

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES ET SYSTÈMES**

**PAR
CAROL GAUTHIER**

**ÉTUDE DU MOUVEMENT GRANULAIRE
DANS UN CYLINDRE EN ROTATION**

MAI 1991



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

Une étude expérimentale du mouvement granulaire au sein d'un cylindre rotatif horizontal a été réalisée. Un montage expérimental constitué principalement d'un cylindre rotatif en plexiglass a été construit. Des techniques de mesures ont été mises au point pour estimer l'épaisseur de la couche active en surface du lit, sa pente ainsi que les distributions des vitesses.

Les résultats obtenus montrent que le mouvement transversal du lit granulaire dans un cylindre rotatif se caractérise par deux zones au sein desquelles les régimes d'écoulement sont très différents: la zone d'écoulement en bloc et la zone de la couche active. La première zone est caractérisée par un écoulement presque uniforme des granules ($v \simeq r\omega$), ce comportement étant similaire à celui d'un fluide à très grande viscosité. La zone de la couche active est caractérisée par un écoulement en cascade très rapide, soit un comportement similaire à celui d'un fluide à très faible viscosité. Une relation semi-empirique est proposée pour estimer la vitesse moyenne du mouvement dans la couche active en fonction des paramètres de fonctionnement.

Gauthier Carol, étudiant

Lacroix Marcel, dir.de recherche

Remerciements

Je tiens à remercier premièrement Monsieur Marcel Lacroix, Ph.D., pour avoir dirigé mes travaux et pour m'avoir donné de judicieux conseils quand cela était nécessaire. Je remercie également Monsieur Rung T. Bui, Ph.D., directeur du groupe de recherche en ingénierie des procédés et systèmes (G.R.I.P.S.).

Je remercie les deux organismes subventionnaires qui sont le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et Alcan International sans qui ces travaux n'auraient pu être réalisés.

Je tiens aussi à remercier mon collègue, Monsieur André Arsenault, pour son aide lors de la mise au point des programmes informatiques servant d'outils pour les mesures expérimentales.

Je dois aussi remercier Monsieur René Verreault, Ph.D., pour m'avoir permis d'utiliser l'ordinateur Commodore de son laboratoire.

Et finalement je tiens tout particulièrement à remercier mes parents et mon amie, Alana Russell, pour leur précieux support moral durant toute la durée de mes travaux.

Table des matières

	Résumé	II
	Remerciements	III
	Liste des figures	VI
	Liste des tableaux	VIII
	Nomenclature	IX
1	La problématique	1
2	Expérimentation	3
2.1	Description du montage	3
2.2	Schéma du montage	5
2.3	Processus expérimental	6
2.3.1	Mesure de l'épaisseur de la couche active et mesure de la pente de la surface du lit	6
2.3.2	Mesure du champ de vitesses transversales	8
2.3.3	Mesure de la granulométrie des matériaux utilisés	11
3	Résultats et discussions	12
3.1	Épaisseur de la couche active	12
3.2	Pente de la surface du lit	16
3.3	Champ de vitesses transversales	18

3.4	Relation semi-empirique pour la vitesse moyenne dans la couche active	22
3.4.1	Synthèse et interprétation des courbes d'épaisseur de couches actives et de vitesses moyennes dans la couche active	28
4	Conclusions et recommandations	31
	Bibliographie	34
	Annexe A Liste du matériel utilisé	36
	Annexe B Résultats des mesures de α et a	38
	Annexe C Granulométrie des matériaux	39
	Annexe D Tableaux des épaisseurs de couches actives	41
	Annexe E Tableaux des vitesses moyennes dans la couche active	43

Liste des figures

Figure 1	Vue du dessus en transparence	5
Figure 2	Coupe transversale (comme indiqué ci-dessus) . . .	5
Figure 3	Vue axiale captée par la caméra	5
Figure 4	Zones d'un lit granulaire dans un cylindre tournant	7
Figure 5	Représentation des deux champs sur une image vidéo	10
Figure 6	Épaisseur de la couche active (coke)	14
Figure 7	Épaisseur de la couche active (sable No 16) . . .	14
Figure 8	Épaisseur de la couche active (sable No 40) . . .	15
Figure 9	Épaisseur de la couche active (sel)	15
Figure 10	Portion de maillage cylindrique	18
Figure 11	Représentation vectorielle du champ de vitesses transversales (matériau: mélange 40–16, $\Psi = 2.67$ rpm)	20
Figure 12	Profil de vitesses dans la coupe radiale de la figure 11	20
Figure 13	Représentation vectorielle du champ de vitesses transversales (matériau: mélange 40–16, $\Psi = 3.47$ rpm)	21
Figure 14	Profil de vitesses dans la coupe radiale de la figure 13	21
Figure 15	Zones de mouvement du lit	22
Figure 16	Vitesse dans la couche active (coke)	26

Figure 17	Vitesse dans la couche active (sable No 16) . . .	26
Figure 18	Vitesse dans la couche active (sable No 40) . . .	27
Figure 19	Vitesse dans la couche active (sel)	27
Figure 20	Granulométrie du coke calciné	39
Figure 21	Granulométrie du mélange utilisé pour la mesure du champ de vitesses transversales (sable No 16 + sable No 40)	39
Figure 22	Granulométrie du sable No 16 et du sable No 40	40
Figure 23	Granulométrie du sable No 70 et du sel fin	40

Liste des tableaux

Tableau 1	Coefficients des relations empiriques pour l'épaisseur de la couche active	13
Tableau 2	Pente de la surface du lit	16
Tableau 3	Mesures pour le coke calciné	38
Tableau 4	Mesures pour le sable de silicate No 16	38
Tableau 5	Mesures pour le sable d'amiante No 40	38
Tableau 6	Mesures pour le sel	38
Tableau 7	Épaisseur de la couche active avec son incertitude (coke)	41
Tableau 8	Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sable No 16)	41
Tableau 9	Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sable No 40)	42
Tableau 10	Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sel)	42
Tableau 11	Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (coke)	43
Tableau 12	Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sable No 16)	43
Tableau 13	Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sable No 40)	44
Tableau 14	Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sel)	44

Nomenclature

- a** Épaisseur de la couche active.
- a_1, a_2** Coefficients déterminant le profil de vitesses linéaire dans la zone b.
- b** Zone de transition entre la zone d'écoulement en bloc et la couche active.
- c** Zone d'écoulement en bloc.
- C_1, \dots, C_6** Coefficients pour les relations empiriques donnant l'épaisseur de la couche active avec son incertitude.
- D** Diamètre interne du cylindre.
- D_{ext}** Diamètre externe du cylindre.
- e** Épaisseur du lit.
- r** Position radiale d'un point à l'intérieur du lit par rapport au centre du cylindre.
- R** Rayon du cylindre rotatif.
- v** Vitesse en un point quelconque dans la zone d'écoulement en bloc.
- v_a** Vitesse dans la couche active au niveau d'une coupe radiale traversant au centre du lit.
- V_a** Vitesse moyenne dans la couche active au niveau d'une coupe radiale traversant au centre de lit.
- x** Position en x d'un point à l'intérieur du lit par rapport au centre du cylindre.
- y** Position en y d'un point à l'intérieur du lit par rapport au centre du cylindre.
- α** Angle que fait la surface du lit avec l'horizontale.

Δa	Incertitude sur la valeur de a.
Δb	Incertitude sur la valeur de b.
Δc	Incertitude sur la valeur de c.
ΔR	Incertitude sur la valeur de R.
ΔV_a	Incertitude sur la valeur de V_a .
$\Delta \omega$	Incertitude sur la valeur de ω .
θ	Position angulaire d'un point à l'intérieur du lit par rapport au centre du cylindre.
Ψ	Vitesse de rotation du cylindre en révolution par minute (rpm).
ω	Vitesse de rotation du cylindre en radian par seconde.

Chapitre 1 La problématique

Dans beaucoup de procédés industriels de transformation, on utilise des enceintes cylindriques rotatives légèrement inclinées le long de leur axe et contenant un matériau granulaire. Ce dernier est entraîné par le mouvement rotatif du cylindre sur toute la longueur. Cette technique constitue la base de plusieurs types d'équipements industriels comme les mélangeurs, les séchoirs, les réacteurs chimiques, les calcinateurs, etc. Un des problèmes majeurs dans la mise au point de ces équipements est la prédiction du mouvement granulaire à l'intérieur du cylindre. Ce mouvement se décompose en deux parties distinctes soit le mouvement axial et le mouvement transversal. Le mouvement axial est important dans la détermination du temps de résidence des matériaux dans certaines zones du cylindre où des phénomènes physico-chimiques influencent grandement le procédé. Le mouvement transversal est important pour la détermination de l'homogénéité du lit et du transfert de chaleur et de masse entre les gaz et le lit.

Plusieurs chercheurs ont déjà étudié le mouvement transversal et axial d'un fluide granulaire dans un cylindre rotatif. Mentionnons les travaux récents de J. Perron et R. T. Bui [1, 2] qui proposent un modèle semi-empirique pour la prédiction du transport axial et du mouvement transversal du lit granulaire dans un cylindre rotatif. Plusieurs chercheurs se sont également penchés sur le problème particulier du mouvement transversal. H. Henein, J. K. Brimacombe et A. P. Watkinson [3, 4] ont étudié expérimentalement et établi des modèles semi-empiriques pour divers modes de mouvements transversaux. Soulignons également, dans l'étude du mouvement transversal, les travaux de Zablotsny [5]

en 1965 sur l'influence des paramètres individuels sur le taux de soulèvement de la charge et les travaux de Mu [6] en 1980 sur le brassage et le transport de matériaux granulaires a l'intérieur d'un cylindre en rotation.

Le but du présent travail est de poursuivre ces travaux en entreprenant une étude expérimentale du mouvement transversal d'un lit granulaire. Cette étude vise à corréler rigoureusement l'épaisseur de la couche active, la pente de la surface du lit ainsi que la vitesse moyenne dans cette couche en fonction de la nature du matériau granulaire, de la charge et de la vitesse de rotation du cylindre. Pour réaliser ces objectifs, un montage expérimental comprenant un cylindre rotatif horizontal a été construit.

Au chapitre 2, le montage expérimental est décrit en détails et les techniques de mesures mises au point sont présentées. Le chapitre 3 enchaîne avec une discussion approfondie des principaux résultats. Le chapitre 4 termine avec les conclusions générales et les recommandations.

Chapitre 2 Expérimentation

Dans ce chapitre, le montage expérimental est présenté et les techniques de mesures sont décrites.

2.1 Description du montage

Le montage se compose principalement d'un tube de plexiglass d'une longueur d'environ 1.3 m et d'un diamètre externe de 0.381 m (figure 1).

- La surface interne de ce tube est recouverte de papier d'émeri de façon à créer une surface rugueuse. Le tube repose sur quatre roues de caoutchouc de 0.102 m de diamètre fixées à des blocs de bois de 0.11 m de hauteur et retenus solidement à une feuille de contre-plaqué (figure 2).

À une des extrémités du tube, une plaque circulaire faite de verre a été soigneusement collée de façon à pouvoir observer le mouvement transversal des granules à l'intérieur du lit. À l'autre extrémité, une plaque circulaire de plexiglass est utilisée comme couvercle pouvant être enlevé et remis à volonté. Cette plaque est percée d'un trou d'environ 5 cm de diamètre permettant l'alimentation en granules pendant l'expérimentation.

Le cylindre est entraîné par une courroie de caoutchouc reliée à un système de poulies. Le changement de vitesse de rotation peut se faire en dévissant les deux boulons se trouvant à l'extrémité de la petite feuille de contre-plaqué (permettant un pivotement vers le haut) et en desserrant les quatre boulons servant à fixer le moteur (permettant un déplacement du moteur parallèle à la courroie).

La mesure de l'épaisseur de la couche active et de l'épaisseur du lit est faite avec une règle graduée en mm orientée perpendiculairement à la surface du lit.

La mesure de l'angle d'inclinaison de la surface du lit est effectuée avec un rapporteur d'angles fixé solidement à un support et ajusté au niveau de façon à lire 0 degré à l'horizontale.

Pour la mesure du champ de vitesses transversales, des marqueurs fluorescents aux ultra-violets (gravier d'aquarium coloré) ont été introduits dans le lit. Ainsi en éclairant le montage avec une lampe émettant des ultra-violets, seuls les marqueurs apparaissent. Une caméra installée à l'extrémité du cylindre permet de suivre le mouvement des marqueurs (figure 3). Deux marqueurs, un au centre de la plaque circulaire de verre et un autre situé à une position réelle connue, servent de points de référence afin de pouvoir calculer les facteurs d'agrandissement entre l'image de la caméra et les dimensions réelles.

