

Caractérisation de l'agitation de milieux granulaires en mélangeur TRIAXE

DEMEYRE Jean-François^{a*}, GATUMEL Cendrine^a, BERTHIAUX Henri^a, GRANDJEAN Michel^b

^aLaboratoire de Génie des Procédés des Solides Divisés, UMR CNRS 2392,
École des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard, 81013 Albi Cedex 09 (France)

^bHognon SA, rue Antoine Laurent de Lavoisier, 77720 Mormant (France)

Résumé

L'objet de ce travail est de caractériser le fonctionnement du mélangeur TRIAXE[®] sur des milieux granulaires à écoulement libre et cohésifs. Nous démontrons que ce mélangeur, combinant deux mouvements de révolution, est très peu consommateur d'énergie notamment pour les poudres cohésives. L'influence de la combinaison des vitesses de giration et de rotation est particulièrement étudiée. Les résultats sont exprimés en termes de couple effectif et de puissance consommée.

Mots-clés : Mélange, Milieux Granulaires, Nombres Adimensionnels, Puissance consommée.

1. Introduction

Le mélange des solides divisés (poudres, milieux granulaires) est une opération clé pour de nombreux domaines industriels (pharmacie, agro-alimentaire, ciments, matières plastiques...). Réglant l'homogénéité de composition à l'échelle requise, qui est souvent celle du conditionnement, elle est en effet la première responsable de l'atteinte des spécifications et propriétés d'usage des produits formulés (Berthiaux, 2002). Pour les milieux granulaires, il existe de nombreuses géométries de mélangeurs et de nombreux systèmes d'agitation (mélangeurs à pales, à vis, à haut cisaillement, à tambour, en lit fluidisé, en silo...). Les mouvements induits par ces appareils sont souvent trop « systématiques » pour permettre une bonne dispersion et un mélange à faible échelle d'une part et d'autre part, leur développement est toujours basé sur des méthodes intuitives. C'est pourquoi il y a un réel besoin de relier les caractéristiques des produits, les mécanismes de mélanges et le système d'agitation. Dans ce contexte, l'apport d'outils du génie des procédés comme les corrélations entre nombres dimensionnels devrait sans doute apporter une avancée considérable.

Ce travail de début de thèse est réalisé sur un mélangeur discontinu, le TRIAXE[®], développé et vendu par la société HOGNON SA. Conçu à l'origine pour mélanger des fluides visqueux, ce système a récemment été testé au niveau industriel sur des poudres cohésives et des poudres à écoulement libre. Il est constitué d'une cuve sphérique dans laquelle la poudre est agitée par la combinaison de deux mouvements de révolution d'une hélice : un mouvement de giration de l'axe principal et un mouvement de rotation du mobile d'agitation. Différents types de pales (pleines, ajourées, à couteaux...) peuvent être adaptées. Les vitesses de giration et de rotation sont contrôlées indépendamment, autorisant un grand nombre de combinaisons si bien que l'intégralité du volume occupé par la poudre est sous l'influence du mobile. On devrait donc s'attendre à un mélange plus intime des particules qu'avec des systèmes plus « conventionnels ».

Notre but est de quantifier l'efficacité de ce mélangeur avec des systèmes granulaires agro-alimentaires en termes d'homogénéité de mélanges et de caractérisation de l'agitation. Dans ce travail, nous nous penchons sur ce dernier aspect en étudiant les puissances consommées par ce mélangeur en fonction des différentes conditions opératoires : combinaison des vitesses d'agitation et type de poudres. Grâce aux mesures du couple développé par chaque moteur (giration et rotation) nous recherchons à établir des corrélations entre nombres sans dimension comme le Nombre de Froude ou le Nombre de Puissance, caractérisant les différents régimes du mélangeur.

