



HAL
open science

Etude de l'influence de la granulométrie, de l'humidité, du ratio de mélange et de la compaction sur la masse volumique, la porosité et la perméabilité à l'air de mélanges boues/structurant

P. Radigois

► To cite this version:

P. Radigois. Etude de l'influence de la granulométrie, de l'humidité, du ratio de mélange et de la compaction sur la masse volumique, la porosité et la perméabilité à l'air de mélanges boues/structurant. Sciences de l'environnement. 2008. hal-02590917

HAL Id: hal-02590917

<https://hal.inrae.fr/hal-02590917>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de l'influence de la
granulométrie, de l'humidité, du
ratio de mélange et de la
compaction sur la masse
volumique, la porosité et la
perméabilité à l'air de mélanges
boues/structurant

Pauline RADIGOIS

Maître de stage : Céline DRUILHE

Département Milieux Aquatiques, Qualité et Rejets
Unité de Recherche « Gestion environnementale
et traitement biologique des déchets »

Groupement de Rennes
17, avenue de Cucillé – CS 64427
35044 Rennes Cedex
Tél. 02 23 48 21 21 – Fax. 02 23 48 21 15

*1^{er} avril –
13 juin 2008*

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier Madame Céline DRUILHE, maître de stage, qui m'a permis d'effectuer ce stage dans le domaine de l'environnement, domaine dans lequel je vais poursuivre mes études.

Je remercie aussi Monsieur Nicolas PETIT, directeur du Cemagref de Rennes.

Je remercie également l'ensemble du personnel du Cemagref, en particulier tous les membres de l'équipe GERE, pour leur sympathie et leur gentillesse. Tous ces professionnels m'ont fait découvrir leur métier, leur technique de travail et les outils qu'ils utilisent.

Sommaire

<u>Présentation de Mesures Physiques</u>	1
<u>Présentation de l'entreprise</u>	2
<u>I/ Introduction</u>	4
<u>II/ Rappels théoriques</u>	5
<i>II-1/ Paramètres physiques d'importance opérationnelle</i>	5
II-1-1/ L'humidité	5
II-1-2/ La granulométrie	5
II-1-3/ Le ratio de mélange boues/structurant	5
<i>II-2/ Paramètres physiques non directement modifiés par les opérationnels</i>	5
II-2-1/ Masse volumique ou densité apparente humide	6
II-2-2/ Porosité à l'air ou « free air space » (FAS).....	6
II-2-3/ Perméabilité à l'air (K)	6
<u>III/ Matériels et méthodes</u>	8
<i>III-1/ Le dispositif de mesure (dit PPP pour porosité, perméabilité, piston de compaction)</i> 8	
III-1-1/ Description générale du dispositif	8
III-1-2/ Principe de mesure du FAS	8
III-1-3/ Principe de mesure de la perméabilité K	10
III-1-4/ Principe d'utilisation du piston de compaction	10
<i>III-2/ Matériaux étudiés</i>	11
III-2-1/ Boues	11
III-2-2/ Structurant (RCCDV).....	11
III-2-3/ Mélanges Boues/Structurant.....	11
<u>IV/ Résultats et discussion</u>	13
<i>IV-1/ Caractérisation des fractions granulométriques sèches du structurant</i>	13
IV-1-1/ Masse volumique ρ	13
IV-1-2/ Porosité FAS	13
IV-1-3/ Perméabilité K	13
IV-1-4/ Conclusions	14
<i>IV-2/Caractérisation des mélanges boues/RCCDV</i>	14
IV-2-1/ Masse volumique ρ	14
IV-2-2/ Porosité FAS	17
IV-2-3/ Perméabilité K	18
IV-2-4/ Influence de la compaction des mélanges	20
IV-2-5/ Conclusions	21
<u>V- Conclusions et perspectives</u>	22

Présentation de Mesures Physiques

Afin de compléter ma formation de Mesures Physiques suivie à l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Nazaire, j'ai effectué mon stage en entreprise au sein du Cemagref de Rennes, du 1^{er} avril au 13 juin 2008.

Le Diplôme Universitaire de Technologie Mesures Physiques, diplôme de niveau bac +2, délivre une formation scientifique permettant de bien comprendre les phénomènes physiques des installations industrielles et les phénomènes physiques naturels. Ce diplôme offre une spécialisation dans les domaines de la mesure, de l'instrumentation, de la métrologie afin d'observer ces phénomènes physiques et d'être capables de faire de bonnes mesures.

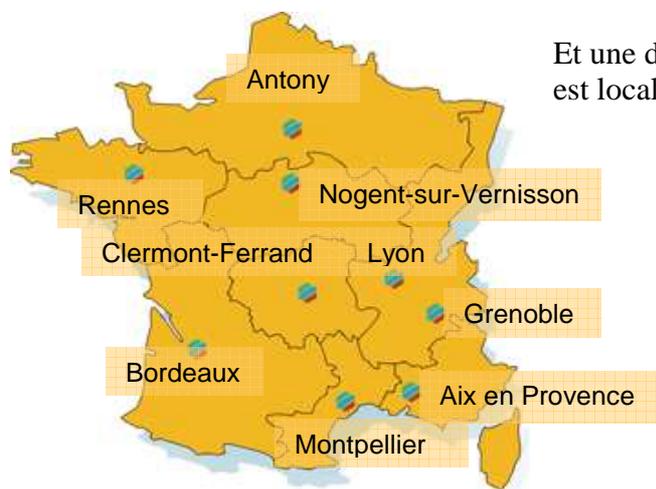
C'est une formation pluridisciplinaire et généraliste. En effet, ces deux années permettent d'acquérir une large plage de connaissances dans des domaines variés et ouvrant l'accès à une poursuite d'étude afin de se spécialiser dans un domaine. Malgré son qualificatif de « généraliste », cette formation permet une spécialisation au cours de la deuxième année avec un choix entre deux options : Techniques Instrumentales (TI) et Matériaux et Contrôles Physico-Chimiques (MCPC).

L'option TI offre des enseignements supplémentaires en électronique, en informatique d'instrumentation et en mécanique vibratoire et acoustique.

Mots-Clés : compostage, paramètres physiques, mélanges boues/structurant

Présentation de l'entreprise

Le Cemagref, Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural et des Eaux et Forêts, compte actuellement 21 unités de recherche (U.R.) propres, 7 unités mixtes de recherche (UMR) et une équipe de recherche technologique (ERT) qui sont réparties sur 9 implantations régionales qui sont représentés sur la carte suivante :



Et une dixième implantation : une antenne régionale est localisée en Martinique.



Le Centre de Rennes du Cemagref est implanté sur le site de Rennes Beauregard où il regroupe une soixantaine d'agents permanents dont 30 ingénieurs et chercheurs. En sus de cet effectif propre, il accueille en permanence une douzaine de doctorants et chercheurs étrangers et chaque année une vingtaine de stagiaires de l'enseignement supérieur. Ses locaux de 4 800 m² abritent des halls permettant des expérimentations sur des pilotes, des prototypes et plusieurs laboratoires. Son budget annuel, hors personnel permanent, est voisin de 2 millions d'euros.

Il est constitué de deux unités de recherche (U.R.) :

- U.R. GERE : Gestion environnementale et traitement biologique des déchets
Responsable : José MARTINEZ

Cette unité oriente ses recherches vers deux thèmes :

- la gestion et le traitement biologique des déchets solides

Etude du compostage, conception et amélioration de procédés

Evaluation technique, économique et environnementale des systèmes de gestion des déchets municipaux, dans un objectif d'appui aux politiques publiques

(équipe SOWASTE, responsable Pascal MALLARD)

- les gestion et traitement des effluents d'élevage

La maîtrise des pollutions liées à la gestion des déjections animales

(équipe EPURE, responsable Fabrice BELINE)

- U.R. TERE : Technologie des équipements agroalimentaires
Responsable : Armel DAVENEL

Cette unité oriente ses recherches vers deux thèmes :

- la caractérisation RMN/IRM des produits et procédés alimentaires

La mesure des transferts hydriques, le suivi de l'acidification au cours des opérations de fabrication de produits caillés et de yaourts et la détermination de l'aptitude à la réhydratation des poudres de lait dans le domaine des produits laitiers

La détermination de l'état de l'eau dans les produits de charcuterie et de l'état physique des produits adipeux dans le secteur de la viande, la détermination du rendement en filet chez le poulet

L'étude des transformations de l'état physique de l'amidon dans divers procédés mécaniques et thermiques

La caractérisation des matières premières et des aliments composés de l'alimentation animale : teneur en eau et matière grasse, transformation de l'amidon, comportement à la granulation

(équipe IRM-Food, responsable François Mariette)

- Maîtrise des écoulements et des transferts pour préserver l'hygiène des aliments

(équipe METFRI, responsable Georges ARROYO)

J'ai effectué mon stage dans l'U.R. GERE, au sein de l'équipe SOWASTE, dont les études portent sur le traitement des déchets solides par compostage.

I/ Introduction

Le compostage est une méthode de traitement biologique aérobie transformant des déchets organiques en compost, utilisable en agriculture. Le compostage, qui utilise la matière organique présente dans les déchets, met en jeu plusieurs processus tels que la biodégradation, des transferts de masse et des transferts de chaleur.

Les caractéristiques physiques des déchets initiaux traités par compostage ont une influence sur le déroulement de ce procédé. L'humidité et la surface spécifique des déchets vont principalement influencer les hydrolyses enzymatiques microbiennes intervenant au cours des processus de biodégradation. Concernant les porosités et perméabilité à l'air des déchets, elles ont un impact majeur sur les écoulements gazeux et les transferts de chaleur.

Pour le compostage de déchets pâteux tels que des boues d'épuration, il est nécessaire d'introduire un co-substrat qui va apporter de la « structure » au produit. Ce co-substrat, appelé agent structurant, peut être des déchets verts, des copeaux de bois, des rafles de maïs... L'opérateur va alors rechercher la formulation optimale du mélange boues/structurant afin d'optimiser les principaux paramètres physiques (humidité, surface spécifique, porosité, perméabilité) de façon à atteindre une biodégradabilité maximale et des transferts de masse et de chaleur optimaux.

Expérimentalement, les paramètres que les opérateurs feront varier sont la granulométrie du structurant, le ratio de mélange boues/structurant ainsi que l'humidité du mélange. La modification de ces paramètres expérimentaux engendrera des modifications des autres paramètres physiques tels que la masse volumique, la porosité à l'air et la perméabilité à l'air. L'objectif du projet global dans lequel s'inscrit ce stage est l'étude de l'influence des caractéristiques physiques des déchets sur la biodégradabilité de ces derniers et les cinétiques de biodégradation, ainsi que sur les écoulements gazeux. Dans le cadre de ce stage, portant exclusivement sur la caractérisation physique des déchets, est étudiée tout particulièrement l'incidence de la granulométrie, de l'humidité, du ratio de mélange et de la compaction sur la masse volumique, la porosité et la perméabilité à l'air de mélanges boues/structurant., mélanges utilisés sur site de compostage par les industriels.

Après des rappels théoriques relatifs aux paramètres physiques abordés lors de ce stage, l'outil expérimental permettant de mesurer simultanément la masse volumique, la porosité et la perméabilité de matrices solides, avec ou sans application d'une compaction, sera présenté ainsi que les différents mélanges boues/structurant étudiés à l'aide de cet outil. Les résultats de caractérisation obtenus seront ensuite commentés.

II/ Rappels théoriques

II-1/ Paramètres physiques d'importance opérationnelle

En compostage de boues, l'opérateur peut agir sur certains paramètres afin d'optimiser les caractéristiques de ses déchets à traiter. Les principaux paramètres facilement maîtrisables sur les sites de compostage de boues sont l'humidité du mélange boues/structurant, la granulométrie du structurant ainsi que le ratio de mélange boues/structurant.

II-1-1/ L'humidité

L'humidité, notée MCwb, est classiquement mesurée par séchage à 105°C sous un flux d'air chaud d'une quantité connue de matière, notée M1, jusqu'à une masse constante, notée M2. L'humidité (%) est calculée selon :

$$MCwb = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

II-1-2/ La granulométrie

La granulométrie a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires qui constituent un produit. Une analyse granulométrique est basée sur des opérations de criblage, généralement effectuées à l'aide de trommels. Un trommel est un tambour rotatif filtrant construit en tôle perforée dans lequel le matériau à cribler est introduit afin d'obtenir les différentes granulométries souhaitées. Un trommel peut être constitué de mailles rondes (la grandeur de la maille égale au diamètre) ou de mailles carrées (la grandeur de la maille égale le côté).

II-1-3/ Le ratio de mélange boues/structurant

C'est un facteur quantitatif qui peut être exprimé en ratio volumique, en ratio massique sec ou ratio massique humide. Il s'agit de donner la quantité, en volume ou en masse, de boues et de structurant à mélanger ensemble. Le ratio volumique est généralement utilisé sur les sites de compostage. Quant au ratio massique sec, il est indépendant de l'humidité du mélange.

II-2/ Paramètres physiques non directement modifiés par les opérationnels

Les paramètres énoncés ci-dessus, à savoir l'humidité de mélange, la granulométrie du structurant et le ratio de mélange, vont influencer d'autres caractéristiques du mélange telles que la surface spécifique, la porosité et la perméabilité du milieu formé. La complexité de l'étude des caractéristiques physiques des matériaux vient du fait que l'ensemble des paramètres sont liés. Ainsi, si l'on modifie un paramètre physique, tous les autres seront théoriquement modifiés.

II-2-1/ Masse volumique ou densité apparente humide

La masse volumique ou densité apparente humide correspond à la masse de l'unité de volume d'un matériau (kg/m³ ou kg/L...). Elle est mesurée par pesée d'un volume connu d'échantillon humide.

II-2-2/ Porosité à l'air ou « free air space » (FAS)

Le FAS correspond à la part de vide dans un volume global (V_g) d'échantillon.

$$\text{FAS}(\%) = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{g}}} \times 100$$

Il existe 3 méthodes de mesure de la porosité dont une méthode par saturation et drainage, trop peu fiable et ayant été abandonnée.

La deuxième méthode se base sur le principe du pycnomètre à eau. Il s'agit de mesurer le volume d'eau nécessaire pour combler les espaces d'air d'un volume donné d'échantillon. Mais cette méthode n'est pas la plus précise car des bulles d'air peuvent être piégées dans le matériau. Elle est de plus destructive pour l'échantillon.

