



Projet AAP CAS DAR n°9109/9027

Améliorer la caractérisation des effluents d'élevage par des méthodes et des modèles innovants pour une meilleure prise en compte agronomique

DESCRIPTION DES OUTILS DE CARACTERISATION PHYSIQUE DES EFFLUENTS D'ELEVAGE LIQUIDES, PATEUX ET SOLIDES



Livrable n°1 – Volet épandabilité

Emilie Dieudé-Fauvel, Frédéric Gauthier, Pierre Havard, Bertrand Decoopman

Sommaire

Sommaire	3
Introduction	4
1 Outils de terrain	5
1.1 <i>Mesure de la fluidité</i>	5
1.2 <i>Mesure de la densité</i>	6
1.2.1 Densité du lisier	6
1.2.2 Densité du fumier	6
1.3 <i>Mesure du risque de bouchage : boîte à bouchage</i>	8
1.4 <i>Mesure de la cohésion du fumier et de son aptitude à se fragmenter</i>	9
1.4.1 Pénétromètre.....	9
1.4.2 Boîte de Casagrande.....	11
1.4.3 Scissomètre.....	11
1.4.4 Foëne et « tire-bouchon ».....	12
2 Outils de laboratoire	14
2.1 <i>Mesure de la matière sèche</i>	14
2.2 <i>Mesure de la texture</i>	14
2.3 <i>Mesure des propriétés d'écoulement</i>	15
2.4 <i>Mesure du seuil d'écoulement : le slump test</i>	15
3 Tableau bilan des outils de caractérisation	17
Conclusion	18
Références	19
Annexes	20
<i>Annexe I – Protocole d'utilisation du fluidimètre</i>	20
<i>Annexe II – Méthode du bocal pour la mesure de densité</i>	20
<i>Annexe III – Slump test</i>	20
<i>Annexe IV – Mesure de masse volumique en stabulation</i>	21
<i>Annexe V – Cas du bouchage</i>	22
<i>Annexe VI – Les outils de mesure chimique au champ</i>	23
Mesure de la concentration en éléments nutritifs.....	23
Mesure de la teneur en azote ammoniacal des lisiers	23
<i>Annexe VII – Protocole d'utilisation du Quantofix</i>	24

Introduction

De manière intuitive, la mise en œuvre de l'épandage des matières organiques est dépendante de la consistance et du comportement mécanique des produits considérés. Il semble donc logique de chercher à caractériser ces propriétés mécaniques des effluents dans le but d'obtenir des indications sur leur « épandabilité », c'est-à-dire leur aptitude à l'épandage.

Pour ce faire, des outils spécifiques ont été conçus et d'autres ont été adaptés au domaine agricole. A l'heure actuelle, peu d'entre eux ont été valorisés (pour diverses raisons) et leur usage se limite essentiellement aux acteurs de la recherche appliquée ou aux centres et instituts techniques.

Ce document a pour objectif de présenter ces outils de caractérisation des différents produits destinés à l'épandage. Certains sont spécifiquement dédiés à la caractérisation des matériaux organiques solides et pâteux (fumiers, etc.) alors que d'autres sont utilisés pour des produits liquides (lisiers). La plupart d'entre eux vise à donner une information sur les caractéristiques physiques des matériaux, mais il existe également des outils permettant de réaliser une caractérisation chimique (pour les lisiers).

Concrètement, ces outils sont utilisés ou ont été développés pour répondre à trois principaux enjeux :

- Appréhender les matériaux et les différencier.
- Dégager des liens entre les propriétés physiques des matériaux et leur comportement lors de l'épandage.
- Etablir une base de données des propriétés physiques des matériaux.

Au cours de la synthèse réalisée, lorsque c'est possible, une analyse de la pertinence de ces outils de mesure sera faite. Dans tous les cas, il faut garder en mémoire que la prise d'échantillon est une étape clé, dont dépendent la qualité et la justesse de l'analyse.

Les outils présentés ici sont disponibles sur le site Irstea (ex-Cemagref) de Montoldre et à la Station des Cormiers (Chambre d'Agriculture de Bretagne), dont les activités portent notamment sur l'épandage des produits organiques.

Pour des raisons pratiques, sont distingués ici les outils « de terrain » et ceux « de laboratoire ». Tous sont présentés en fonction des propriétés qu'ils permettent de mesurer.

