

## Agitation et Mélange

### Concepts Théoriques de base

#### Agiter et mélanger

Agiter et mélanger sont des opérations complexes d'homogénéisation faisant intervenir des phénomènes hydrodynamiques (régimes d'écoulements), thermiques (transferts), chimiques (réactions) et mécaniques (cisaillement). Ces opérations, lorsque réalisées industriellement, nécessitent la mise en œuvre de systèmes de mélanges performants visant à garantir la stabilité et la constance des mélanges aux moindres coûts (temps et énergie minimums). C'est dans ce contexte que les mélangeurs par rotation mécanique se sont imposés dans de nombreuses industries pour tout type de mélanges :

Mise en mouvement	Liquides miscibles	Homogénéisation Mise en suspension Délitage
	Liquides – Solides	
Dispersion (rupture d'une phase)	Liquides non miscibles	Dispersion - Emulsion
	Liquides - Gaz	

#### Paramètres d'agitation

Préciser et dimensionner un type de mélangeur consiste à déterminer les paramètres optimaux à la mise en œuvre du procédé visé. Cette optimisation s'effectue très souvent sous contraintes, qu'elles soient de coûts, d'encombrements ou de limites physiques. Cette démarche repose sur le choix d'un certain nombre de paramètres :

- Type d'agitateurs(s) et positionnement
  - Mobiles à écoulement radial
  - Mobiles à écoulement axial
  - Mobiles à écoulement mixte
  - Mobiles à écoulement tangentiel
  - Mobiles de dispersion / émulsification
- Géométrie de la cuve (dimensions, formes)
- Rotation du Mobile (vitesse, régime d'écoulement)
- Durée du mélange
- Conditions physiques imposées (pression, température)

#### Puissance d'agitation

Ces éléments sont prépondérants au calcul du paramètre principal de caractérisation du système de mélange qu'est la puissance dissipée (ou puissance nécessaire à son entraînement), qui permet :

- De choisir le moteur à installer
- De comparer les performances de mélange
- De diagnostiquer et éventuellement de piloter l'opération de mélange

$$P = 2 \Pi N (C - C_0)$$

(W)
(tr/s)
C couple (N.m)
Couple à vide

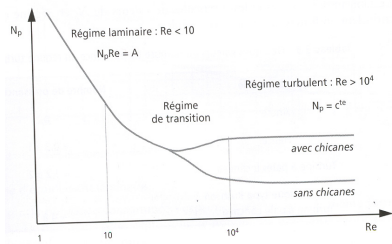
Cette puissance est fonction :

1. de la nature du mélange : viscosité ( $\mu$  en Pa.s), densité ( $\rho$  en Kg/m<sup>3</sup>)
2. du type de mélangeur : géométries et dimensions (dont d, diamètre de l'outil d'agitation en m)
3. du mode opératoire : vitesse de rotation (N en s<sup>-1</sup>), accélération de la pesanteur (g en m/s<sup>2</sup>)

#### Nombres caractéristiques adimensionnels

Chacune de ces valeurs pouvant être exprimée à partir des trois unités fondamentales (masse, longueur, temps), le théorème de Vaschy-Buckingham permet de transformer l'expression de la puissance, dans une première approche, en 3 nombres adimensionnels liés les uns aux autres :

- Le nombre de Reynolds :  $R_e = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$   
qui caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.  $R_e$  permet de calculer le type d'écoulement (laminaire ou turbulent ;  $R_e$  élevé  $\rightarrow$  régime turbulent)
- Le nombre de Froude :  $F_r = \frac{N^2d}{g}$   
qui caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité.  $F_r$  permet de prédire la formation d'un vortex ( $F_r$  élevé  $\rightarrow$  vortex important)
- Le nombre de Puissance :  $N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5}$   
qui est le coefficient de traînée de l'agitateur dans le fluide et représente ainsi l'expression de la puissance consommée



En régime laminaire ( $Re < 10$ ) :  $N_p Re = Cte = A$   
 $\rightarrow P = A \mu N^2 d^3$   
 $\rightarrow$  l'énergie dissipée dépend de la viscosité du fluide mais pas de sa masse volumique

En régime turbulent ( $Re > 10^4$ ) :  $N_p = Cte$   
 $\rightarrow$  l'énergie dissipée ne dépend pas de la viscosité du fluide mais de sa masse volumique

D'autres paramètres permettent de caractériser au mieux l'écoulement au sein du mélangeur :

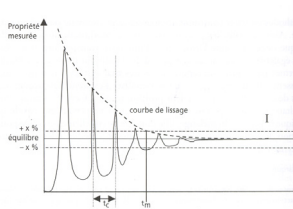
- Le nombre de pompage (adimensionnel) :  $N_{QP} \rightarrow$  Débit de matière qui passe à travers le mobile d'agitation
- Le nombre de circulation (adimensionnel) :  $N_{QC} \rightarrow$  Débit de matière en circulation autour du mobile d'agitation
- Le taux de cisaillement (en  $s^{-1}$ ) :  $\dot{\gamma}$

