Détermination des pertes de charge à travers les biocarburants solides

Ing. N. PROTIN Dr Ir V. HANUS PIERRARD – Virton

Cet article présente l'étude des pertes de charge à travers un lit de biocarburants en fonction du débit. Une bonne compréhension de celles-ci est requise aussi bien pour le dimensionnement d'une chaudière que pour le contrôle du process. Les résultats de l'expérimentation sont ensuite comparés avec le modèle d'Ergun.

Mots-clefs : pertes de charge, débit, biocarburants, Ergun.

As part of this study, the pressure drop through a packed bed of biomass fuel in function of air flow was investigated. A good understanding of this is required for designing a boiler as well as controlling the process. Results of experimentation are compared with the Ergun equation.

Keywords : pressure drop, air flow, biomass fuels, Ergun.

Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels n°30, 2016.

1. Introduction

Cette étude fut proposée par le concepteur de chaudières industrielles VYNCKE [5]. Vieille de plus de cent ans, cette compagnie belge est devenue un expert dans la combustion de biomasse et d'autres carburants solides. L'objectif principal de ce producteur d'énergie est de traiter un large spectre de carburants (de très sec à très humide, de taille grossière à celle de cendres) tout en respectant les normes environnementales.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer expérimentalement les pertes de charge à travers différents biocarburants de type solide. Ces mesures sont réalisées dans une chaudière destinée à la recherche et s'applique à un lit de carburant fixe. Parallèlement à l'obtention de ces résultats, une prédiction est établie à l'aide du modèle d'Ergun. Concrètement, la variation des paramètres relatifs aux carburants permet de visualiser les impacts sur un graphe représentant les pertes de charge en fonction du débit.

Pour VYNCKE, une bonne compréhension des pertes de charge représente un élément essentiel. En effet, ces données permettent d'améliorer le dimensionnement du ventilateur des chaudières ainsi que le contrôle du processus.

2. Modèle d'Ergun

Dans le cas d'un lit de carburant fixe, les particules ne se déplacent pas les unes par rapport aux autres. Lorsqu'un écoulement gazeux traverse le lit, les particules de carburant s'opposent au passage de celui-ci. Cette force de résistance est la cause des pertes de charge. Ces pertes de charge par unité de hauteur de carburant, $\Delta p/L$ de particules uniformément dimensionnées, d_p ont été théorisées par Ergun en 1952 [2]. Applicable à un tube cylindrique, ce modèle résulte des lois de Carman-Kozeny et de Burke-Plummer utilisées respectivement pour des écoulements laminaire et turbulent.

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\psi \ d_p)^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g U^2}{\psi \ d_p}$$
(1)

avec les paramètres relatifs au carburant,

- L: hauteur du lit de carburant [m]
- ε : fraction de vide, porosité [%]
- d_p : diamètre des particules de carburant [m]

 ψ : sphéricité des particules de carburant [%]

ainsi que ceux relatifs au gaz,

- 255
- Δp : pertes de charge à travers le carburant [N/m²]
- μ : viscosité du gaz [kg/ms]
- U : vitesse superficielle du gaz [m/s]
- ρ_{g} : densité du gaz [kg/m³]



Figure 1 : Pellets de bois.



Figure 2 : Pellets de coques de tournesol.



Figure 3 : Epis de maïs.



Figure 4 : Copeaux de bois.



Figure 5 : Coques de tournesol.



Figure 6 : Grignons d'olive.



Figure 7 : Marc de café humide.



Figure 8 : Marc de café sec.

3. Caractéristiques des carburants

L'aspect des différents biocarburants étudiés peut être observé dans les figures 1 à 8. Les biocarburants en question sont les pellets de bois, les copeaux de bois, les pellets de coques de tournesol, les coques de tournesol, les épis de maïs, les grignons d'olive, le marc de café humide et sec.

3.1. Diamètre et sphéricité

Utilisé par l'équation (1), le diamètre d'une particule d_p peut être défini comme le diamètre de la sphère ayant le même volume que la particule réelle.

$$d_p = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

avec V_p : volume de la particule [mm³]

Egalement utilisée par l'équation (1), la sphéricité d'une particule de carburant ψ est définie comme le rapport entre la surface de la sphère ayant un volume égal à celui de la particule et la surface réelle de la particule. En d'autres termes, il s'agit de l'écart de sphéricité par rapport à une sphère parfaite (=1).

$$\psi = \frac{\pi d_p^2}{A_p} \tag{3}$$

avec A_p : surface de la particule [mm²]

Pellets

Que ce soit pour le bois ou pour les coques de tournesol, les pellets peuvent être modélisés par un cylindre. Ainsi, les équations suivantes peuvent être écrites:

$$A_p = 2\pi r \left(r + L_p \right) \tag{4}$$

$$V_p = \pi r^2 L_p \tag{5}$$

avec L_p : longueur de la particule [mm].