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : demeyre@enstimac.fr

2. Généralités

2.1 Les nombres adimensionnels dans le domaine des milieux granulaires

Contrairement au cas des fluides, la complexité des milieux granulaires ne nous permet pas de définir de viscosité. Nous ne pouvons donc pas utiliser les méthodes d'analyse dimensionnelle classiques utilisant par exemple le Nombre de Reynolds. Dans ces conditions, nous utilisons des corrélations empiriques entre nombres adimensionnels (généralement le nombre de puissance, Np et le nombre de Froude, Fr), dans lesquels interviennent des caractéristiques d'écoulement du solide dans le mélangeur utilisé. Ainsi, la littérature est assez pauvre sur ce sujet, on peut cependant citer Miyunami (1991) et les corrélations de Sato et al. pour un mélangeur à tambour horizontal (1977), ou à ruban (1979), d'Entrop (1978) pour un mélangeur à vis, de Werther (1976) pour un lit fluidisé, etc.

2.2 Propriétés des poudres influençant leur écoulement

Les systèmes particuliers sont classés selon leurs propriétés de taille, forme, porosité des grains, porosité d'un ensemble de particules... Deux grandes catégories sont distinguées :

- Les poudres à écoulement libre : en général, leur diamètre moyen est supérieur à 100 μm . Ces poudres s'écoulent très facilement et ne posent aucun problème de mottage. Par contre, chaque particule possède une forte mobilité individuelle. Ces poudres ont donc une forte tendance à ségréger.
- Les poudres cohésives : leur diamètre moyen est en général inférieur à 30 μm . Ces poudres possèdent de fortes liaisons interparticulaires comme les forces de van der Waals, les forces électrostatiques..., qui peuvent entraîner la formation d'agglomérats. Si de telles poudres posent des problèmes d'écoulement ou de stockage, elles n'ont pas vraiment de tendances à ségréger.

Le mélange des poudres est fortement dépendant des propriétés d'écoulement des constituants, elles-mêmes liées directement aux caractéristiques des poudres, telles que :

- Distribution granulométrique : Ségrégation par la taille, les fines occupent les interstices laissés par les particules plus grosses. C'est pour cela que les grosses particules remontent à la surface d'un mélange lors de vibrations par exemple. Plus l'écart de taille entre les particules est grand, plus le phénomène de ségrégation est important.
- Densité vraie et apparente : comme dans le cas précédent, une différence de densité vraie entre les constituants est défavorable au mélange.
- Forme et propriétés de surface des particules : elles influent directement sur les caractéristiques d'écoulement des produits.
- Friabilité : la formation de poussière est gênante dans plusieurs procédés, le choix du mélangeur doit donc tenir compte de la friabilité des poudres.

3. Matériels et méthodes

3.1 Les systèmes particuliers utilisés

Les solides divisés utilisés sont des produits agroalimentaires. Nous avons utilisé différents types de poudres : des poudres à écoulement libre (couscous et semoule) ainsi qu'une poudre cohésive (Lactose GranuLac[®] 140).

3.1.1 Masses volumiques

Les masses volumiques vraies ont été mesurées au pycnomètre à Hélium (Accu Pyc 1330, MICROMERITICS[®]). Cet appareil détermine le volume exact occupé par l'échantillon dans une cellule de volume connu, dans laquelle on introduit de l'hélium. Connaissant la masse de l'échantillon, on en déduit

sa masse volumique vraie. Chaque volume est la moyenne de 25 mesures, les manipulations ont été réalisées avec une cellule de 10 cm³ avec 25 purges.

La masse volumique apparente tassée des trois produits a été mesurée par un volumétre. On introduit une masse connue de poudres dans une éprouvette graduée de 250 cm³ et l'on relève le volume obtenu après un certain nombre de tassements (500 coups).

Table 1: Différentes masses volumiques de la semoule et du couscous

Masse Volumique [g · cm ⁻³]	Granulac 140	Semoule	Couscous
Vraie	1,54	1,47	1,44
Aérée	0,63	0,76	0,72
Tassée (500 coups)	0,90	0,82	0,76

Nous pouvons constater que les masses volumiques des poudres à écoulement libres sont très proches (cf. table 1).