La troisième méthode permet la mesure de la porosité selon le principe du pycnomètre à air et est basée sur la loi de Boyle-Mariotte (ou loi des gaz parfaits). Cette méthode est moins source d'imprécisions et n'est pas destructive pour l'échantillon étudié. Elle est donc généralement préférée aux deux autres.

II-2-3/ Perméabilité à l'air (K)

La perméabilité qualifie la capacité de l'air à s'écouler dans un matériau. Elle peut être reliée à la perte de charge induite par un flux d'aération à vitesse donnée à travers un lit de matériau de hauteur fixée.

Deux lois existent pour définir ces relations : la loi de Dupuit-Forcheimer qui prend en compte les forces de viscosité et les forces de frottements et la loi de Darcy qui néglige les forces de frottements et est donc une simplification de la première :

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha \cdot u + \beta \cdot u^2 \quad (\text{relation de Dupuit-Forcheimer})$$

avec : H la hauteur de matériau (en m)

ΔP la perte de charge induite par le flux d'aération dans le lit de matériau (en Pa)

$\alpha \cdot u$ les forces de viscosité ($\alpha = \frac{\mu}{K}$)

μ la viscosité dynamique de l'air ($\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

K la perméabilité (en m²)

u la vitesse surfacique ($u = Q/A$; en m.s⁻¹)

$\beta \cdot u^2$ les forces de frottement ($\beta = \frac{\rho_{\text{air}}}{\eta} = \frac{C_f \cdot \rho_{\text{air}}}{\sqrt{K}}$)

ρ_{air} la masse volumique de l'air ($\rho_{\text{air}} = 1.293 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

η la passabilité

C_f un coefficient d'inertie (coefficient de Forcheimer)

Dans les cas où les forces de frottements sont négligeables, on obtient :

$$\boxed{K = \frac{Q \cdot \mu \cdot H}{\Delta P \cdot A} = u \cdot \frac{\mu \cdot H}{\Delta P}} \quad \text{soit} \quad \boxed{\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu}{K} \cdot u} \quad (\text{loi de Darcy})$$

avec : Q le débit d'air traversant le mélange étudié (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
 A la section de la cellule ($A = 0,116416\text{m}^2$)

Pour déterminer si les forces de frottements sont ou non négligeables, donc quelle est la relation à utiliser, loi de Darcy ou loi de Dupuit-Forcheimer, deux nouveaux paramètres adimensionnels sont calculés : Re_K (nombre de Reynolds, appliqué à la perméabilité) et L (nombre de Lage) :

$$\boxed{\text{Re}_K = u \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \frac{\sqrt{K}}{\mu}} \quad \text{nombre de Reynolds}$$

$$\boxed{L = \frac{\beta u^2}{\alpha u} = \frac{\frac{\rho_{\text{air}}}{\eta}}{\frac{\mu}{K}} \cdot u = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot K}{\eta \cdot \mu} \cdot u} \quad \text{nombre de Lage}$$

En théorie, lorsque Re_K et $L < 1$, le régime est considéré comme « laminaire » et la loi de Darcy est appliquée tandis que lorsque Re_K ou $L > 1$, le régime est considéré comme « turbulent » et la loi de Dupuit-Forcheimer est appliquée car on ne peut pas négliger le terme de second ordre de la loi de Dupuit-Forcheimer.

III/ Matériels et méthodes

III-1/ Le dispositif de mesure (dit PPP pour porosité, perméabilité, piston de compaction)

III-1-1/ Description générale du dispositif

L'outil PPP est composé de deux cellules de mesure :



Photo 1: La cellule échantillon

-la cellule échantillon, dans laquelle est introduit le mélange étudié, dans un panier (diamètre : 38,5cm, hauteur : 47cm), et où il est possible de réaliser une compaction grâce au piston mis en place. (diamètre : 40cm, hauteur : 110cm, volume approximatif : 87,3L)

-la cellule additionnelle, servant à la mise sous pression de l'échantillon par création d'un état d'équilibre. (diamètre : 46cm, hauteur : 21,5cm, volume approximatif : 25,6L)



Photo 2 : La cellule additionnelle

Le mélange à étudier est pesé afin de connaître précisément la masse de l'échantillon (M). Les caractéristiques (hauteur et diamètre) du panier de mesure étant connues, le volume du mélange introduit (V_g) est calculé par mesure de la hauteur restante entre le dessus du matériau et le haut du panier. La masse volumique de l'échantillon est ainsi déterminée :

$$\rho = \frac{M}{V_g}$$

Pour la mesure du FAS, chacune des cellules précédentes possède une sonde de température et la cellule additionnelle est également équipée d'un capteur de pression (0-3.5Bars absolus). Ce capteur mesure la pression dans le système qui est défini selon l'orientation d'une vanne 3 voies. Cette vanne permet soit de connecter les deux cellules entre elles, soit de connecter l'arrivée d'air comprimé à la cellule additionnelle, soit d'isoler la cellule additionnelle du reste du système.

Pour la mesure de K, la cellule échantillon est constituée de telle sorte à pouvoir brancher un capteur de pression différentielle (0-25Pa, mesure de ΔP entre le haut et le bas du lit de matériau) ainsi qu'un aspirateur afin de faire circuler un débit d'air connu de bas en haut.

Pour les mélanges étudiés avec compaction, un capteur de force positionné au niveau du piston de compaction sert à connaître la charge appliquée au matériau.

III-1-2/ Principe de mesure du FAS



Photo 3: Connexion des deux cellules pour la mesure du FAS

Le FAS est mesuré par état d'équilibre de pression et de température se formant entre les 2 cellules du PPP et est basé sur la loi de Boyle-Mariotte. De l'air comprimé est injecté dans la cellule additionnelle qui est isolée une fois la pression stabilisée. Lors d'un précédent stage, il a été montré qu'il était nécessaire d'attendre 12 minutes avant de connecter les 2 cellules. Un relevé régulier des pressions et températures sera effectué lors de la mise à l'équilibre. Les 3 étapes de la mesure du FAS sont décrites ci-après.

Etat initial

Au repos et lorsque les 2 cellules sont connectées, les pressions P_{e0} et P_{a0} (proches de la pression atmosphérique) dans les deux cellules sont identiques. Un relevé des températures T_{a0} dans la cellule additionnelle et T_{e0} dans la cellule échantillon sera effectué. La loi de Boyle-Mariotte permet d'écrire les relations suivantes :

$$P_{e0} \cdot (V_e - V_s) = n_{e0} \cdot R \cdot T_{e0} \text{ (relation 1)}$$

$$P_{a0} \cdot V_a = n_{a0} \cdot R \cdot T_{a0} \text{ (relation 2)}$$

avec : P_{e0} et P_{a0} , pressions initiales dans les cellules échantillon et additionnelle (en Pa)
 n_{e0} et n_{a0} , nombre de moles dans ces mêmes cellules (en moles)
 T_{e0} et T_{a0} , températures dans les cellules (en K)
 R la constante des gaz parfaits
 V_e et V_a , les volumes des cellules vides, en incluant les volumes de tuyauterie (en L)
 V_s le volume de solide dans l'échantillon étudié, étant caractérisé par ailleurs par son volume global V_g incluant le volume de vide (en L)

Etat de compression

Par l'intermédiaire de la vanne à 3 voies, la cellule additionnelle est isolée puis connectée à l'air comprimé. Elle est alors mise sous pression à environ 2.5 Bars absolus. Lorsque la pression est stabilisée, l'arrivée d'air est coupée et la cellule additionnelle est isolée durant 12 minutes. Ce temps est nécessaire pour obtenir un état stable. Quelques micro-fuites existantes seront corrigées par calcul lors des exploitations de résultats. Une fois les 12 minutes écoulées, la loi de Boyle-Mariotte permet d'aboutir à la relation :

$$P_{a1} \cdot V_a = n_{a1} \cdot R \cdot T_{a1} \text{ (relation 3)}$$

avec : P_{a1} pression dans la cellule additionnelle (en Pa)
 n_{a1} nombre de moles dans la cellule additionnelle
 T_{a1} température dans la cellule additionnelle (en K)
 V_a et R étant définis comme pour l'état initial

Etat final

La vanne 3 voies est tournée de sorte à connecter les cellules. L'air présent en grande quantité dans la cellule additionnelle va s'échapper vers la cellule échantillon jusqu'à obtention d'un équilibre. L'équation des gaz parfaits obtenue est alors :

$$P_f \cdot (V_e + V_a - V_s) = n_f \cdot R \cdot T_f \text{ (relation 4)}$$

avec : P_f la pression finale dans le système
 n_f le nombre final de moles présentes dans le système (en moles)
 T_f la température finale du système, moyenne des températures relevées au niveau des deux sondes Pt100

Connaissant la relation $n_f = n_e + n_{a1}$, reliant les quantités de matière les unes aux autres, en combinant les relations 1, 3 et 4, il est possible d'aboutir à la relation permettant de calculer V_s , le volume de solide dans l'échantillon étudié, à savoir :

$$V_s = V_a \times \frac{P_f - P_{a1} \cdot \frac{T_f}{T_{a1}}}{P_f - P_{e0} \cdot \frac{T_f}{T_{e0}}} + V_e$$

Cette relation est en pratique complexifiée en tenant compte des déformations des deux cellules de mesure lors des phases de compression et décompression, ainsi que des fuites diffuses. Cette relation complète est donnée en annexe (annexe 1).

Connaissant le volume global V_g , la valeur de la porosité est déduite de la formule :

$$FAS(\%) = \left(1 - \frac{V_s}{V_g}\right) \times 100$$

III-1-3/ Principe de mesure de la perméabilité K

La perméabilité à l'air est mesurée indirectement via la quantification de la perte de charge ΔP subie par un débit d'air Q traversant une hauteur H de matériau à étudier. Pour cela, un aspirateur sera utilisé. Un robinet branché au niveau d'un tuyau en T sert à faire varier le débit d'air traversant le matériau. Ce robinet permet, selon sa position, un apport supplémentaire d'air extérieur et crée ainsi une diminution du débit dans le mélange étudié. A chaque mesure, le débit d'air circulant dans le matériau est relevé ainsi que la différence de pression (perte de charge ΔP) entre le dessus et le dessous du matériau et de nouveau la valeur du débit d'air. Pour un relevé, différents débits sont appliqués suivant l'ordre croissant puis décroissant, permettant de faire varier la vitesse



Photo 4: Cellule échantillon connectée pour la mesure de perméabilité

surfacique u entre 0,03 et 0,07m/s. La courbe $\frac{\Delta P}{H}$ en fonction

de u pour l'échantillon étudié est ensuite simulée par une équation polynomiale du second ordre correspondant à l'équation de Dupuit-Forcheimer (cf. II-2-3). Les paramètres L et Re_K sont calculés aux conditions extrêmes de vitesse surfacique. Les 4 valeurs obtenues pour ces paramètres sont comparées à 1 afin de déterminer la nature du régime d'écoulement. Si les 4 valeurs sont inférieures à 1, les forces de frottement sont négligées et la perméabilité est calculée par linéarisation de la courbe $\frac{\Delta P}{H} = f(u)$ (Darcy). Si l'une de ces 4 valeurs est supérieure à 1, les forces de frottement ne sont pas négligeables et la perméabilité est calculée en utilisant l'équation polynomiale de 2nd ordre (Dupuit-Forcheimer).

III-1-4/ Principe d'utilisation du piston de compaction

La cellule échantillon de l'outil PPP dispose d'un plateau de compaction relié à un capteur de force. En abaissant le plateau à des hauteurs différentes, plusieurs niveaux de compaction peuvent être étudiés. Cependant, suite à un problème d'axe du piston au niveau du capteur de force tordu, en plus du plateau de compaction déformé car non enclenché lors d'un essai, aucune valeur de force ne pourra être donnée dans ce rapport.

III-2/ Matériaux étudiés

III-2-1/ Boues

Les boues utilisées dans l'étude sont issues du traitement des eaux d'un abattoir bovin et ont été prélevées à leur livraison sur le site de compostage industriel SERPOT (Chancay – 37), exploité par Terralys (filiale du groupe Suez-Environnement) et habituellement traitées directement sur place.

Une fois récupérées, elles sont congelées pour leur conservation. Quelques jours avant utilisation, la quantité de boues nécessaire est placée en chambre froide à 4°C pour la décongélation, puis mise à température ambiante pendant plusieurs heures avant le mélange.

III-2-2/ Structurant (RCCDV)

Le structurant étudié est du refus de criblage de compost de déchets verts (RCCDV). Cinq fractions granulométriques de structurant sont considérées ici : supérieur à 40mm, 30-40mm, 20-30mm, 12-20mm et 8-12mm. Ce structurant est passé au trommel de maille ronde 40mm (diamètre de la maille). Le passant sera criblé à la maille inférieure, 30mm, tandis que ce qui reste dans le crible constitue la fraction de granulométrie supérieure à 40mm. Tout le structurant est tamisé aux différentes mailles dans l'ordre suivant : trommels à 40mm, à 30mm, à 20mm, à 12mm, pour finir à 8mm. Après obtention, chaque fraction granulométrique est séchée à 80°C

III-2-3/ Mélanges Boues/Structurant

Les mélanges sont caractérisés selon les paramètres physiques d'importance opérationnelle et définis page 6. Dans le cadre du projet global dans lequel s'inscrit ce stage, les mélanges ont été étudiés au préalable en respirométrie (étude de l'influence des caractéristiques physiques sur la biodégradabilité) et/ou en réacteur de compostage de 300L (étude de l'influence des caractéristiques physiques sur les écoulements gazeux et le comportement en compostage).

Les ratios de mélange seront exprimés en massique sec et de valeurs définies selon un plan d'expérience réalisé avant le début de ce stage. Selon le plan factoriel 2^k , les valeurs choisies sont : $\frac{1}{6}$ pour le point central, $\frac{1}{4,1}$ et $\frac{1}{7,9}$ pour ses bornes, $\frac{1}{2,8}$ et $\frac{1}{9,2}$ pour les points étoile.

En ce qui concerne l'humidité de mélange, les points étoile valent 20 et 70% ce qui correspond aux humidités minimale et maximale pour avoir de la biodégradation dans le premier cas ou pour ne pas être saturé en eau dans le second cas. Du fait du plan centré de trois facteurs, le point central est donc à 45% d'humidité et les deux dernières humidités sont de 30 et 60% en étude par respirométrie et de 27 et 63% en réacteur de 300L.