1 Outils de terrain

1.1 Mesure de la fluidité

Le terme « fluidité » est utilisé préférentiellement pour décrire les lisiers. Un matériau sera d'autant plus fluide que son comportement se rapprochera de celui de l'eau.

La mesure de fluidité est réalisée sur les lisiers à l'aide d'un fluidimètre. Il s'agit d'un appareil permettant de mesurer la durée d'écoulement d'une quantité donnée de lisier en prenant comme base de référence la durée d'écoulement de l'eau. Le temps de référence pour l'écoulement de l'eau est de 6,6 secondes \pm 0,05. Le temps d'écoulement renseigne sur la facilité du fluide testé à s'écouler. Concrètement, pour une même tonne à lisier, plus le temps d'écoulement du lisier est élevé, plus le débit en sortie de tonne sera faible (Malgeryd *et al.* 1994).

Les caractéristiques physiques (forme, dimensions et volume) du fluidimètre ainsi que la procédure de mesure, sont décrites en détails dans l'annexe A de la norme EN13406 (2002) intitulée : Matériel agricole, Epancheur de lisier et dispositifs d'épandage – Protection de l'environnement, Prescriptions et méthodes d'essai pour la précision d'épandage.

Le fluidimètre se compose d'un cylindre avec une base conique obturée par une bille de caoutchouc (Figure 1). L'orifice à la base de l'entonnoir, est calibré et fabriqué dans une pastille de téflon. Cette pastille est amovible. Bien que la norme ne prévoise qu'un seul diamètre (40 mm) de mesure, la station des Cormiers utilise également une pastille d'un diamètre de 35 mm. La diminution de ce diamètre permet d'être plus discriminant sur certaines catégories de lisier en augmentant le temps d'écoulement.

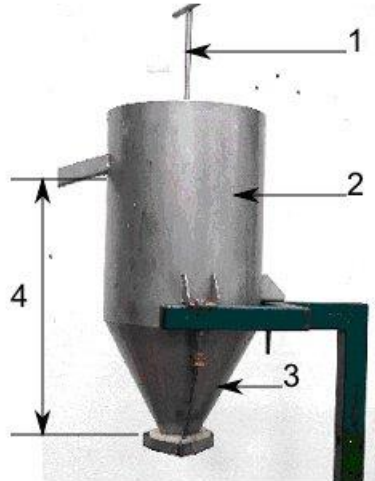


Figure 1 : Photographie d'un fluidimètre sur son support. 1-Tige support de la bille en caoutchouc obturant la partie conique (diamètre 64 mm), 2-Diamètre intérieur : $250 \pm 0,5$ mm, 3-Cône du fluidimètre (angle de 60°), 4-hauteur de remplissage.

Le protocole de mesure de fluidité est détaillé en Annexe I. Avec un tel système, l'unité de mesure est la seconde (le temps d'écoulement étant inversement proportionnel à la capacité du matériau à s'écouler).

Plusieurs tentatives d'automatisation ont eu lieu mais n'ont pas donné satisfaction pour des raisons d'encombrement des capteurs par des éléments grossiers des lisiers chargés ou pour des raisons de la fragilité des capteurs.

1.2 Mesure de la densité

1.2.1 Densité du lisier

Le densimètre

Le densimètre est un appareil servant à mesurer la densité des liquides. Il est constitué d'un tube mince gradué pour lire la mesure et d'un réservoir lesté. En fonction de la masse volumique des liquides testés, le densimètre s'enfonce plus ou moins dans le produit. L'utilisation de ce type de densimètre atteint ses limites avec des lisiers chargés (particulièrement de paille). Le densimètre reste alors en surface du liquide, se penche, et ne fournit pas une valeur correcte (Figure 2).



Figure 2 : Photographie d'un densimètre.

Le bocal de densité

La station des Cormiers a recherché une solution pour la mise en œuvre de la mesure des lisiers chargés. La solution retenue consiste en l'utilisation d'un bocal ayant un couvercle spécifique permettant de fiabiliser le remplissage du récipient (Figure 3). Cette méthode convient pour tous types de lisiers (cf. protocole en Annexe II).

