition d'un système d'agitation
- 3. Paramètres globaux d'un système d'agitation**
- 4. Paramètres locaux d'un système d'agitation**
- 5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation**
- 6. Choix du matériel d'agitation**
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage**

3. PARAMETRES GLOBAUX D'UN SYSTEME D'AGITATION

3.1 Puissance dissipée

- Lorsque, pour une opération de mélange à effectuer, un type de mobile d'agitation a été choisi, il reste à déterminer la puissance nécessaire à son entraînement.
- la puissance ne peut être considérée comme le seul critère de définition d'un agitateur. C'est cependant un élément important puisqu'elle permet de choisir le type de moteur à installer et de comparer, sur le plan consommation d'énergie, les performances de plusieurs mobiles.

3.1 Puissance dissipée

3.1.1 Application de la similitude et de l'analyse dimensionnelle au calcul de la puissance

Un problème d'agitation fait intervenir un certain nombre de variables dont :

— **3 caractéristiques des fluides** à agiter : la masse volumique ρ (kg/m^3), la viscosité dynamique η ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) et la tension superficielle γ (N/m) ;

— **3 caractéristiques cinématiques et dynamiques** : la vitesse de l'agitateur N (tr/s), l'accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ et la puissance absorbée pour vaincre les forces de résistance P (W) ;

— (au moins) 10 caractéristiques aussi bien de l'agitateur lui-même que de l'appareil dans lequel il fonctionne et des accessoires qui y sont fixés, tels que : serpentins, chicanes, etc. ;

ce qui peut s'écrire :

$$f(\rho, \eta, \gamma, N, g, P, d, D, H, Y, w, b, , p, np, nc) = 0$$

L'application du théorème de Vaschy-Buckingham permet de transformer la relation précédente en des nombres sans dimension.

Ce sont les nombres suivants :

$$Re = \frac{N d^2 \rho}{\eta} = \frac{N d^2}{\nu}$$

Nombre de Reynolds de l'agitateur : caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

$$Fr = \frac{N^2 d}{g}$$

Nombre de Froude : caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité.

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 d^5}$$

Nombre de puissance. C'est le coefficient de traînée de l'agitateur dans le fluide

$$We = \frac{\rho N^2 d^3}{\gamma}$$

Nombre de Weber: caractérise l'action des forces de tension superficielle.

ν | m^2/s | viscosité cinématique de la solution agitée

3.1 Puissance dissipée

3.1.2 Courbes caractéristiques

- Pour des systèmes cuves-agitateurs géométriquement semblables, quelle que soit la nature des fluides, l'équation se réduit à :

$$N_p = k Re^x Fr^y \quad (14)$$

ou encore à la fonction

$$\Phi = \frac{N_p}{Fr^y} = k Re^x \quad (15)$$

- Cette relation se traduit par une **courbe** appelée **courbe caractéristique d'un mobile d'agitation**, donnant les variations de Φ **en fonction** du nombre de Reynolds.

3.1.2 Courbes caractéristiques

Les deux cas suivants peuvent se présenter :

– en présence d'un vortex (sans chicane) :

$$\text{si } Re < 300 : \Phi = N_p \quad (16)$$

$$\text{si } Re > 300 : \Phi = \frac{N_p}{Fr^y} \quad (17)$$

$$\text{et } y = \frac{a - \lg Re}{a'} \quad (18)$$

avec a et a' coefficients donnés dans le tableau **3** ;

– en l'absence d'un vortex (avec chicanes) :

$$\forall Re : \Phi = N_p \text{ et } N_p = f(Re) \quad (19)$$

Tableau 3 – Coefficients a et a' de la formule (18)

Mobile d'agitation	n_p ou p	$\frac{D}{d}$	$\frac{H}{d}$	$\frac{Y}{d}$	a	a'
Turbine à n_p pales droites (repères $R1$ et $R2$, article [J 3 802])	$n_p = 4$ $n_p = 6$	3,3 3	2,7 à 3,9 2,7 à 3,9	0,75 à 1,3 0,75 à 1,3	1 1	40 40
Hélice marine de pas p (repère $A1$, article [J 3 802])	$p = d$	3	2,7 à 3,9	0,75 à 1,3	2,1	18

3.1.2 Courbes caractéristiques

3.1.2.1 Régime laminaire

Dans le cas où $Re < 10$ (zone AB).

Dans l'équation (14) : $x = -1$ et $y = 0$,

$$\text{d'où : } \Phi = N_p = \frac{k}{Re} = \frac{k\nu}{Nd^2} \quad (20)$$

D'après la définition (10) de N_p :

$$P = N_p \rho N^3 d^5 = \frac{k\nu}{Nd^2} \rho N^3 d^5 = k \eta N^2 d^3 \quad (21)$$

La puissance est indépendante de la masse volumique du fluide et de la présence ou non de vortex, mais proportionnelle à la viscosité.

3.1.2.2 Régime intermédiaire

Dans le cas où $10 < Re < 10^4$ à 10^5 (*selon le type de mobile*)

L'expression mathématique de la courbe $\Phi = f(Re)$ *n'est pas simple*. On détermine la puissance en utilisant directement la courbe Φ .

3.1.2.3 Régime turbulent

Dans le cas où 10^4 à $10^5 < Re$ (zones CD ou EF).

Ce régime se caractérise par un Φ constant et donc indépendant du nombre de Reynolds pour des valeurs de $Re > 10^4$ à 10^5 :

— avec vortex, d'après (17) : $\Phi = \frac{N_P}{Fr^3} = Cte$

— sans vortex, d'après (19) : $\Phi = N_P = Cte = N_{P0}$

et, d'après (10) : $P = N_{P0} \rho N^3 d^5$

Dans une cuve munie de chicanes (sans vortex) fonctionnant en régime turbulent, la puissance dissipée est indépendante de la viscosité du fluide.

3. PARAMETRES GLOBAUX D'UN SYSTEME D'AGITATION

3.2 Débits de pompage et de circulation

3.2.1 Débit de pompage

- Le débit de pompage Q_p est le débit de liquide qui passe effectivement dans le mobile d'agitation. Il est proportionnel à la vitesse de rotation N , et au cube du diamètre du mobile d , soit :

$$Q_p = N_{Qp} N d^3 \quad (24)$$

Le coefficient de proportionnalité N_{Qp} est appelé ***nombre de pompage***. Il est fonction du type de mobile d'agitation et du régime hydrodynamique. **Dans le cas du régime turbulent N_{Qp} peut être considéré comme constant.**

