

AIDE AU DIMENSIONNEMENT ET À L'OPTIMISATION D'UNE INSTALLATION DE TRI-COMPOSTAGE MODÉLISATION DES TROMMELS

Pascale Michel, Jacques Villeneuve, Philippe Wavrer et Stéphane Brochot *
Bernard Morvan et Pascal Mallard **

* BRGM, Service environnement & procédés

** Cemagref, Unité de recherche gestion des effluents d'élevage et des déchets municipaux

Mis en œuvre dans le domaine du traitement des déchets par tri-compostage, le trommel est le premier équipement utilisé pour trier les impuretés par séparation granulométrique, aussi bien pour l'affinage du compost en sortie de fermentation qu'au niveau du tri primaire. L'analyse de procédé dans le domaine du traitement des déchets en est à son début. Pourtant, les performances de tri ont une influence cruciale sur la qualité des produits.

Un modèle de trommel dédié aux déchets est proposé. En intégrant ce modèle, le simulateur Usim Pac du BRGM devient ainsi un instrument d'aide à la conception et l'optimisation de procédés de tri-compostage de déchets ménagers, destiné aux bureaux d'études, aux experts, ainsi qu'aux exploitants.

Trommels are used in the field of the waste management, in particular for biological treatment processes. The trommel is the basic facility implemented to sort out impurities through size classification. It is implemented in the process for compost sorting after the biological degradation as well as for the primary sorting of waste. Research in the field of process analysis of waste treatment is at its beginnings. The development of a phenomenological model for trommels dedicated to municipal solid waste will allow a more accurate knowledge of the performance of such facilities.

Results of the modelling allow to take into account both the characteristics of the trommel and the characteristics of the waste input to predict the quantity and the quality of the output products.

Included to the simulation platform of the Usim Pac software, the model is able to predict the performance of a trommel, to optimise its operation, as well as to study the effects of the addition or the substitution of one trommel in a given treatment process. This model is an aid tool for process analysis for designers, experts and managers of municipal solid waste treatment.

INTRODUCTION

Dans le cadre d'expertises d'installations de tri-compostage de déchets ménagers, on a été amené à modéliser le fonctionnement de ce type d'unités de traitement. Les simulations basées sur ces modélisations permettent d'étudier l'impact d'une modification du schéma de traitement sur la qualité et la quantité des produits de sortie. Elles facilitent donc l'optimisation de ces installations.

Ces études ont mis à jour d'une part, l'importance des performances des équipements de tri sur la qualité des produits et d'autre part, le besoin d'augmenter le niveau de prédiction des modèles dédiés aux déchets.

Les travaux de recherche présentés ici avaient pour objectif l'établissement d'un modèle phénoménologique de la séparation granulométrique obtenue dans un trommel, qui décrive les phénomènes et les processus de séparation en fonction des caractéristiques de la matière et des équipements.

Les procédés de criblage ont été largement étudiés pour l'industrie minérale. Sur la base des modélisations établies dans ce domaine, un modèle spécifique en adéquation avec les caractéristiques physiques propres aux déchets est proposé. Il a été établi à partir d'une série d'essais sur des trommels de laboratoire et validé sur des données industrielles.

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ ET DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Description du procédé

Mis en œuvre dans le domaine du traitement des déchets par tri-compostage en particulier, le trommel représente un des équipements les plus utilisés pour trier les impuretés par séparation granulométrique ; aussi bien lors de l'affinage du compost en sortie de fermentation, qu'au niveau du tri primaire.

Schématiquement, un trommel se présente sous la forme d'un crible cylindrique de longueur L et de diamètre D percé de n ouvertures rondes de diamètre O (figure 1).