Pour des humidités élevées (60 à 70%), une certaine quantité d'eau est ajoutée au structurant sec de sorte qu'il absorbe toute l'eau, le tout étant ensuite additionné à la boue. Pour des humidités moyennes (45%), aucun ajout d'eau n'est effectué. Pour les humidités faibles (20 à 30%), la boue est mise à sécher lentement en étuve à 30°C afin d'abaisser son humidité initiale (86,2%), puis mélangée au



Photo 5: Mélange B/RCCDV

structurant. Les valeurs d'humidité ne sont que théoriques et la mesure de l'humidité effective de chaque mélange est effectuée.

Les 19 mélanges B/RCCDV caractérisés à l'aide du PPP sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous. Parmi eux, 10 ont été parallèlement étudiés en respirométrie, 4 en réacteur de compostage 300L et 5 à la fois en respirométrie et en réacteur de compostage. Pour les 9 échantillons étudiés en réacteur de compostage, une procédure de compaction est appliquée afin de simuler l'évolution de la masse volumique observée en réacteur et quantifier son influence sur la porosité et la perméabilité.

Nom du mélange B/RCCDV	Granulométrie RCCDV	Ratio mélange B/S (massique sec)	Humidité mélange théorique	Humidité réelle	Ajout d'eau	Séchage des boues	Compaction
1 respiro	20-30mm	1/9,2	45%	42,20	Oui		
9 respiro	30-40mm	1/4,1	60%	54,90	Oui		
8 respiro	12-20mm	1/4,1	60%	58,00	Oui		
2 respiro	12-20mm	1/7,9	60%	57,40	Oui		
14 respiro	30-40mm	1/7,9	60%	53,40	Oui		
11 respiro, 5 réacteur	>40mm	1/6	45%	43,50			Oui
10/15 respiro, 1/9 réacteur	20-30mm	1/6	45%	46,00			Oui
3 respiro, 2 réacteur	8-12mm	1/6	45%	38,10			Oui
6 respiro	30-40mm	1/7,9	30%	29,60		Oui	
12 respiro	12-20mm	1/7,9	30%	24,70		Oui	
4 respiro	20-30mm	1/2,8	45%	48,80		Oui	
16 respiro	30-40mm	1/4,1	30%	29,35		Oui	
7 respiro	12-20mm	1/4,1	30%	37,00		Oui	
4 réacteur	30-40mm	1/6	27%	30,90		Oui	Oui
13 respiro, 8 réacteur	20-30mm	1/6	20%	29,20		Oui	Oui
6 réacteur	12-20mm	1/6	27%	25,50		Oui	Oui
7 réacteur	30-40mm	1/6	63%	64,10	Oui		Oui
5 respiro, 10 réacteur	20-30mm	1/6	70%	63,60	Oui		Oui
3 réacteur	12-20mm	1/6	63%	en cours	Oui		Oui

Tableau 1: Caractéristiques des mélanges B/RCCDV étudiés

IV/ Résultats et discussion

IV-1/ Caractérisation des fractions granulométriques sèches du structurant

Le tableau qui suit fournit les résultats généraux obtenus lors des études au PPP des fractions granulométriques du structurant seul.

Granulométrie	ρ (en kg/L)	FAS (%)	$K \cdot 10^7$ (en m^2)
>40mm	0,253	77,47	4,507
30-40mm	0,281	74,8	4,645
20-30mm	0,276	77,38	4,099
12-20mm	0,23	81,04	0,644
8-12mm	0,176	85,57	0,254

Tableau 2: Caractéristiques physiques des fractions granulométriques sèches de RCCDV

IV-1-1/ Masse volumique ρ

Globalement, pour les fractions granulométriques sèches, la masse volumique augmente de 0,176 à 0,281kg/L avec l'augmentation de la granulométrie de 8-12mm à 30-40mm. Seule la masse volumique de la fraction supérieure à 40mm (0,253kg/L) ne suit pas l'augmentation mais se situe entre celles de granulométrie 12-20 et 20-30mm.

IV-1-2/ Porosité FAS

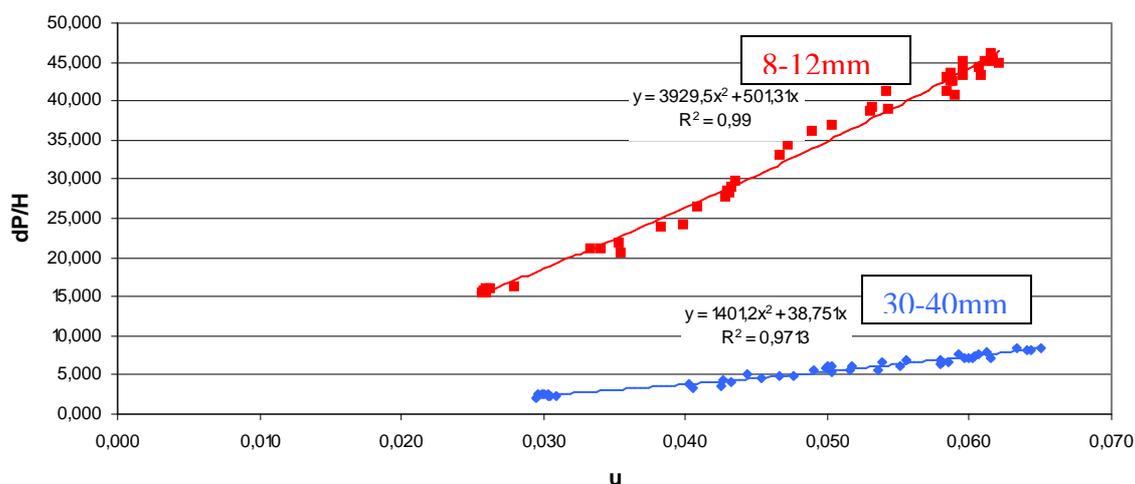
La tendance observée pour le FAS est une augmentation de 74,8 à 85,57% quand la granulométrie diminue de 30-40mm à 8-12mm. Quant au FAS pour la granulométrie >40mm, il est égal à celui de la fraction 20-30mm.

IV-1-3/ Perméabilité K

La perméabilité évolue de la même manière que la granulométrie. Cependant, avec les fractions fines (8-12 et 12-20mm), les valeurs de perméabilité sont faibles et proches les unes des autres ($0,25 \cdot 10^{-7} m^2$ et $0,64 \cdot 10^{-7} m^2$), alors qu'elles sont beaucoup plus fortes dans les fractions grossières (4 à $4,6 \cdot 10^{-7} m^2$).

Les courbes $\frac{\Delta P}{H} = f(u)$, obtenues avec les granulométries 8-12mm et 30-40mm, sont tracées à titre d'exemple sur la courbe 1 ci-après.

Influence de la granulométrie sur la perméabilité



Courbe 1: Allure des courbes $dp/H = f(u)$ des fractions RCCDV 8-12 et 30-40mm

IV-1-4/ Conclusions

Une augmentation de la granulométrie entraîne une augmentation de la masse volumique, une diminution du FAS ainsi qu'une augmentation de la perméabilité, exceptées pour la granulométrie $>40\text{mm}$. Cette fraction la plus grossière et la plus hétérogène est en effet la fraction la plus sensible aux éventuelles erreurs d'échantillonnage, ceci pouvant expliquer son comportement différent.

Il peut en outre être noté que la perméabilité est plus influencée par la granulométrie que la masse volumique et le FAS. Une modification de la distribution des tailles des particules vers des particules plus grossières entraîne une augmentation de la taille des pores et donc une facilitation des mouvements d'air et ainsi une augmentation de la perméabilité. Parallèlement, l'augmentation simultanée de la taille des particules et de la taille des pores induit de plus faibles modifications de ρ et du FAS.

IV-2/Caractérisation des mélanges boues/RCCDV

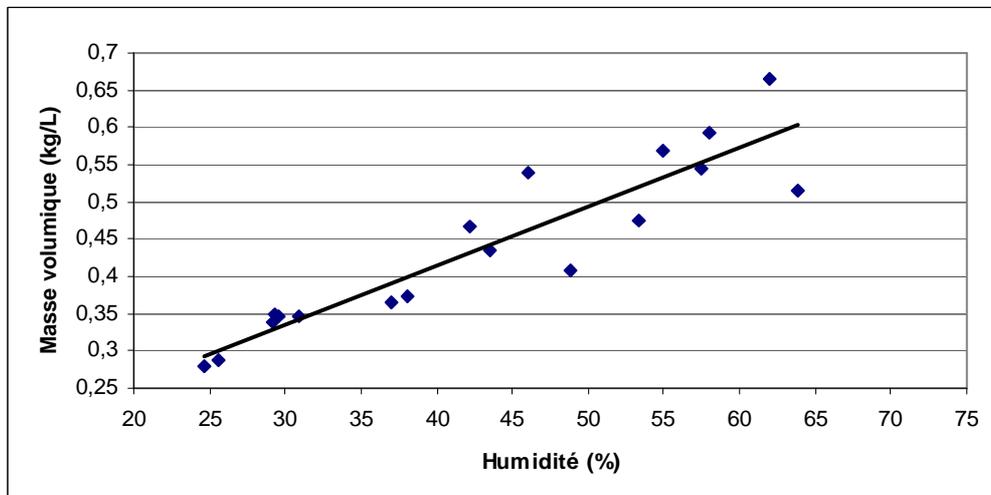
Les résultats obtenus par caractérisation au PPP sont répertoriés dans le tableau 3 en annexe (annexe 2). Le dernier mélange, 3 réacteur, dont l'étude a été réalisée plus tard, n'apparaîtra pas dans ce rapport.

Lors de l'étude du mélange 16 respiro, les relevés n'ont pas permis d'aboutir à une valeur satisfaisante de la perméabilité, le coefficient α de l'équation de Dupuit-Forcheimer étant négatif.

IV-2-1/ Masse volumique ρ

Les masses volumiques des différents mélanges sont comprises entre $0,280$ et $0,666\text{kg.L}^{-1}$ (cf. annexe 2).

En groupant tous les points de mesure, il apparaît que le taux d'humidité a beaucoup d'impact sur la masse volumique : l'augmentation du taux d'humidité entraîne l'augmentation de la masse volumique (cf. courbe 2 ci-après).



Courbe 2: Influence de l'humidité sur la masse volumique des mélanges B/RCCDV

En revanche, la granulométrie des RCCDV (cf. courbe 1 en annexe 3) et le ratio massique sec (cf. courbe 2 en annexe 3) ne semblent avoir aucun ou très peu d'effet sur l'évolution de la masse volumique.

L'incidence du ratio, de la granulométrie et de l'humidité est étudiée plus précisément ci-dessous.

(i) Influence du ratio de mélange

La masse volumique des boues est supérieure à celle de l'eau ($1\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) qui est elle-même nettement supérieure à celle des RCCDV. Donc, en théorie, à granulométrie et humidité constantes, la masse volumique devrait augmenter lorsque le ratio augmente, soit lorsque la part de RCCDV diminue par rapport à la part de boues.

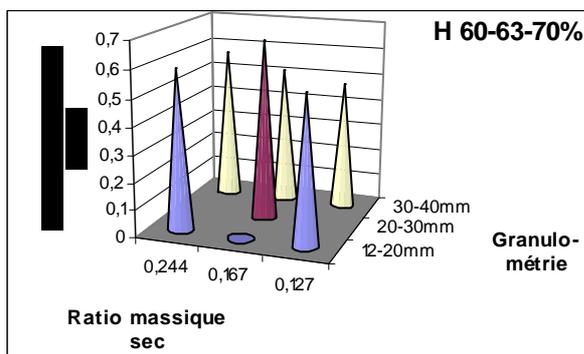


Figure 1: Influence du ratio massique sec sur la masse volumique à fort taux d'humidité

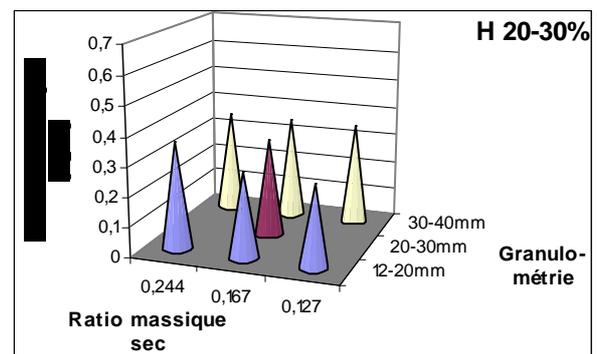


Figure 2: Influence du ratio massique sec sur la masse volumique à faible taux d'humidité

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 1 et 2 ci-dessus ainsi que sur la figure 1 en annexe 3. Il apparaît que la masse volumique a effectivement tendance à augmenter avec l'augmentation du ratio de mélange principalement à faible granulométrie et faible taux

d'humidité ainsi que à forte granulométrie et fort taux d'humidité. Cette tendance reste toutefois faible.

(ii) Influence de l'humidité du mélange

L'augmentation de l'humidité est synonyme de remplacement d'air par de l'eau. Donc en travaillant à granulométrie et ratio constants, la masse volumique devrait augmenter lorsque l'humidité augmente.

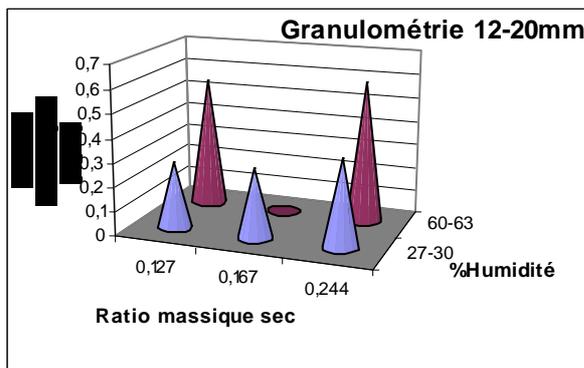


Figure 3: Influence du taux d'humidité sur la masse volumique à faible granulométrie de RCCDV

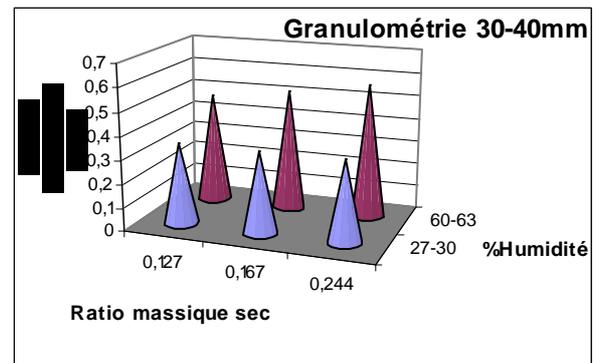


Figure 4: Influence du taux d'humidité sur la masse volumique à forte granulométrie de RCCDV

Les figures 3 et 4 ci-dessus et la figure 2 en annexe 3 permettent de voir effectivement la forte incidence du taux d'humidité sur la masse volumique, quels que soient le ratio de mélange et la granulométrie de RCCDV utilisés.