À partir de ces valeurs, nous pouvons déterminer la compressibilité ou indice de Carr (cf. table 2) :

$$\% \text{ comp} = 100 \times \frac{\rho_{\text{tassée}} - \rho_{\text{aérée}}}{\rho_{\text{tassée}}} \quad (1)$$

Table 2 : valeurs d'indices de Carr

Granulac 140	Semoule	Couscous
30%	7,3%	5,3%

3.1.2 Porosités

La porosité intergranulaire représente le rapport entre le volume des pores et le volume total occupé par la poudre, et peut se déduire des mesures précédentes. La porosité intragranulaire quant à elle, représente le volume relatif du « vide » à l'intérieur d'une particule. La détermination de la porosité intragranulaire a été mesurée à partir du porosimètre à mercure (Autopore III, MICROMERITICS®). Aucune valeur de porosité intragranulaire n'a été détectée, ni pour la semoule ni pour le couscous.

La porosité intergranulaire est déterminée à partir des masses volumiques apparentes et de la masse volumique vraie des poudres (cf. équation 2). On peut distinguer la porosité aérée et la porosité tassée, cette dernière indique l'état de compacité maximale du système.

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{vraie}} - \rho_{\text{apparente}}}{\rho_{\text{vraie}}} \quad (2)$$

Table 3 : Valeurs de la porosité pour les trois produits :

Porosité intergranulaire	Granulac 140	Semoule	Couscous
$\varepsilon_{\text{inter}}(\text{tassée})$	0,42	0,44	0,47
$\varepsilon_{\text{inter}}(\text{aérée})$	0,59	0,48	0,5

À nouveau, les porosités des poudres à écoulement libres sont très proches. Le milieu cohésif montre bien sa différence en occupant un volume plus important initialement mais ne résiste pas au tassement (cf. table 2 et 3).

En tout état de cause, ce sont plutôt les valeurs de porosités aérées qu'il faut retenir comme point de comparaison des poudres lors d'un mélange. En effet, le mouvement du mélangeur aère la poudre au lieu de la tasser.

3.1.3 Distribution granulométrique

Les distributions granulométriques des particules de couscous et de semoule ont été mesurées par tamisage à l'aide d'une tamiseuse RETSCH® avec contrôle de l'amplitude et de la durée sur une série normalisée de tamis. La distribution granulométrique du lactose a été obtenue par diffraction laser à l'aide d'un MASTERSIZER® en voie sèche. Les résultats sont donnés dans la table 4.

Table 4 : Différents diamètres caractéristiques de la distribution granulométrique de la semoule et du couscous
⁺ établi au granulomètre laser - ^{*} établi par tamisage

Diamètre [μm]	Granulac 140 ⁺	Semoule [*]	Couscous [*]
d_{10}	20	200	1100
d_{50}	70	340	1400
d_{90}	140	840	1800
$Span = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}}$	1,71	1,88	0,5

3.2 Plate-forme expérimentale

Le TRIAXE® est un mélangeur constitué d'une cuve sphérique (cf. figure 1) et composé de 2 moteurs d'agitation :

- Le moteur inférieur entraîne l'axe de giration à des vitesses allant de 0 à 30 tr.min⁻¹. Cet axe vertical est centré dans la cuve. La giration peut s'effectuer dans le sens horaire et dans le sens anti-horaire.
- Le moteur supérieur entraîne le mobile d'agitation à des vitesses allant de 0 à 100 tr.min⁻¹. Les pales du mobile décrivent un disque autour de l'axe de rotation incliné de 15° par rapport à l'horizontale.

Chaque pale est inclinable par rapport au plan décrit par les axes des pales ce qui introduit un troisième axe. La combinaison des vitesses d'agitation et l'inclinaison des pales doivent permettre de faire varier les conditions d'écoulement afin d'obtenir un mélange satisfaisant. De plus, il existe différents types de pales : pleines, ajourées ou en couteaux afin de s'adapter au mieux au problème posé. Nous avons utilisé les pales ajourées pour cette étude.