3.2.2 Débit de circulation

- Le débit de pompage induit dans le volume de la cuve, par transfert de quantité de mouvement, un débit d'entraînement Q_e . *Le débit de circulation Q_c est la somme du débit d'entraînement Q_e et du débit de pompage Q_p , soit :*

$$Q_c = Q_e + Q_p \quad (25)$$

- D'après les travaux de plusieurs auteurs, on admet que, quel que soit le type de mobile d'agitation, le rapport Q_c / Q_p est à peu près constant et vaut environ 1,8. On pourra définir un **nombre de circulation N_{Q_c} par :**

$$N_{Q_c} = \frac{Q_c}{Nd^3} = 1,8 N_{Q_p} \quad (26)$$

3.2.3 Application à l'estimation du temps de mélange

3.2.3.1 Définition et équation

- On définit le temps de mélange t_M comme le temps nécessaire à l'obtention d'un mélange d'une qualité fixée dans des conditions d'agitation bien déterminées. C'est donc l'intervalle de temps entre le début de l'agitation et le moment où une composition uniforme est obtenue dans la masse fluide.
- Comme pour le calcul de la puissance d'agitation, le temps de mélange est fonction :
 - des caractéristiques physico-chimiques des fluides à mélanger ;
 - des conditions d'agitation ;
 - du système cuve-agitation.
- Pour un système d'agitation donné, ou des systèmes géométriquement semblables, munis de chicanes et travaillant en régime turbulent, l'analyse dimensionnelle permet d'écrire :

$$Nt_M = k' Re^x \quad (27)$$

avec k' constante dépendant du type de mobile.

3.2.3 Application à l'estimation du temps de mélange

3.2.3.2 Mesure des temps de mélange

Il existe diverses méthodes permettant de mesurer les temps de mélange mais elles conduisent bien souvent à des conclusions assez différentes. La technique de base est l'observation de l'évolution d'une propriété du fluide après avoir introduit dans le système une perturbation.

Les principales techniques de mesure utilisées sont les suivantes.

- Méthodes colorimétriques avec réaction chimique
- Méthodes thermiques
- Méthode des traceurs radioactifs
- Méthode conductimétrique ++

Le choix de la technique dépend des conditions opératoires, du système étudié et des caractéristiques des fluides

3.2.3.2 Mesure des temps de mélange

Comparaison des principales techniques de mesure utilisées.

Tableau 4 – Méthodes de mesure du temps de mélange		
Méthodes	Avantages	Inconvénients
colorimétriques avec réaction chimique	Pas de capteur de mesure. La décoloration d'un fluide est facile à déterminer.	Demandant une bonne observation visuelle. Ne s'appliquent pas pour fluides opaques. Consommation de fluides.
thermiques	Pas de modification de la nature des fluides. Ne consomment pas de produits.	La cuve doit être isolée thermiquement. Appareillage important et coûteux.
des traceurs radioactifs	Valables quel que soit le système agité.	Utilisation de la radioactivité (implication pratique et financière).
conductimétriques	Utilisent des capteurs très simples et des produits bon marché. Mise en œuvre rapide. Résultats corrects.	Nécessité de renouveler les fluides au bout d'un certain nombre d'essais.

3.2.3.3 Corrélation pour calculer le temps de mélange

- Les divergences existant entre les corrélations proposées en utilisant la formule (27) : $Nt_M = k' Re^x$ proviennent, d'une part, des diverses méthodes utilisées et, d'autre part, des conditions d'expérience (placement des capteurs, endroit d'injection du traceur, degré de mélange différents ou non précisés).
- En régime turbulent, on peut considérer $x = 0$, soit $Nt_M = k'$.
- Cependant, pour des agitateurs classiques, il existe quelques corrélations pratiques permettant de calculer un temps de mélange (tableau 5).

Tableau 5 – Calcul du temps de mélange par deux formulations (1)

Mobile	Formulation 1 (2)	Formulation 2 (3)
Hélice marine (repère A1, [J 3 802]) $p = d$	$Nt_M = 6 (D/d)^2$ $n_c = 3$ ou 4 $Re > 10^4$	$(N/K) (d/D)^2 = 0,90$ $Y = D/2 ; n_c = 4 ;$ $b = (1/10)D$ $0,10 < d/D < 0,45 ;$ $Re > 10^4$ $K = \frac{\ln (A/2)}{-t_M}$
Turbine disque à six pales droites (repère R1, [J 3 802]) $W/d = 0,20$ $\ell/d = 0,25$	$Nt_M = 4 (D/d)^2$ $n_c = 3$ ou 4 $Re > 10^4$	$(N/K) (d/D)^{2,3} = 0,5$ $Y = D/2 ; n_c = 4 ;$ $b = (1/10)D$ $0,23 < d/D < 0,43 ;$ $Re > 2 \times 10^3$ $K = \frac{\ln (A/2)}{-t_M}$

3.2.3.3 Corrélation pour calculer le temps de mélange

- Le temps de mélange t_M peut être relié au débit de pompage du mobile d'agitation :

$$Nt_M = k' \quad \text{d'où} \quad t_M = k'/N$$

$$Q_p = N_{Qp} Nd^3$$

- Le temps de pompage $t_p = V/Q_p$ est donc :

$$t_p = \frac{V}{N_{Qp} Nd^3} \quad (28)$$

$$\text{d'où : } \frac{t_M}{t_p} = \frac{k' N_{Qp} d^3}{V}$$

- Pour un système d'agitation donné, ce rapport est donc constant.
- Pour des systèmes géométriquement semblables d^3/V est constant, il en est de même pour t_M/t_p et donc pour t_M/t_c (avec t_c : temps de circulation défini par $t_c = V/Q_c$). Ce rapport indique le nombre de circulations que doit effectuer le liquide pour être mélangé

3. PARAMETRES GLOBAUX D'UN SYSTEME D'AGITATION

3.3 Gradient de vitesse

Le liquide quittant le pale de l'agitateur crée des effets de cisaillement dans le liquide. La figure **13** représente un **profil de vitesse** autour d'une turbine à six pales droites tournant à trois vitesses différentes.