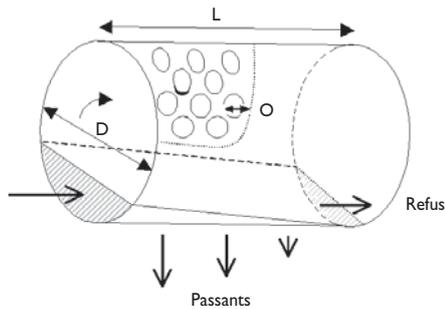


Figure 1 : Schéma d'un trommel

Dans une installation industrielle, l'alimentation d'un trommel se fait en continu. Un lit de déchets se forme. Les déchets entrants de taille inférieure au diamètre des ouvertures sont susceptibles de passer au travers du trommel : la hauteur du lit de déchets diminue donc au fur et à mesure que la matière progresse au sein du trommel. La progression de la matière selon l'axe longitudinal du trommel est facilitée par la rotation de ce dernier : le lit de déchets progresse en fait par retournements successifs. Dans certains cas, le déplacement longitudinal des déchets à l'intérieur du trommel est facilité par son inclinaison par rapport à l'horizontale ou grâce à des déflecteurs internes. En raison des frottements entre la paroi du trommel et les déchets, ceux-ci vont suivre momentanément le mouvement de la paroi. En fonction de la vitesse de rotation, les déchets vont monter plus ou moins haut avant de retomber majoritairement sur le lit qu'ils forment au sein du trommel. A chacun de ces retournements, les particules ont une nouvelle chance de passer à travers les ouvertures.

Modèles existants

Les procédés de criblage ont été largement étudiés pour l'industrie minérale [1,2]. Dans des conditions où les particules n'interagissent pas les unes avec les autres, le criblage peut être modélisé par une cinétique du premier ordre [1]:

$$\frac{\delta q(d,l)}{\delta l} = -k(d) q(d,l) \quad (1)$$

où $q(d,l)$ représente le débit massique des particules de diamètre d pour une distance parcourue à l'intérieur du trommel l .

La constante cinétique k est fonction de la probabilité $P(d)$ de passage des particules de diamètre d au travers des ouvertures et du nombre moyen de tentatives de passage N relatif à une distance parcourue unitaire :

$$k(d) = N \ln(1 - P(d)) \quad (2)$$

La probabilité de passage d'une particule à travers une ouverture est égale au rapport de la section efficace totale des ouvertures par la surface totale du cylindre [2], d'où :

$$P(d) = \frac{n\pi \left(\frac{O-d}{2}\right)^2}{\pi DL} \quad (3)$$

Pour chaque rebond sur la paroi du trommel, la particule aura cette même probabilité de passage.

Tableau 1 : Récapitulatif des essais sur ordures ménagères

Essai	Diamètre du trommel	Diamètre des ouvertures	Vitesse de rotation	Masse
G.100.5	1,3 m	100 mm	10,7 tpm	47 kg
G.100.3	1,3 m	100 mm	10,7 tpm	28 kg
G.20.2	1,3 m	20 mm	10,7 tpm	17 kg
P.40.2	0,7 m	40 mm	20,0 tpm	23 kg
P.63.2	0,7 m	63 mm	20,0 tpm	24 kg
P.20.3	0,7 m	20 mm	20,0 tpm	29 kg
P.100.3	0,7 m	100 mm	20,0 tpm	27 kg
P.100.1	0,7 m	100 mm	20,0 tpm	10 kg

Tableau 2 : Récapitulatif des essais sur ordures ménagères fermentées

Essai	Diamètre du trommel	Diamètre des ouvertures	Vitesse de rotation	Masse
P.100.1	1,3 m	100 mm	20,0 tpm	13 kg
P.63.1	1,3 m	63 mm	20,0 tpm	13 kg
P.40.1	1,3 m	40 mm	20,0 tpm	13 kg
P.20.1	0,7 m	20 mm	20,0 tpm	13 kg
G.20.5	0,7 m	20 mm	10,7 tpm	51 kg
G.20.3	0,7 m	20 mm	10,7 tpm	31 kg

Or, compte tenu des caractéristiques physiques des déchets (hétérogénéité, humidité) et des conditions de criblage (encombrement du trommel), le comportement des particules dépend en réalité des caractéristiques du lit de déchets. Les équations (1), (2) et (3) ont été utilisées comme point de départ à l'établissement du modèle spécifique aux déchets. La recherche s'est orientée vers l'établissement d'une formule semi-empirique du nombre effectif de tentatives de passage N , évoluant tout au long du criblage en même temps que les caractéristiques d'encombrement du trommel. La cinétique sera appliquée sur une distance parcourue dl suffisamment petite pour que N soit supposée constante entre l et $l+dl$.