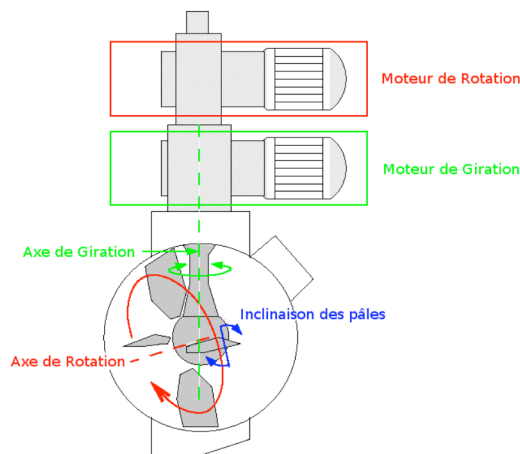


Figure 1 : Schéma du TRIAXE®

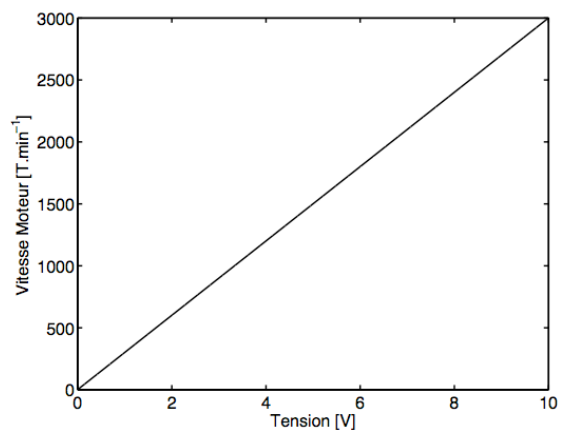


Figure 2 : Courbe d'étalonnage des vitesses des moteurs

Le TRIAXE® étudié dispose de deux moteurs SEW USOCOME® de 370 Watts de puissance. Chacun des moteurs est piloté par une platine de variation de vitesse de type MOVITRAC®. Cette platine fait varier la fréquence d'alimentation des moteurs en fonction de la tension qui lui est appliquée entre 0 et 10 Volts. En mesurant cette tension, nous déterminons les vitesses de rotation des moteurs (cf. Figure 2).

Connaissant les rapports de réduction en sortie des moteurs, nous déduisons la vitesse de révolution des axes de Giration N_{AG} et de Rotation N_{AR} (cf. équation 3) :

$$N_{AG} = \frac{N_{MG}}{144.79} \text{ et } N_{AR} = \frac{N_{MR} + 0.59N_{AG}}{34} \quad (3)$$

Où N_{MG} et N_{MR} sont respectivement les vitesses des moteurs de Giration et de Rotation.

Entre chacun des moteurs et le réducteur correspondant, nous avons placé un couplemètre rotatif de la marque SCAIME mesurant des couples variant de 0 à 5 N.m. L'ensemble doit donc permettre de connaître les puissances consommées par les deux moteurs.

L'acquisition de l'ensemble des signaux (tension aux bornes de chacun des variateurs, couple développé par chaque moteur) est réalisée grâce à une carte NATIONAL INSTRUMENTS® PCI-6023E. Les données brutes sont récoltées grâce au logiciel LABVIEW® 7.1 puis analysées par le logiciel MATLAB®.

Nous mesurons les couples développés par chacun des moteurs aux vitesses suivantes : 0, 75, 150, 225, 300, 450, 600, 900, 1200, 1800, 2400, et 3000 tr.mon⁻¹.

Nous enregistrons des points de mesures toutes les 100 millisecondes sur un intervalle de temps d'une minute afin de s'assurer de la stabilité du signal. La valeur du couple utilisée est la moyenne des couples acquis.