(iii) Influence de la granulométrie des RCCDV

Il peut être attendu un comportement similaire à celui obtenu avec les RCCDV seuls, soit une légère augmentation de la masse volumique avec l'augmentation de la granulométrie.

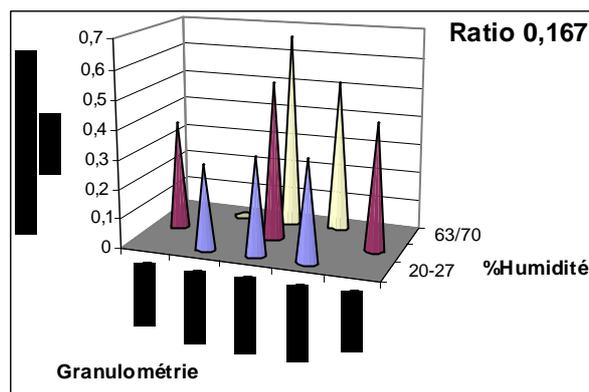


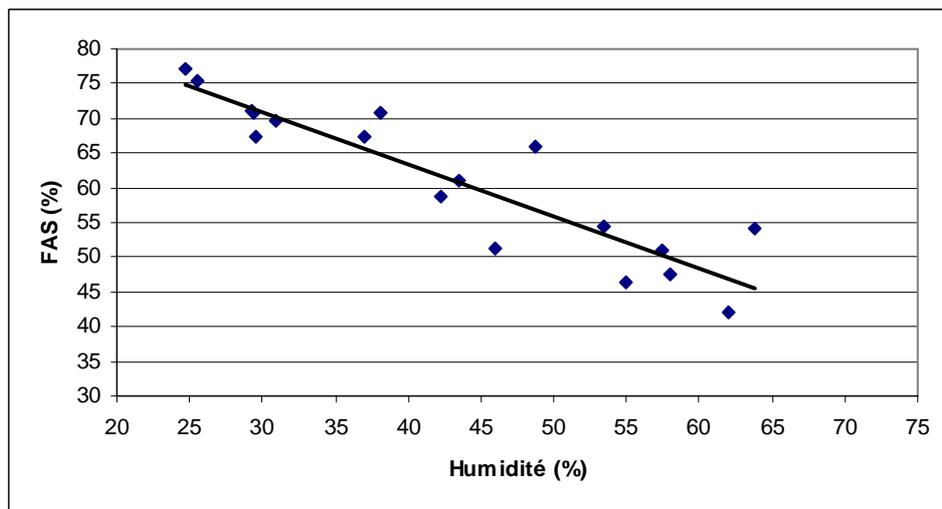
Figure 5: Influence de la granulométrie des RCCDV sur la masse volumique à ratio moyen

Dans les faits, l'incidence de la granulométrie sur la masse volumique n'est pas nette et contrastée. Il semble que la masse volumique augmente bien avec l'augmentation de la granulométrie des RCCDV à faible taux d'humidité mais une tendance inverse semble apparaître à plus fort taux d'humidité. (voir aussi figures 3 et 4 en annexe 3)

IV-2-2/ Porosité FAS

Les porosités des différents mélanges sont comprises entre 42 et 77,26% (cf. tableau 3 en annexe 2). Selon la littérature, il est souhaitable de commencer un traitement aérobique par compostage avec une valeur de FAS de l'ordre de 60-65% afin d'atteindre et de conserver un FAS favorable à l'étape de maturation (>30%).

En groupant tous les points de mesure, il apparaît que le taux d'humidité est le paramètre qui a le plus d'impact sur la porosité : l'augmentation du taux d'humidité entraîne la diminution du FAS (cf. courbe 3).



Courbe 3: Influence du taux d'humidité sur la porosité des mélanges B/RCCDV

La granulométrie du structurant et le ratio massique sec ne semblent pas avoir d'effet significatif sur l'évolution du FAS. Les courbes illustrant cela se situent en annexe (annexe 4, courbes 1 et 2).

Comme pour la masse volumique, l'incidence du ratio, de la granulométrie et de l'humidité est étudiée plus précisément ci-après.

(i) Influence du ratio de mélange

En partant de la même base que pour l'influence du ratio sur la masse volumique, à granulométrie et humidité constantes, le FAS devrait diminuer lorsque le ratio augmente, soit lorsque la part de RCCDV diminue par rapport à la part de boues. En effet, les boues et l'eau ont un FAS proche de zéro et donc nettement inférieur au FAS des RCCDV.

Selon les figures 1, 2 et 3 en annexe 4, l'évolution attendue est globalement observée : une diminution du FAS avec l'augmentation du ratio. Ce phénomène est plus particulièrement visible dans les deux cas suivants : faibles granulométrie et humidité ainsi que fortes granulométrie et humidité. C'était aussi dans ces deux situations que l'on observait précédemment l'augmentation de la masse volumique avec l'augmentation du ratio la plus significative.

(ii) Influence de l'humidité du mélange

Comme déjà mentionné pour la masse volumique, l'augmentation de l'humidité est synonyme de remplacement d'air par de l'eau. Donc en travaillant à granulométrie et ratio constants, le FAS devrait diminuer lorsque l'humidité augmente.

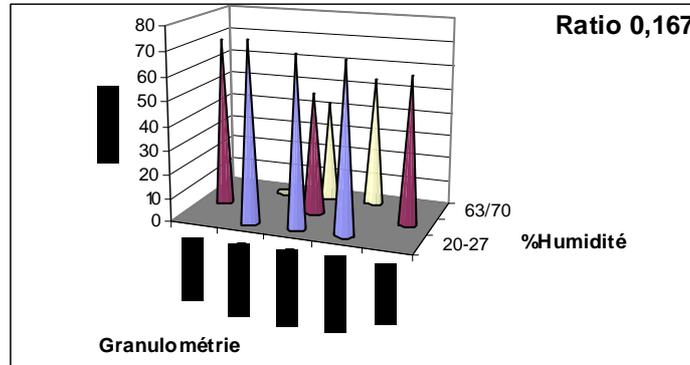


Figure 6: Influence du taux d'humidité sur le FAS à ratio moyen

Les résultats obtenus (cf. figure 6 ci-dessus et figures 4 et 5 en annexe 4) sont en accord avec la théorie ci-dessus : la porosité diminue fortement avec l'augmentation de l'humidité. Cela est vrai quels que soient le ratio de mélange et la granulométrie de RCCDV utilisés.

(iii) Influence de la granulométrie des RCCDV

Là encore, on peut attendre un comportement similaire à celui observé sur les RCCDV seuls, soit une diminution du FAS avec l'augmentation de la granulométrie.

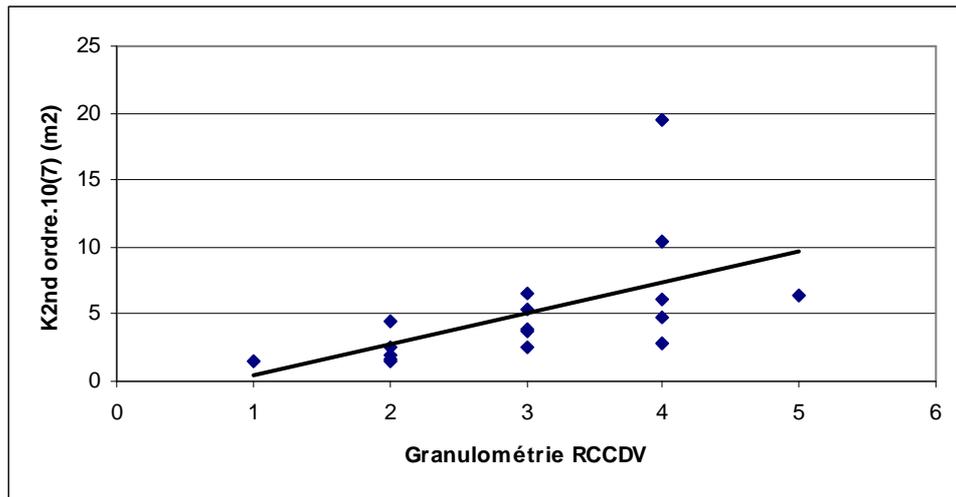
Dans les faits, comme pour la masse volumique, l'incidence de la granulométrie sur le FAS n'est pas nette et contrastée (cf. figure 6 et figures 4 et 5 en annexe 4).

IV-2-3/ Perméabilité K

Les valeurs de K des différents mélanges sont comprises entre $1,451$ à $19,435 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ (cf. tableau 3 en annexe 2).

En groupant tous les points de mesure, il apparaît que la granulométrie du structurant a beaucoup d'impact sur la perméabilité : l'augmentation de la granulométrie entraîne l'augmentation de la perméabilité.

Granulométries RCCDV :
 1 : 8-12mm
 2 : 12-20mm
 3 : 20-30mm
 4 : 30-40mm
 5 : >40mm



Courbe 4: Influence de la granulométrie des RCCDV sur la perméabilité des mélanges B/RCCDV

Le taux d'humidité a un léger impact : son augmentation tend à faire diminuer très légèrement la perméabilité (cf. courbe 1 en annexe 5), tandis que le ratio massique sec n'a aucun ou très peu d'effet sur l'évolution de la perméabilité (cf. courbe 2 en annexe 5).

(i) Influence du ratio de mélange

La perméabilité des boues est nettement inférieure à celle des RCCDV. Par conséquent, à granulométrie et humidité constantes, une diminution de la perméabilité serait attendue avec l'augmentation du ratio de mélange, soit lorsque la part de RCCDV diminue par rapport à la part de boues.

Selon les résultats des expériences (cf. annexe 5), le ratio a une incidence peu nette et contrastée : en travaillant à forte humidité et forte granulométrie ainsi qu'à faible humidité et faible granulométrie, le K a tendance à augmenter avec l'augmentation du ratio, alors qu'en travaillant à faible humidité et forte granulométrie ainsi qu'à forte humidité et faible granulométrie, le K semble diminuer avec l'augmentation du ratio.

(ii) Influence de l'humidité du mélange

Selon la littérature, l'humidité a des effets contrastés sur la perméabilité selon les matériaux à l'étude. Une diminution de la perméabilité pourrait être attendue avec l'augmentation de l'humidité par réduction du nombre d'espaces lacunaires, mais une augmentation de la perméabilité avec l'augmentation de l'humidité est parfois observée et associée à des agglomérations de particules lors de l'apport d'eau, d'où une augmentation de la taille des espaces lacunaires facilitant les passages d'air.

Selon les résultats obtenus lors de cette étude sur des mélanges B/RCCDV, la perméabilité diminue avec un taux d'humidité qui augmente.

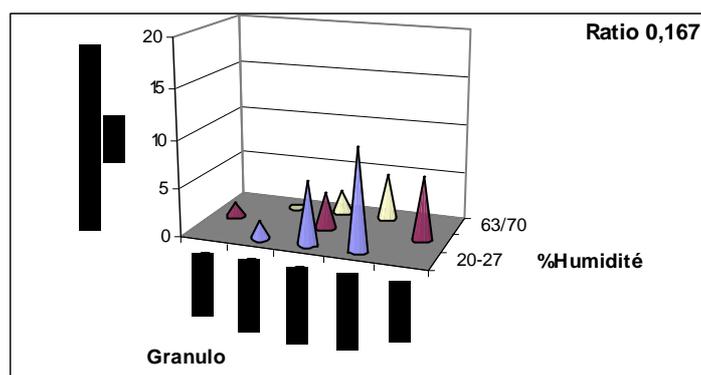


Figure 7: Influence du taux d'humidité du mélange sur K à ratio moyen

Cet effet du taux d'humidité sur K semble d'autant plus marqué que la granulométrie des RCCDV est grossière.

(iii) Influence de la granulométrie des RCCDV

Avec les RCCDV seuls, il est apparu que la granulométrie avait une forte incidence sur la perméabilité. Avec les mélanges étudiés ici, cet impact est maintenu (cf. figure 7 ci-dessus et figure 8 ci-dessous).