En théorie dans le cas d'un lit fixe, les deux sortes de pellets sont de même taille et de même forme. Cependant en réalité, les pellets de coques de tournesol ont tendance à se briser en cendres. Ainsi, d_p pellets de coques de tournesol $\leq d_p$ pellets de bois. Somme toute, la distribution de tailles des pellets de coques de tournesol fût mesurée ($d_{50} = 5,86$ mm).

Copeaux de bois

Les copeaux de bois furent modélisés en parallélépipède rectangle. Il est à noter que cette hypothèse est relativement approximative : la taille et la forme de ce carburant varient fortement. Cependant, une distribution de tailles fût réalisée : la valeur moyenne de la distribution granulométrique des particules $d_{50} = 5,82$ mm).

$$W_p = \frac{L_p}{3} \qquad T_p = \frac{3L_p}{50} \tag{6}$$

$$A_p = 2L_p W_p + 2L_p T_p + 2W_p T_p \tag{7}$$

$$V_p = L_p W_p T_p \tag{8}$$

avec les paramètres relatifs au carburant,

 W_p : largeur de la particule [mm]

 T_p : épaisseur de la particule [mm]

Marc de café

Dans un premier temps, la granulométrie du marc de café avec son humidité d'origine (55,40 %) fût analysée par diffraction laser ($d_p = 1,47$ mm). Etant dans l'impossibilité de déterminer la sphéricité des particules, celle-ci fut fixée à la valeur de base de 0,5. Certaines références [3] proposent une valeur de 0,7 pour un carburant inconnu. Par la suite, cette valeur doit être ajustée le plus précisément possible afin de correspondre à la réalité.

Ensuite, le marc de café sec (5,33 % d'humidité) s'obtient par un procédé de séchage dans un four. Durant ce processus, le volume du carburant s'est réduit d'un facteur 1,76. En effet, la hauteur maximale du lit de carburant est passée de 30 cm à 17 cm.

Grignons d'olive

Sans aucune information pertinente, la sphéricité fut fixée à une valeur moyenne. Bien sûr, il s'agit là d'une délicate approximation.

Coques de tournesol

La sphéricité des particules de tournesol s'obtient par l'équation (14) [4], tandis que la valeur du diamètre provient des laboratoires VYNCKE. La figure 9 illustre la forme considérée pour ce carburant.



Figure 9 : Croquis d'une coque de tournesol.

Epis de maïs

Bien que de forme irrégulière, les épis de maïs peuvent être modélisés par une forme cylindrique dans les mêmes proportions que pour les pellets ($\psi = 0.87$). Il s'agit là d'une hypothèse délicate, puisque ce carburant se présente brisé sous différentes pièces de différentes tailles et formes.

Récapitulatif

Le tableau 1 reprend, pour chaque carburant, le diamètre et la sphéricité des particules déterminés ci-dessus.

Carburants	Diamètre	Sphéricité
[-]	[mm]	[-]
Marc de café humide	1,47	0,5
Marc de café sec	1,34	0,5
Epis de maïs	5,99	0,88
Coques de tournesol	5,16	0,58
Pellets de coques de tournesol	5,86	0,88
Grignons d'olive	2,33	0,5
Copeaux de bois	5,82	0,43
Pellets de bois	9,32	0,88

Tableau 1 : Résumé des valeurs pour le diamètre et la sphéricité des particules.

3.2. Porosité

Dans le cas d'une couche de carburant solide et en fonction de la forme des particules, un certain volume de vide existe entre chaque particule. Ce vide est exprimé par la porosité.

D'abord, la faculté technique de l'université Tomas Bata de Zlín UTB a déterminé la porosité des différents carburants à l'aide d'un pycnomètre azote. Ensuite, le laboratoire TÜV NORD Czech a déduit la porosité en comparant la densité de l'échantillon original et la densité du même échantillon moulu en fines particules. Enfin, le centre de recherche énergétique de l'université technique d'Ostrava ERC a immergé les différents carburants dans l'eau de manière à en déduire la porosité (voir tableau 2). La moyenne établie entre ces trois valeurs sera utilisée dans la prédiction d'Ergun. Après avoir séché le marc de café dans un four, sa porosité reste pratiquement inchangée.