Une liste détaillée de toutes les constituantes du montage expérimental, des appareils et des matériaux utilisés est donnée à l'annexe A.

2.2 Schéma du montage

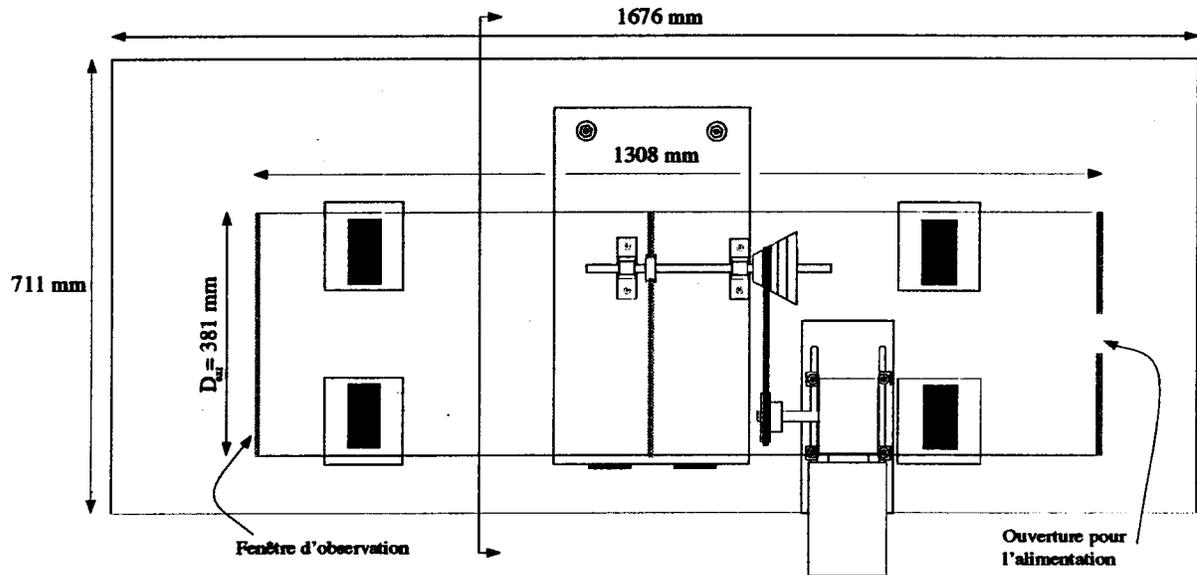


Figure 1 Vue du dessus en transparence

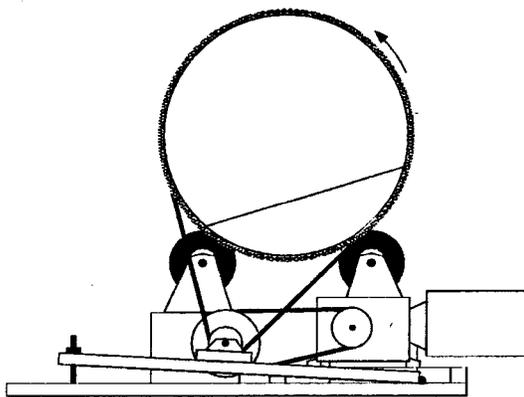


Figure 2 Coupe transversale
(comme indiqué ci-dessus)

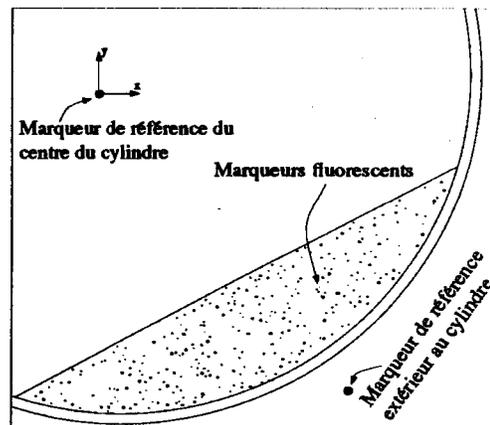


Figure 3 Vue axiale
captée par la caméra

2.3 Processus expérimental

Les mesures prises lors des expériences peuvent être classées en deux parties distinctes:

1) La mesure de

- l'épaisseur de la couche active
- la pente de la surface du lit

en fonction de

- la vitesse de rotation du cylindre
- l'épaisseur du lit
- la nature du matériau granulaire

2) La mesure du champ de vitesses transversales (la vitesse axiale étant considérée nulle) avec un matériau granulaire et pour deux vitesses de rotation (2.67 rpm et 3.47 rpm).

2.3.1 Mesure de l'épaisseur de la couche active et mesure de la pente de la surface du lit

Pour chaque matériau granulaire les quantités α et a (figure 4) ont été mesurées pour des remplissages allant de 8% à 30% du diamètre et des vitesses de rotation s'échelonnant entre 2 et 6 révolutions par minute. Étant donné que l'ajustement de la vitesse de rotation se fait en modifiant l'arrangement des poulies, il n'est pas possible d'obtenir des séries de mesures à des vitesses de rotation en nombres entiers de rpm. De plus, le fait d'augmenter l'épaisseur du lit modifie de façon non négligeable la vitesse de rotation, la puissance du

moteur étant limitée. Il est donc nécessaire d'effectuer une régression linéaire sur ces mesures comme nous le verrons plus loin.

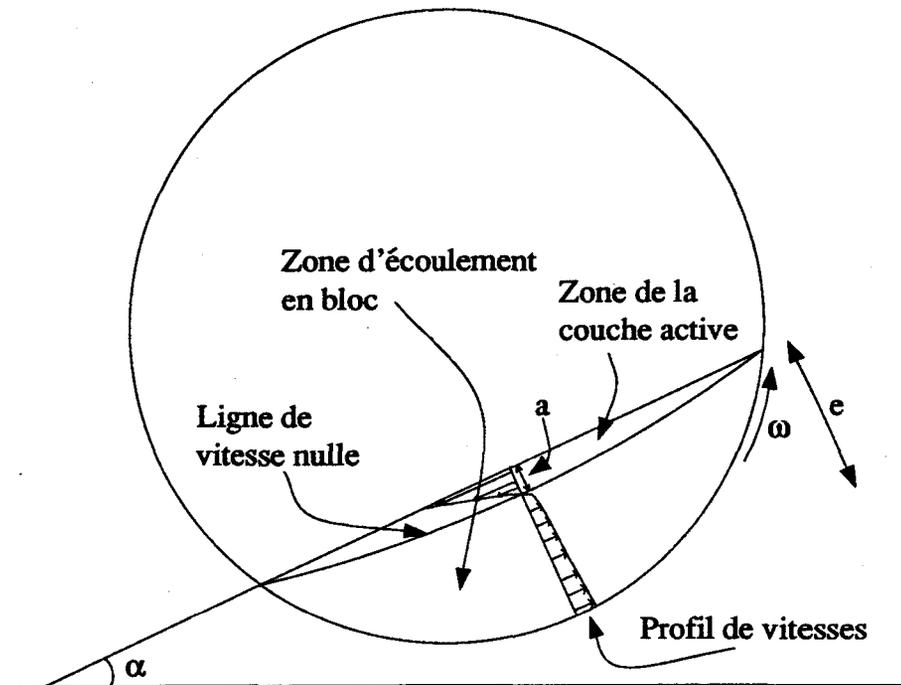


Figure 4 Zones d'un lit granulaire dans un cylindre tournant

On trouve dans l'annexe B les tableaux de mesures de l'épaisseur de la couche active et de la pente de la surface du lit pour chacun des matériaux granulaires. On remarque qu'il n'y a pas de tableau de mesures pour le sable de silicate No 70. La finesse de ce sable augmente la cohésion entre les grains ce qui entraîne un glissement en bloc à la surface du lit. Ce glissement rend le mouvement beaucoup plus cahotique empêchant ainsi la prise de mesures.

Quant au coke il provient directement de la sortie de l'un des deux calcinateurs de l'usine Alcan d'Arvida. Afin de respecter les dimensions relatives des granules et du cylindre, le coke a bien sûr été tamisé. Les plus gros granules ont un diamètre de 6 mm.

2.3.2 Mesure du champ de vitesses transversales

La technique employée pour mesurer le champ de vitesses des granules à l'intérieur du lit nécessite l'utilisation de marqueurs fluorescents. Ces marqueurs sont des grains colorés avec de la peinture fluorescente aux ultra-violets et qui ont des dimensions du même ordre de grandeur que les granules constituant le lit. Certains types de gravier d'aquarium sont en l'occurrence fluorescents aux ultra-violets, et ils ont donc été utilisés. Une petite quantité de marqueurs est mélangée aux granules constituant le lit (pour ces expérimentations un mélange de sable d'amiante No 40 et un peu de sable de silicate No 16 a été utilisé). Ainsi le sable d'amiante et le sable de silicate étant presque invisibles sous la lumière ultra-violet, les quelques marqueurs fluorescents se distinguent très bien.

Comme le montre la figure 3, un marqueur de référence a été placé sur l'axe de rotation du cylindre et un autre marqueur a été placé à une distance de 20.8 cm du premier (9.5 cm en x et -18.5 cm en y).

Pour enregistrer le mouvement des marqueurs on utilise une caméra vidéo de type VHS disposée parallèlement à l'axe du cylindre de façon à ce que son champ capte toute l'extrémité du lit qui se trouve en contact avec la plaque de verre. La fenêtre de la caméra ressemble à peu de chose près à ce que l'on peut voir à la figure 3. Ainsi grâce aux marqueurs de référence il est possible de connaître la position réelle de tous les marqueurs à l'intérieur du lit à partir de leurs positions mesurées sur les images enregistrées.

Deux séquences de 5 à 10 minutes ont été enregistrées sur une bande magnétique, une lorsque le cylindre tourne à 2.67 rpm et l'autre lorsque le

cylindre tourne à 3.47 rpm.

Capture des images et mesure de la vitesse des marqueurs

Afin d'avoir une bonne évaluation du champ de vitesses à l'intérieur du lit, il est nécessaire de prendre une très grande quantité de mesures. Pour ce faire on utilise deux types d'ordinateurs, un pour la capture et la digitalisation des images et l'autre pour la mesure de la vitesse des marqueurs à partir des images digitalisées.

Un ordinateur Commodore est utilisé pour la capture des images. Ce dernier est muni d'un système qui capture et digitalise des images enregistrées de façon analogique sur une bande magnétique VHS. Les captures sont faites sous forme de séquences de neuf images espacées également dans le temps. Un total d'environ 600 images ont été capturées pour les deux vitesses de rotation (2.67 rpm et 3.47 rpm).

Selon les standards de télévision, une image entière est projetée à l'écran tous les $1/30^{\text{ième}}$ de seconde [7]. Cet affichage est cependant fait en deux étapes. L'image est divisée en deux parties que l'on appelle champs, chacun de ceux-ci étant composé de 240 lignes soit la moitié de toute l'image comme le montre la figure 5. En réalité un signal vidéo contient l'information pour une image de 525 lignes mais pratiquement toutes les télévisions n'en affichent que 480. Ainsi les deux champs formant une image sont affichés l'un après l'autre à $1/60^{\text{ième}}$ de seconde d'intervalle. Les images capturées sont en réalité des champs de 240 lignes transformés en des images digitalisées de 240 lignes par 320 colonnes.

Quelques précautions doivent être prises lors de la capture des séquences. En effet il est possible de déterminer le nombre de champs entre deux images capturées à l'intérieur d'une séquence. Mais pour minimiser l'erreur sur la mesure des positions en y, il faut que les deux images capturées correspondent au même champ. Par conséquent, le nombre de champs entre deux images capturées doit être impair. Ainsi il est possible de déterminer l'intervalle de temps entre deux images en connaissant le nombre de champs entre elles. Par exemple, s'il y a trois champs entre deux images, l'intervalle de temps entre ces dernières sera de $1/15^{\text{ième}}$ de seconde.