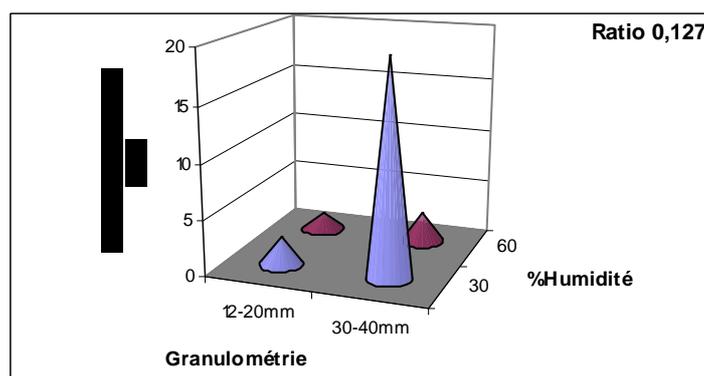


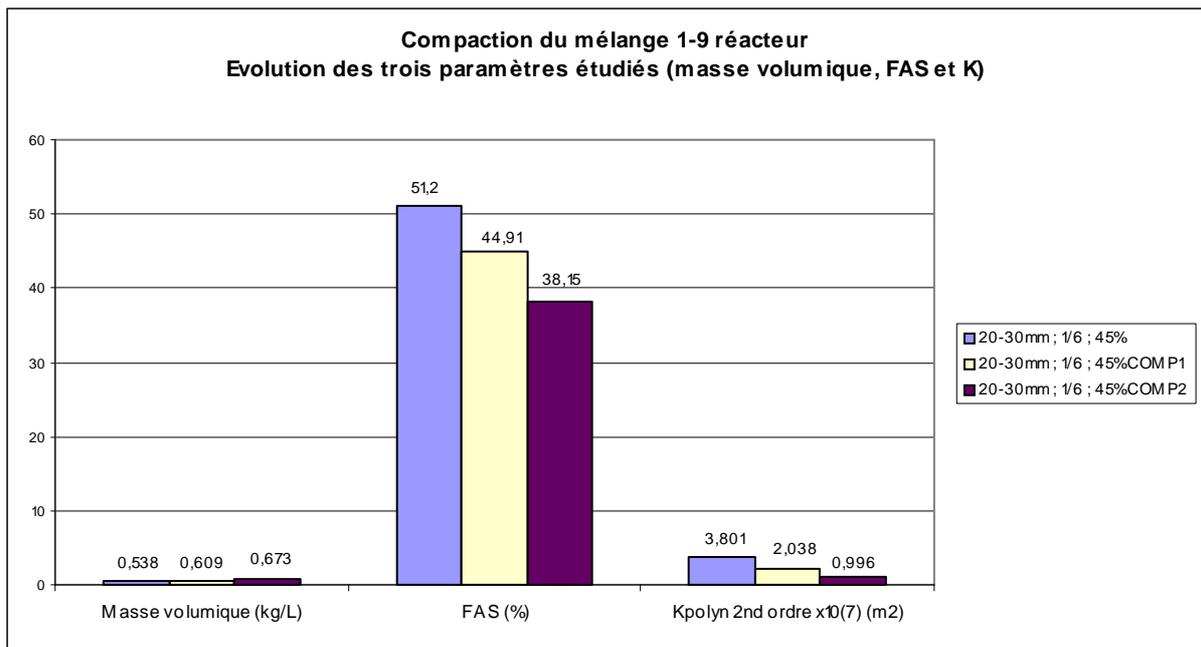
Figure 8: Influence de la granulométrie des RCCDV à faible ratio de mélange

L'augmentation de K avec l'augmentation de la granulométrie est d'autant plus marquée que le taux d'humidité et le ratio sont faibles, soit dans les cas où la structure des mélanges B/RCCDV se rapproche le plus de la structure des RCCDV seuls.

IV-2-4/ Influence de la compaction des mélanges

Une compaction sert à augmenter la masse volumique du mélange étudié. Il reste moins de passages dans le mélange donc l'air aura moins de place au sein du matériau. Par conséquent, ceci entraîne une diminution de la porosité. De la même façon, une fois compacté, le matériau ayant moins de volume vide, l'air circulera moins facilement, ce qui explique une baisse de la perméabilité.

Ces observations sont effectuées pour tous les mélanges étudiés et sont illustrées par le graphique suivant, obtenu avec la compaction du mélange 1/9 réacteur.



Graph 1 : Résultats de compaction obtenus pour le mélange 1/9 réacteur

IV-2-5/ Conclusions

D'un point de vue expérimental, sur site de compostage, il est plus simple pour l'opérateur de faire varier le ratio de mélange, l'humidité et/ou la granulométrie des RCCDV plutôt que la masse volumique, le FAS ou la perméabilité.

L'humidité et la granulométrie semblent les paramètres les plus influents, même si leur impact ne concerne pas les mêmes caractéristiques physiques. L'humidité va fortement impacter la masse volumique (augmentation de la masse volumique avec l'augmentation de l'humidité) et le FAS (diminution du FAS avec augmentation de l'humidité) et plus accessoirement la perméabilité (diminution de la perméabilité avec l'augmentation de l'humidité).

La granulométrie va au contraire nettement influencer la perméabilité (augmentation de la perméabilité avec l'augmentation de la granulométrie) alors que son incidence sur la masse volumique et sur le FAS reste peu nette et contrastée.

Pour le ratio, les modifications le concernant ont globalement peu d'impact, principalement sur la perméabilité. Une légère incidence du ratio sur la masse volumique et sur le FAS est observée avec des tendances d'évolution à l'augmentation de la masse volumique et du FAS avec l'augmentation du ratio.

V- Conclusions et perspectives

L'étude de caractérisation physique de mélanges boues/structurant de diverses humidités, divers ratios de mélanges et diverses granulométries de structurant permet de visualiser les paramètres d'influence majeure et les tendances d'impact.

L'humidité va principalement influencer la masse volumique et le FAS, accessoirement la perméabilité. Inversement, la granulométrie du structurant va fortement influencer la perméabilité, sans avoir d'impact significatif sur la masse volumique et le FAS. Enfin le ratio de mélange a un impact très faible sur les trois paramètres étudiés, avec une légère tendance à l'augmentation de la masse volumique, la diminution du FAS et la diminution de la perméabilité avec l'augmentation du ratio.

Une augmentation de l'humidité du mélange, avec remplacement d'air par de l'eau au sein de la matière, va ainsi engendrer une nette augmentation de la masse volumique et une nette diminution du FAS. Dans une moindre mesure, l'augmentation du taux d'humidité engendre aussi une diminution de la perméabilité.

Au niveau de la granulométrie, une augmentation de la taille des particules entraîne une augmentation des espaces lacunaires et donc une facilitation des mouvements d'air et incidemment une augmentation nette de la perméabilité. Cette tendance a également été observée lors de la caractérisation physique préalable des fractions granulométriques du structurant seul.

Après ce stage, l'utilisation d'un logiciel statistique permettra de déterminer les corrélations éventuelles existantes entre les différents paramètres. Une mise en relation des caractéristiques physiques obtenues avec les comportements observés sur ces mêmes mélanges en respirométrie et en réacteurs de compostage 300L sera également effectuée. Enfin, cette étude sera réalisée avec un deuxième type de structurant, de la palette broyée.

Sommaire des annexes

<u>Annexe 1 : Mesure du FAS</u>	II
<u>Annexe 2 : Résultats des études des mélanges</u>	IV
<u>Annexe 3 : Courbes complémentaires des influences sur la masse volumique</u>	V
<u>Annexe 4 : Courbes complémentaires des influences sur la porosité</u>	VII
<u>Annexe 5 : Courbes complémentaires des influences sur la perméabilité</u>	XI

Annexe 1 Mesure du FAS

A l'état initial :

$$P_{e0} \cdot (V_{e0} - V_s) = n_{e0} \cdot R \cdot T_{e0} \text{ (relation 1')}$$

$$P_{a0} \cdot V_{a0} = n_{a0} \cdot R \cdot T_{a0} \text{ (relation 2')}$$

avec : P_{e0} et P_{a0} pressions initiales dans les cellules échantillon et additionnelle (en Pa)
 n_{e0} et n_{a0} , nombre de moles dans ces mêmes cellules (en moles)
 T_{e0} et T_{a0} , températures dans les cellules (en K)
 R la constante des gaz parfaits
 V_s le volume de solide dans l'échantillon étudié (en L)
 V_{e0} et V_{a0} les volumes des cellules vides, en incluant les volumes de tuyauterie (en L)

Les volumes V_{e0} et V_{a0} sont liés aux conditions de pression dans les cellules et, pour V_{e0} , à la position du plateau de compaction. Ils sont définis selon :

$$V_{e0} = 0,1175 \cdot P_{e0} + 87,1588 + 0,004909(H-9) + 0,1451$$

avec : $0,1175 \cdot P_{e0} + 87,1588$ le volume vide de la cellule échantillon corrigé selon la pression
 $0,004909(H-9)$ la correction de V_e selon la position du plateau de compaction avec H
(en cm) hauteur extérieure de la tige de compaction
 $0,1451$ le volume de tuyauterie entre la cellule échantillon et la vanne trois voies

$$V_{a0} = 0,3392 \cdot P_{a0} + 25,269 + 0,067$$

avec : $0,3392 \cdot P_{a0} + 25,269$ le volume vide de la cellule additionnelle corrigé selon la pression
 $0,067$ le volume de tuyauterie entre la cellule additionnelle et la vanne trois voies

A l'état de compression :

$$P_{a1} \cdot V_{a1} = n_{a1} \cdot R \cdot T_{a1} \text{ (relation 3')}$$

avec : P_{a1} pression dans la cellule additionnelle (en Pa)
 n_{a1} nombre de moles dans la cellule additionnelle (en moles)
 T_{a1} température dans la cellule additionnelle (en K)
 V_{a1} volume de la cellule additionnelle vide à l'état de pression P_{a1} défini selon :

$$V_{a1} = 0,3392 \cdot P_{a1} + 25,269 + 0,067$$

A l'état final :

$$P_f \cdot (V_{af} + V_{ef} - V_s) = n_f \cdot R \cdot T_f \text{ (relation 4')}$$

avec : P_f pression finale dans le système (en Pa)
 n_f nombre de moles dans le système (en moles)
 T_f température finale dans le système, moyenne des températures relevées dans les deux cellules (en K)
 V_{af} et V_{ef} les volumes des deux cellules vides à l'état de pression P_f

Comme aux états précédents, les volumes V_{af} et V_{ef} sont liés aux conditions de pression dans les cellules et pour V_{ef} à la position du piston de compaction selon :

$$V_{ef} = 0,1175.P_{e0} + 87,1588 + 0,004909(H-9) + 0,1451$$

$$\text{et } V_{af} = 0,3137.P_f + 25,34 + 0,067$$

La correction de V_a en fonction de la pression ($0,3137.P_f + 25,34$) est différente de celle utilisée aux états précédents car il s'agit ici d'une correction dans un état de décompression de la cellule additionnelle et non de compression.

Sur la base de ces différentes équations, le volume V_s est calculé selon :

$$V_s = \frac{P_f.(V_{ef} + V_{af}) - P_{e0}.V_{e0}.\frac{T_f}{T_{e0}} - P_{a1}.V_{a1}.\frac{T_f}{T_{a1}}}{P_f - P_{e0}.\frac{T_f}{T_{e0}}}$$

Cette équation est encore complexifiée en raison de la présence de fuites diffuses au niveau de la cellule échantillon à l'état final. A cet état, des relevés de P_f et de T_f sont effectués toutes les 2 minutes pendant 30 minutes. La courbe P_f en fonction du temps est tracée puis linéarisée à partir de 10 minutes de mesure (stabilité de la température T_f) selon $P_f = a.t$. La pente de cette équation correspond à la fuite diffuse et est utilisée pour corriger P_f à chaque instant de mesure selon :

$$P_{f \text{ corrigée}}(t) = P_{f \text{ mesurée}}(t) - a.t$$

Cette correction de P_f est ensuite prise en compte pour calculer V_{ef} et V_{af} qui dépendent de la pression P_f et donc pour calculer V_s à chaque instant de mesure de l'état final d'équilibre :

$$V_{s \text{ corrigé}}(à t) = \frac{P_{f \text{ corrigé}}(à t).(V_{ef \text{ corrigé}}(à t) + V_{af \text{ corrigé}}(à t)) - P_{e0}.V_{e0}.\frac{T_f}{T_{e0}} - P_{a1}.V_{a1}.\frac{T_f}{T_{a1}}}{P_{f \text{ corrigé}}(à t) - P_{e0}.\frac{T_f}{T_{e0}}}$$

Le $V_{s \text{ corrigé}}$ utilisé pour le calcul du FAS est celui obtenu à 14 minutes de mesure à l'état final d'équilibre, pour être certain de la stabilisation des températures dans les deux cellules.

Annexe 2

Résultats des études des mélanges

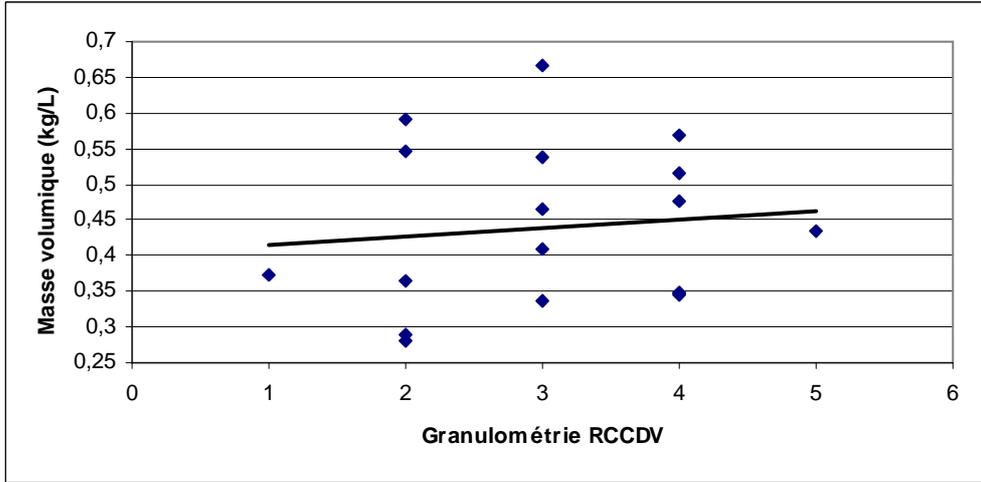
Nom du mélange B/RCCDV	Granulométrie des RCCDV	Humidité cible	Ratio massique sec B/RCCDV	ρ (en kg/L)	FAS (%)	$K \cdot 10^7$ (en m ²)
1 respiro	20-30mm	45%	1/9,2	0,466	58,77	3,772
9 respiro	30-40mm	60%	1/4,1	0,57	46,32	6,152
8 respiro	12-20mm	60%	1/4,1	0,592	47,62	1,451
2 respiro	12-20mm	60%	1/7,9	0,545	50,96	1,652
14 respiro	30-40mm	60%	1/7,9	0,476	54,45	2,899
11 respiro, 5 réacteur	>40mm	45%	1/6	0,434	60,98	6,424
10/15 respiro, 1/9 réacteur	20-30mm	45%	1/6	0,538	51,2	3,801
3 respiro, 2 réacteur	8-12mm	45%	1/6	0,372	70,7	1,538
6 respiro	30-40mm	30%	1/7,9	0,346	67,26	19,435
12 respiro	12-20mm	30%	1/7,9	0,28	77,26	2,543
4 respiro	20-30mm	45%	1/2,8	0,408	65,84	5,332
16 respiro	30-40mm	30%	1/4,1	0,349	70,81	-
7 respiro	12-20mm	30%	1/4,1	0,365	67,47	4,524
4 réacteur	30-40mm	27%	1/6	0,347	69,71	10,399
13 respiro, 8 réacteur	20-30mm	20%	1/6	0,338	71,1	6,593
6 réacteur	12-20mm	27%	1/6	0,288	75,3	1,91
7 réacteur	30-40mm	63%	1/6	0,516	54,06	4,692
5 respiro, 10 réacteur	20-30mm	70%	1/6	0,666	42	2,487