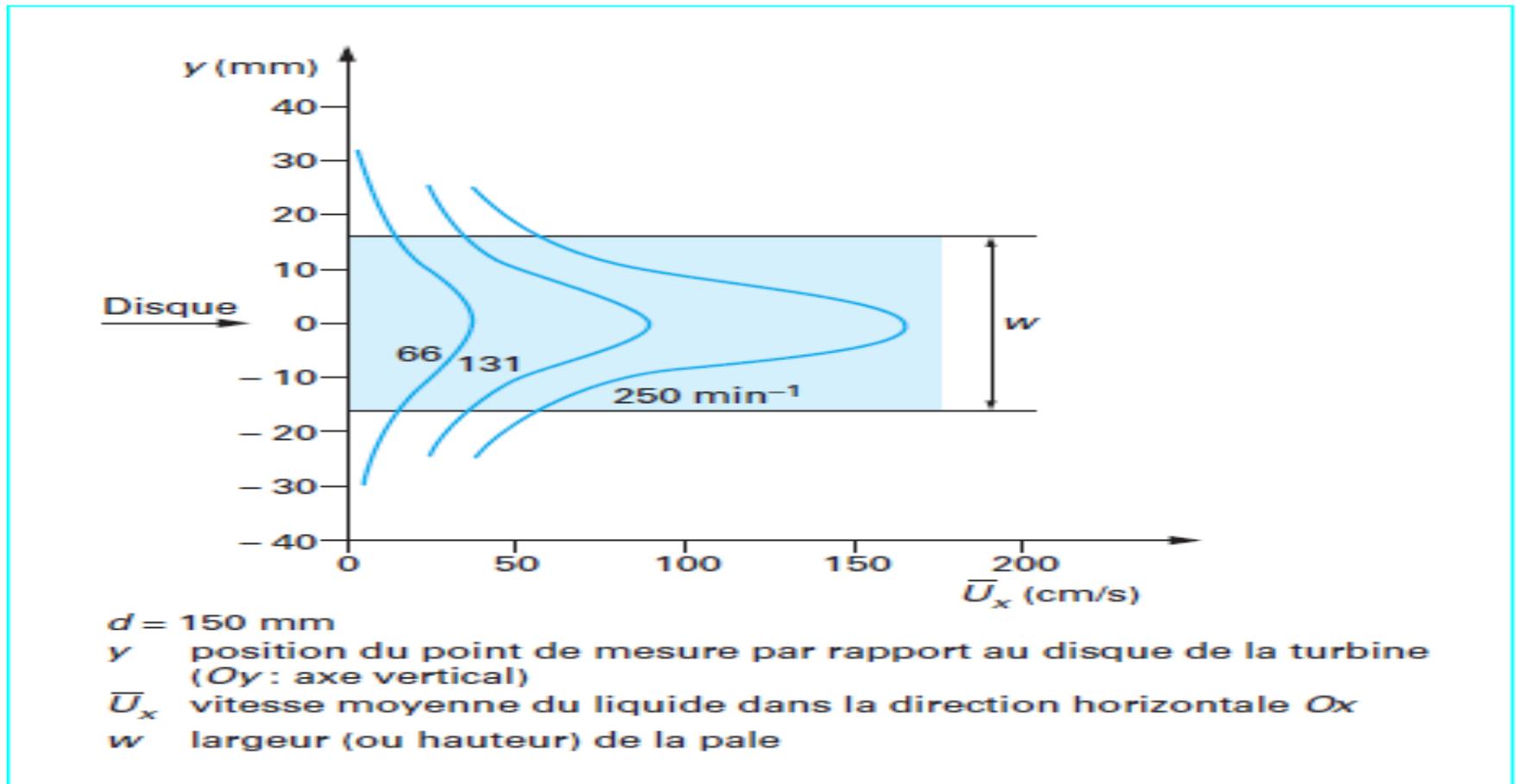


Figure 13 – Profil de vitesse autour d'un mobile à débit radial

3.3 Gradient de vitesse

- Le **gradient de vitesse** (appelé encore *taux de cisaillement*) se mesure à partir de la pente de l'enveloppe des vecteurs vitesse (figure **13**) :

$$\text{gradient de vitesse} = \frac{d\bar{U}_x}{dy} \quad (33)$$

- La **contrainte de cisaillement** se définit par la loi de Newton

$$\tau = \eta \frac{d\bar{U}_x}{dy} \quad (34)$$

3.3 Gradient de vitesse

- Oldshue a montré qu'il fallait distinguer deux gradients de vitesse : un **gradient moyen** et un **gradient maximal**.
- La **figure 14 a** donne la variation de ces gradients de vitesse moyen et maximal pour une turbine disque à 6 pales, **en fonction de la vitesse de rotation**. Le gradient maximal est environ égal à 2 fois le gradient moyen.
- La figure **14 b** donne la variation des gradients de vitesse moyen et maximal **en fonction du diamètre de la turbine** pour une vitesse d'agitation *N constante*. Le gradient moyen reste constant tandis que le gradient maximal augmente avec le diamètre de la turbine. **Il s'agit d'un élément important pour l'extrapolation d'un système d'agitation**

3.3 Gradient de vitesse

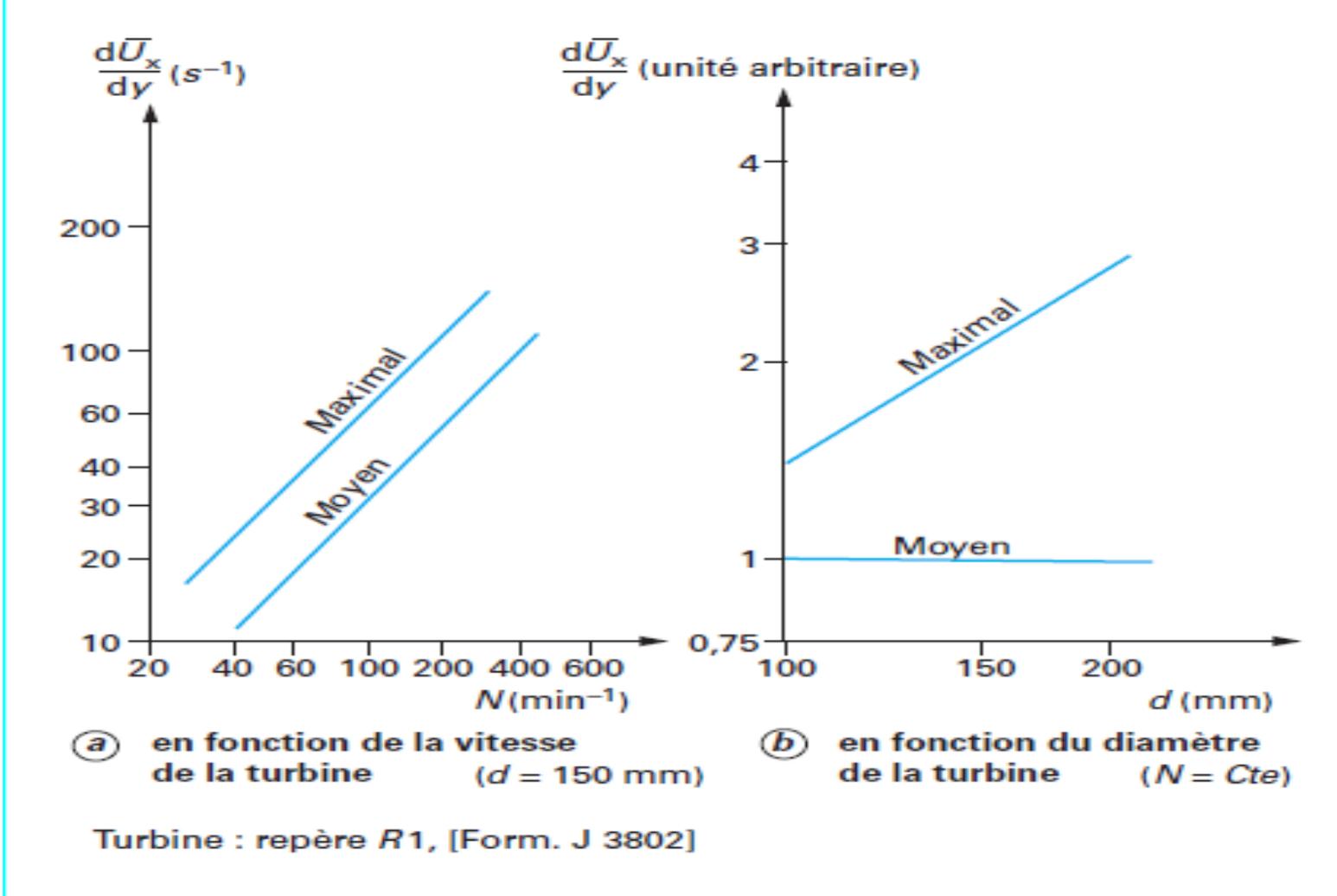


Figure 14 – Gradients de vitesse moyen et maximal pour une turbine disque à 6 pales droites