Carburants	Porosité			
	UTB	TÜV N	ERC	Moyenne
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
Marc de café humide	59,52	51,9	-	56
Marc de café sec	-	-	-	-
Epis de maïs	79,13	89,7	-	84
Coques de tournesol	92,13	91,9	-	92
Pellets de coques de tour- nesol	62,09	-	77,1	70
Grignons d'olive	64,03	60,4	-	62
Copeaux de bois	85,89	88,9	77,1	84
Pellets de bois	56,71	56,7	46,7	53

Tableau 2 : Résumé des valeurs pour la porosité des particules.

3.3. Densité

Le tableau 3 reprend l'ensemble des densités propres à chaque carburant déterminées par VYNCKE.

4. Prédiction des pertes de charges selon Ergun

Appliquées aux pellets de bois, les prédictions suivantes sont réalisées à l'aide de l'équation (1).

Carburants	Densité
[-]	[kg/m ³]
Marc de café humide	520
Marc de café sec	510
Epis de maïs	150
coques de tournesol	100
Pellets de coques de tournesol	510
Grignons d'olive	500
Copeaux de bois	190
Pellets de bois	630

Tableau 3 : Résumé des valeurs pour la densité des particules.

4.1. Diamètre

La littérature [6] spécifie que les pellets de bois se présentent sous plusieurs tailles, de celle de cendres à une longueur maximale de 34 mm. Ainsi, afin de connaître l'influence du diamètre des particules, les longueurs de pellets de 1, 5, 10 et 30 mm sont mises en équation.



Figure 10 : Influence du diamètre des particules pour pellets de bois (200 mm).

Comme le démontre la figure 10, une diminution de la taille des particules conduit à une augmentation de la résistance au débit. En réalité, avec des particules plus grandes, le chemin d'air est plus direct et ainsi celui-ci présente moins de résistance. La différence de pertes de charge obtenue entre le plus grand et le plus petit pellet est de l'ordre de 200 Pa à 2250 m³/h.

4.2. Sphéricité

L'augmentation de la sphéricité conduit à une diminution des pertes de charge (voir figure 11). En effet, une particule avec une surface lisse engendre moins de frottement avec le flux gazeux qu'une particule difforme.



Figure 11 : Influence de la sphéricité des particules pour pellets de bois (200 mm).

4.3. Porosité

La figure 12 représente l'influence de la porosité sur les pertes de charge. Déduite du modèle d'Ergun, cette figure décrit les porosités mesurées par les laboratoires (46,7% et 56,7%) ainsi que les valeurs de 40, 50 et 60 %. Logiquement, si la porosité augmente, les pertes de charge diminuent. En effet, la fraction de vide présente dans la couche de carburant n'offre aucune résistance au flux la traversant. La différence entre la porosité minimale et maximale est la suivante : $\Delta p = 200$ Pa à 2250 m³/h.



Figure 12 : Influence de la porosité des particules pour pellets de bois (200 mm).



Figure 13 : Pertes de charge pour les pellets de bois (200 mm) avec $\rho = 620 \text{ kg/m}^3$.

262



Figure 14 : Pertes de charge pour les pellets de bois (200 mm) avec $\rho = 630 \text{ kg/m}^3$.



Figure 15 : Pertes de charge pour les pellets de bois (200 mm) avec $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$.

4.4. Densité

D'après la littérature [1], la densité des pellets de bois peut varier de 620 à 650 kg/m³. La faible différence de densité pouvant exister pour les pellets de bois ne permet pas un impact significatif des pertes de charge (voir figures 13, 14, 15).

5. Résultats des pertes de charge selon les expérimentations

5.1. Banc de test

La figure 16 décrit le banc de test utilisé pour les expérimentations.



5.2. Procédure de test

Le débit est appliqué de sa valeur minimale à maximale (respectivement 658, 1088, 1274, 1560 et 1867 m³/h). Ces valeurs doivent être adaptées en fonction des carburants. En effet, les débits maximaux, dictés par le début de la fluidisation du carburant, sont plus faibles pour les particules légères (marc de café, coques de tournesol et grignons d'olive) que pour les plus lourdes (pellets et copeaux de bois) (voir figure 17). Cette procédure est répétée pour trois hauteurs de lit différentes (10, 20 et 30 cm).

Le phénomène de fluidisation apparait lorsque le frottement du flux gazeux permet de compenser le poids des particules de carburant. Le lit de carburant se comporte alors comme un fluide.