Tableau 3 : Caractéristiques physiques des mélanges B/RCCDV

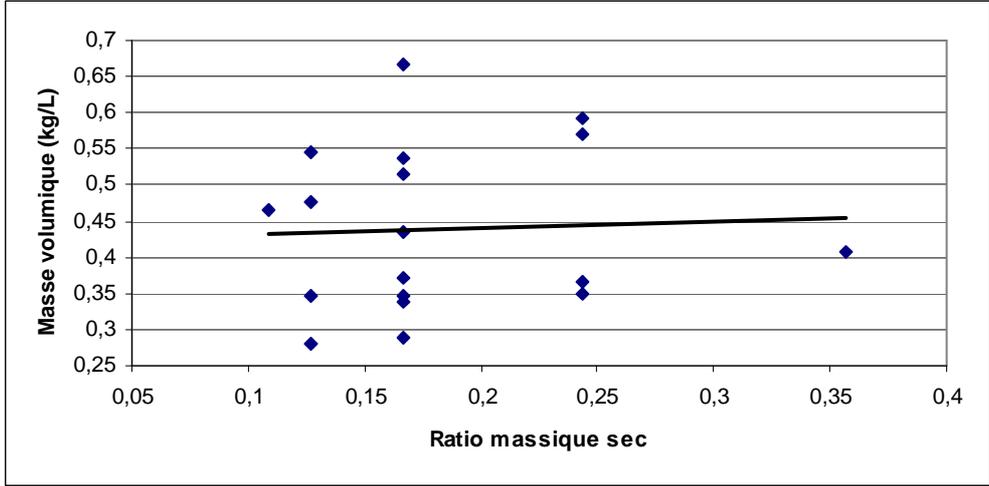
Annexe 3

Courbes complémentaires des influences sur la masse volumique

Granulométries RCCDV :
 1 : 8-12mm
 2 : 12-20mm
 3 : 20-30mm
 4 : 30-40mm
 5 : >40mm



Courbe 1 : Influence de la granulométrie des RCCDV sur la masse volumique



Courbe 2 : Influence du ratio massique sec sur la masse volumique

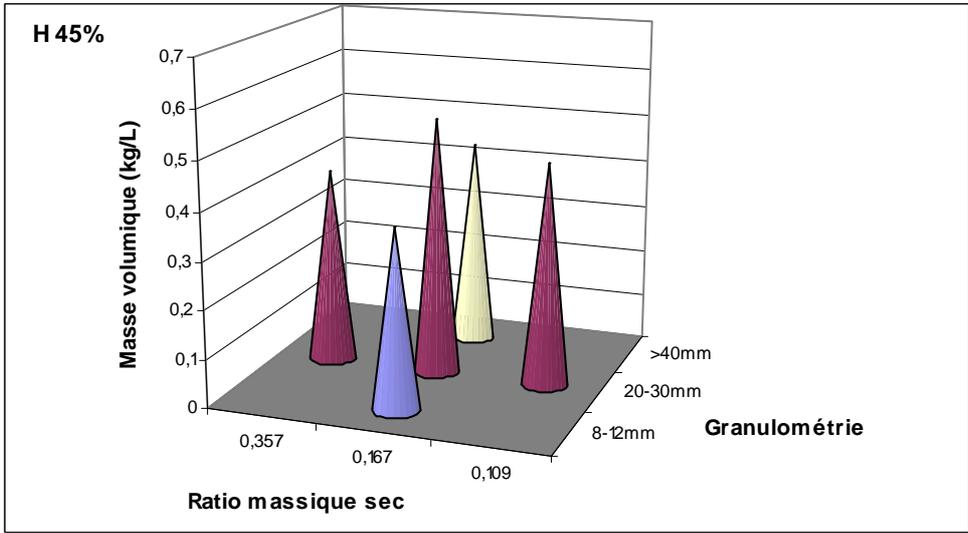


Figure 1 : Influence du ratio massique sec sur la masse volumique à 45% d'humidité

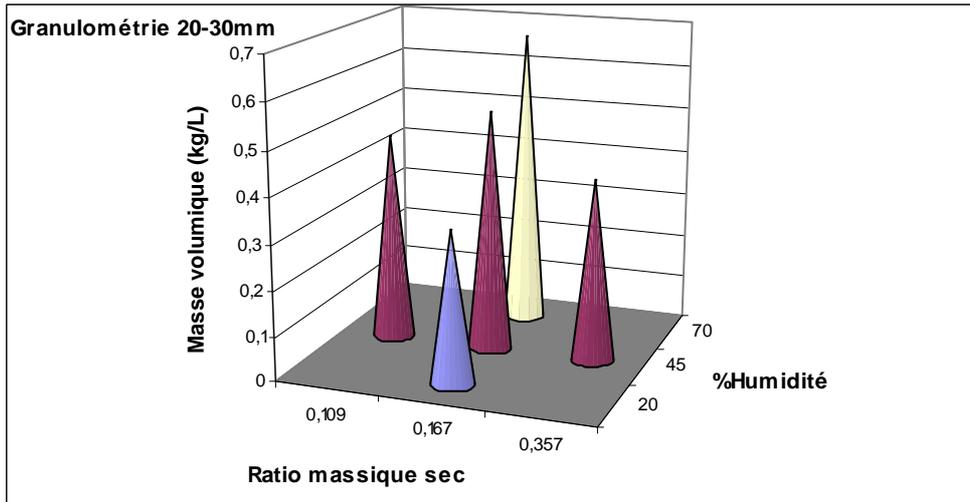


Figure 2: Influence du taux d'humidité sur la masse volumique à granulométrie 20-30mm

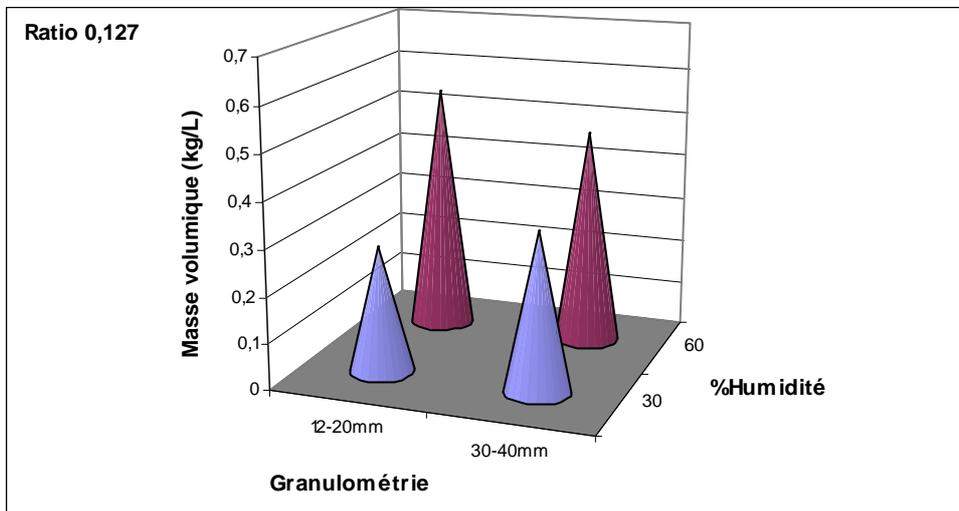


Figure 3: Influence de la granulométrie des RCCDV sur la masse volumique à ratio 0,127

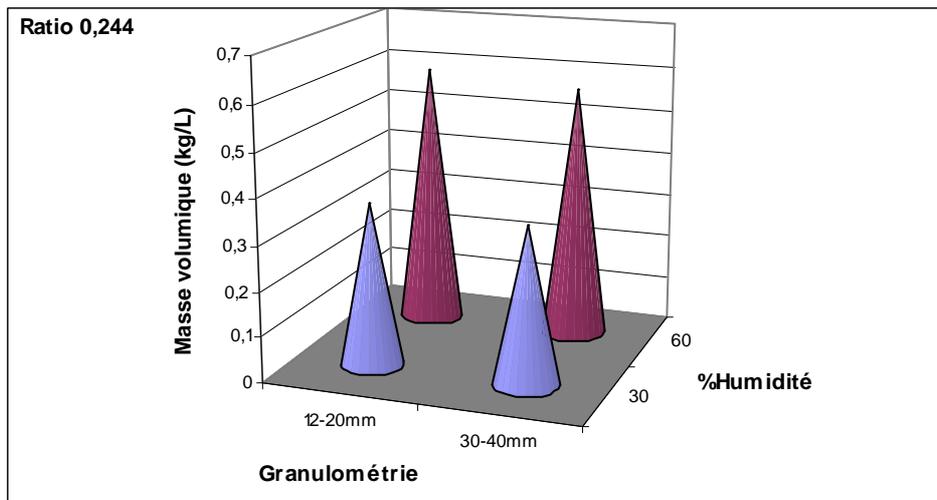
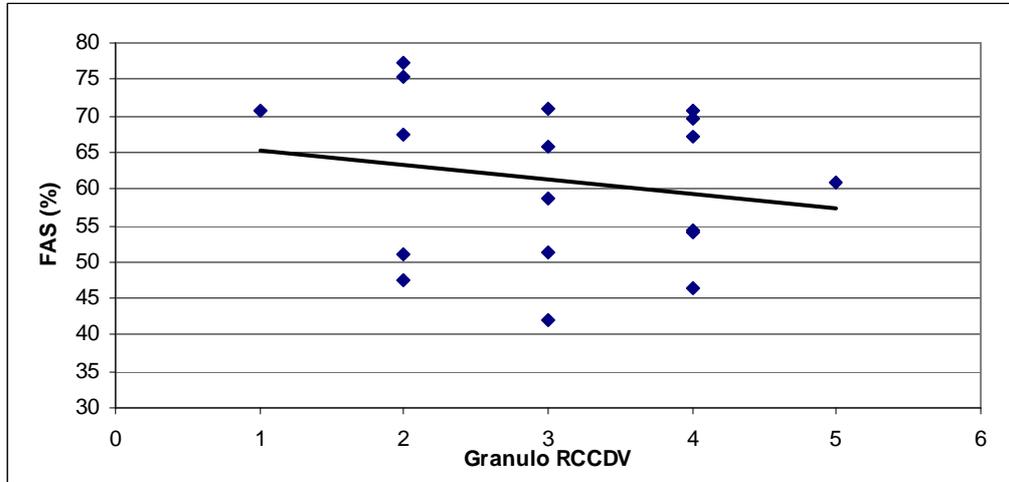


Figure 4 : Influence de la granulométrie des RCCDV sur la masse volumique à ratio 0,244

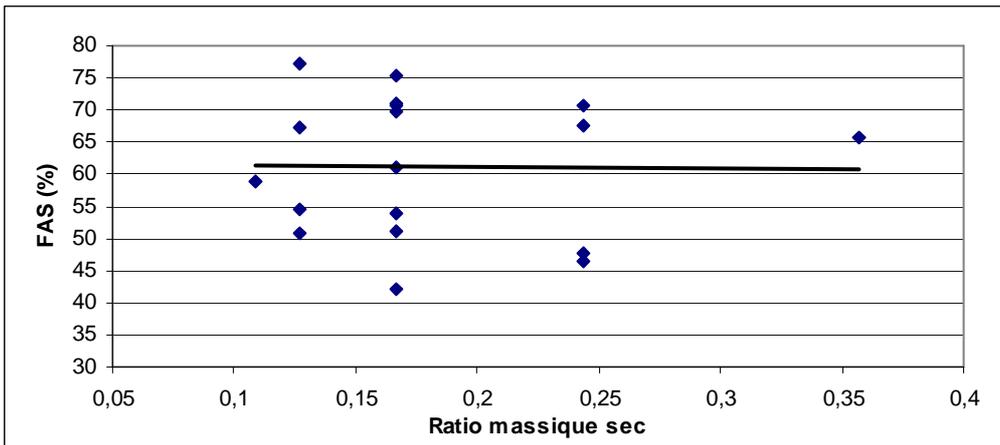
Annexe 4

Courbes complémentaires des influences sur la porosité

**Granulométries
RCCDV :**
1 : 8-12mm
2 : 12-20mm
3 : 20-30mm
4 : 30-40mm



Courbe 1: Influence de la granulométrie des RCCDV sur la porosité



Courbe 2: Influence du ratio massique sec sur la porosité

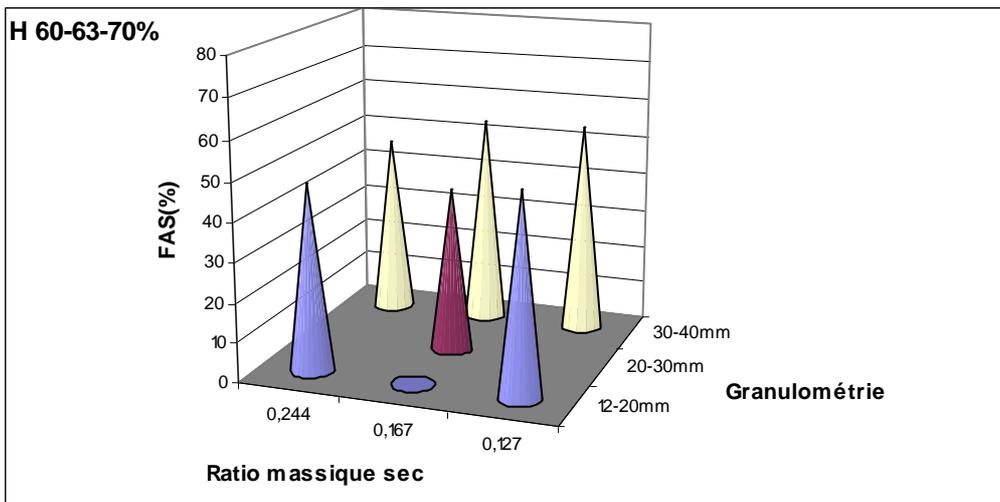


Figure 9: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur le FAS à fort taux d'humidité