Afin d'obtenir la valeur du couple reçu par le produit agité, nous avons réalisé des essais à vide. Ainsi, nous nous affranchissons des pertes mécaniques en retranchant les valeurs à vide aux valeurs en charges :

$$C_{\text{effectif}} = C_{\text{en charge}} - C_{\text{à vide}} \quad (4)$$

Le couple effectif total est la somme des couples effectifs mesurés sur chaque axe. De même, la puissance consommée P_C est la somme des puissances effectives de Giration P_G et de Rotation P_R :

$$P_C = P_G + P_R \quad (5)$$

Avec :

$$P_G = (C_G - C_{G_0}) \cdot 2\pi \cdot N_{MG} \text{ et } P_R = (C_R - C_{R_0}) \cdot 2\pi \cdot N_{MR} \quad (6)$$

Où N_{MG} et N_{MR} sont les vitesses des moteurs en tr.sec⁻¹. En effet, les couples sont mesurés en sortie des moteurs et non sur les axes de giration et de rotation.

4. Résultats

La figure 3 donne les résultats obtenus pour les mesures de couple effectif sur les deux arbres pour des essais sur Couscous, Semoule et Lactose. Chaque graphique de la figure 3 décrit, pour un couple Produit/Moteur, le couple effectif développé par le moteur en fonction de sa vitesse pour différentes valeurs de la vitesse de l'autre moteur. Par exemple, la figure 3 (a) décrit le couple effectif développé par le moteur de Giration lors d'un essai sur Couscous. Les différentes séries de la figure 3 (a) correspondent à différentes vitesses du moteur de Rotation.

L'analyse de cette figure met en évidence que :

- Le couple effectif est principalement apporté par le mouvement de rotation. Pour des valeurs de vitesse de rotation des moteurs identiques, le couple effectif apporté par le moteur de Rotation est environ 3 fois plus important que le couple apporté par le moteur de Giration.
- Que ce soit en Rotation ou Giration, on observe toujours une phase de croissance de couple avec la vitesse, une phase de « plateau ». Pour la poudre cohésive, on passe par un maximum entre ces deux phases. Une fois le lactose mis en mouvement, on peut considérer qu'il est légèrement fluidisé ce qui diminue les forces de cohésion interparticulaires. Le couple à fournir est donc moindre. Ce qui explique que le couple mesuré diminue après la « vitesse critique ».

- Le couple développé par le moteur de Giration dépend de la vitesse du moteur de Rotation. Plus la vitesse du moteur de Rotation est élevée, plus le couple apporté par le moteur de Giration est faible. On peut penser que le couple apporté par le moteur de Rotation facilite le déplacement de l'arbre de Giration au sein du produit.
- Par contre, quelle que soit la vitesse du moteur de Giration, le couple développé par le moteur de Rotation est sensiblement le même.
- Le couple maximal développé pour les poudres cohésives est plus important que pour les poudres à écoulement libre.