5.3. Résultats

Les pertes de charge nettes (uniquement à travers le carburant) sont obtenues en soustrayant les pertes de charge à vide aux pertes de charge totales (voir figure 17). Il est à noter que les mesures de la grille à vide auraient pu être réalisées jusqu'aux débits maximums. En effet sans carburant, il n'y a aucun risque de fluidisation.

Manifestement, les coques de tournesol et les épis de maïs présentent les plus faibles pertes de charge. Ce résultat logique s'explique par leur porosité élevée (respectivement 0,92 et 0,84) et l'important diamètre de leurs particules (respectivement 5,16 et 5,99 mm). En d'autres termes, un grand espace entre chaque grain est synonyme d'une faible résistance au débit. Il est à noter que la modélisation de ce carburant sous la forme cylindrique est une hypothèse purement théorique et approximative. En effet, les épis de maïs se décomposent facilement en une multitude de pièces différentes.

Les copeaux de bois présentent la même porosité que les épis de maïs (0,84) mais impactent de manière plus importante Δp . Ce phénomène peut s'expliquer par la sphéricité très faible de ce carburant (0,43). En effet, la surface d'une particule asphérique a tendance à s'opposer au passage du flux.

De par leur faible porosité, les pellets offrent la résistance au débit la plus élevée. Cependant, les pertes de charge sont illogiquement plus importantes pour les pellets à base de coques de tournesol que pour ceux faits de bois. En effet, la porosité de ces derniers sont respectivement 0,70 et 0,53. La seule explication à ce résultat peut s'expliquer par le diamètre des particules. En effet, le diamètre des particules des pellets en coques de tournesol (5,86 mm) est plus petit que celui des pellets de bois (9,32 mm).



Figure 17 : Pertes de charge à travers chaque carburant et différentes hauteurs.

266

Les pellets de bois, les pellets de coques de tournesol et les copeaux de bois présentent le même profil de pertes de charge que la grille mesurée à vide. La fluidisation de ceux-ci requiert des débits plus élevés.

5.4. Hauteur

Logiquement, quelque soit le carburant, la figure 18 démontre que si la hauteur du lit augmente, les forces de frottement augmentent et la fluidisation apparait plus tardivement. Le modèle d'Ergun est, ici, très peu représentatif de la réalité. En effet, ni la tendance, ni les grandeurs observées ne correspondent au modèle. Là où la théorie annonce une augmentation linéaire, les mesures expérimentales démontrent une augmentation plus importante après un débit de 1600 m³/h qu'avant.



Figure 18: Influence de la hauteur du lit pour pellets de bois (200 mm).

Comme le représente la figure 19, les pertes de charge ont été mesurées successivement pour un lit de carburant de 10, 20 et 30 cm. Cette figure indique que la tendance générale est semblable pour les pellets de bois, les pellets faits de coques de tournesol, les coques de tournesol et le marc de café humide : les pertes de charge augmentent en fonction de la hauteur du lit. Cependant, on peut observer une augmentation accrue des pertes de charge du marc de café humide par rapport au reste des carburants. Cette augmentation peut être expliquée par le faible diamètre des particules du marc de café qui offrent une force de friction plus importante au fluide traversant le carburant.



Figure 19: Influence de la hauteur du lit pour le café humide, les coques de tournesol, les pellets de bois et les pellets de coques de tournesol (débit maximum).

5.5. Humidité

L'influence de l'humidité sur les pertes de charge ne peut être directement dictée par l'équation d'Ergun. Dans ce cas, il faudrait connaître l'impact du pourcentage d'eau contenue dans les particules sur les paramètres de l'équation (1), tels que la porosité. Ainsi, les courbes du marc de café sec représentées à la figure 20 doivent être considérées avec prudence puisque la porosité ne fut pas analysée dans ce cas (voir section 3.2). Par défaut, le calcul des prédictions se base sur la valeur du marc de café humide.

La différence d'inclinaison entre les courbes du marc de café humide et sec interpelle (voir figure 20). Théoriquement, l'humidité seule ne peut impacter la forme

des courbes des pertes de charge. Au terme de cette étude, la seule explication à ce phénomène réside dans la différence de porosité entre les deux types de café. De plus, remarquons que la sphéricité du marc de café et des grignons d'olive fut fixée à une valeur moyenne de 0,5.

Pour le marc de café humide, on peut remarquer que la tendance mesurée correspond à la prédiction d'Ergun. Cependant les grandeurs mesurées sont plus élevées que celles prédites. La théorie d'Ergun ne peut donc, à elle seule, déterminer les pertes de charge.