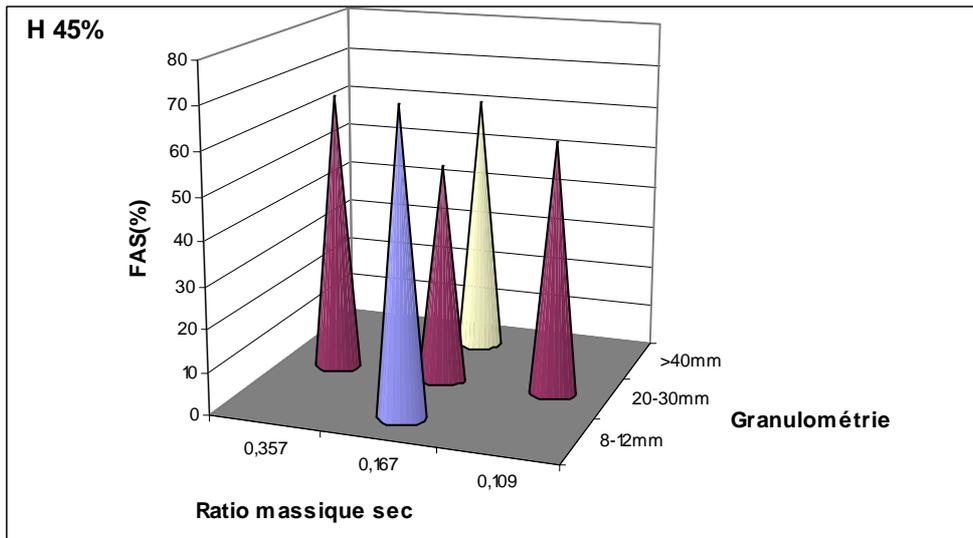


Figure 10: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur le FAS à 45% d'humidité

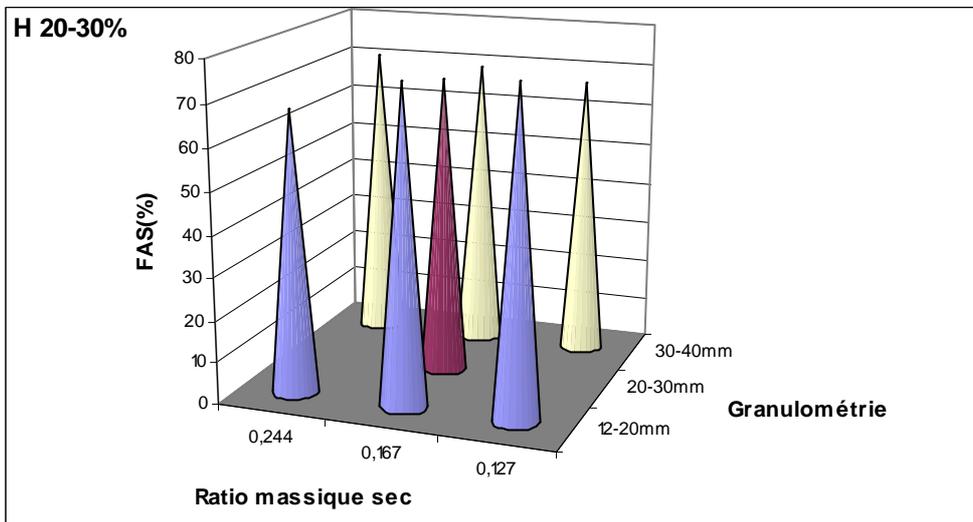


Figure 11: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur le FAS à faible taux d'humidité

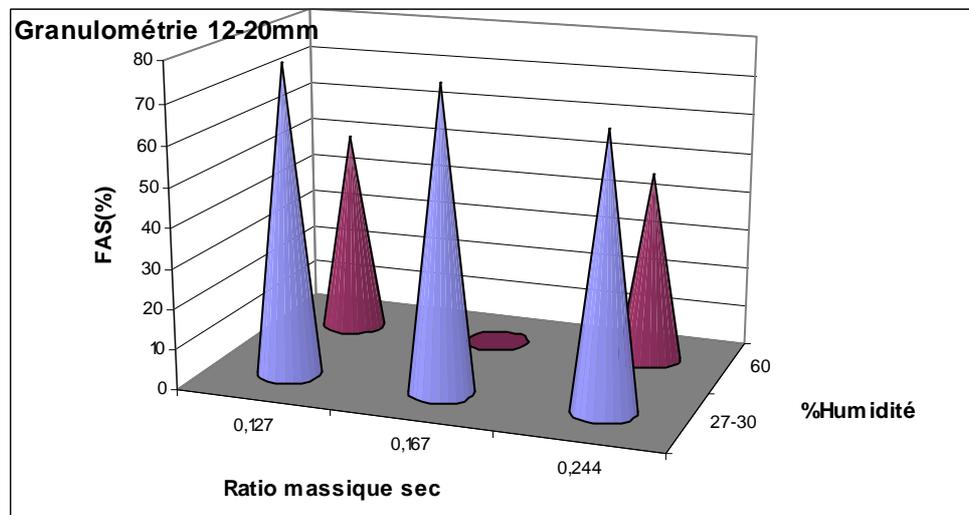


Figure 12: Influence du ratio massique sec et du taux d'humidité sur le FAS à granulométrie 12-20mm

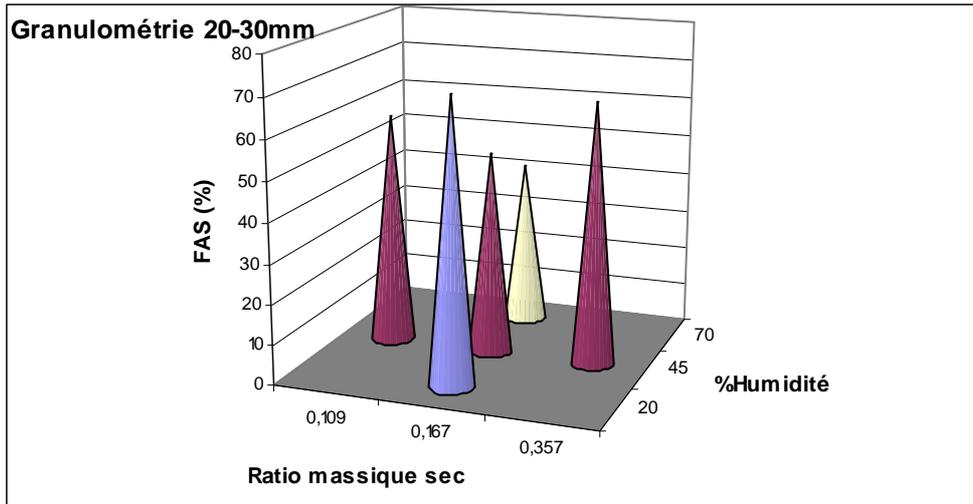


Figure 13: Influence du taux d'humidité et du ratio massique sec sur la masse volumique à granulométrie 20-30mm

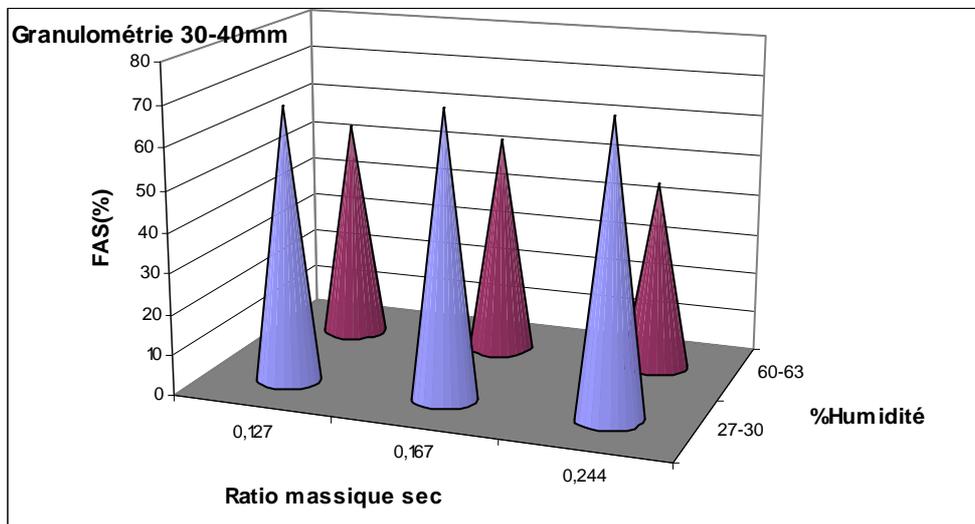


Figure 14: Influence du taux d'humidité et du ratio massique sec sur le FAS à granulométrie 30-40mm

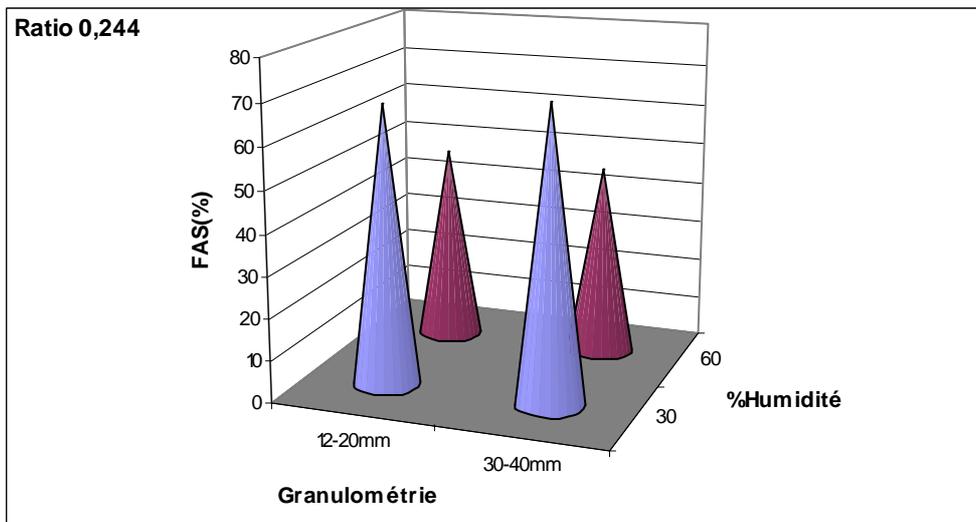


Figure 7: Influence du taux d'humidité et de la granulométrie des RCCDV sur le FAS à ratio 0,244

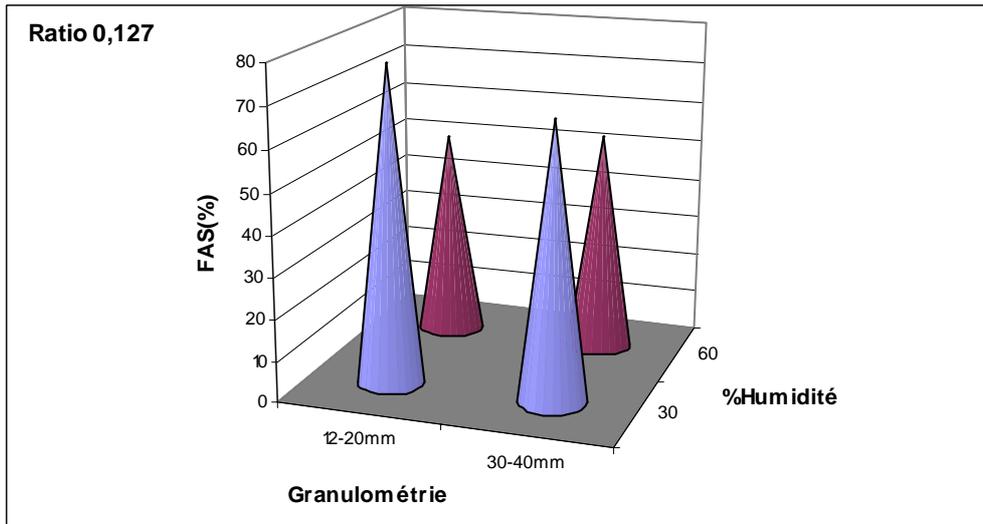
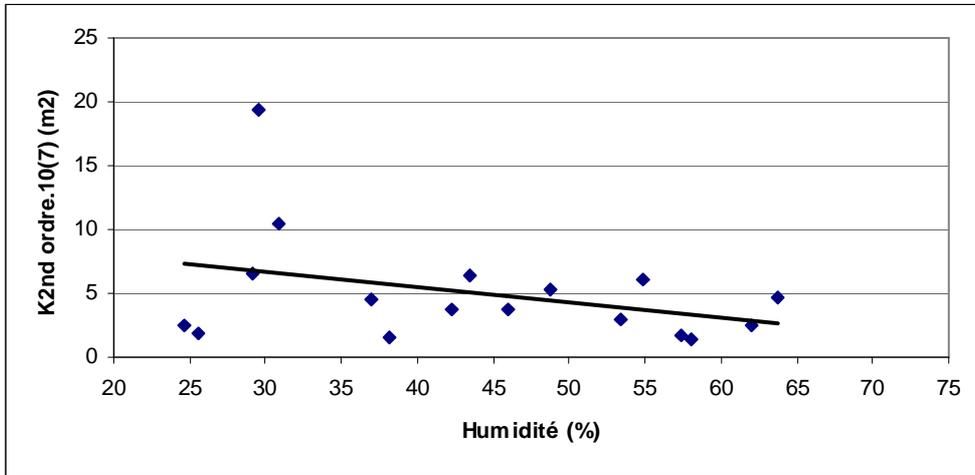


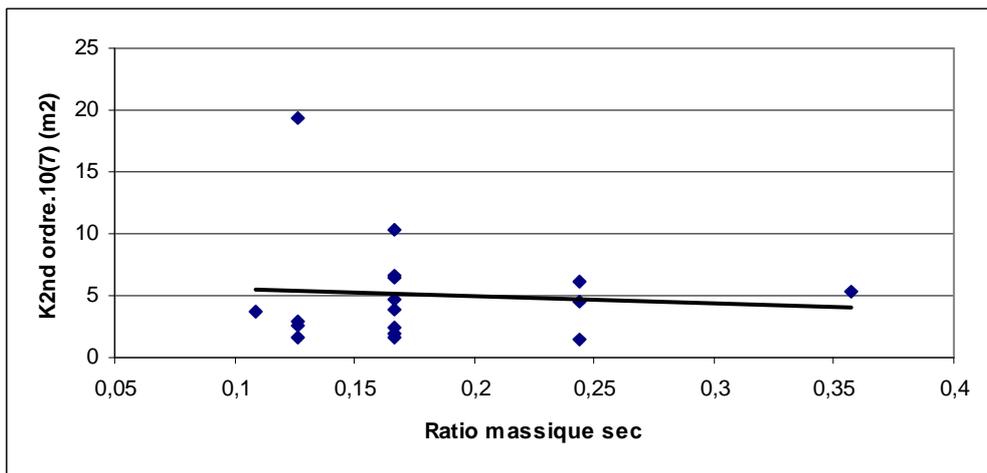
Figure 8: Influence du taux d'humidité et de la granulométrie des RCCDV sur la porosité à ratio 0,127