La modélisation du criblage d'une quantité de déchets dans sa progression le long du trommel selon la distance parcourue revient à caractériser les performances de criblage en fonction du temps de présence de cette même quantité de déchets à l'intérieur du trommel [1]. Ainsi, les données expérimentales nécessaires à l'établissement du modèle ont été obtenues sur des essais batch : modélisation de la cinétique de criblage en fonction du temps de présence des déchets à l'intérieur d'un trommel clos.

Démarche expérimentale

L'objectif de l'étude expérimentale est donc le recueil de données sur la cinétique de passage de la matière à travers un trommel : mesure de la masse des passants en fonction du temps dans un trommel de laboratoire clos alimenté au temps zéro par une masse donnée de déchets. La cinétique de passage a pu ainsi être déterminée jusqu'à la fin apparente du criblage.

Les conditions opératoires de chaque essai ont été définies pour recueillir le maximum d'information sur l'influence des facteurs d'encombrement des trommels (charge, dimension, etc.).

Des trommels de même longueur (un mètre), mais de diamètres et d'ouvertures différents ont été utilisés. La vitesse de rotation a été ajustée pour conserver une même vitesse linéaire en périphérie.

Deux séries d'essais batch ont été conduites sur :

- des ordures ménagères brutes prélevées à l'entrée de l'unité de tri-compostage de Lantic (22) (tableau 1)
- des déchets fermentés sortants d'un cylindre de fermentation (tableau 2)

Les figures 2 et 3 regroupent les courbes expérimentales obtenues : masse des passants cumulés rapportée à la masse initiale des inférieurs au diamètre des ouvertures (ou passants potentiels). La proportion de passants potentiels par rapport à la masse initiale de déchets introduit dans le trommel a été indiquée.

Les cinétiques observées sur deux essais réalisés avec un même trommel à des charges différentes se distinguent

effectivement. On constate aussi que les temps de criblage sur ordures ménagères brutes et fermentées se différencient.

DESCRIPTION DU MODELE DEVELOPPÉ

Détermination du nombre moyen de tentatives de passage

En première approximation, on peut considérer qu'il y a tentative de passage à chaque retournement du lit de déchets ; la fréquence de retournement étant liée à la fréquence de rotation du trommel. Le nombre de tentatives N effectuées par une particule est donc proportionnel au nombre de rotations R effectuées par le trommel.

$$N = RT \quad (4)$$

T : Nombre moyen de tentatives par tour du trommel

Seules les particules situées à proximité de la paroi sont susceptibles de se présenter devant une ouverture. T dépend donc de l'étalement du lit sur la paroi donc du rapport entre la surface de contact entre les déchets et le trommel et la hauteur du lit. Plus ce rapport est important, plus les passants potentiels ont de chances de se retrouver en contact avec la paroi. T dépend aussi de la consistance du lit formé. En effet, les particules de tailles supérieures aux ouvertures vont gêner l'accès des passants potentiels à la paroi du trommel. Plus l'épaisseur du lit de déchets constitué des refus de criblage relativement à la dimension des ouvertures est importante et plus la migration vers la paroi du trommel est compromise. La formule semi-empirique qui découle de ces considérations a été validée sur les données expérimentales :

$$T = \frac{l_c O}{h^2} \frac{1}{l} \quad (5)$$

h est la hauteur du lit de déchets. l_c , fonction de h , est la demi-longueur de contact entre la paroi du trommel et le lit de déchets (Figure 4). l est le rapport entre la masse des non-passants potentiels et la masse totale des déchets considérés. Ces trois paramètres évoluent durant le criblage relativement à la masse des passants.