3.3 Gradient de vitesse

- Le gradient de vitesse moyen (G_m) *autour du mobile d'agitation* est proportionnel à la vitesse de rotation du mobile :

$$\mathbf{G}_m = k_m \mathbf{N} \quad (35)$$

- Il est possible de définir un gradient de vitesse moyen dans toute la cuve proportionnel à N :

$$\mathbf{G}'_m = k'_m \mathbf{N} \quad (36)$$

- Voici quelques valeurs de k_m et k'_m pour plusieurs turbines Moritz

Turbine	Repère (article [Form. J 3 802])	k_m	k'_m
Hélice marine	A 1	35	10
Turbine HAP	A 2,3	42	13
Turbine DEL	A 6	80	13
Turbine TPR	R 1	60	13

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. Définition d'un système d'agitation
3. Paramètres globaux d'un système d'agitation
- 4. Paramètres locaux d'un système d'agitation**
- 5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation**
- 6. Choix du matériel d'agitation**
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage**

4. PARAMÈTRES LOCAUX D'UN SYSTÈME D'AGITATION

L'analyse locale du comportement de la cuve agitée présente plusieurs intérêts. :

- La connaissance du champ de vitesse en tout point de la cuve donne accès à la circulation globale, à la localisation des zones d'eaux mortes et des zones à fort gradient de vitesse.
- La connaissance du champ de vitesse induit par un mobile d'agitation permet de choisir la position et le type d'agitateur le mieux adapté à un procédé : mise en suspension, dispersion de particules solides ou dispersion de bulles ou de gouttes.
- La connaissance du champ turbulent permet de quantifier le mélange en estimant les échelles caractéristiques des tourbillons énergétiques, le niveau d'énergie associé et le taux de dissipation d'énergie.

4. PARAMÈTRES LOCAUX D'UN SYSTÈME D'AGITATION

- Pour accéder aux grandeurs locales, l'analyse expérimentale est indispensable.
- En parallèle à l'expérience, les outils de simulation numérique des écoulements dans les cuves agitées peuvent aider l'ingénieur à mieux maîtriser les performances d'un procédé de mélange.

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. Définition d'un système d'agitation
3. Paramètres globaux d'un système d'agitation
4. Paramètres locaux d'un système d'agitation
- 5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation**
- 6. Choix du matériel d'agitation**
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage**

5. EXEMPLES DE CALCULS POUR DES SYSTEMES D'AGITATION

5.1 Calculs des paramètres globaux du système d'agitation

- Calculer la **puissance nécessaire à l'entraînement** d'un mobile d'agitation, type hélice marine, ($p = d$, $n_p = 3$, $d = 0,3$ m, $N = 6$ s⁻¹), *monté dans une cuve standard* ($H = D$, $d/D = 1/3$, $Y/d = 1$,) *contenant un liquide de masse volumique $\rho = 1200$ kg/m³ et de viscosité $\eta = 3,6 \times 10^{-3}$ Pa · s.*
= la **puissance dissipée** (par unité de volume de liquide P/V)
- Calculer la **vitesse périphérique du mobile d'agitation** ($V = \pi Nd$)
- Calculer les **débits de pompage et de circulation**
- Calculer le **temps de mélange**

5.2 Comparaison d'une hélice marine et d'une turbine disque à six pales droites

- On considère deux mobiles d'agitation, hélice marine et turbine disque à six pales droites, dissipant la même puissance $P = 50 \text{ W}$ dans une cuve ($D = 0,3 \text{ m}$; $d/D = 1/3$; $nc = 4$; $H = D$; $b/D = 1/10$) contenant de l'eau ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).
- On calcule les grandeurs suivantes : N , Re , V_p , Q_p , H^* , Q_p/H^* .
- $H^* = (N_p / N_{QP} g \cdot \pi^2) V_p^2$
- Q_p/H^*

5.3 Effet du changement du rapport d/D sur les grandeurs caractéristiques

- Lors d'un changement du rapport d/D d'un système d'agitation, il est intéressant de voir l'évolution des grandeurs caractéristiques en prenant comme critères la vitesse périphérique, la puissance dissipée par unité de volume, le temps de pompage.
- En régime turbulent, dans une cuve d'agitation donnée, le diamètre du mobile d'agitation est changé dans le rapport R .

5.3 Effet du changement du rapport d/D sur les grandeurs caractéristiques

Tableau 6 – Changement du diamètre du mobile dans une cuve donnée : conséquences sur les autres caractéristiques

	Caractéristiques	1 ^{er} cas	2 ^e cas	3 ^e cas
<p>Dans une cuve d'agitation donnée, d (et donc d/D) est multiplié par R. Voici les valeurs par lesquelles sont multipliées les autres caractéristiques dans 3 cas différents, en régime turbulent :</p> <p>– 1^{er} cas : $P = Cte$ et $P/V = Cte$.</p> <p>Si le diamètre d augmente, le débit de pompage Q_p augmente, la hauteur théorique H^* diminue et donc Q_p/H^* augmente. Cela veut dire qu'en augmentant le diamètre, la circulation du liquide est augmentée.</p> <p>– 2^e cas : la vitesse périphérique $\pi Nd = Cte$.</p> <p>Si le diamètre d augmente, le débit de pompage Q_p, la puissance dissipée P/V et Q_p/H^* augmentent. Comme dans le 1^{er} cas, la circulation du fluide est meilleure.</p> <p>– 3^e cas : Q_p (ou t_p) = Cte.</p> <p>Si le diamètre d augmente, pour avoir le même débit de pompage, il faut une vitesse de rotation et une puissance dissipée nettement inférieures, ce qui peut être intéressant.</p>	d	R	R	R
	d/D	R	R	R
	P	1	R^2	R^{-4}
	P/V	1	R^2	R^{-4}
	N	$R^{-1,67}$	R^{-1}	R^{-3}
	$V_p = \pi Nd$	$R^{-0,67}$	1	R^{-2}
	Re	$R^{-0,33}$	R	R^{-1}
	Fr	$R^{-2,33}$	R^{-1}	R^{-5}
	We	$R^{-0,33}$	R	R^{-3}
	Q_p	$R^{1,33}$	R^2	1
	t_p	$R^{-1,33}$	R^{-2}	1
	H^*	$R^{-1,33}$	1	R^{-4}
	Q_p/H^*	$R^{2,66}$	R^2	R^4

Le rapport d/D sera donc choisi en fonction de l'action (pompage ou turbulence) à privilégier, c'est-à-dire en fonction de l'opération à réaliser dans la cuve agitée.