Le volume d'échantillon étant alors connu, par pesée, il est possible de déterminer la masse volumique du produit, puis d'en déduire la densité.

$$\frac{\text{Masse de l'échantillon (kg)}}{\text{Volume du bocal (m}^3\text{)}}$$



Figure 3 : Bocal de densité

1.2.2 Densité du fumier

En pratique, on détermine la masse volumique d'un fumier. La densité est ensuite définie comme la masse volumique du produit divisée par la masse volumique de l'eau.

Chargé dans l'épandeur

On calcule la masse de fumier chargé dans l'épandeur, après pesée à vide et en charge. A partir du volume de la caisse de l'épandeur, la masse volumique moyenne du fumier est calculée avec la relation :

$$\frac{\text{Poids de fumier dans l'épandeur (kg)}}{\text{Volume de la caisse (m}^3\text{)}}$$

→ La méthode est grossière mais un large volume de matériau est considéré.

Méthode de terrain simplifiée

Le volume de référence est un seau de 10 litres. Les échantillons de matériau doivent être tassés, ce qui se fait par trois chutes de seau depuis 1 m de haut. La masse volumique (en kg/m³) est égale à :

$$\frac{\text{Poids de fumier dans le seau (kg)}}{\text{Volume du seau (m}^3\text{)}}$$

→ Cette méthode est plus fine que la précédente mais fortement dépendante de l'expérimentateur et du type de matière. La mesure de certains fumiers compactés (caprin, ovin...) est difficile.

Densité du produit en tas

Pour limiter les variations liées à la prise d'échantillon lors des mesures de densité, une autre méthode a été mise au point. Il s'agit de prélever la matière par carottage, directement dans le tas de fumier, à l'aide d'un système spécifique (Figure 4). Les dimensions de l'échantillon ainsi prélevé étant connues, il suffit de le peser pour connaître sa masse volumique :

$$\frac{\text{Masse de l'échantillon (kg)}}{\text{Volume prélevé (m}^3\text{)}}$$



Figure 4 : Système de carottage du fumier (gauche) et litière après extraction (droite)

→ La détermination de la densité du produit en tas est bien représentative du produit à l'endroit de la mesure, mais les résultats sont fortement influencés par le positionnement de l'échantillon dans la stabulation. En effet dans le bâtiment la densité, selon les types d'élevage, le paillage, le mouillage, le piétinement peut varier beaucoup d'une zone à l'autre. L'échantillon mériterait d'être bien décrit dans sa position.

Un échantillon peut aussi être malaxé, manutentionné et cette opération même involontaire peut générer des variations de densité.

De manière générale, la mesure de densité permet de se ramener à une seule valeur de référence et donc de comparer tous les produits. L'expérience montre toutefois que cette mesure ne donne une indication intéressante qu'à condition que le produit ne soit pas trop pailleux, un excès de paille pouvant fausser les mesures, du fait de sa très faible densité. De plus, si elle permet de mieux décrire le matériau (et donc d'aider à la prise de décision concernant les réglages machine), la mesure de densité ne permet pas d'évaluer directement la capacité du matériau à être bien épandu.

1.3 Mesure du risque de bouchage : boîte à bouchage

Certains lisiers sont chargés de pailles, de foin, de plumes générant des bouchages dans les systèmes d'épandages en ligne (rampes pendillards ou enfouisseurs) et limitant de façon importante l'usage de ces derniers. Pourtant ces systèmes permettent de réduire de manière sensible les pertes d'azote par volatilisation et les odeurs. Des mesures sont donc réalisées pour évaluer le risque de bouchage pour un type de lisier donné.

La boîte à bouchage est issue de travaux suédois (JTI-Uppsala) sur le thème de la caractérisation des lisiers. Cette boîte est constituée de quatre compartiments de même dimension (Figure 5). Une grille percée de trou est positionnée au fond de chaque compartiment. La somme des surfaces des trous est équivalente pour chaque grille, seul le nombre de trous est différent (Figure 6). Les caractéristiques des grilles sont les suivantes :

- Grille 1 : 64 trous de Ø15 mm.
- Grille 2 : 24 trous de Ø24.5 mm.
- Grille 3 : 12 trous de Ø34.7 mm.
- Grille 4 : 7 trous de Ø45.5 mm.