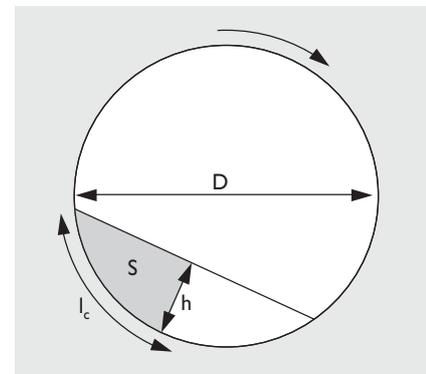


Figure 4 - Coupe transversale d'un trommel

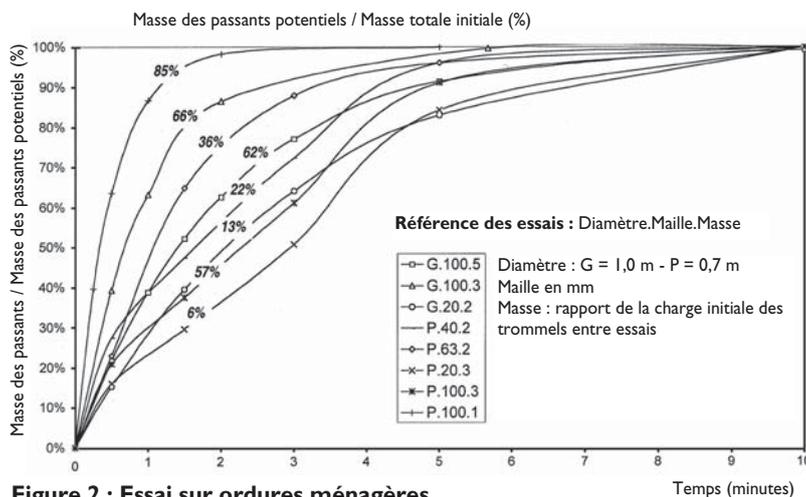


Figure 2 : Essai sur ordures ménagères

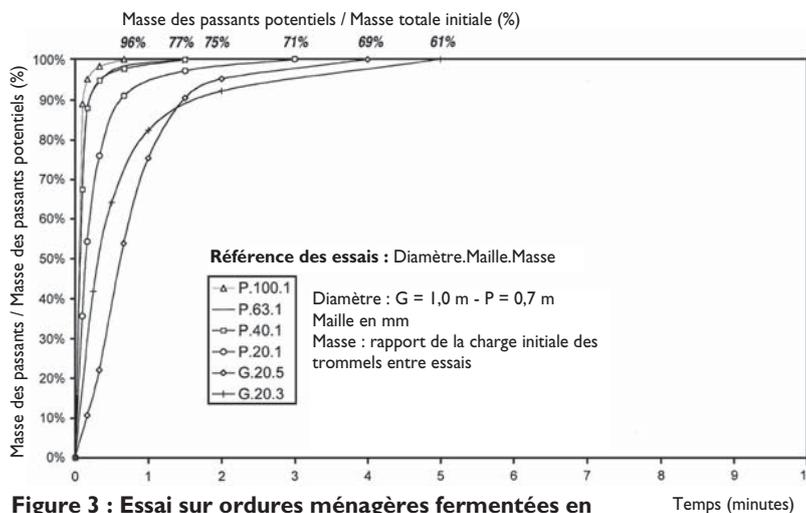


Figure 3 : Essai sur ordures ménagères fermentées en sortie du cylindre de fermentation

Le nombre moyen de tentatives par rotation du trommel T est limité au nombre d'ouvertures devant lesquelles une particule passe si elle parcourt la circonférence du cylindre :

$$T_{\max} = f_o \frac{\pi d}{O_c} \quad f_o = \frac{\pi n \left(\frac{O_c}{2}\right)^2}{\pi LD} \quad (6)$$

f_o est la proportion surfacique d'ouverture.

Le cas des très fines particules

Les fines particules ne se comportent pas comme les particules plus grosses. La modélisation de la cinétique de criblage ne permet pas dans la forme présentée ci-dessus de modéliser correctement leur comportement. Le pourcentage de passants est alors surestimé. Une certaine proportion de ces fines est, en fait, agglomérée aux plus grosses particules et ne réagit pas comme des particules dites libres. Cette proportion dépend en partie de l'humidité des déchets considérés, de la granulométrie des plus grosses particules

et de l'historique des traitements préalables qu'ont subi ces déchets.

Le comportement des fines liées aux autres particules est modélisé de la manière suivante :

- Seules les fines dites libres sont soumises à des tentatives de passage.
- Les fines agglomérées sont considérées comme des non-passants potentiels.
- Ces fines se libèrent des grosses au fur et à mesure du criblage selon une cinétique de libération.