### Les critères de mélange

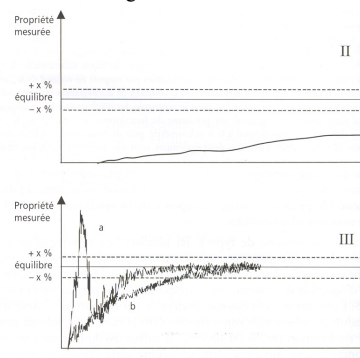
L'ensemble de ces paramètres permet :

1. de calculer, pour une géométrie donnée, la puissance nécessaire à l'obtention d'un mélange, et donc l'énergie totale consommée par l'agitateur,
2. de calculer, pour une puissance donnée, les dimensions de l'agitateur,
3. de prévoir des temps de mélange  $t_m$ , eux-mêmes fonctions des temps de circulation  $t_c$  (temps moyen mis par un élément de matière pour effectuer une rotation complète dans la cuve), en appliquant la règle  $N_c t_c = C^{lc}$

En régime laminaire



En régime turbulent



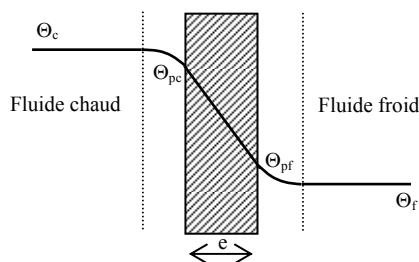
4. de déterminer s'il vaut mieux tourner vite ou plus longtemps (en respectant les contraintes énergétiques)
5. d'interpoler les caractéristiques d'un type de mélangeur donné à un mélangeur de dimensions différentes

### Les transferts de chaleur dans les cuves agitées

Les cuves agitées sont rarement utilisées dans le seul but de chauffer ou refroidir de la matière, car elles sont moins efficaces qu'un échangeur de chaleur conçu pour cette fonction. Toutefois, il s'avère nécessaire d'apporter ou d'évacuer de la chaleur au sein même des cuves lors des opérations de mélange.

Ces problèmes de transfert de chaleur sont particulièrement préoccupants lorsque l'on cherche à interpoler les caractéristiques d'une cuve donnée à une cuve de dimensions différentes.

Les calculs de transferts de chaleurs au sein d'une cuve sont régis par les lois de la thermodynamique et tout particulièrement par la loi d'échange à travers une paroi entre deux milieux de températures différentes :



Le flux de chaleur  $dQ$  échangé entre les deux fluides est :

$$dQ = \frac{\Theta_c - \Theta_f}{\frac{1}{h_c dA_c} + \frac{e}{\lambda_i dA_m} + \frac{1}{h_f dA_f}}$$

où :

- $h_c$  et  $h_f$  sont les coefficients superficiels d'échange
- $dA_c$  et  $dA_f$  les surfaces correspondantes
- $\lambda_i$  est la conductivité thermique du matériau solide (paroi)
- $dA_m$  est la moyenne logarithmique des aires  $dA_c$  et  $dA_f$

Les coefficients superficiels d'échange thermique pouvant être obtenus à partir de l'expression de nombres adimensionnels suivants :

- le nombre de Nusselt qui exprime le rapport entre le flux transféré et celui qui serait transféré si le fluide était au repos

$$N_u = \frac{h_i D}{\lambda_i} \quad \text{où } D \text{ est le diamètre de la cuve}$$

- le nombre de Prandtl qui peut être considéré comme le rapport des coefficients de diffusion de la chaleur et de la quantité de mouvement

$$P_r = \frac{Cp_i \mu_i}{\lambda_i} \quad \text{où } Cp_i \text{ est la chaleur spécifique du fluide et } \mu_i \text{, sa viscosité}$$

- le nombre de viscosité qui est le rapport entre la viscosité moyenne du fluide dans la cuve ( $\mu$ ) et celle calculée à la température de la paroi ( $\mu_p$ )

$$V_i = \frac{\mu}{\mu_p}$$

Afin d'obtenir les coefficients d'échange thermiques, on exploite en général la corrélation qui consiste à écrire  $N_u$  sous la forme :

$$N_u = k \cdot R_e^\alpha \cdot P_r^\beta \cdot V_i^\gamma$$

**Pour en savoir plus :**

Littérature

- *Agitation et Mélange* – Catherine Xuereb, Martine Poux, Joël Bertrand (Editions Dunod)
- *Mixing : Principles and Applications* – S. Nagata (Editions John Wiley)
- *Publications scientifiques de Philippe Tanguy et Al.* (International Journal for Numerical Methods in Engineering, Chemical Engineering & Technology, Chemical Engineering Science, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, ...)
- *Dossier Agitation, Mélange* – Michel Roustan, Jean-Claude Pharamond (Techniques de l'Ingénieur)

Web

- <http://www.u-bourgogne.fr/GPAB/jmpc/tphall2005/TPMelange2005.htm>