Figure 5 : Boîte à bouchage



Figure 6 : Exemple de grille pour la boîte à bouchage. Grille n°2 (à gauche) et grille n°4 (à droite).

Le principe de la mesure est de remplir les quatre compartiments de la boîte et de mesurer ensuite le niveau de produit résiduel dans chaque compartiment (Figure 7) et la proportion de couverture des trous par la paille ou la matière organique. Un index I_i reflétant le pouvoir bouchant du produit, est alors calculé pour chaque compartiment tel que :

$$I_i = \text{pourcentage de trous bouchés} \times 25 + \frac{\text{hauteur résiduelle de lisier}}{2}$$

L'index de bouchage global du produit est alors la somme des quatre index. L'index de bouchage varie de 0 pour de l'eau à 200 pour une boîte complètement bouchée.



Figure 7 : Utilisation de la boîte à bouchage.

→ En pratique, les manipulations sont longues et fastidieuses. D'une part, l'échantillon à prélever est conséquent, de l'ordre de 1 m³. D'autre part, la mise en place de la boîte à bouchage nécessite la présence de deux opérateurs et l'utilisation d'une installation conséquente (Figure 8). Cette installation permet de pomper le lisier dans le conteneur de stockage de 1 m³, puis de le transférer vers la boîte à bouchage et les autres instruments de mesure. Ce système permet également le retour des lisiers vers le conteneur de 1 m³ après le passage par la boîte à bouchage.



Figure 8 : Dispositif de mesure pour la boîte à bouchage.

→ L'indice de bouchage d'un produit peut être rapproché d'une fréquence de bouchage de ce même produit dans un épandeur donné. Une fréquence faible est une bonne performance et peut être le résultat d'un certain nombre de facteurs dont la pression maximale d'obturation du broyeur répartiteur.

1.4 Mesure de la cohésion du fumier et de son aptitude à se fragmenter

La cohésion du fumier ou son aptitude à se fragmenter sont des indicateurs importants pour la mise en œuvre du chantier d'épandage.

1.4.1 Pénétrromètre

Le pénétromètre (Figure 9) est une sonde utilisée pour cartographier l'hétérogénéité du matériau (c'est une technique généralement utilisée pour mesurer la cohésion des sols). Il peut être mécanique ou électronique :

- mécanique : on obtient un profil de force via la course d'un crayon sur du papier,
- électronique : les efforts et déplacements sont obtenus grâce au couplage entre des capteurs et une interface informatique.

→ Les mesures sont réalisées *in situ* sans qu'un prélèvement ne soit nécessaire. Dans tous les cas, que le pénétromètre soit mécanique ou électronique, le résultat sera toujours très dépendant du cône ou de la pointe de pénétration. De plus, du fait de la forte hétérogénéité

de certains produits, il est nécessaire de reproduire les tests plusieurs fois, de façon à pouvoir établir une moyenne représentative de l'échantillon.



Figure 9 : Pénétrètres électroniques, manuel (gauche) et automatique (droite). Exemple de dimensions pour le pénétrètre manuel : diamètre maximum de la pointe 3 cm, longueur 6 cm.

Les résultats obtenus se présentent sous la forme de diagrammes (Figure 10) dont l'analyse permet de caractériser deux propriétés du fumier :

- Premièrement, la forme de la courbe nous renseigne sur l'hétérogénéité du produit : un profil lisse ou monochrome traduira une homogénéité forte, contrairement à un profil polychrome ou en dents de scie, synonyme d'hétérogénéité.
- Dans un second temps, la force nécessaire à l'enfoncement de la pointe permet de calculer le taux de cohésion du produit. Pour cela, on calcule le coefficient de pénétrétrie C_p ($N.m^{-2}$)¹ tel que :

$$C_p = \frac{F}{S_p},$$

avec F la force exercée sur la pointe (en N) et S_p la surface de la pointe. Plus le coefficient est grand, plus le matériau est cohésif.