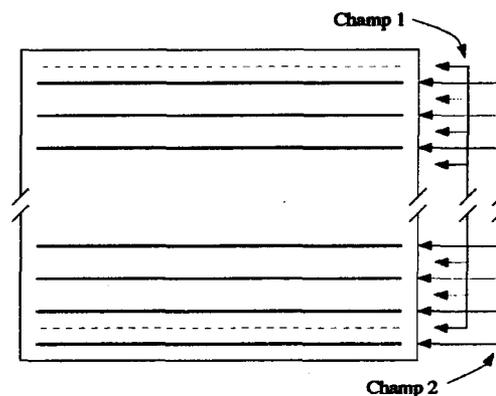


Figure 5 Représentation des deux champs sur une image vidéo

Les images capturées sont enregistrées sur disquettes sous forme de fichiers binaires. Ces fichiers sont ensuite transférés sur un disque dur accessible à plusieurs ordinateurs SUN via un réseau de communication interne de type Ethernet. Les mesures de vitesses se font alors à l'aide d'un programme interactif construit à cet effet. Ce dernier calcule automatiquement le déplacement d'un marqueur donné, d'une image à l'autre, de même que sa vitesse moyenne. Les positions et les vitesses moyennes de tous les marqueurs sont ainsi stockées en mémoire pour être par la suite traitées graphiquement.

De façon générale il est possible de mesurer une vingtaine de vitesses pour chaque couple d'images traitées, et ce dans un laps de temps raisonnable (3 à 5 min). Ainsi pour chacune des vitesses de rotation étudiées (2.67 rpm et 3.47 rpm) près de 2000 vitesses ont été mesurées.

2.3.3 Mesure de la granulométrie des matériaux utilisés

Les mesures de granulométries sont effectuées à l'aide d'un microscope à faible grossissement muni d'un vernier digital électronique. On mesure le diamètre de 200 à 300 granules pris au hasard pour chacun des matériaux étudiés. Les résultats sont échantillonnés de façon à pouvoir les porter sur un graphique. Dans l'annexe C on trouve les graphiques représentant les distributions granulométriques pour chacun des matériaux étudiés. Mentionnons cependant que ces distributions ne représentent pas une mesure très précise de la granulométrie mais fournissent toutefois une bonne approximation de la granulométrie des matériaux en question.

Chapitre 3 Résultats et discussions

Tel que mentionné précédemment, les expériences réalisées dans le cadre de ce projet ont été scindées en deux parties distinctes. D'une part les expériences visant à mesurer l'épaisseur de la couche active et la pente de la surface du lit en fonction des paramètres de fonctionnement et d'autre part les expériences visant à mesurer de façon détaillée les champs de vitesses transversales. Nous présentons, dans ce chapitre, le traitement et les résultats de ces mesures. Une synthèse des résultats permet ensuite d'établir une relation semi-empirique pour la vitesse moyenne dans la couche active.

3.1 Épaisseur de la couche active

Les traitements qui sont appliqués aux mesures relatives à l'épaisseur de la couche active (annexe B) visent uniquement à rendre ces dernières plus faciles à visualiser et à utiliser.

Tel qu'indiqué précédemment, les séries de mesures ne sont pas faites à des vitesses de rotation en nombres entiers de rpm. Une régression linéaire est donc appliquée aux mesures de façon à obtenir une relation empirique reliant l'épaisseur de la couche active (a en mm) à la vitesse de rotation (Ψ en rpm) et au remplissage (e en mm) et ce pour chacun des matériaux granulaires (figure 4). Cette relation empirique a la forme suivante:

$$a = C_1 + C_2 * e + C_3 * \Psi \quad (1)$$

Une régression linéaire, utilisant la méthode des moindres carrés, permet de trouver les coefficients C_1 , C_2 et C_3 pour lesquels la relation empirique décrit le mieux l'ensemble des mesures.

Le même type de régression linéaire est aussi appliquée à l'incertitude sur la mesure de a (Ces incertitudes étant évaluées à chaque mesure de a) permettant d'obtenir une autre relation empirique reliant cette incertitude aux paramètres de fonctionnement, comme ci-dessous:

$$\Delta a = C_4 + C_5 * e + C_6 * \Psi \quad (2)$$

Les coefficients C_1, C_2, \dots, C_6 sont donnés pour chacun des matériaux au tableau 1.

Tableau 1 Coefficients des relations empiriques pour l'épaisseur de la couche active

Matériau	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Coke	-2.035	0.122	0.802	1.300	0.015	-0.007
Sable No 16	-2.866	0.128	0.927	0.135	0.016	0.060
Sable No 40	-1.094	0.119	0.828	-0.319	0.016	0.207
Sel	-1.373	0.063	0.509	1.000	0.000	0.000

Les figures 6 à 9 montrent les résultats normalisés de l'épaisseur de la couche active, calculés à l'aide de l'équation 1, pour différentes vitesses de rotation et pour chacun des matériaux granulaires étudiés. Dans l'annexe D on trouve les tableaux de résultats qui ont permis de tracer ces graphiques ainsi que les incertitudes (équation 2) correspondantes.

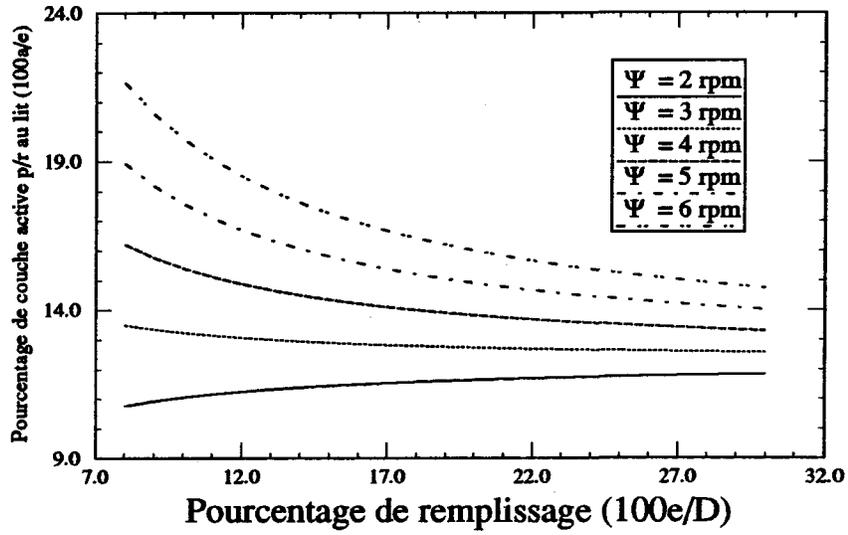


Figure 6 Épaisseur de la couche active (coke)

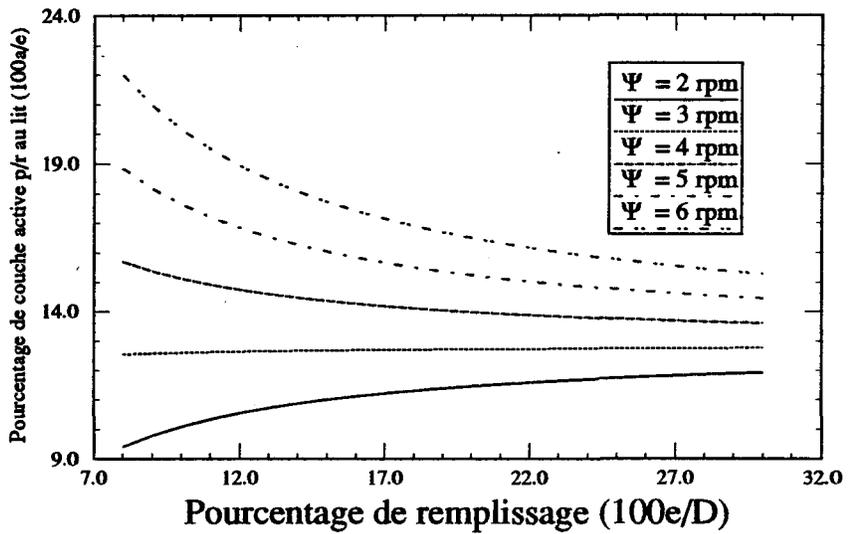


Figure 7 Épaisseur de la couche active (sable No 16)

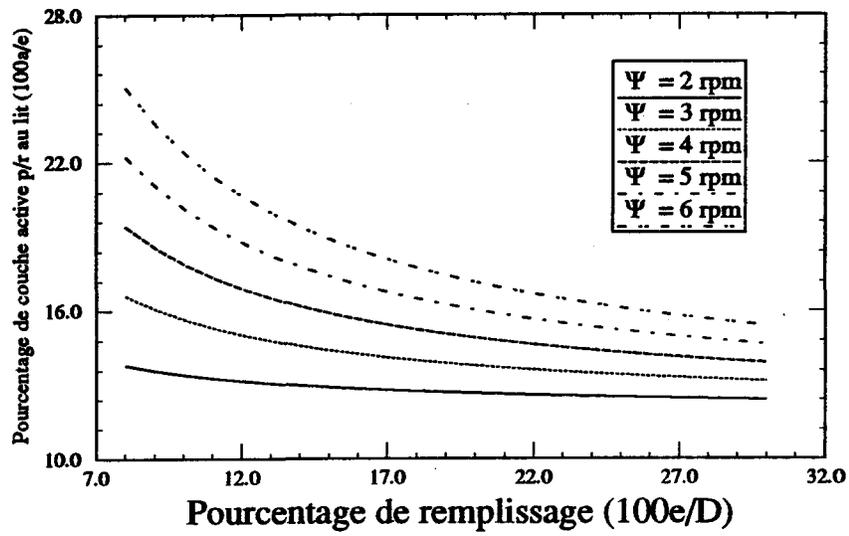


Figure 8 Épaisseur de la couche active (sable No 40)

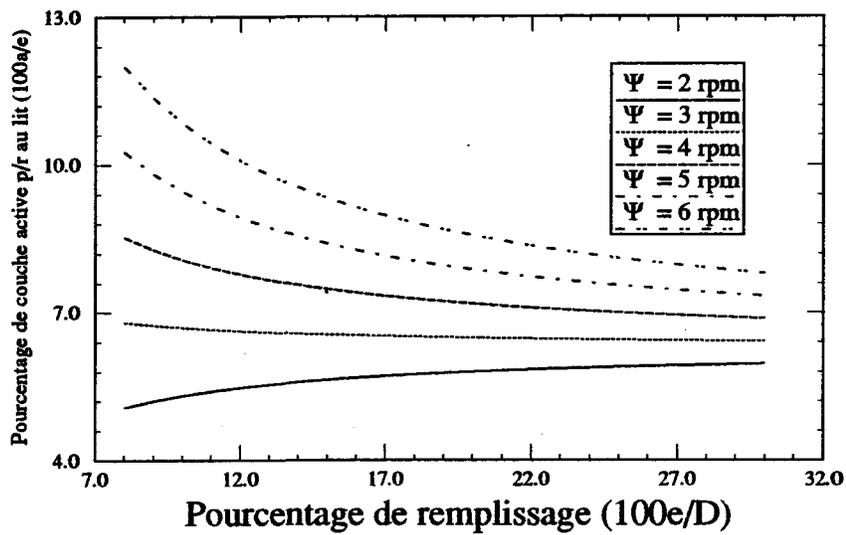


Figure 9 Épaisseur de la couche active (sel)

3.2 Pente de la surface du lit

Les mesures de la pente α (degré) de la surface du lit (figure 4) pour les différents matériaux granulaires sont données dans l'annexe B. Ces mesures montrent clairement que la pente ne dépend pas significativement du remplissage. Quant aux variations de la pente selon la vitesse de rotation, elles sont faibles pour le sable de silicate No 16, pour le sable d'amiante No 40 et pour le sel. Cependant, dans le cas du coke calciné, il semble y avoir une augmentation de la pente de la surface du lit lorsque la vitesse de rotation augmente mais celle-ci demeure tout de même assez faible. En effet, la pente de la surface du lit de coke passe de 36.5 degrés pour une vitesse de rotation 2.25 rpm à 39 degrés pour une vitesse de rotation de 6.25 rpm.

Par contre la nature du matériau semble être un facteur très influent sur la pente de la surface du lit. Le tableau 2 montre la moyenne des pentes mesurées pour chacun des matériaux granulaires étudiés:

Tableau 2 Pente de la surface du lit

Matériau	Pente moyenne (degré)
Coke calciné	37.5
Sable de silicate No 16	36.0
Sable d'amiante No 40	35.8
Sel fin	31.4

Ce tableau montre de façon claire que la pente de la surface du lit pour le sel fin est significativement plus petite que pour les autres matériaux. Ce fait peut être expliqué en observant de près la forme des granules et la rugosité de leurs faces. En effet, vu au microscope, le sel se présente comme un ensemble de

granules de forme parfaitement cubique dont les faces sont lisses. Il en résulte une plus faible cohésion entre les granules et cela a pour effet de diminuer la pente de la surface du lit. Contrairement au sel, les autres matériaux étudiés et plus particulièrement le coke calciné, se présentent comme un ensemble de granules de formes variées dont les surfaces sont très rugueuses, ce qui a pour effet d'augmenter la cohésion entre les granules d'où une augmentation de la pente de la surface du lit.