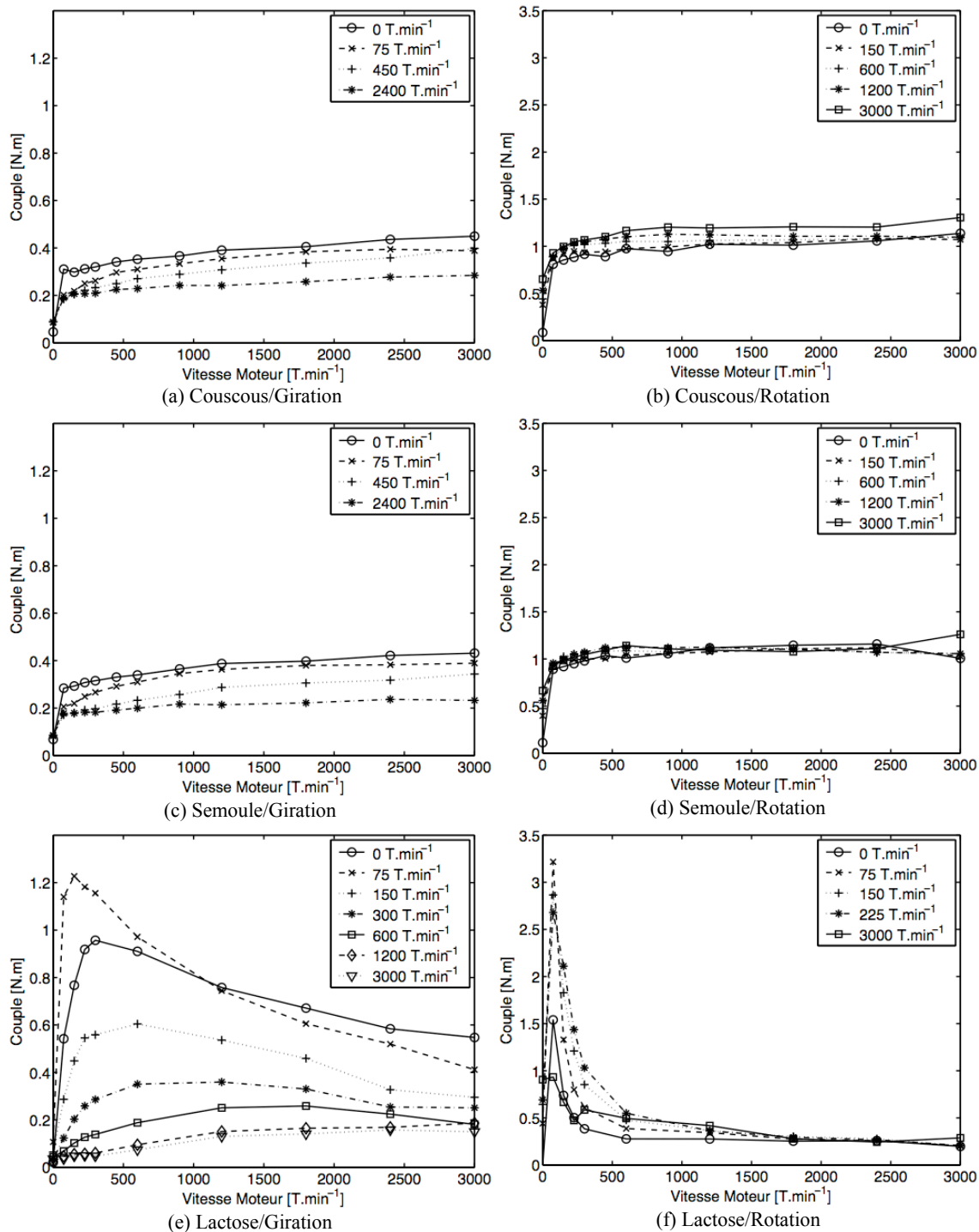


Figure 3 : Couple mesuré sur un arbre moteur en fonction de sa vitesse. Chaque série correspond à une vitesse de l'autre arbre. Chaque graphique correspond à un couple produit/moteur.

Chaque graphique de la figure 4 décrit, pour un couple Produit/Moteur, la puissance consommée par le moteur en fonction de sa vitesse pour différentes valeurs de la vitesse de l'autre moteur.