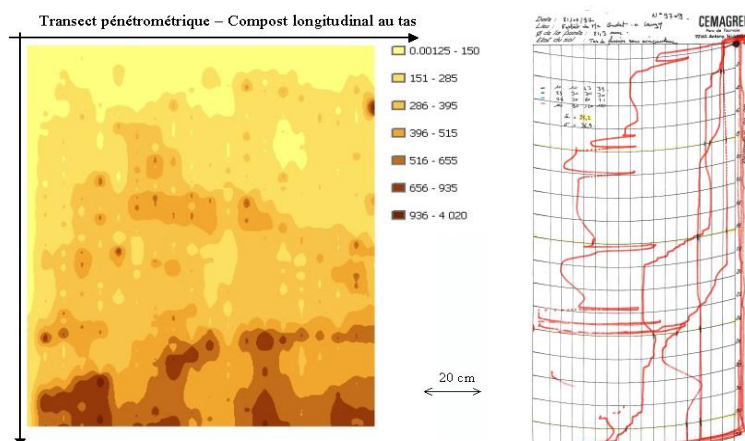


Figure 10 : Diagrammes obtenus par mesure de pénétrétrie, carte numérique (gauche) et diagramme manuel (droite).

Outre des renseignements sur l'homogénéité du produit (en tas ou chargé dans l'épandeur), les mesures de pénétrétrie ont pour but de donner une indication sur l'aptitude du matériau à être fragmenté (plus le produit est cohésif, moins il se fragmentera facilement). Il faut toutefois garder en mémoire que des mesures ne peuvent être comparées que si elles ont été réalisées exactement de la même manière (importance de la géométrie de mesure).

¹ $N.m^{-2}$: c'est une unité de pression équivalente à des Pascal (Pa).

→ Ce type de tests donne des indications concernant le comportement du matériau dans les hérissons (ces derniers permettant de déchiqeter le produit).

1.4.2 Boîte de Casagrande

Une boîte de Casagrande permet de mesurer l'angle de frottement interne du produit et par extension, sa cohésion. Cela renseigne sur sa capacité à se déliter lors de l'épandage.

Cet appareil permet aussi d'évaluer la valeur de cisaillement d'un échantillon placé entre deux demi-cylindres (ou coquilles) (Figure 11). Dans un premier temps, on exerce une pression perpendiculairement au plan de jonction des deux demi-cylindres par le biais d'un système de contrainte pour compacter le produit. Ensuite, l'une des deux coquilles étant fixe, on exerce une force latérale, tendant à faire glisser l'autre parallèlement à leur séparation. En augmentant progressivement cette contrainte verticale, on constate que la résistance de l'échantillon croît, passe par un maximum, puis décroît jusqu'au moment où se produit le cisaillement.

L'enregistrement en continu des données d'effort et de déplacement permet de tracer la courbe d'effort (en $N.m^{-2}$) en fonction du déplacement $\Delta L/L$.

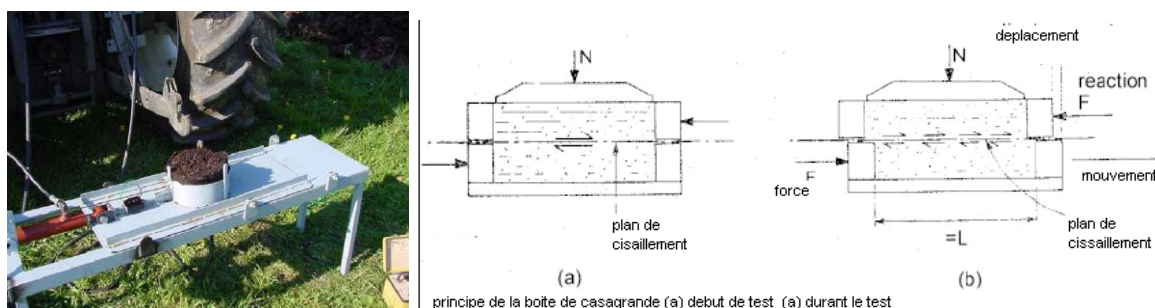


Figure 11 : Boîte de Casagrande, aperçu de la partie supérieure sans le système de contrainte (la partie inférieure n'est pas visible sur cette photo) (gauche). Schéma de fonctionnement (droite).

Tout comme les mesures de pénétrométrie, les tests réalisés avec la boîte de Casagrande visent à donner des indications sur l'aptitude du produit à bien se fragmenter : plus l'effort nécessaire au déplacement est important, moins le matériau est apte à se fragmenter.