5.4 Comparaison de deux turbines à débit radial de rapports d/D différents

On considère deux turbines disques à six pales droites de diamètres différents ($d = 0,10$ et $0,15$ m), tournant dans une cuve ($D = 0,3$ m, $n_c = 4$, $H = D$, $Y/d = 1$) dissipant la même puissance $P = 50$ W. On calcule les grandeurs N , Re , V_p , Q_p , dans le cas où la cuve contient de l'eau ($\rho = 1000$ kg/m³, $\nu = 10^{-6}$ m²/s).

Tableau 7 – Résultats obtenus avec différents mobiles dissipant même puissance			
Paramètre	Hélice marine	Turbine disque à 6 pales	
	$d = 0,10$ m	$d = 0,10$ m	$d = 0,15$ m
P (W)	50	50	50
N_p (1).....	0,37	5,5	5,5
N (s ⁻¹)	24	9,7	4,9
Re	$2,4 \times 10^5$	$0,97 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$
V_p(m/s)	7,5	3	2,3
N_{Qp} (1).....	0,55	0,80	0,80
Q_p (m ³ /s)	$13,2 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$13,2 \times 10^{-3}$
H^* (m)	0,39	0,65	0,38
Q_p/H^* ..(m ² /s)	0,034	0,012	0,035

Hélice marine : repère A1, [Form. J 3 802].
 Turbine disque à 6 pales : repère R1, [Form. J 3 802].
 La signification des symboles est donnée en début d'article.
 (1) Les valeurs de N_p et N_{Qp} sont dans [Form. J 3 802] ; $N_p = 5,5$ est une valeur moyenne.

5.4 Comparaison de deux turbines à débit radial de rapports d/D différents

On notera que :

- en augmentant le diamètre du mobile d'agitation (à $P = \text{Cte}$), la vitesse de rotation diminue mais le débit de pompage augmente ;
- par contre, le degré de turbulence lié à H^* diminue ;
- à même puissance dissipée, la circulation sera beaucoup plus favorisée avec un mobile de rapport d/D plus grand ;
- en jouant sur le rapport d/D , il est donc possible d'augmenter ou de diminuer les actions de pompage ou de turbulence du mobile.

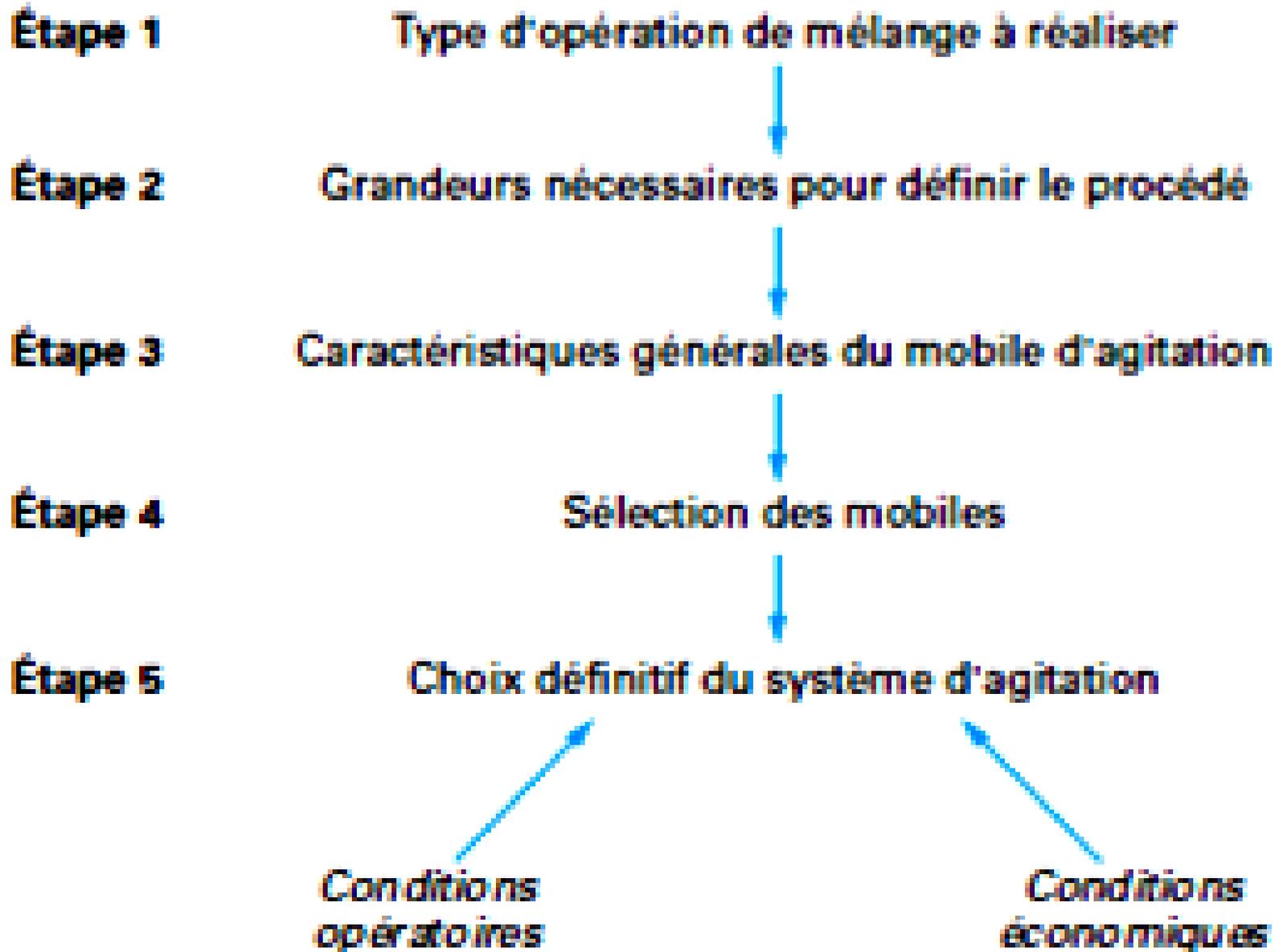
Cela démontre une fois encore que la puissance dissipée n'est pas un critère suffisant pour caractériser l'action d'un mobile d'agitation.