La granulométrie des matériaux a certainement aussi une influence non négligeable sur la pente de la surface du lit. Nous ne pouvons cependant pas conclure statistiquement sur l'influence relative de la nature et de la granulométrie du matériau étant donné que les mesures n'ont pas été faites avec suffisamment de granules de différentes natures et surtout différentes granulométries pour chaque type de matériau. Nous soupçonnons toutefois que la pente du lit diminue à mesure que les dimensions des granules augmentent. En effet les plus gros granules ont plus de facilité que les autres à rouler sur la surface du lit comme il a été observé lors des expériences avec le coke calciné. Il serait toutefois souhaitable de vérifier cette hypothèse en effectuant des expériences additionnelles avec un matériau dont la granulométrie couvre une vaste gamme.

3.3 Champ de vitesses transversales

Puisque les mesures pour évaluer le champ de vitesses transversales (près de 2000 pour chacun des cas étudiés) sont prises à des positions aléatoires à l'intérieur du lit, il faut en général les traiter de façon à pouvoir les porter sur un graphique. Pour ce faire, on construit à l'aide d'un programme, un maillage cylindrique régulier sur lequel les vitesses sont moyennées. Ce maillage est ensuite utilisé comme repère pour représenter graphiquement les champs de vitesses.

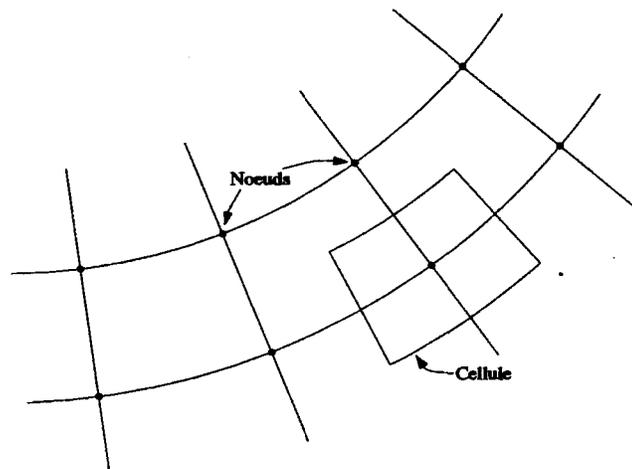


Figure 10 Portion de maillage cylindrique

Une vitesse moyenne est assignée à la position de chacun des noeuds. Celle-ci est calculée en faisant la moyenne de toutes les vitesses mesurées à l'intérieur de la cellule entourant chacun des noeuds (figure 10).

Aux figures 11 et 13 on trouve les résultats du traitement sur les vitesses mesurées pour chacun des deux cas étudiés et ce avec un maillage de 31

cellules en r et 41 cellules en θ . On trouve aussi aux figures 12 et 14 les graphiques de la vitesse des granules en fonction de la position radiale pour des coupes traversant au centre du lit.

Étant donné que certains des marqueurs fluorescents se déplacent trop rapidement pour pouvoir être enregistrés distinctement sur deux images consécutives, la valeur des vitesses mesurées dans la zone de la couche active est probablement sous évaluée par rapport à la réalité. Cependant pour le reste du champ de vitesses l'erreur sur la mesure des vitesses est très faible ($< 8\%$) étant donné la grande quantité de mesures prises et la lenteur relative du déplacement des granules dans cette zone.

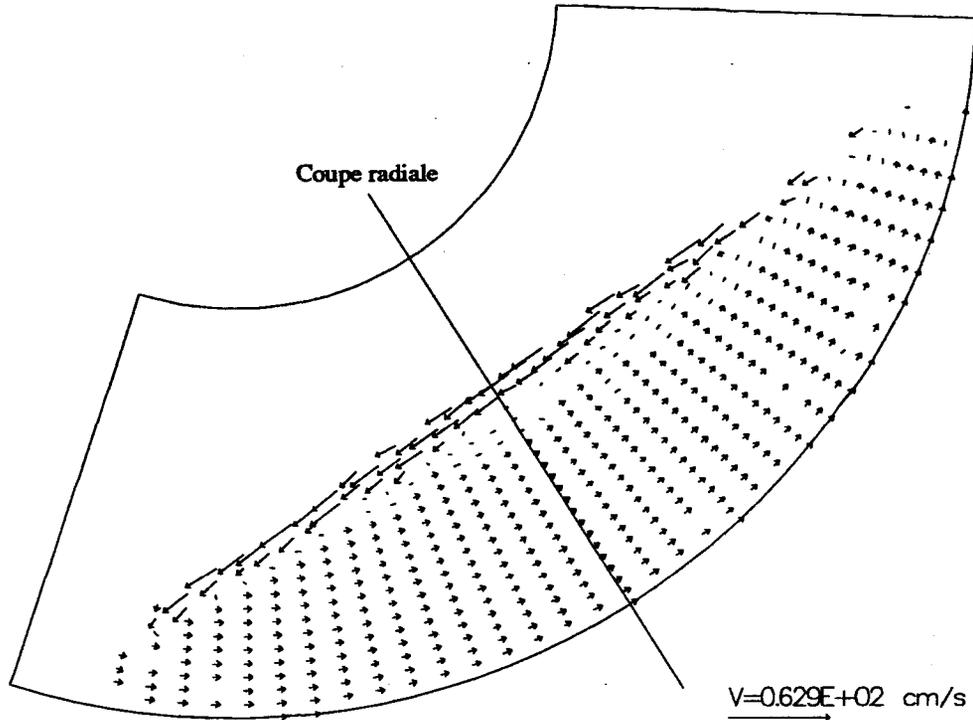


Figure 11 Représentation vectorielle du champ de vitesses transversales (matériau: mélange 40-16, $\Psi = 2.67$ rpm)

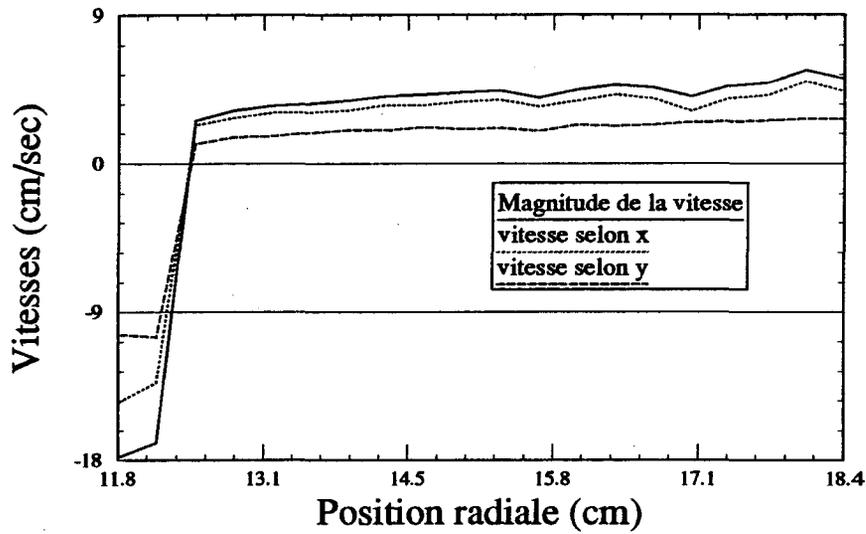


Figure 12 Profil de vitesses dans la coupe radiale de la figure 11

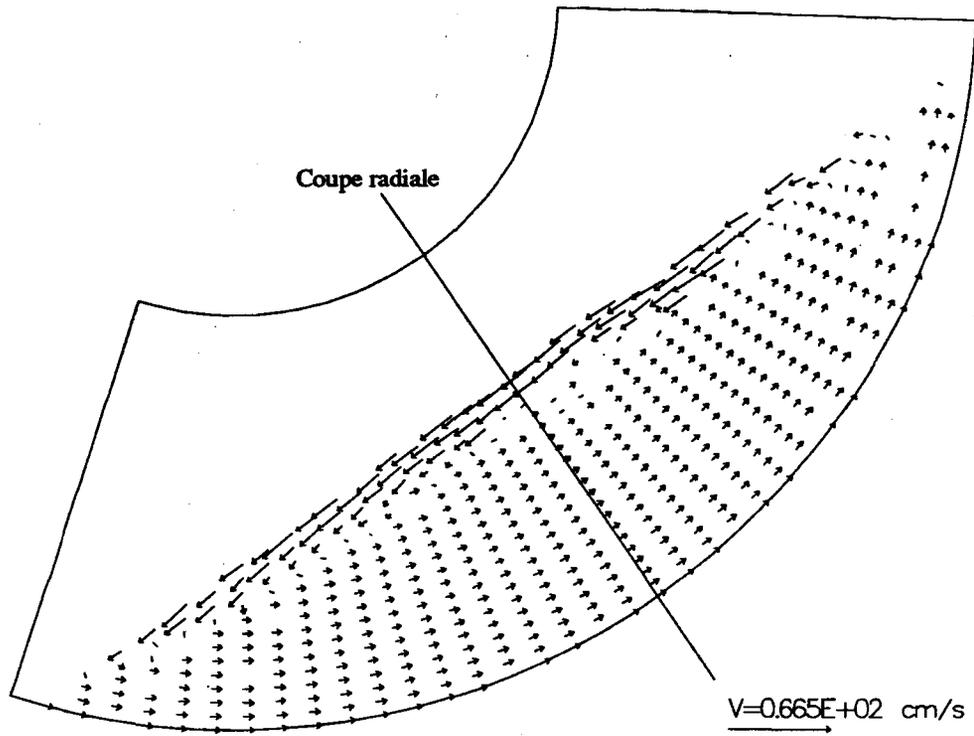


Figure 13 Représentation vectorielle du champ de vitesses transversales (matériau: mélange 40-16, $\Psi= 3.47$ rpm)

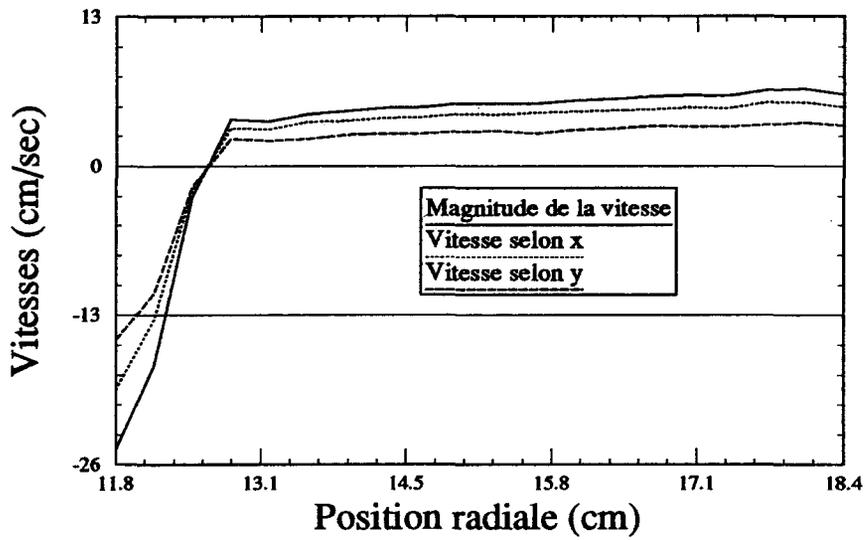


Figure 14 Profil de vitesses dans la coupe radiale de la figure 13

3.4 Relation semi-empirique pour la vitesse moyenne dans la couche active

Tel que mentionné dans la section précédente, la mesure directe des vitesses dans la couche active n'est pas d'une précision suffisante. Dans la présente section une relation semi-empirique est développée pour estimer la vitesse moyenne dans la couche active (V_a) au niveau d'une coupe radiale traversant au centre du lit (figure 15).