1.4.3 Scissomètre

Le scissomètre (Figure 12) permet d'apprécier la résistance du produit au cisaillement. La mesure peut être réalisée directement dans un tas de fumier sans nécessiter le prélèvement d'un échantillon.

Cet appareil est composé d'une tige sur laquelle un jeu de pales est fixé. L'ensemble est enfoncé à la profondeur souhaitée et l'on applique alors un mouvement de torsion sur la tige qui oppose une résistance croissante jusqu'au cisaillement du produit. L'enregistrement de la valeur maximale obtenue (à l'aide d'une clef dynamométrique par exemple) permet de connaître la valeur de cisaillement du produit testé.

On rencontre le même souci de répétabilité que pour le pénétromètre. Les mesures doivent donc être répétées pour obtenir une moyenne représentative.



Figure 12 : Scissomètre. Exemple de dimensions : pales disposées en croix de 5 cm de large pour 34,5 cm de haut

La contrainte de cisaillement τ (en N.m^{-2}) est déterminée selon la formule :

$$\tau = \frac{M}{2\pi R^2 h}$$

avec M le couple, h la hauteur des pales et R la largeur des pales (on considère que le cylindre d'échantillon cisailé a les dimensions de la géométrie du système de mesure et donc la largeur des pales est équivalente au rayon de ce cylindre).

→ Le scissomètre s'inscrit dans la même catégorie de mesures que le pénétromètre et la boîte de Casagrande. Il renseigne sur l'aptitude du produit à bien se fragmenter.

1.4.4 Foëne et « tire-bouchon »

L'expérience acquise sur le terrain a montré l'importance du rôle joué par les fibres dans la texture des produits. Les deux outils suivants ont donc été mis au point afin notamment de pouvoir caractériser la présence de fibres longues dans les fumiers.

La foëne (Figure 13) est un outil utilisé pour la détermination du collant et de la présence de fibres longues au sein du produit considéré.

C'est une sorte de harpon constitué d'une lame triangulaire de 12 cm de large pour 60 cm de hauteur, garnie de dents dont les pointes sont dirigées vers le haut.

Lors de l'enfoncement, comme en pénétrométrie, il est possible de mesurer la résistance du produit (notamment liée à un effet collant dû à la largeur de la lame). De plus, une fois enfoncée dans le tas, le matériau oppose une résistance à l'extraction qui peut également être mesurée.



Figure 13 : Foëne (à gauche) et Tire-bouchon (à droite)

Le « tire-bouchon » (Figure 13), ainsi appelé par sa forme, a la même finalité que la foène. C'est une tige d'acier de forme hélicoïdale de 14 cm de diamètre pour 40 cm de hauteur. Dans un premier temps, il est vissé dans le matériau à caractériser (comme un tire-bouchon dans le bouchon de liège d'une bouteille), puis on l'extrait verticalement tout en mesurant la résistance qu'il oppose à l'extraction. Pour les deux systèmes, la mesure se fait par l'intermédiaire d'un capteur d'effort (absent sur les photos), sensible en pression et compression. Les résultats sont exprimés en Newton (N).

→ Ces deux outils ont été conçus de façon à pouvoir être utilisés aisément sur le terrain. Le principe de la mesure est basé sur l'hypothèse selon laquelle, comme l'humidité et les autres matières sèches, les fibres (brins de paille, déchets de foin) présentes dans le fumier jouent un rôle sur sa cohésion et par conséquent son aptitude à l'épandage. La résistance du matériau à l'extraction de l'outil, influencée par tous ces paramètres, est alors supposée refléter l'épandabilité du produit. La simplicité du concept est intéressante, mais les résultats dépendent de l'expérimentateur. De plus, la mauvaise répétabilité des mesures rend difficile leur interprétation. Par conséquent, à ce jour, ces outils n'ont pas été beaucoup exploités.

2 Outils de laboratoire

2.1 Mesure de la matière sèche

La méthode consiste à peser un échantillon de produit, le faire sécher dans une étuve et le peser à nouveau (Figure 14). La procédure est similaire pour le fumier et le lisier, avec un protocole de séchage de 24h à 105°C. La teneur en matière sèche (ou siccité) du produit est exprimée en un pourcentage de la masse initiale. On applique la formule de la norme EN 13406 (calcul de la teneur en matière sèche) :

$$D_m(\%) = \frac{m_d}{m_w} \times 100$$

avec m_d la masse de l'échantillon de produit séché (en kg) et m_w la masse initiale de l'échantillon de lisier (en kg). Pour un même échantillon, l'opération est réalisée 5 fois. Le résultat est la moyenne arithmétique des cinq déterminations.