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. Définition d'un système d'agitation
3. Paramètres globaux d'un système d'agitation
4. Paramètres locaux d'un système d'agitation
5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation
- 6. Choix du matériel d'agitation**
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage**

6. CHOIX DU MATERIEL D'AGITATION

- Le choix du type de mobile d'agitation est déterminant pour l'économie d'une opération d'agitation à réaliser. Il est évident que **le type de mobile doit être adapté à l'opération d'agitation à réaliser.**
- Pour cela il faut **bien définir ce que l'on veut réaliser dans la cuve.**
- Pour orienter le choix du matériel nous vous proposons la démarche suivante.



6. CHOIX DU MATERIEL D'AGITATION

6.1 Types d'opérations à réaliser

Il s'agit des opérations suivantes :

- mise et/ou maintien en suspension ;
- dissolution, cristallisation ;
- extraction liquide-solide ;
- dispersion ;
- émulsion ;
- mélange ;
- homogénéisation, circulation ;
- transfert thermique ;
- dilution ;
- neutralisation ;
- réaction chimique ;
- extraction liquide-liquide ;
- absorption, désorption ;
- fermentation, etc.

6.2 Grandeurs nécessaires pour définir le procédé

Examen détaillé des produits mis en présence.

Liquides	Solides
<ul style="list-style-type: none">— masse volumique ;— viscosité ;— pourcentage ;— température initiale et finale ;— type de fluide.	<ul style="list-style-type: none">— pourcentage ;— masse volumique ;— dimension et répartition granulométrique ;— vitesse de décantation ;— mouillabilité ;— solubilité.— nature ;

Gaz : — nature ; — débit ; — pression ; — solubilité.

6.3 Caractéristiques générales du mobile d'agitation

- cisaillement fort, moyen, faible ;
- turbulence forte, moyenne, faible ;
- pompage fort, moyen, faible.

6.4 Sélection des mobiles

Le tableau 8 donne une liste de mobiles susceptibles d'être utilisés en fonction du type d'opération de mélange à réaliser.

Tableau 8 – Choix du mobile d'agitation

Opération à réaliser	Principales grandeurs nécessaires pour définir le procédé	Caractéristiques générales des mobiles d'agitation	Type de mobile d'agitation (1)
Mélange liquide-solide			
Mise et maintien en suspension	<ul style="list-style-type: none"> – concentration – granulométrie – masse volumique – vitesse de décantation des solides – mouillabilité – sensibilité au cisaillement – degré d'homogénéité – viscosité 	<ul style="list-style-type: none"> – faible cisaillement – faible turbulence – très bon pompage 	<ul style="list-style-type: none"> A1 R3 A2 R8 A4 A6 A7
Dissolution Cristallisation	<ul style="list-style-type: none"> – concentration – granulométrie – masse volumique – vitesse de décantation des solides – mouillabilité et solubilité – sensibilité au cisaillement – viscosité 	<ul style="list-style-type: none"> – cisaillement moyen – turbulence moyenne – bon pompage 	<ul style="list-style-type: none"> A1 R3 A2 A3 A4 A6
Dispersion de solides ou poudres dans des liquides	<ul style="list-style-type: none"> – concentration – granulométrie – masse volumique – vitesse de décantation des solides ou poudres – nature des fluides – variation de la viscosité – mouillabilité 	<ul style="list-style-type: none"> – cisaillement important – faible capacité de mélange 	<ul style="list-style-type: none"> R3 R6

Mélange liquide-liquide
a) liquides miscibles

Homogénéisation-mélange Dilution Transfert thermique Réaction chimique	<ul style="list-style-type: none"> – viscosité des fluides – évolution de la viscosité dans le temps – nature des fluides – temps de mélange 	<ul style="list-style-type: none"> – faible cisaillement – faible turbulence – très bon pompage <i>mobile à flux axial avec ou sans composante radiale</i> 	A1 A2 A3 A4 A5 A6	R7 R8
---	--	--	----------------------------------	----------

b) liquides non miscibles

Extraction liquide-liquide Dispersion Réaction chimique Émulsions	<ul style="list-style-type: none"> – pourcentage des différents liquides – taille des gouttes dispersées – degré de stabilité de l'émulsion 	<ul style="list-style-type: none"> – fort cisaillement – forte turbulence – circulation moyenne <i>mobile à flux radial</i> 	A4,3 A4,4	R1 R2 R3 R4 R5 R6
--	--	---	--------------	----------------------------------

Mélange liquide-gaz

Dispersion d'un gaz dans un liquide Réaction chimique Absorption Désorption Fermentation	<ul style="list-style-type: none"> – débit gazeux – viscosité – variation de la viscosité dans le temps – sensibilité des micro-organismes au cisaillement 	<ul style="list-style-type: none"> – forte turbulence – fort cisaillement – bonne circulation 	A2 A3,3 A4,14	R1 R2
--	--	--	---------------------	----------

6.5 Choix définitif

Pour chaque problème plusieurs agitateurs répondront aux conditions à satisfaire. **Une sélection plus** fine doit tenir compte :

- des conditions opératoires ;
- de considérations économiques.

6.5.1 Conditions opératoires

□ **Mode opératoire :**

- fonctionnement en continu, discontinu ;
- débits à traiter ;
- temps de mélange limité ou non ;
- mode d'évacuation du mélange.

6.5.1 Conditions opératoires

❑ Mode de montage du mobile :

- agitateur amovible avec fixation sur le bord d'une cuve ouverte ;
- agitateur vertical monté sur cuve ouverte ;
- agitateur vertical monté sur cuve fermée (sous pression ou sous vide)
- agitateur à entrée latérale avec cuve fermée ou ouverte ;
- agitateur à entrée par le fond.

❑ Type de cuve :

- forme, hauteur, diamètre ;
- cuve ouverte, fermée ;
- cuve sous pression, sous vide ;
- équipement de la cuve : serpentins, chicanes, trou d'homme, étanchéité ;
- position des piquages (alimentation, vidange, recirculation).

6.5.2 Considérations économiques

Le choix définitif de l'ensemble d'agitation ne peut se faire qu'après une étude portant sur les considérations économiques (coût d'investissement, coût d'entretien), après consultations de plusieurs fabricants.