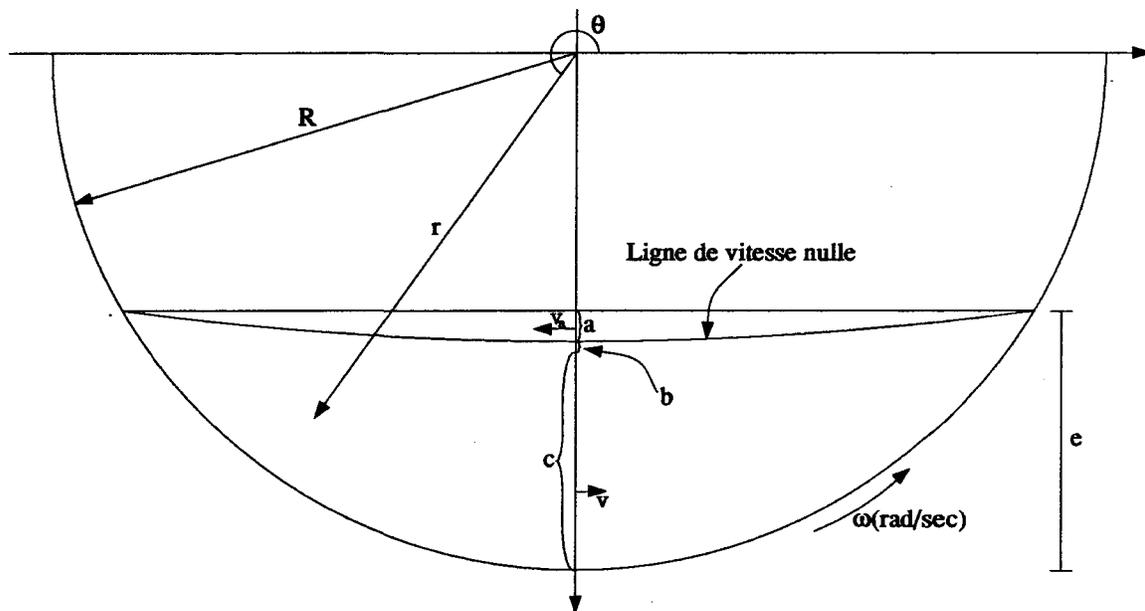


Figure 15 Zones de mouvement du lit

Selon le principe de conservation de la masse, la quantité de masse passant par les zones b et c doit obligatoirement être égale à la quantité de masse passant par la zone a (figure 15) puisque le mouvement du lit est dans un état stationnaire. Ainsi si l'on considère en première approximation la densité du matériau uniforme partout à l'intérieur du lit (La densité n'est certainement pas

uniforme, particulièrement dans le cas du coke, mais dans cette étude aucune mesure du champ de densité n'a été prise.) on obtient la relation suivante,

$$\int_c v dr + \int_b v dr = \int_a v_a dr \quad (3)$$

Puisque l'on calcule la vitesse moyenne dans la couche active V_a , l'équation (3) peut s'écrire,

$$\int_c v dr + \int_b v dr = a V_a \quad (4)$$

Afin d'évaluer les intégrales de la dernière équation, il faut poser une fonction $v(r)$ pour chacune des zones b et c.

Une analyse détaillée de plusieurs coupes radiales (au centre du lit) des champs de vitesses, dont bien sûr les coupes radiales illustrées aux figures 11 et 13, a permis de déterminer, par régression linéaire, la relation suivante,

$$v = 1.25 \omega r - 0.25 R \omega \quad (5)$$

où r est la position radiale (au niveau des coupes radiales centrales), R le rayon du cylindre rotatif et ω la vitesse de rotation en rad/sec. L'incertitude de cette relation est estimée expérimentalement à 1%. D'ailleurs, cette incertitude est pratiquement négligeable devant l'incertitude sur la mesure de a .

Dans la zone b, la vitesse est estimée à l'aide d'une relation linéaire:

$$v = a_1 r + a_2 \quad (6)$$

où $v = 0$ à la limite entre a et b et $v = 1.25wr - 0.25wR$ à la limite entre b et c . De ces conditions limites, on peut estimer les coefficients a_1 et a_2 :

$$a_1 = \frac{1.25w(R - c) - 0.25Rw}{b} \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{-(1.25w(R - c) - 0.25Rw)(R - c - b)}{b}$$

En insérant les équations (5) et (6) dans l'équation (4) on obtient,

$$\int_c^a (1.25wr - 0.25wR) dr + \int_b^a (a_1r + a_2) dr = aV_a \quad (8)$$

En intégrant l'équation (8), on tire finalement une relation semi-empirique pour la vitesse moyenne dans la couche active:

$$V_a = \frac{\left[0.375R^2w + \frac{(R-c)^2(a_1-1.25w)}{2} + 0.25Rw(R-c) - \frac{a_1(R-c-b)^2}{2} + a_2b \right]}{a} \quad (9)$$

Le calcul de l'incertitude sur la valeur de V_a se fait en utilisant la relation suivante,

$$\Delta V_a = \left| \frac{\partial V_a}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial V_a}{\partial R} \right| \Delta R + \left| \frac{\partial V_a}{\partial c} \right| \Delta c + \left| \frac{\partial V_a}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial V_a}{\partial w} \right| \Delta w \quad (10)$$

L'incertitude sur a étant beaucoup plus grande que l'incertitude sur les autres paramètres, on peut négliger l'erreur sur ces derniers pour évaluer l'incertitude sur V_a . Ainsi l'équation (10) devient,

$$\Delta V_a = \left| \frac{\partial V_a}{\partial a} \right| \Delta a \quad (11)$$

Pour calculer V_a il est nécessaire de connaître le rayon du cylindre (R), la vitesse de rotation (ω en radian/sec), l'épaisseur du lit (e), l'épaisseur de la couche active (a) et l'épaisseur de la zone (b). Les mesures effectuées fournissent la valeur de tous les paramètres sauf b. D'après les graphiques de coupes radiales aux figures 12 et 14 on peut évaluer b à environ le quart de l'épaisseur de la couche active soit $0.25a$. L'erreur engendrée par la détermination du paramètre b sur la vitesse moyenne V_a est très petite devant l'erreur engendrée par les autres paramètres étant donnée que le paramètre b est en soi presque négligeable.

Les figures 16 à 19 montrent les résultats du calcul de la vitesse moyenne dans la couche active fait à partir des résultats obtenus par la mesure de l'épaisseur de la couche active. Ces résultats sont présentés pour chacun des matériaux étudiés.

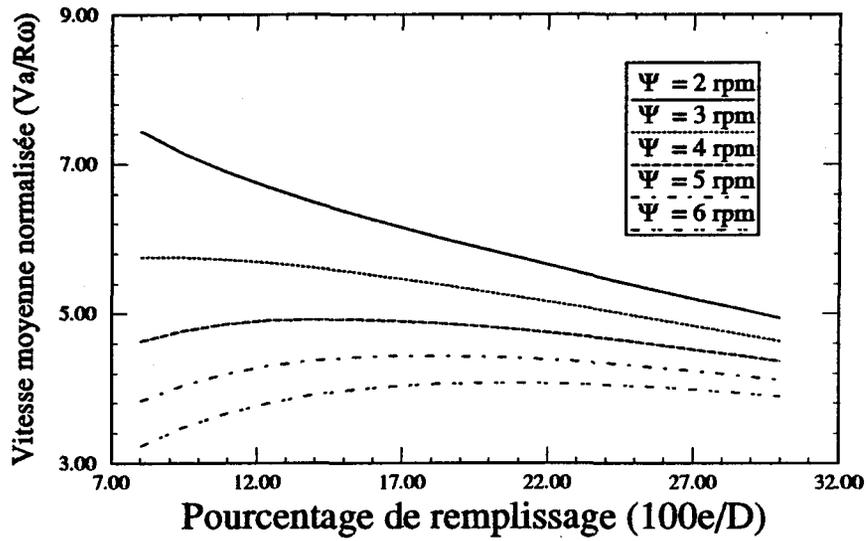


Figure 16 Vitesse dans la couche active (coke)

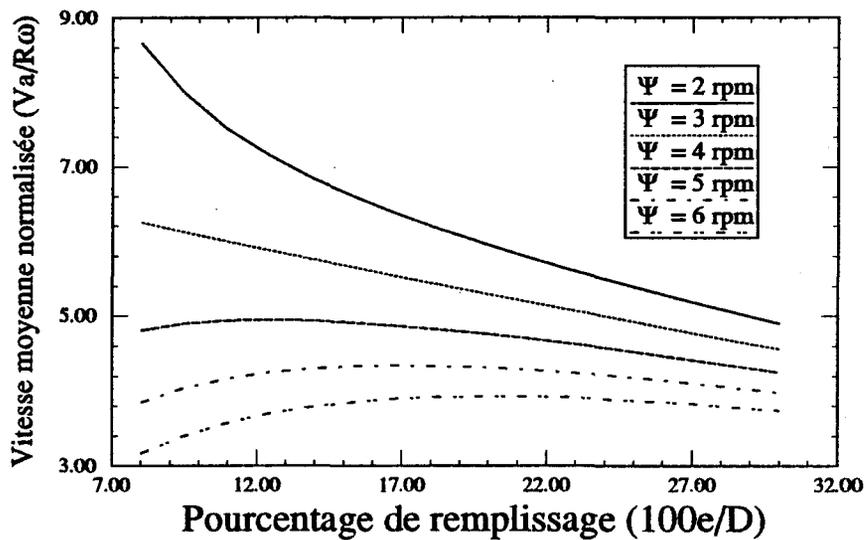


Figure 17 Vitesse dans la couche active (sable No 16)

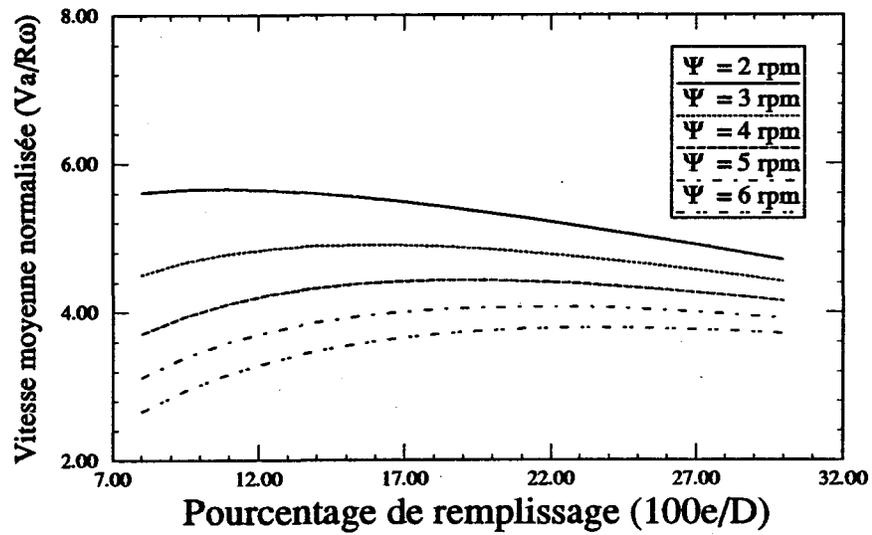


Figure 18 Vitesse dans la couche active (sable No 40)

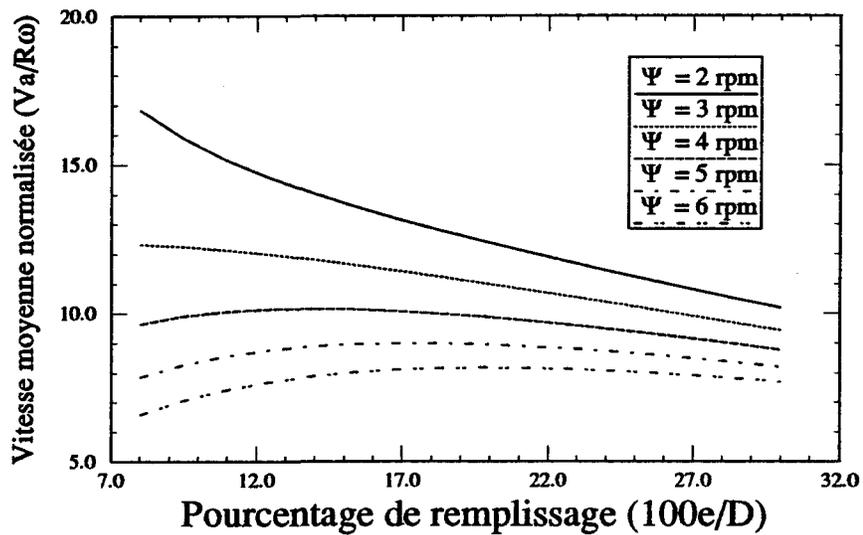


Figure 19 Vitesse dans la couche active (sel)

3.4.1 Synthèse et interprétation des courbes d'épaisseur de couches actives et de vitesses moyennes dans la couche active

Après une première observation des courbes de l'épaisseur de la couche active (figures 6 à 9), on constate qu'elles suivent toutes des tendances très semblables. Cette similarité apparaît éventuellement dans les courbes de vitesses moyennes dans la couche active (figures 16 à 19) confirmant ainsi l'hypothèse voulant que l'épaisseur de la couche active ait une influence déterminante dans le calcul de la vitesse moyenne (équation 9).