Figure 14 : Étuve (à gauche) et balance avec un échantillon (à droite).

→ Seule, la teneur en matière sèche ne peut pas être considérée comme un indicateur de la consistance des effluents. Par contre, pour un type d'effluent donné, elle peut permettre de mieux décrire l'effluent en question.

2.2 Mesure de la texture

Le texturomètre (Figure 15) est un appareil de laboratoire qui permet de déterminer le pouvoir collant, la plasticité, l'élasticité ou encore la fracturabilité des échantillons (à condition de pouvoir réaliser les tests, ce qui dépend des produits), essentiellement par le biais d'une sonde qui s'enfonce dans l'échantillon.

Certains tests, comme celui de compressibilité, peuvent également être adaptés à l'échelle du terrain, par le biais de systèmes plus grossiers. C'est le cas des mesures de pénétrométrie qui peuvent être effectuées par des systèmes portables (cf. I) ou par biais d'un texturomètre en laboratoire : le principe de mesure reste le même, mais le volume d'échantillon considéré varie, ainsi que la précision des mesures.



Figure 15 : Texturomètre.

Les propriétés caractérisées par texturométrie sont souvent davantage associées à des procédés de traitement qu'à la valorisation des produits et donc à l'épandage. L'unité de mesure dépend du paramètre considéré.

Les résultats sont généralement interprétés d'un point de vue comparatif, ou au regard de l'évolution d'un paramètre physique particulier comme la température ou la concentration.

2.3 Mesure des propriétés d'écoulement

Autre appareil de laboratoire, le rhéomètre (Figure 16) sert à mesurer de manière fine les propriétés d'écoulement de matériaux (idéalement homogènes). Plusieurs géométries de mesure peuvent être utilisées : cône/plan, plan/plan, cylindres coaxiaux, etc. Chacune d'elle a des spécificités propres. Des protocoles particuliers sont nécessaires à la mise en œuvre de ces mesures et ne sont pas explicités ici.

L'unité de mesure dépend du paramètre considéré (viscosité en Pa.s, contrainte seuil en Pa, modules élastique et visqueux en Pa, etc.).



Figure 16 : Rhéomètre avec une géométrie plan/plan.

→ A ce jour, ce type de mesures est utilisé pour l'étude du comportement des produits pâteux (boues de station d'épuration, digestats), essentiellement à des fins de R&D. Tout comme pour le texturomètre, les mesures ainsi réalisées ne sont pas spécifiquement dédiées à l'épandabilité des produits.

2.4 Mesure du seuil d'écoulement : le slump test

Le « slump test » (Figure 17) est un outil initialement utilisé pour caractériser les bétons. Il permet de déterminer le seuil d'écoulement des produits fluides à pâteux tels que les boues

résiduaire ou certains digestats de méthanisation sans l'intermédiaire d'un rhéomètre, le seuil d'écoulement d'un matériau étant la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à s'écouler. La technique a été adaptée sur les fumiers, de plusieurs manières, mais aucune n'a réellement fait l'unanimité (cf. mesures internes au Cemagref).

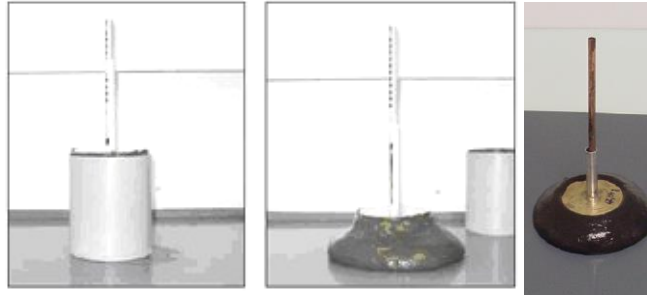


Figure 17 : Slump test (réalisé sur une boue de STEP).