LE PLAN

1. Opérations de mélange
2. Définition d'un système d'agitation
3. Paramètres globaux d'un système d'agitation
4. Paramètres locaux d'un système d'agitation
5. Exemples de calculs pour des systèmes d'agitation
6. Choix du matériel d'agitation
- 7. Extrapolation du pilote à l'échelle industrielle**
- 8. Contrôles après mélangeage (Voir le cours sur les émulsions)**

7. EXTRAPOLATION DU PILOTE À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE

7.1 Principe de l'extrapolation

- ❖ Le but de l'extrapolation est de permettre de reproduire à l'échelle industrielle les résultats obtenus à l'échelle pilote ou laboratoire.
- ❖ Il s'agit, à partir de résultats obtenus à l'échelle du 1/10 de m³, de dimensionner un système d'agitation à l'échelle de plusieurs m³, voire d'une centaine de m³.
- ❖ **L'extrapolation est fondée sur le principe de similitude selon lequel les rapports d'un ou plusieurs paramètres sont les mêmes aux deux échelles.**
- ❖ Dans le domaine de l'agitation, les paramètres géométriques et opératoires sont nombreux

7.1 Principe de l'extrapolation

On peut considérer cinq similitudes :

- **similitude géométrique** : les rapports des dimensions géométriques sont les mêmes aux deux échelles (exemple : d/D , w/d , etc.) ;
- **similitude dynamique** : les rapports des forces sont identiques (exemple : $Re = \text{force d'inertie} / \text{force de viscosité}$, $Fr = \text{force d'inertie} / \text{force de pesanteur}$, etc.) ;
- **similitude cinématique** : les rapports des vitesses en des points homologues sont identiques ;
- **similitude chimique** : les concentrations sont les mêmes en des points homologues ;
- **similitude thermique** : les températures sont les mêmes en des points homologues.

7.1 Principe de l'extrapolation

Le tableau 9 montre l'influence d'un changement d'échelle de ***facteur F , en conservant la similitude géométrique***, sur les grandeurs caractéristiques d'un système d'agitation.

Selon la grandeur conservée invariante d'une échelle à l'autre, le principe de similitude n'est pas respecté pour les autres grandeurs caractéristiques.

Tableau 9 – Effet d'un changement d'échelle sur les grandeurs caractéristiques (régime turbulent)

Toutes les grandeurs géométriques sont multipliées par un facteur F donc le volume V est multiplié par F^3

Grandeur caractéristique	Grandeur invariante						
	N	$\frac{\pi}{Nd}$	P/V	t_p	Re	Fr	We
N	1	F^{-1}	$F^{-0,66}$	1	F^{-2}	$F^{-0,50}$	$F^{-1,50}$
$V_p = \pi Nd$	F	1	$F^{0,33}$	F	F^{-1}	$F^{0,50}$	$F^{-0,50}$
P/V	F^2	F^{-1}	1	F^2	F^{-4}	$F^{0,50}$	$F^{-2,50}$
Q_p	F^3	F^2	$F^{2,33}$	F^3	F	$F^{2,50}$	$F^{1,50}$
t_p	1	F	$F^{0,66}$	1	F^{+2}	$F^{+0,50}$	$F^{+1,50}$
H^*	F^2	1	$F^{0,66}$	F^2	F^{-2}	F	F^{-1}
Q_p/H^*	F	F^2	$F^{1,66}$	F	F^{-1}	$F^{1,50}$	$F^{2,50}$
Re	F^2	F	$F^{1,33}$	F^2	1	$F^{1,50}$	$F^{0,50}$
Fr	F	F^{-1}	$F^{-0,33}$	F	F^{-3}	1	F^{-2}
We	F^3	F	$F^{1,66}$	F^3	F^{-1}	F^2	1
Gradient de vitesse moyen (1)	1	F^{-1}	$F^{-0,66}$	1	F^{-2}	$F^{-0,50}$	$F^{-1,50}$
Gradient de vitesse maximal (1)	F	1	$F^{0,33}$	F	F^{-1}	$F^{0,50}$	$F^{-0,50}$

7.1 Principe de l'extrapolation

- L'examen de ce tableau montre bien que, dans tout problème d'agitation-mélange, il y a incompatibilité entre critères et qu'il est nécessaire de déterminer **quelles sont la ou les grandeurs dont l'influence est prépondérante sur le phénomène étudié et que l'on garde constantes.**
- Cela démontre l'utilité de bien définir le problème d'agitation.

7.1 Principe de l'extrapolation

- L'extrapolation revient toujours à déterminer la vitesse du mobile d'agitation.
- **Si la similitude géométrique est conservée, le diamètre du mobile d'agitation, la géométrie de la cuve sont définis.** Il sera alors possible de déterminer les autres grandeurs caractéristiques.
- Il faut vérifier que les valeurs obtenues sont compatibles avec un bon fonctionnement du procédé.

7.1 Principe de l'extrapolation

- Lors de certaines extrapolations, si on veut conserver plusieurs grandeurs constantes, **il est nécessaire de procéder à une extrapolation non géométrique ; on peut en particulier utiliser des rapports d/D supérieurs.**

7.2 Exemples d'extrapolation

7.2.1 Exemples d'extrapolation entre un pilote et une cuve industrielle

Un exemple d'extrapolation entre un pilote de 0,785 m³ et une cuve industrielle de 50 m³ est donné tableau **10**.

Tableau 10 – Exemple d’extrapolation entre un pilote et une cuve industrielle

Pilote : cuve standard ($d = 0,33 \text{ m}$), $H = D = 1 \text{ m}$, $V = 0,785 \text{ m}^3$.
Turbines disques à 6 pales droites (repère $R1$, [Form. J 3 802]).
Cuves chicanées $n_c = 4$.
Fluide peu visqueux $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 72 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$.
Régime turbulent.
Facteur d’échelle : $F = 4$.

Grandeur caractéristique	Pilote	Échelle industrielle						
		Grandeur invariante						
		N	$V_p = \pi Nd$	P/V	Re	Fr	$V_p = \pi Nd$	P/V
		Similitude géométrique					Similitude non géométrique	
N (min^{-1})	180	180	45	72	11,25	90	30	36
$V_p = \pi Nd$ (m/s)	3,14	12,6	3,14	5	0,78	6,3	3,14	3,8
P (kW)	0,61	627,5	9,8	39,2	0,15	78,3	22	39,2
P/V (kW/m^3)	0,78	12,5	0,195	0,78	0,003	1,56	0,44	0,78
Re	$3,3 \times 10^5$	$52,8 \times 10^5$	13×10^5	21×10^5	$3,3 \times 10^5$	$26,4 \times 10^5$	$19,5 \times 10^5$	24×10^5
We	$4,6 \times 10^3$	$29,5 \times 10^4$	$18,4 \times 10^3$	46×10^3	$1,1 \times 10^3$	$73,6 \times 10^3$	$27,8 \times 10^3$	40×10^3
Fr	0,30	1,2	0,075	0,19	0,0047	0,30	0,05	0,073
d/D	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50
Gradient de vitesse moyen (unité arbitraire)	1	1	0,25	0,4	0,06	0,5	0,17	0,2
Gradient de vitesse maximal (unité arbitraire)	1	4	1	1,6	0,25	2	1	1,2

La signification des symboles est donnée en début d’article.

On passe de la colonne **pilote** aux colonnes **similitude** géométrique en utilisant le tableau 9 avec $F = 4$.

On passe des colonnes **similitude** géométrique aux colonnes **similitude non géométrique** en utilisant le tableau 6 avec $R = 0,50/0,33$.