La première caractéristique commune qui émerge des courbes de l'épaisseur de la couche active est que la proportion de couche active par rapport à l'épaisseur du lit augmente, plus ou moins rapidement selon le matériau, lorsque la vitesse de rotation croît. Éventuellement, cette augmentation a pour conséquence de réduire la vitesse moyenne normalisée dans la couche active ($V_a/R\omega$). En effet, étant donné que le mouvement de descente à la surface du lit provient essentiellement de l'effet de la gravité sur les granules, la vitesse de descente ne peut pas augmenter aussi rapidement que la vitesse de rotation. Donc si la vitesse dans la couche active augmente dans une proportion moindre que l'augmentation de la vitesse de rotation (pour une charge donnée), il faut, pour respecter la conservation de la masse, que l'épaisseur de la couche active augmente dans une proportion supérieure.

Considérons maintenant un accroissement de l'épaisseur du lit à une vitesse de rotation fixe. Toutes les courbes relatives à l'épaisseur de la couche active (figures 6 à 9) montrent que, peu importe la vitesse de rotation, la proportion

de couche active par rapport au lit tend asymptotiquement vers une constante (différente selon le matériau et la vitesse de rotation).

La plupart de ces courbes ne sont pas rectilignes même si elles sont le résultat d'une régression linéaire. Ceci est une conséquence de la normalisation des résultats. En regardant les fonctions issues des régressions linéaires (équations 1 et 2) il est clair que l'épaisseur de la couche active augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du lit. Cependant l'épaisseur de la couche active n'augmente pas dans la même proportion que l'épaisseur du lit pour la plupart des courbes.

En ce qui concerne la variation de la vitesse moyenne dans la couche active en fonction du remplissage (figures 16 à 19), on constate qu'elles sont dépendantes de deux facteurs: Premièrement les variations de la proportion de couche active par rapport au lit et deuxièmement la forme du profil de vitesses dans la zone d'écoulement en bloc.

En général, à de hautes vitesses de rotation (> 4 rpm), le premier facteur résulte en une légère augmentation de la vitesse moyenne normalisée dans la couche active en fonction du pourcentage de remplissage, et ce pour des petites charges. Par contre, pour des vitesses de rotation plus petites (2 rpm), la vitesse moyenne normalisée diminue monotoniquement en fonction de la charge. Toutefois aux grandes vitesses de rotation (> 4 rpm), la vitesse moyenne normalisée dans la couche active passe par un maximum. Au delà du seuil de remplissage correspondant à ce maximum, la forme du profil de vitesses dans la zone d'écoulement en bloc devient un facteur déterminant. C'est d'ailleurs également le cas à de faibles vitesses de rotation. Ceci s'explique par le fait

que la vitesse moyenne dans la zone d'écoulement en bloc est supérieure à faible remplissage qu'elle ne l'est à remplissage élevé (équation 5).

Chapitre 4 Conclusions et recommandations

Comme il a été mentionné précédemment, les expériences réalisées dans le cadre de ce projet se classent en deux parties distinctes:

- 1) Les mesures de l'épaisseur de la couche active et de la pente de la surface du lit en fonction des paramètres de fonctionnement.
- 2) La mesure du champ de vitesses transversales avec un matériau granulaire et pour deux vitesses de rotation (2.67 rpm et 3.47 rpm).

L'analyse et la synthèse des résultats obtenus ont permis d'établir une relation semi-empirique permettant d'évaluer la vitesse moyenne dans la couche active en fonction des paramètres de fonctionnement (vitesse de rotation, remplissage et nature du matériau).

À partir de tous les résultats contenus dans ce rapport on peut tirer les conclusions générales suivantes:

- 1) En ce qui concerne l'épaisseur de la couche active:
 - La proportion de couche active par rapport à l'épaisseur du lit augmente lorsque la vitesse de rotation augmente (pour des vitesses de rotations de 2 à 6 rpm).
 - Peu importe la vitesse de rotation, la proportion de couche active par rapport au lit tend asymptotiquement vers une constante (différente selon le matériau et la vitesse de rotation) lorsque la charge augmente.
 - L'épaisseur de la couche active augmente avec l'épaisseur du lit. Cette augmentation n'est cependant pas proportionnelle à l'épaisseur du lit dans la plupart des cas.

2) En ce qui concerne la pente de la surface du lit:

- La pente de la surface du lit ne dépend pas significativement du remplissage.
- Dans la plage de vitesses de rotation étudiées (2 rpm à 6 rpm) la pente de la surface du lit est faiblement influencée par la vitesse de rotation (variation de 1 à 2 degrés sur toute la plage de vitesses de rotation).
- La nature du matériau est un facteur très influent sur la pente de la surface du lit.
- La granulométrie du matériau a une influence non négligeable sur la pente de la surface du lit.

3) En ce qui concerne la vitesse moyenne dans la couche active:

- La vitesse moyenne normalisée dans la couche active ($V_a/R\omega$) diminue lorsque la vitesse de rotation augmente (pour des vitesses de rotation de 2 rpm à 6 rpm).
- Pour des remplissages importants ($> 20\%$) la vitesse moyenne normalisée dans la couche active diminue constamment à mesure que la charge augmente.
- Pour des remplissages plus faibles ($< 15\%$) l'allure générale des résultats montre que la vitesse moyenne normalisée dans la couche active diminue avec le remplissage pour de faibles vitesses de rotation (≤ 3 rpm) et augmente légèrement avec le remplissage pour de plus hautes vitesses de rotations (> 3 rpm).

Pour compléter les travaux expérimentaux décrits dans ce rapport sur le comportement du lit granulaire dans un cylindre rotatif, il serait nécessaire d'étudier la ségrégation des plus gros granules par rapport aux plus petits. En effet les observations faites pendant les expérimentations avec le coke ont montré que les plus gros granules tournent autour des plus petits. Ceci a pour conséquence que les plus petits granules sont moins souvent en contact avec les parois du cylindre et sont aussi beaucoup moins exposés à la surface du lit. Cela signifie que dans un four de calcination, ils seraient moins exposés aux gaz chauds circulant au-dessus du lit. De plus, cette ségrégation entraîne des variations de densités à l'intérieur du lit pouvant fausser légèrement l'évaluation de la vitesse dans la couche active. Bien que S. D. Savage et C. K. K. Lun [8] aient beaucoup publié au sujet de la ségrégation dans les écoulements granulaires, nous croyons que poursuivre les présents travaux de recherche dans cette voie pourrait sûrement contribuer à approfondir davantage les connaissances actuelles de cet important mouvement.

Bibliographie

- [1] J. Perron, R. T. Bui, and T. H. Nguyen. **Rotary Cylinders: Solid Transport Prediction by Dimensional and Rheological Analysis.** The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 68, 1990.
- [2] J. Perron and R. T. Bui. **Rotary Cylinders: Transverse Bed Motion Prediction by Rheological Analysis.** The Canadian Journal of Chemical Engineering, Submitted, 1991.
- [3] H. Henein, J. K. Brimacombe, and A. P. Watkinson. **Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns.** Metallurgical transactions B, Vol. 14B, Page 191–205, 1983.
- [4] H. Henein, J. K. Brimacombe, and A. P. Watkinson. **The Modelling of Transverse Solids Motion in Rotary Kilns.** Metallurgical transactions B, Vol. 14B, Page 207–220, 1983.
- [5] W. W. Zablotny. **The Movement of the Charge in Rotary Kilns.** International Chemical Engineering, Vol. 5, No 2, Page 360–366, 1965.
- [6] J. Mu and D. D. Perlmutter. **The Mixing of Granular Solids in a Rotary Cylinder.** A.I.C.H.E. Journal, Vol. 26, No 6, Page 928–934, 1980.
- [7] Clyde N. Herrick. **Television Theory and Servicing.** Reston publishing company Inc., 1972.
- [8] S. B. Savage and C. K. K. Lun. **Particle Size Segregation in Inclined Chute Flow of Dry Cohesionless Granular Solids.** Journal of Fluid Mechanics, Vol. 189, Page 311–335, 1988.

- [9] **W. C. Saeman. Passage of Solids through Rotary Kilns: Factors Affecting Time of Passage. Chemical Engineering Progress, Vol. 10, Page 508–514, 1951.**
- [10] **H. Kramers and P. Croockewit. The Passage of Granular Solids Through Inclined Rotary Kilns. Chemical Engineering Science, Vol. 1, No 6, Page 259–265, 1952.**
- [11] **S. B. Savage and K. Hutter. The Motion of a Finite Mass of Granular Material Down a Rough Incline. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 199, Page 177–215, 1989.**
- [12] **S. B. Savage. The Mechanics of Rapid Granular Flows. Advances in Applied Mechanics, Vol. 24, Page 289–366, 1984.**

Annexe A Liste du matériel utilisé

— Un tube de plexiglass ;

longueur : 1308 mm

diamètre externe : 381 mm

diamètre interne : 368 mm

— Deux feuilles de contre-plaqué ;

1) 711 mm × 1676 mm × 19 mm

2) 300 mm × 559 mm × 19 mm

— Une plaque circulaire faite de plexiglass et percée d'un trou d'environ 50 mm au centre ;

épaisseur : 6 mm

diamètre : 381 mm

— Une plaque circulaire faite de verre ;

épaisseur : 6 mm

diamètre : 381 mm

— Quatre blocs de bois ; 136 mm × 124 mm × 111 mm

— Quatre roues de caoutchouc ;

épaisseur : 38 mm

diamètre : 102 mm

— Un moteur avec une transmission permettant une vitesse de rotation d'environ 50 rpm ;

puissance : 124 W

- Deux courroies d'entraînement ;
 - 1) longueur : 1473 mm
 - 2) longueur : 711 mm
- Une poulie simple ; diamètre : 50 mm
- Une poulie multiple ; diamètre : de 25 à 100 mm
- Une poulie simple à diamètre variable ; diamètre : de 60 à 100 mm
- Papier d'émeri No 60 pour recouvrir l'intérieur du cylindre.
- Différents matériaux granulaires ;
 - 40 kg de sel fin.
 - 40 kg de sable d'amiante No 40.
 - 40 kg de sable de silicate No 70.
 - 40 kg de sable de silicate No 16.
 - 40 kg de coke calciné tamisé.
- Un entonnoir de verre pour l'alimentation en granules.
- Un rapporteur d'angle.
- Une règle graduée en mm.
- Un chronomètre précis aux dixièmes de secondes.
- Des marqueurs fluorescents.
- Une lampe émettant des ultra-violets.
- Une caméra vidéo de type VHS.
- Un ordinateur Commodore installé de façon à pouvoir capturer des séquences d'images à partir d'un lecteur de cassettes vidéo de type VHS.