Dans le cas du marc de café sec, ni la tendance, ni les grandeurs des courbes ne correspondent à la détermination d'Ergun.



Figure 20 : Influence de l'humidité du carburant pour le marc de café.

6. Conclusion

Dans cette étude, les pertes de charge à travers des lits de combustibles solides furent, d'une part, mesurées expérimentalement et, d'autre part, approchées par le modèle d'Ergun. Il est à noter que d'autres expressions, comme Carman-Kozeny (régime laminaire) et Burke-Plummer (régime turbulent), permettent de décrire le phénomène cité. Obtenue expérimentalement, la théorie d'Ergun est d'application pour un milieu poreux (régime laminaire et/ou turbulent).

De manière générale, Ergun nous informe que:

- une diminution de la taille des particules conduit à une augmentation des pertes de charge,
- une diminution de la sphéricité des particules entraîne une augmentation des pertes de charge,
- une diminution de la porosité du lit de carburant cause une augmentation des pertes de charge.

Expérimentalement, les mesures de pertes de charge furent enregistrées des débits minimums aux débits maximums. La procédure de test a dû être adaptée en fonction du début de fluidisation de chaque carburant. En effet, les particules de petite taille et de faible densité sont rapidement soulevées par le flux les traversant (marc de café sec et humide, grignons d'olive, coques de tournesol).

Tout d'abord, les mesures relatives aux coques de tournesol et aux épis de maïs confirment la tendance qu'une haute porosité (respectivement 0,92 et 0,84) et qu'un grand diamètre de particule (respectivement 5,16 et 5,99) sont la cause de faibles pertes de charge. Ensuite, par rapport aux épis de maïs, les copeaux de bois impactent de manière plus importante les pertes de charge, dû à leur faible sphéricité (0,43). Enfin, la faible porosité des lits de pellets de bois et des pellets de coques de tournesol engendre les plus grandes pertes de charge. Cependant, les pertes de charge sont plus importantes pour les pellets de coques de tournesol que pour les pellets de bois. Cette observation ne peut être expliquée uniquement par la porosité de ces deux carburants (respectivement 0,70 et 0,53), mais plutôt par le diamètre de leurs particules (respectivement 5,86 et 9,32). En effet, les pellets de coques de tournesol ont tendance à se fragmenter en poussière.

Ensuite, il a été observé qu'une augmentation de la hauteur du lit de carburant (10, 20 et 30 cm) conduit à une augmentation des pertes de charge. En effet, chaque particule supplémentaire accroit la résistance du lit.

Comme écrit plus haut, l'influence de l'humidité sur les pertes de charge ne peut être directement dictée par l'équation d'Ergun. Dans ce cas, il faudrait connaître l'impact du pourcentage d'eau contenue dans les particules sur les paramètres de l'équation (1), tels que la porosité.

Enfin globalement, le modèle d'Ergun permet de confirmer les tendances obtenues mais pas de les quantifier. La disparité entre les expérimentations et le modèle peuvent s'expliquer, en partie, par les hypothèses de celui-ci:

- La théorie d'Ergun se repose sur des expérimentations réalisées dans un tube cylindrique, tandis que les mesures du présent article sont réalisées dans une chaudière d'étude non-cylindrique.
- Le modèle d'Ergun s'applique à des particules parfaitement sphériques et homogènes. Les carburants de l'étude sont quant à eux utilisés à l'état brut.

7. Sources

- [1] AEBIOM (consulté le 2 juin 2015), Wood fuels handbook. Adresse URL : http://www.aebiom.org/IMG/pdf/WOOD_FUELS_HANDBO OK_BTC_EN.pdf
- [2] BASU, P., *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006, 473 p.
- [3] DE SOUZA-SANTOS M. L., Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operations, Second Edition, CRC Press, 2010, 508 p.
- [4] GUPTA, R. K. & DAS. S. K., *Physical Properties of Sunflower Seeds*, Department of Agricultural and Food Engineering, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India, 8 p.
- [5] VYNCKE (consulté le 5 mars, 2015), *Clean Energy Technology*. Adresse URL : http://www.vyncke.com/
- [6] YAZDANPANAH, F., SOKHANSANJ, S., *Air flow versus pressure drop for bulk wood pellets*, Chemical and Biological Engineering Department, University of British Columbia Vancouver, BC, Canada, 16 p.

8. Acknowledgements

I would like to acknowledge Mr Hans FASTENAEKELS, who gave me the opportunity to take part in the Vyncke activities. Without his support and his availability this project would not have been possible.