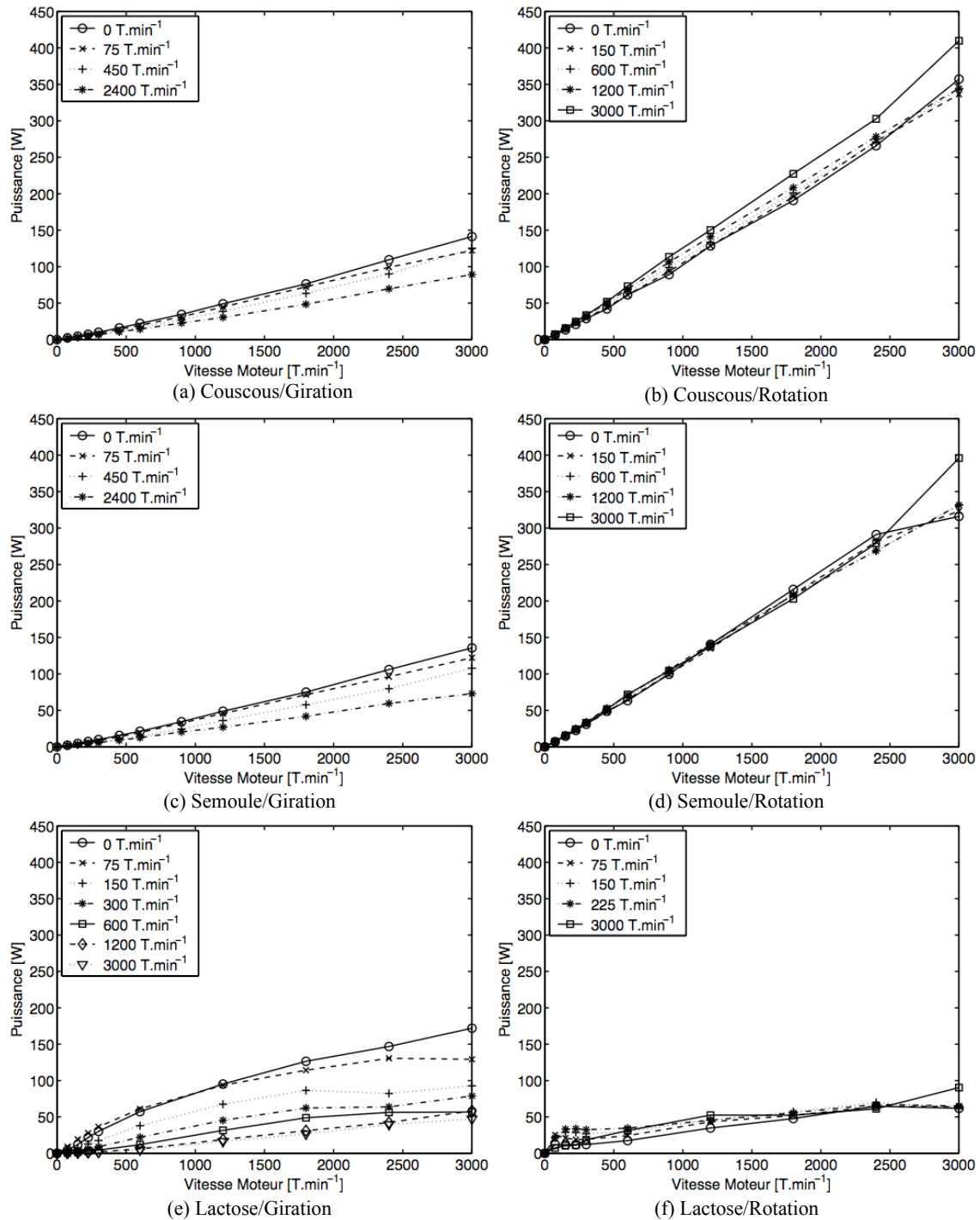


Figure 4 : Puissance efficace développée par chaque moteur en fonction de sa vitesse. Chaque série correspond à une vitesse de l'autre arbre. Chaque graphique correspond à un couple produit/moteur.

Dans le cas des poudres à écoulement libre, la puissance consommée par la Rotation est 3 fois plus importante que la puissance consommée par la Giration. On note là encore une dépendance de la puissance consommée par le moteur de Giration vis-à-vis de la vitesse du moteur de Rotation. Par contre,

pour les poudres cohésives, la puissance consommée par le moteur de Giration est légèrement supérieure à celle consommée par le moteur de Rotation, spécialement pour les faibles vitesses du moteur de Rotation. En effet, dans ce cas, le moteur de Giration doit développer un maximum de puissance pour mettre en mouvement le « bloc » formé par les poudres cohésives.