Annexe B Résultats des mesures de α et a

Tableau 3 Mesures
pour le coke calciné

e (mm)	a (mm)	α (deg)	Ψ (rpm)
33 ± 1	4 ± 2	37 ± 1	2.26
52 ± 1	6 ± 2	37 ± 1	2.25
67 ± 1	8 ± 2	37 ± 1	2.24
82 ± 1	10 ± 2	36 ± 1	2.23
107 ± 1	12 ± 3	36 ± 1	2.22
32 ± 1	4 ± 2	37 ± 1	2.88
43 ± 1	6 ± 2	37 ± 1	2.87
70 ± 1	9 ± 2	37 ± 1	2.85
92 ± 1	12 ± 3	37 ± 1	2.83
108 ± 1	13 ± 3	37 ± 1	2.82
45 ± 1	8 ± 2	39 ± 1	6.38
61 ± 1	10 ± 2	39 ± 1	6.34
80 ± 1	13 ± 2	39 ± 1	6.27
93 ± 1	15 ± 3	39 ± 1	6.23
114 ± 1	17 ± 3	39 ± 1	6.16

Tableau 4 Mesures pour
le sable de silicate No 16

e (mm)	a (mm)	α (deg)	Ψ (rpm)
38 ± 1	7 ± 1	36 ± 1	5.90
58 ± 1	9 ± 1	36 ± 1	5.81
78 ± 1	12 ± 2	36 ± 1	5.68
94 ± 1	15 ± 2	36 ± 1	5.56
28 ± 1	5 ± 1	36 ± 1	3.44
49 ± 1	7 ± 1	36 ± 1	3.41
67 ± 1	9 ± 2	36 ± 1	3.35
88 ± 1	12 ± 2	36 ± 1	3.27
100 ± 1	15 ± 2	36 ± 1	3.18
32 ± 1	4 ± 1	36 ± 1	2.28
49 ± 1	5 ± 1	36 ± 1	2.26
65 ± 1	7 ± 1	36 ± 1	2.25
83 ± 1	8 ± 1	36 ± 1	2.23
98 ± 1	11 ± 2	36 ± 1	2.21

Tableau 5 Mesures pour
le sable d'amiante No 40

e (mm)	a (mm)	α (deg)	Ψ (rpm)
36 ± 1	5 ± 1	36 ± 1	1.91
45 ± 1	6 ± 1	35 ± 1	1.90
65 ± 1	8 ± 1	36 ± 1	1.88
83 ± 1	10 ± 1	35 ± 1	1.86
102 ± 1	13 ± 2	35 ± 1	1.83
32 ± 1	5 ± 1	36 ± 1	2.52
47 ± 1	7 ± 1	36 ± 1	2.49
70 ± 1	8 ± 1	35 ± 1	2.47
86 ± 1	11 ± 1	36 ± 1	2.44
110 ± 1	14 ± 2	36 ± 1	2.42
31 ± 1	6 ± 1	36 ± 1	3.47
46 ± 1	7 ± 1	36 ± 1	3.44
72 ± 1	9 ± 1	36 ± 1	3.39
92 ± 1	14 ± 3	36 ± 1	3.35
31 ± 1	7 ± 1	37 ± 1	5.81
51 ± 1	10 ± 2	36 ± 1	5.62

Tableau 6 Mesures pour le sel

e (mm)	a (mm)	α (deg)	Ψ (rpm)
42 ± 1	3 ± 1	32 ± 1	2.28
57 ± 1	4 ± 1	32 ± 1	2.27
76 ± 1	5 ± 1	31 ± 1	2.25
92 ± 1	5 ± 1	31 ± 1	2.23
105 ± 1	6 ± 1	31 ± 1	2.21
31 ± 1	2.5 ± 1	31 ± 1	3.65
48 ± 1	3 ± 1	31 ± 1	3.63
75 ± 1	5 ± 1	31 ± 1	3.57
96 ± 1	6 ± 1	31 ± 1	3.52
110 ± 1	7 ± 1	30 ± 1	3.48
27 ± 1	3 ± 1	32 ± 1	6.35
55 ± 1	5 ± 1	32 ± 1	6.23
78 ± 1	7 ± 1	32 ± 1	6.11
94 ± 1	8 ± 1	32 ± 1	6.01
109 ± 1	9 ± 1	32 ± 1	5.85

Annexe C Granulométrie des matériaux

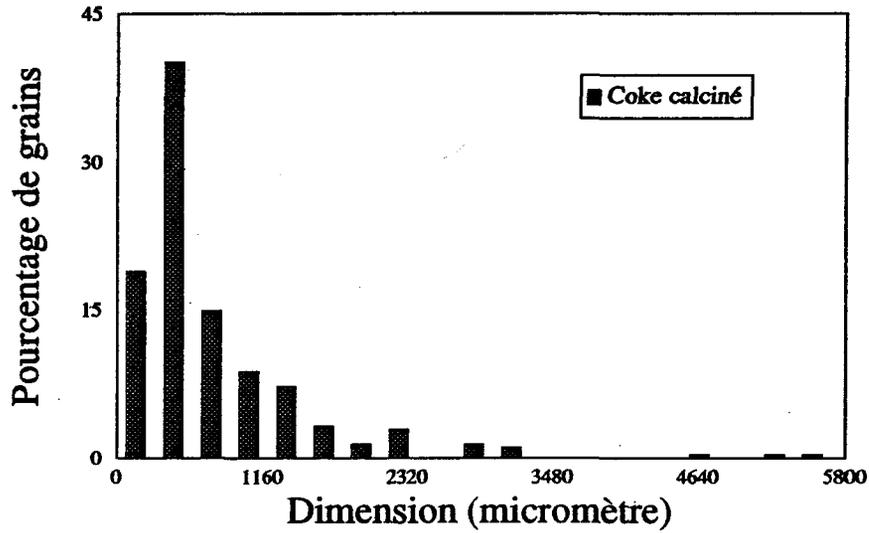


Figure 20 Granulométrie du coke calciné

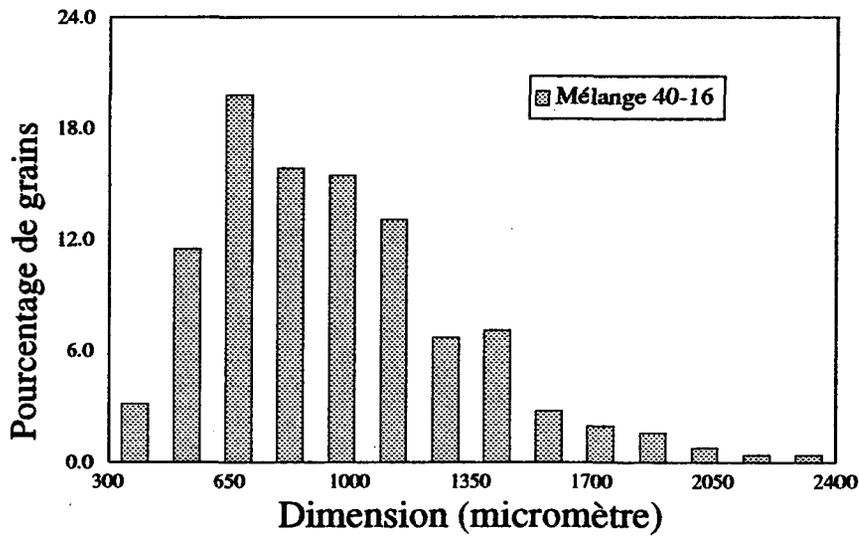


Figure 21 Granulométrie du mélange utilisé pour la mesure du champ de vitesses transversales (sable No 16 + sable No 40)

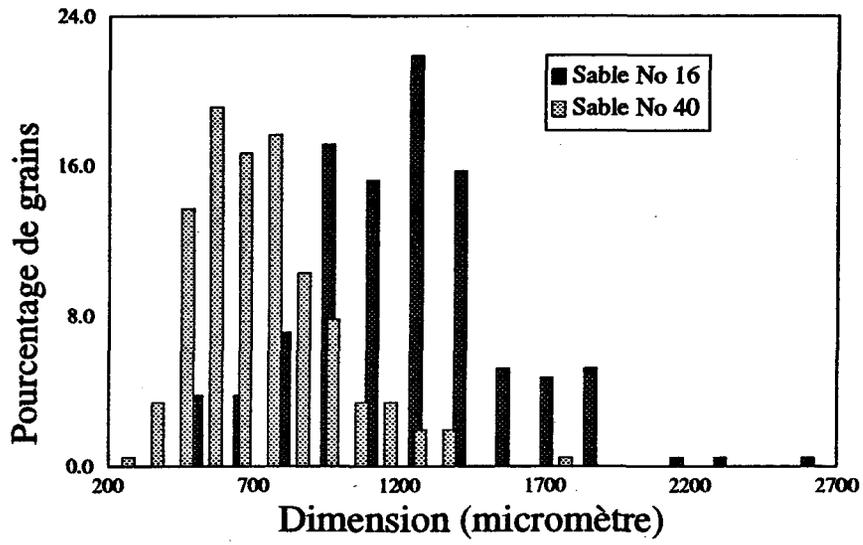


Figure 22 Granulométrie du sable No 16 et du sable No 40

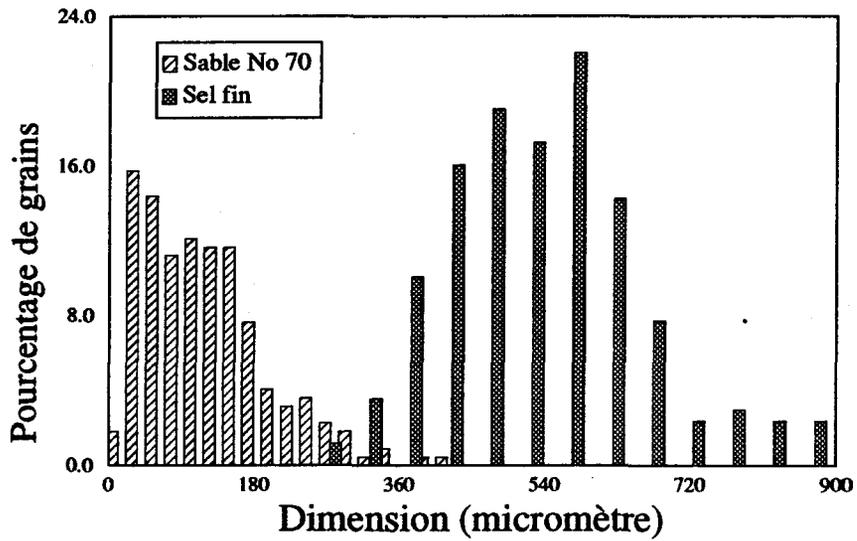


Figure 23 Granulométrie du sable No 70 et du sel fin

Annexe D Tableaux des épaisseurs de couches actives

Tableau 7 Épaisseur de la couche active avec son incertitude (coke)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	A	dA								
8.00	10.77	5.83	13.49	5.81	16.21	5.79	18.93	5.76	21.65	5.74
9.47	11.00	5.16	13.29	5.14	15.59	5.12	17.89	5.10	20.19	5.08
10.93	11.16	4.66	13.15	4.65	15.14	4.63	17.13	4.61	19.13	4.59
12.40	11.29	4.29	13.04	4.27	14.80	4.26	16.55	4.24	18.31	4.23
13.87	11.39	3.99	12.96	3.97	14.53	3.96	16.10	3.95	17.67	3.93
15.33	11.47	3.75	12.89	3.73	14.31	3.72	15.73	3.71	17.15	3.70
16.80	11.53	3.55	12.83	3.54	14.13	3.53	15.42	3.51	16.72	3.50
18.27	11.59	3.38	12.78	3.37	13.97	3.36	15.17	3.35	16.36	3.34
19.73	11.64	3.24	12.74	3.23	13.84	3.22	14.95	3.21	16.05	3.20
21.20	11.68	3.12	12.71	3.11	13.73	3.10	14.76	3.09	15.79	3.08
22.67	11.71	3.01	12.67	3.00	13.64	2.99	14.60	2.99	15.56	2.98
24.13	11.75	2.92	12.65	2.91	13.55	2.90	14.45	2.89	15.35	2.89
25.60	11.77	2.83	12.62	2.83	13.47	2.82	14.32	2.81	15.17	2.80
27.07	11.80	2.76	12.60	2.75	13.41	2.75	14.21	2.74	15.02	2.73
28.53	11.82	2.69	12.58	2.69	13.35	2.68	14.11	2.67	14.87	2.67
30.00	11.84	2.63	12.57	2.63	13.29	2.62	14.02	2.62	14.74	2.61

Tableau 8 Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sable No 16)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	A	dA								
8.00	9.41	2.49	12.55	2.69	15.70	2.89	18.84	3.10	21.99	3.30
9.47	9.94	2.35	12.60	2.52	15.25	2.70	17.91	2.87	20.57	3.04
10.93	10.33	2.25	12.63	2.40	14.93	2.55	17.23	2.70	19.53	2.85
12.40	10.63	2.18	12.65	2.31	14.68	2.44	16.71	2.57	18.74	2.70
13.87	10.86	2.12	12.67	2.24	14.49	2.35	16.30	2.47	18.12	2.59
15.33	11.05	2.07	12.69	2.18	14.33	2.28	15.97	2.39	17.61	2.50
16.80	11.21	2.03	12.70	2.13	14.20	2.23	15.70	2.32	17.20	2.42
18.27	11.34	2.00	12.71	2.09	14.09	2.18	15.47	2.27	16.85	2.36
19.73	11.45	1.97	12.72	2.05	14.00	2.14	15.27	2.22	16.55	2.30
21.20	11.54	1.95	12.73	2.02	13.92	2.10	15.11	2.18	16.29	2.25
22.67	11.63	1.93	12.74	2.00	13.85	2.07	14.96	2.14	16.07	2.21
24.13	11.70	1.91	12.74	1.97	13.79	2.04	14.83	2.11	15.87	2.18
25.60	11.77	1.89	12.75	1.95	13.73	2.02	14.72	2.08	15.70	2.15
27.07	11.83	1.88	12.75	1.94	13.68	2.00	14.61	2.06	15.54	2.12
28.53	11.88	1.86	12.76	1.92	13.64	1.98	14.52	2.03	15.40	2.09
30.00	11.92	1.85	12.76	1.91	13.60	1.96	14.44	2.01	15.28	2.07

Note : rem représente le pourcentage de remplissage (100e/D) et (A ± dA) représente le pourcentage de l'épaisseur de la couche active par rapport à l'épaisseur du lit ($(A \pm dA) = 100(a \pm da)/e$).