La libération des fines est en fait proportionnelle au nombre de rotations effectuées par le trommel durant le criblage :

$$A = A_0 (1 - k_L R) \quad (7)$$

A : Proportion de fines agglomérées aux grosses particules
 k_L : Constante cinétique de libération des fines

Par exemple, pour les ordures ménagères brutes, 82 % des < 20 mm sont agglomérées aux plus grosses particules pour une vitesse de libération de 4 % par tour du trommel. Pour les ordures ménagères fermentées, 5 % de la masse des particules supérieures à 100 mm, et 8 % des 20 – 100 mm sont en fait des particules inférieures à 20 mm. La vitesse de libération a été estimée à 24 % par tour.

COMPARAISON AVEC LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les figures 5 et 6 comparent la cinétique de criblage calculée par le modèle aux données expérimentales.

Les cinétiques simulées des figures 5 et 6 ont été obtenues par le modèle après calibrage du pourcentage de fines agglomérées et de la cinétique de libération.

Au regard de l'hétérogénéité de la matière et du nombre d'essais réalisés, la comparaison des courbes expérimentales et simulées est tout à fait satisfaisante.

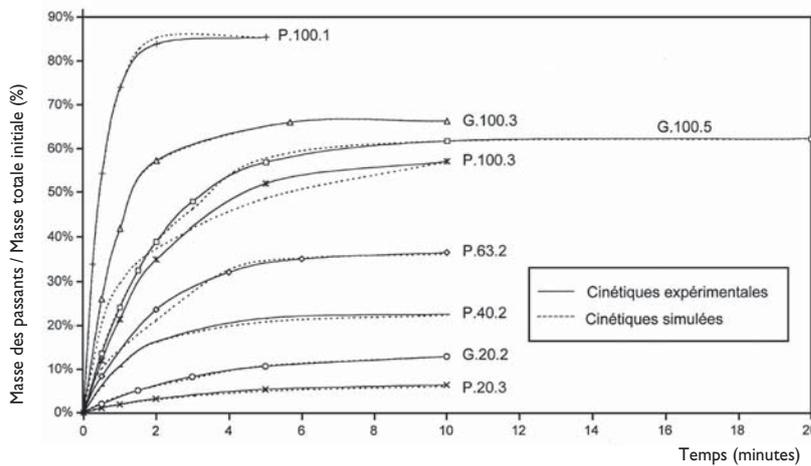


Figure 5 : Cinétiques expérimentales et simulées des ordures ménagères

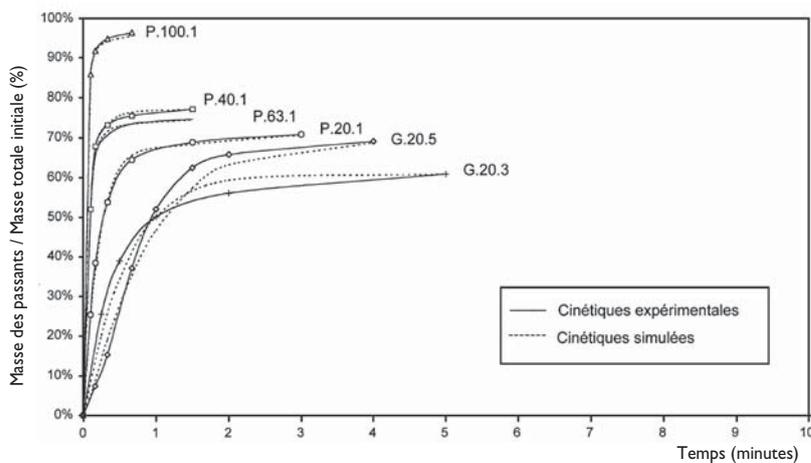


Figure 6 : Cinétiques expérimentales et simulées des ordures ménagères fermentées en sortie du cylindre de fermentation

UTILISATION DU MODÈLE POUR LA SIMULATION D'UNE INSTALLATION INDUSTRIELLE

L'application du modèle à des trommels utilisés comme séparateurs dans des installations industrielles est possible en introduisant la vitesse d'avancement v_x de la matière le long du trommel.