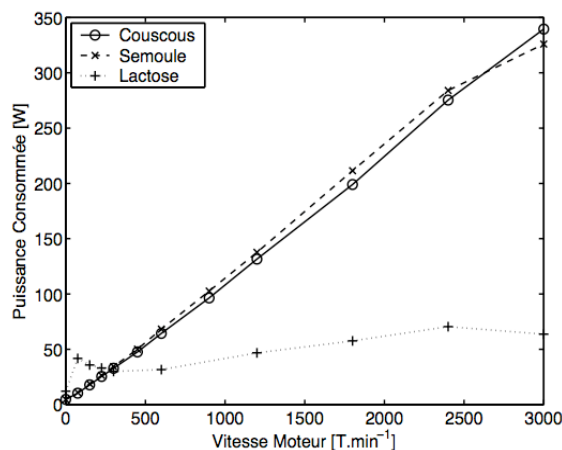


Figure 5 : Comparaison des puissances consommées pour les 3 produits pour une vitesse de Giration de 150 tr.min⁻¹.

La figure 5 représente la somme des puissances consommées par les deux moteurs pour une vitesse du moteur de Giration de 150 tr.min⁻¹. Son analyse montre que la puissance consommée pour le lactose est inférieure à celle consommée pour le couscous ou la semoule une fois dépassée la vitesse « critique » de 300 tr.min⁻¹. On retrouve la même tendance et en particulier cette vitesse critique de 300 tr.min⁻¹ pour l'ensemble des vitesses du moteur de Giration. De plus, il est intéressant de noter que le mélangeur n'a jamais consommé plus de 450 W pour mettre en mouvement 48 litres de produit soit une puissance spécifique de 15,6 W.kg⁻¹ pour le couscous, 13,2 W.kg⁻¹ pour la semoule et 5 W.kg⁻¹ pour le lactose.

Conclusion

Ce travail est réalisé sur un mélangeur discontinu, le TRIAXE[®], développé et vendu par la société HOGNON SA. Dans ce travail, nous nous sommes penchés sur la caractérisation de l'agitation en étudiant les puissances consommées par ce mélangeur en fonction des différentes conditions opératoires : combinaison des vitesses d'agitation et type de poudres. Grâce aux mesures du couple développé par chaque moteur (giration et rotation) nous avons mis en évidence l'existence d'une vitesse « critique » à partir de laquelle les forces de cohésions sont vaincues. Cette vitesse est en quelque sorte caractéristique de l'état de cohésion du système. Il serait donc très intéressant de comparer celle-ci (pour différents produits cohésifs) avec un indice caractéristique de la cohésion (par exemple l'indice de Carr ou cohésion déterminée par la cellule de Jenike ou de Schulze...). À court terme, nous proposons de déterminer une relation empirique entre le nombre de Puissance et les nombres de Froude qui caractérisent les vitesses des deux moteurs. A plus long terme, ce travail sur l'agitation sera relié à une étude sur la qualité du mélange en termes d'homogénéité et de temps mélange par une analyse d'image en ligne.

Références

- Berthiaux, H. ; 2002, Mélange et homogénéisation des solides divisés. Techniques de l'ingénieur, 397.
 Entrop, W., 1978, International Symposium on Mixing, D1, p. 1-14, Mons.
 Miyanami, K., 1991, Mixing Powder Technology Handbook. Linoya – Gotoh – Higashitani éditeurs, NY, p. 595-612.
 Sato, M., Abe, Y., Ishii, K., et Yano, T., 1977, J. Soc. Powder Technol. Jpn., 14, p.411.
 Sato, M., Miyanami, K. et Yano, T., 1979, J. Soc. Powder Technol. Jpn., 16, p.3.
 Werther, W., 1976, Chem. Eng. Tech., 46, p. 339