7.2.1 Exemples d'extrapolation entre un pilote et une cuve industrielle

Plusieurs grandeurs ont été conservées invariantes dans l'extrapolation et l'évolution des autres grandeurs est donnée dans les différentes colonnes.

□ Similitude géométrique $d/D = 0,33$

- La 1^{re} colonne conserve $N = Cte$, c'est-à-dire le même temps de mélange aux 2 échelles. Cela conduit à des valeurs très importantes de la puissance consommée.
- La 2^e colonne conserve $\pi Nd = Cte$. La puissance par unité de volume diminue à l'échelle industrielle.
- La 3^e colonne conserve $P/V = Cte$. La vitesse périphérique augmente. Le gradient de vitesse moyen diminue, par contre le gradient de vitesse maximal augmente beaucoup.

□ Similitude géométrique $d/D = 0,33$ (suite)

- La 4e colonne indique un même nombre de Reynolds, ce qui a pour effet de diminuer fortement la vitesse de rotation N *et donc la* puissance dissipée.
- La 5e colonne montre que, pour conserver le nombre de Froude constant, il faut une vitesse de rotation relativement importante.

□ Similitude non géométrique $d/D = 0,50$

- Dans le cas où le procédé est sensible au cisaillement (catalyseur, solide, micro-organisme, bactéries, etc.), il n'est plus possible d'extrapoler avec une similitude géométrique.

□ Similitude non géométrique $d/D = 0,50$ (Suite)

- Afin de diminuer le gradient de vitesse maximal au voisinage de la turbine, on est amené à prévoir un mobile d'agitation de rapport d/D *supérieur*. Si, de plus, on veut conserver la puissance dissipée par unité de volume (7e colonne, $P/V = Cte$), *il faudra prendre un rapport $d/D = 0,50$ pour obtenir un gradient de vitesse maximal (1,2) voisin de celui obtenu sur le pilote.*
- Avec ce même rapport $d/D = 0,50$, *si la vitesse périphérique doit être gardée constante (6e colonne, $V_p = Cte$), l'extrapolation conduit à une puissance plus grande qu'en utilisant un rapport $d/D = 0,33$ (2e colonne, $V_p = Cte$) (donc à un couple supérieur au niveau du réducteur), mais un gradient de vitesse pratiquement identique à celui obtenu sur le pilote.*

7.2.2 Exemple d'un procédé d'absorption en continu

- On veut extrapoler un procédé sous pression mis au point dans un pilote de 75 L environ. L'unité industrielle doit avoir une capacité de l'ordre de 70 m³.
- Le tableau 11 résume tous les résultats numériques, tous calculs faits, de ce problème.

Tableau 11 – Exemple : résultats de l’extrapolation d’un procédé d’absorption en continu, d’après [19]

Grandeurs caractéristiques	Pilote	Échelle industrielle	
		1 ^{re} extrapolation <i>VVM</i> (1) = Cte	2 ^e extrapolation <i>VVM</i> (1) est réduit
Pression (bar)	0,3	1	1
Diamètres de cuve <i>D</i> (m)	0,46	3,6	3,6
Puissance (milieu gazeux) (kW)	0,0145	38	66
Diamètre de turbine <i>d</i> (mm)	150	1 220	1 220
Nombre de turbines	1	2	2
Hauteur de liquide (milieu gazeux) (m)	0,46	6,7	6,7
Volume (milieu gazeux) (L)	75	70 000	70 000
Volume (milieu non gazeux) (L)	68	57 000	57 000
Débit de gaz par unité de volume [<i>VVM</i> (1)]	1,6	1,6	0,7
Débit de gaz (m ³ /h)	7,1	6 000	2 700
Vitesse du gaz (m/min)	0,55	4	1,8
Taux de transfert de masse (2)	1	1	1
Coefficient de transfert <i>k_{L a_i}</i> (2)	1	0,6	0,8
Gradient de concentration (2)	1	1,6	1,2
Gradient de vitesse maximal (2)	1	1,4	1,7

(1) *VVM* : volume de gaz/volume de liquide x temps en min).

(2) Unité arbitraire : 1 pour le pilote.

7.2.2 Exemple d'un procédé d'absorption en continu

- La première extrapolation utilise un débit de gaz par unité de volume de liquide constant. La puissance requise pour satisfaire l'absorption gaz-liquide seule est trop faible pour donner une bonne dispersion physique du gaz, en raison de la vitesse de passage du gaz qui est trop élevée dans la cuve en vraie grandeur. La concentration du gaz à la sortie de la cuve montre que la quantité de gaz introduite par unité de volume (VVM) peut être réduite lors de l'extrapolation tout en permettant à l'absorption du gaz actif de rester dans des limites raisonnables.

7.2.2 Exemple d'un procédé d'absorption en continu (Suite)

- On est alors conduit à une seconde extrapolation, dont le niveau de puissance est plus élevé et la vitesse de passage du gaz plus faible, de façon à améliorer la dispersion physique du gaz. Il est bon de noter que cette extrapolation a été conduite suivant des règles de similitude géométrique, et que le gradient de vitesse maximal au voisinage de la turbine s'est trouvé ainsi environ 70 % plus important à l'échelle industrielle qu'à l'échelle pilote. En fait, dans ce cas précis, d'autres essais pilotes avaient montré que le procédé n'était que peu sensible à la contrainte de cisaillement, et que l'on pouvait très bien s'accomoder d'un gradient de vitesse (taux de cisaillement) élevé à l'échelle industrielle.

7.2.3 Procédure d'extrapolation

Les deux exemples choisis (relativement simples) montrent que l'extrapolation des agitateurs est extrêmement complexe, compte tenu de tous les paramètres opératoires. Nous proposons une procédure d'extrapolation qui peut servir de base de travail :

- définir de façon précise les buts de l'opération de mélange et spécifier les actions demandées au mélangeur ;
- déterminer les grandeurs caractéristiques importantes, celles qui auront un effet déterminant sur le résultat souhaité ;
- rechercher le ou les critères d'extrapolation à utiliser ;
- vérifier que le régime hydrodynamique de la cuve est similaire et que les valeurs des autres paramètres conduisent à un fonctionnement correct ;
- tenir compte des contraintes de fonctionnement pour définir le système d'agitation, sans oublier les contraintes mécaniques et économiques.

7.3 Conclusion

L'extrapolation des cuves agitées mécaniquement n'est pas un problème simple. Les exemples traités montrent que, si le facteur d'échelle est important, les divergences concernant, par exemple, la puissance dissipée augmentent très vite, selon la grandeur caractéristique conservée invariante dans l'extrapolation.

L'expérimentation pilote est donc une étape importante et doit permettre :

- de bien définir la géométrie du système d'agitation adaptée au problème posé ;
- de décider du ou des phénomènes prépondérants du processus sur lequel doit être fondée l'extrapolation.

8. CONTRÔLE APRES LE MELANGEAGE

Voir les enseignements sur :

- Emulsification
- Dissolution
- Suspension