Tableau 9 Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sable No 40)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	A	dA								
8.00	13.80	1.96	16.61	2.66	19.42	3.37	22.23	4.07	25.04	4.77
9.47	13.50	1.91	15.88	2.51	18.25	3.10	20.63	3.69	23.00	4.29
10.93	13.29	1.88	15.34	2.39	17.40	2.90	19.45	3.42	21.51	3.93
12.40	13.12	1.85	14.93	2.30	16.75	2.75	18.56	3.21	20.37	3.66
13.87	12.99	1.83	14.61	2.23	16.23	2.64	17.85	3.04	19.48	3.45
15.33	12.89	1.81	14.35	2.17	15.82	2.54	17.28	2.91	18.75	3.27
16.80	12.80	1.79	14.14	2.13	15.48	2.46	16.81	2.80	18.15	3.13
18.27	12.73	1.78	13.96	2.09	15.19	2.40	16.42	2.70	17.65	3.01
19.73	12.66	1.77	13.80	2.06	14.94	2.34	16.08	2.62	17.22	2.91
21.20	12.61	1.76	13.67	2.03	14.73	2.29	15.79	2.56	16.85	2.82
22.67	12.56	1.75	13.56	2.00	14.55	2.25	15.54	2.50	16.53	2.75
24.13	12.52	1.75	13.45	1.98	14.39	2.21	15.32	2.45	16.25	2.68
25.60	12.49	1.74	13.36	1.96	14.24	2.18	15.12	2.40	16.00	2.62
27.07	12.45	1.74	13.28	1.94	14.12	2.15	14.95	2.36	15.78	2.57
28.53	12.43	1.73	13.21	1.93	14.00	2.12	14.79	2.32	15.58	2.52
30.00	12.40	1.73	13.15	1.91	13.90	2.10	14.65	2.29	15.40	2.48

Tableau 10 Épaisseur de la couche active avec son incertitude (sel)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	A	dA								
8.00	5.07	3.39	6.80	3.39	8.53	3.39	10.26	3.39	11.99	3.39
9.47	5.26	2.87	6.72	2.87	8.18	2.87	9.64	2.87	11.10	2.87
10.93	5.40	2.48	6.66	2.48	7.93	2.48	9.19	2.48	10.45	2.48
12.40	5.50	2.19	6.62	2.19	7.73	2.19	8.84	2.19	9.96	2.19
13.87	5.58	1.96	6.58	1.96	7.58	1.96	8.57	1.96	9.57	1.96
15.33	5.65	1.77	6.55	1.77	7.45	1.77	8.35	1.77	9.26	1.77
16.80	5.70	1.62	6.53	1.62	7.35	1.62	8.17	1.62	8.99	1.62
18.27	5.75	1.49	6.51	1.49	7.26	1.49	8.02	1.49	8.78	1.49
19.73	5.79	1.38	6.49	1.38	7.19	1.38	7.89	1.38	8.59	1.38
21.20	5.82	1.28	6.47	1.28	7.13	1.28	7.78	1.28	8.43	1.28
22.67	5.85	1.20	6.46	1.20	7.07	1.20	7.68	1.20	8.29	1.20
24.13	5.88	1.12	6.45	1.12	7.02	1.12	7.60	1.12	8.17	1.12
25.60	5.90	1.06	6.44	1.06	6.98	1.06	7.52	1.06	8.06	1.06
27.07	5.92	1.00	6.43	1.00	6.94	1.00	7.45	1.00	7.96	1.00
28.53	5.94	0.95	6.42	0.95	6.91	0.95	7.39	0.95	7.88	0.95
30.00	5.96	0.90	6.42	0.90	6.88	0.90	7.34	0.90	7.80	0.90

Note : rem représente le pourcentage de remplissage (100e/D) et (A ± dA) représente le pourcentage de l'épaisseur de la couche active par rapport à l'épaisseur du lit ((A ± dA) = 100(a ± da)/e).

Annexe E Tableaux des vitesses moyennes dans la couche active

Tableau 11 Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (coke)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	v	dV								
8.00	7.44	4.48	5.75	2.84	4.63	1.95	3.83	1.42	3.23	1.08
9.47	7.14	3.72	5.75	2.53	4.77	1.83	4.04	1.38	3.48	1.08
10.93	6.90	3.20	5.72	2.29	4.86	1.72	4.19	1.34	3.66	1.07
12.40	6.69	2.82	5.68	2.10	4.91	1.62	4.30	1.29	3.80	1.05
13.87	6.50	2.52	5.62	1.94	4.92	1.54	4.37	1.25	3.91	1.03
15.33	6.33	2.29	5.55	1.80	4.92	1.46	4.41	1.20	3.98	1.01
16.80	6.17	2.09	5.47	1.68	4.90	1.39	4.43	1.16	4.03	0.98
18.27	6.01	1.93	5.39	1.58	4.87	1.32	4.43	1.12	4.06	0.96
19.73	5.87	1.79	5.30	1.49	4.83	1.26	4.42	1.08	4.07	0.93
21.20	5.73	1.67	5.21	1.41	4.78	1.20	4.40	1.04	4.07	0.91
22.67	5.59	1.57	5.12	1.33	4.72	1.15	4.37	1.00	4.06	0.88
24.13	5.45	1.47	5.03	1.27	4.66	1.10	4.33	0.97	4.04	0.85
25.60	5.32	1.39	4.93	1.21	4.59	1.06	4.28	0.93	4.02	0.83
27.07	5.19	1.31	4.83	1.15	4.51	1.01	4.23	0.90	3.98	0.80
28.53	5.07	1.24	4.73	1.09	4.44	0.97	4.17	0.87	3.94	0.78
30.00	4.94	1.18	4.63	1.04	4.36	0.93	4.11	0.84	3.89	0.75

Tableau 12 Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sable No 16)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	v	dV								
8.00	8.66	2.50	6.25	1.52	4.81	1.04	3.85	0.77	3.17	0.60
9.47	9.47	2.08	6.12	1.39	4.90	1.01	4.04	0.78	3.40	0.62
10.93	7.52	1.81	6.00	1.29	4.94	0.98	4.16	0.77	3.57	0.64
12.40	7.16	1.62	5.88	1.21	4.95	0.95	4.25	0.77	3.70	0.64
13.87	6.85	1.47	5.76	1.14	4.94	0.92	4.30	0.76	3.79	0.65
15.33	6.60	1.36	5.65	1.08	4.91	0.89	4.33	0.75	3.85	0.64
16.80	6.37	1.27	5.53	1.03	4.87	0.87	4.34	0.74	3.90	0.64
18.27	6.16	1.19	5.42	0.99	4.82	0.84	4.33	0.73	3.92	0.64
19.73	5.98	1.13	5.31	0.95	4.77	0.82	4.32	0.71	3.93	0.63
21.20	5.80	1.07	5.20	0.91	4.71	0.79	4.29	0.70	3.93	0.62
22.67	5.63	1.02	5.09	0.88	4.64	0.77	4.25	0.68	3.92	0.61
24.13	5.48	0.97	4.99	0.85	4.57	0.75	4.21	0.67	3.89	0.60
25.60	5.33	0.93	4.88	0.82	4.49	0.73	4.16	0.65	3.86	0.59
27.07	5.18	0.89	4.77	0.79	4.41	0.71	4.10	0.64	3.83	0.58
28.53	5.04	0.85	4.66	0.76	4.33	0.69	4.04	0.62	3.78	0.57
30.00	4.90	0.82	4.56	0.73	4.25	0.66	3.98	0.61	3.74	0.56

Note : rem représente le pourcentage de remplissage ($100e/D$), V représente la vitesse moyenne dans la couche active normalisée ($V = Va/R\omega$), et dV représente l'erreur sur cette vitesse ($dV = dVa/R\omega$).

Tableau 13 Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sable No 40)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	v	dV								
8.00	5.61	0.92	4.50	0.86	3.71	0.79	3.12	0.73	2.66	0.67
9.47	5.65	0.91	4.67	0.86	3.94	0.81	3.39	0.75	2.94	0.70
10.93	5.66	0.91	4.78	0.87	4.11	0.82	3.59	0.77	3.16	0.72
12.40	5.64	0.90	4.85	0.86	4.24	0.82	3.74	0.78	3.33	0.74
13.87	5.60	0.89	4.89	0.86	4.32	0.82	3.86	0.78	3.47	0.74
15.33	5.55	0.87	4.90	0.85	4.38	0.81	3.94	0.78	3.57	0.75
16.80	5.49	0.86	4.90	0.83	4.41	0.81	4.00	0.78	3.65	0.74
18.27	5.42	0.84	4.88	0.82	4.43	0.80	4.04	0.77	3.71	0.74
19.73	5.34	0.83	4.85	0.81	4.43	0.79	4.06	0.76	3.75	0.74
21.20	5.26	0.81	4.80	0.79	4.41	0.77	4.07	0.75	3.78	0.73
22.67	5.17	0.79	4.75	0.78	4.39	0.76	4.07	0.74	3.79	0.72
24.13	5.08	0.78	4.69	0.76	4.35	0.75	4.06	0.73	3.79	0.71
25.60	4.99	0.76	4.63	0.75	4.31	0.73	4.03	0.71	3.78	0.70
27.07	4.90	0.74	4.56	0.73	4.26	0.72	4.00	0.70	3.76	0.68
28.53	4.80	0.72	4.49	0.71	4.21	0.70	3.96	0.69	3.74	0.67
30.00	4.70	0.70	4.41	0.69	4.15	0.68	3.92	0.67	3.71	0.66

Tableau 14 Vitesse moyenne dans la couche active avec son incertitude (sel)

rem	2 rev/min		3 rev/min		4 rev/min		5 rev/min		6 rev/min	
	v	dV	v	dV	v	dV	v	dV	v	dV
8.00	16.83	11.80	12.32	6.55	9.64	4.16	7.86	2.87	6.59	2.10
9.47	15.90	9.09	12.25	5.56	9.91	3.75	8.27	2.69	7.07	2.03
10.93	15.17	7.32	12.13	4.80	10.06	3.39	8.56	2.52	7.42	1.94
12.40	14.58	6.08	11.99	4.20	10.14	3.07	8.76	2.35	7.69	1.85
13.87	14.06	5.17	11.82	3.72	10.16	2.80	8.89	2.19	7.88	1.75
15.33	13.60	4.46	11.63	3.32	10.14	2.56	8.96	2.04	8.02	1.66
16.80	13.18	3.91	11.44	2.98	10.08	2.35	8.99	1.90	8.11	1.57
18.27	12.79	3.45	11.23	2.70	9.99	2.16	8.99	1.77	8.16	1.48
19.73	12.43	3.08	11.02	2.45	9.89	2.00	8.95	1.66	8.17	1.40
21.20	12.08	2.77	10.80	2.24	9.76	1.85	8.89	1.55	8.16	1.32
22.67	11.74	2.50	10.58	2.05	9.62	1.71	8.82	1.45	8.13	1.24
24.13	11.41	2.27	10.36	1.88	9.47	1.59	8.72	1.36	8.07	1.17
25.60	11.10	2.07	10.13	1.73	9.31	1.48	8.61	1.27	8.00	1.11
27.07	10.79	1.89	9.90	1.60	9.14	1.37	8.48	1.19	7.91	1.04
28.53	10.48	1.73	9.66	1.48	8.96	1.28	8.35	1.12	7.81	0.99
30.00	10.19	1.59	9.43	1.37	8.77	1.20	8.20	1.05	7.70	0.93

Note : rem représente le pourcentage de remplissage (100e/D), V représente la vitesse moyenne dans la couche active normalisée ($V = Va/R\omega$), et dV représente l'erreur sur cette vitesse ($dV = dVa/R\omega$).