Annexe 5

Courbes complémentaires des influences sur la perméabilité



Courbe 1: Influence du taux d'humidité sur la perméabilité



Courbe 2: Influence du ratio massique sec sur la perméabilité à l'air

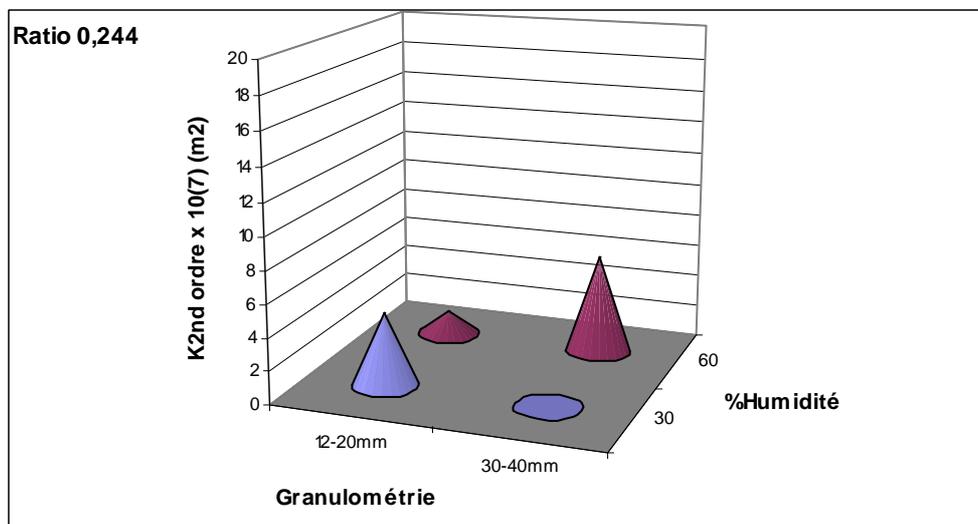


Figure 1: Influence de la granulométrie des RCCDV sur la perméabilité à ratio 0,244

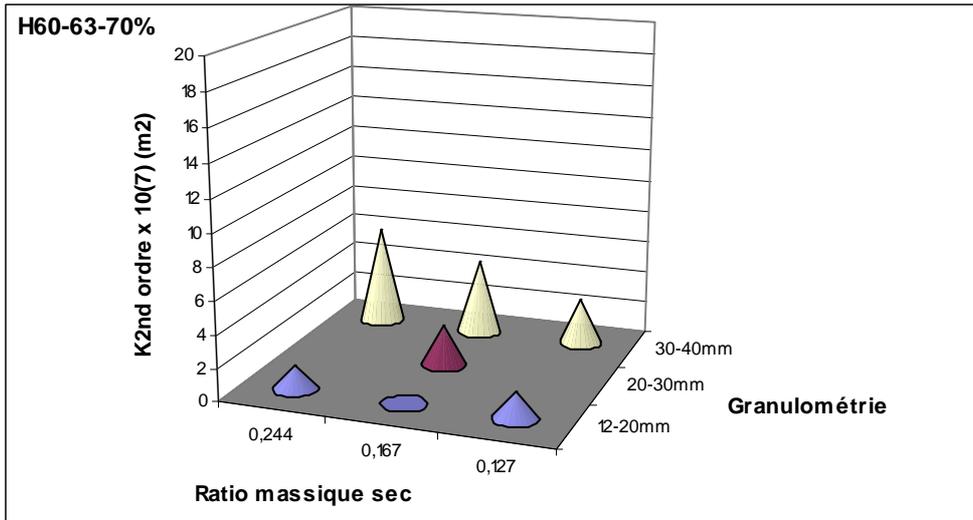


Figure 2: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur la perméabilité à fort taux d'humidité

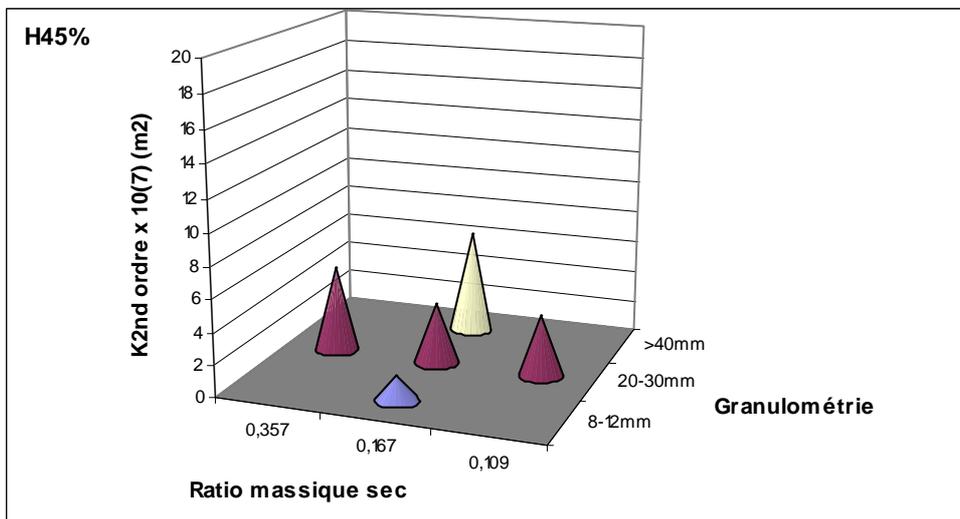


Figure 3: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur la perméabilité à taux d'humidité moyen

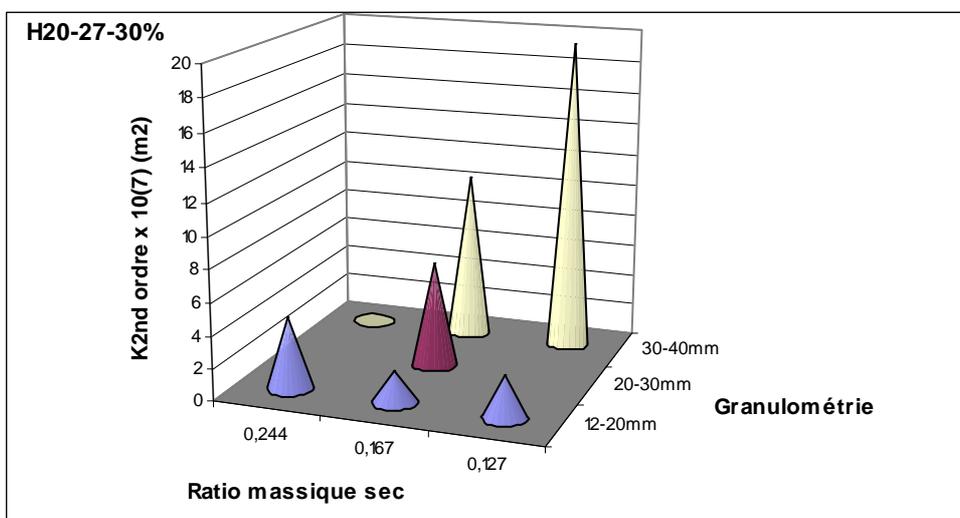


Figure 4: Influence du ratio massique sec et de la granulométrie sur la perméabilité à faible taux d'humidité

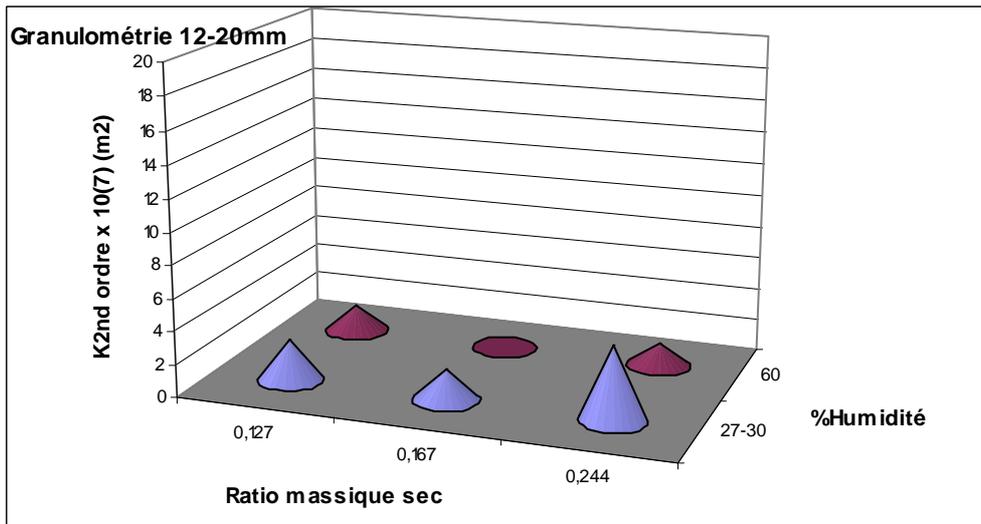


Figure 5: Influence du ratio massique sec et du taux d'humidité sur la perméabilité à granulométrie 12-20mm

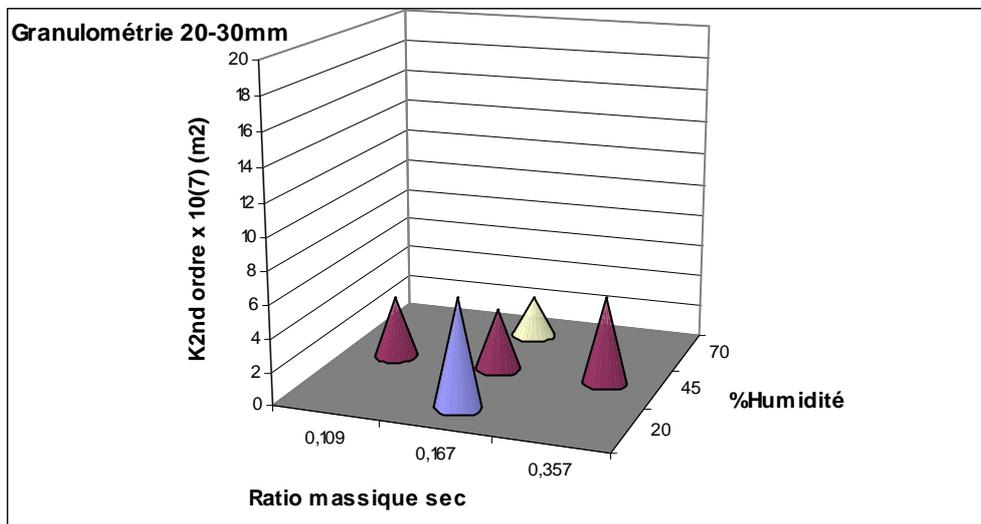


Figure 6: Influence du ratio massique sec et du taux d'humidité sur la perméabilité à granulométrie 20-30mm

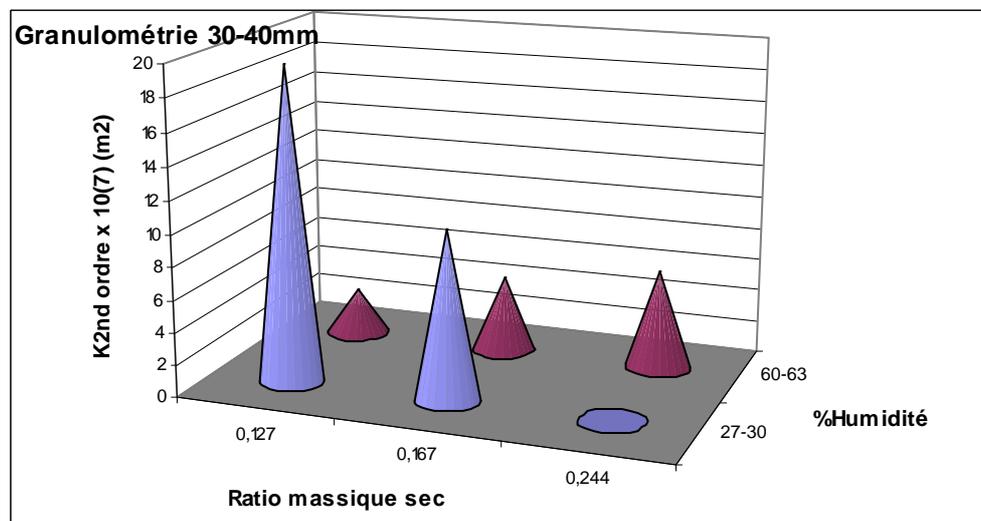


Figure 15: Influence du ratio massique sec et du taux d'humidité sur la perméabilité à granulométrie 30-40mm

Résumé

Lors d'un compostage de boues, on cherche à obtenir le mélange boues/structurant tel que les principaux paramètres physiques (humidité, surface spécifique, porosité, perméabilité) permettent d'atteindre une biodégradabilité maximale et des transferts de masse et de chaleur optimums. Sur site de compostage (et au cours de ce stage), ce sont la granulométrie du structurant, le ratio de mélange boues/structurant, et l'humidité qui seront modifiés. A l'aide d'un outil spécifique, la masse volumique, la porosité et la perméabilité à l'air de divers mélanges sont mesurées permettant ainsi de visualiser les paramètres d'influence majeure et les tendances d'impact de ces différents paramètres. Cela constitue la caractérisation physique de mélanges boues/structurant.

Summary

During a sludge composting, a blend of sludge/co-substrate is required to achieve the principal physical parameters (moisture, specific surface, free air space, permeability) to make it possible to reach a maximum biodegradability and optimal transfer of mass and heat. On site of composting (and also during this industrial placement), it is the particle size, the ratio of blend of sludge/co-substrate, and the moisture which is modified. Using a specific tool, the density, the free air space and the permeability to the air of various mixtures are measured making it possible to visualize the determining parameters and the trend of impact of these various factors. This makes up the physical characterization of blend of sludge/co-substrate.