Le pourcentage de passants pour une longueur de trommel L revient au calcul du pourcentage de passants au bout d'un temps t :

$$t = \frac{L}{v_x} \quad (9)$$

Ce modèle mathématique a été intégré au logiciel Usim Pac développé par le BRGM.

La première étape de l'utilisation du modèle consiste en un calibrage à partir des données recueillies sur l'installation industrielle : débit et granulométrie des passants pour des déchets entrants connus. Pour que les données sur les sortants du trommel prédites par le modèle soient les plus proches possibles des données industrielles, la vitesse d'avancement des déchets au sein du trommel, le pourcentage de fines agglomérées et la cinétique de libération sont ajustés.

Les paramètres pris en compte pour la prédiction des sortants du trommel sont :

- les caractéristiques dimensionnelles du trommel (longueur, diamètre, diamètre des ouvertures, nombre d'ouvertures, vitesse de rotation),
- les caractéristiques de l'alimentation (débit, densité, granulométrie, humidité avec le pourcentage de fines agglomérées aux autres particules),
- les conditions opératoires (vitesse d'avancement de la matière, constante cinétique de libération des fines¹).

Une fois le calibrage effectué, le modèle peut être utilisé pour prédire les caractéristiques des sortants du trommel en fonction du débit et de la granulométrie des entrants.

On peut aussi étudier l'influence de la longueur du trommel, l'influence de l'ajout d'un trommel d'ouverture différente ou l'influence de la vitesse de rotation sur l'efficacité de criblage d'une installation.

La validation industrielle, ainsi qu'une étude de sensibilité du modèle feront l'objet d'une deuxième publication.

CONCLUSION

Le niveau de modélisation atteint prend en considération les caractéristiques dimensionnelles du trommel. Son utilisation permet d'une part, d'estimer les performances d'un trommel d'une installation existante (séparation granulométrique en fonction des caractéristiques des entrants) et

d'optimiser son utilisation (influence du débit ou de la vitesse de rotation). Il permet également de simuler des configurations hypothétiques d'installations industrielles dans la limite des conditions expérimentales qui ont permis sa validation.

Instrument d'aide à l'analyse de procédés, ce modèle peut apporter des informations clés, inaccessibles sans les outils de simulation, aux concepteurs, aux experts, ainsi qu'aux exploitants d'unités de tri-compostage de déchets ménagers.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de recherche BRGM / Cemagref / Ademe. La partie expérimentale a été conduite par le Cemagref (***) et la conception du modèle a été effectuée par le BRGM (*).

***Pascale Michel, Jacques Villeneuve, Philippe Wavrer et Stéphane Brochot**

BRGM, Service environnement & procédés
3, avenue C. Guillemin – B.P. 6009 45060 Orléans Cedex 2

****Bernard Morvan et Pascal Mallard**

Cemagref, Unité de recherche Gestion des effluents d'élevage et des déchets municipaux
17, avenue de Cucillé - CS 64427 35044 Rennes Cedex

Bibliographie

[1] Ferrara, G., Preti, U., Schena, G.D., *Modelling of screening operations*, International Journal of Mineral Processing, 1988, 22, pp. 193-222.

[2] Vaillant, communication privée.

[3] Durance, M.-V., Villeneuve, J., Guillauneau, J.-C., *Optimisation des atelières de classification*, Revue de l'industrie minérale, Les techniques, 1998, Vol. V/98, supplément à décembre, pp. 85-93.

[4] Guillauneau, J.-C., Villeneuve, J., Bodenan, F., Brochot, S., Durance, M.-V., Hergibo, P.-L., Piantone, P., Sandvik, K., Vedrine, H., Wavrer, P., *Urban waste management : From characterization to process evaluation*, French-Egyptian symposium on water and waste management and treatment, Cairo, Egypt, January 17-18-19, 2000.

[5] Brochot, S., Durance, M.-V., Guillauneau, J.-C., Villeneuve, J., *Usim Pac 3.0: New features for a global approach in mineral processing design*, Application of computers and operations research in the mineral industry, Ed. Sukumar Bandopadhyay, SME, 2002, pp. 465-478.

¹ Estimé par le modèle si nécessaire