→ Le slump test s'apparente davantage à un outil de terrain qu'à un outil de laboratoire, même si l'interprétation des résultats nécessite quelques calculs. Il permet de déterminer le seuil d'écoulement de certains matériaux, ce qui peut fournir des indications concernant l'évolution d'un matériau pâteux en fond d'épandeur (frottement sur le tapis, etc.). Des travaux récents (Héritier et al. 2010) ont également montré qu'il était possible d'établir un lien entre certaines caractéristiques rhéologiques et les propriétés des nappes d'épandage. Il reste toutefois de nombreuses étapes à franchir avant de pouvoir prédire le comportement à l'épandage des effluents à partir de cette « simple » mesure.

3 Tableau bilan des outils de caractérisation

Outils de terrain					
Type d'outil	Matériau	Grandeur(s) caractérisée(s)	Unités de mesure	Lien produit/machine	Limitation
Fluidimètre	Lisier	Temps d'écoulement	seconde	Indication sur le débit en sortie des épandeurs	-
Densimètre	Lisier	Densité (masse volumique)	kg/m ³	Donnée à titre indicatif	Non adapté aux lisiers pailleux
Bocal de densité	Lisier	Densité (masse volumique)	kg/m ³	Donnée à titre indicatif	
Systèmes de mesure de densité	Fumier	Densité	kg/m ³	Donnée à titre indicatif	échantillonnage
Boîte à bouchage	Lisier	Tendance du produit à boucher un orifice	Index de 0 à 200	Bouchage des outils d'épandage en ligne	Volume nécessaire 1 m ³
Pénétromètre	Fumier	Hétérogénéité et cohésion du produit	Interprétation visuelle et N.m ⁻²	Fragmentation	Nécessite un grand nombre de mesures
Boîte de Casagrande	Fumier	Cohésion du produit	N.m ⁻²	Fragmentation	Dispositif expérimental important
Scissomètre	Fumier	Cohésion du produit	N.m ⁻²	Fragmentation	Nécessite un grand nombre de mesures
Foëne	Fumier	Cohésion du produit	N	Fragmentation	
Tire-bouchon	Fumier	Cohésion du produit	N	Fragmentation	
Fertimeter	Lisier	Détermination des unités fertilisantes	Azote, Phosphore, Potassium	Caractérisation chimique	Valeurs de référence non adaptées aux élevages français
Quantofix	Lisier	Teneur en azote ammoniacal	Azote	Caractérisation chimique	
Agrolisier	Lisier	Teneur en azote ammoniacal	Azote	Caractérisation chimique	
Outils de laboratoire					
L'étuve et la balance	Tous produits	Taux de matière sèche	% de matière sèche par rapport au poids humide	Donnée à titre indicatif	-
Texturomètre	Lisier et fumier	Pouvoir collant, plasticité, élasticité ou encore fracturabilité	Fonction de la grandeur mesurée	-	Matériel de laboratoire
Rhéomètre	Lisier et boues	Propriétés d'écoulement (viscosité, etc.)	Fonction de la grandeur mesurée	-	Matériel de laboratoire
Slump test	Fumier et boues ou digestats	Mesure du seuil d'écoulement (force nécessaire pour que le produit s'écoule)	Pa	Comportement éventuel du produit en fond de cuve (cisaillement tapis)	Outil adapté à des matériaux relativement homogènes

Conclusion

Il existe donc de nombreux outils ou méthodes destinés à caractériser les effluents d'élevage. Parmi eux, seules les mesures de densité et de siccité concernent tous les produits. Les autres mesures sont généralement dédiées à un type d'effluent donné : lisier, fumier, produits pâteux (boues, digestats).

La plupart des techniques disponibles vise à décrire la consistance ou le comportement mécanique des produits. Certaines mettent en œuvre une forte technologie (comme le rhéomètre) ou peuvent être assez grossières (tire-bouchon, etc.) : la fiabilité des mesures peut donc s'avérer fortement variable.

Il faut également retenir que dans la pratique les outils en question sont très peu utilisés (les outils de caractérisation chimique étant les plus répandus) et leur usage se limite aux centres techniques ou de recherche. Cela s'explique soit par la difficulté de mise en œuvre (les mesures sont longues et/ou nécessitent un système expérimental spécifique et peu pratique, voire coûteux), soit par le manque de recul concernant l'interprétation des résultats (et donc « l'inutilité » des tests).

Les mesures simples de caractérisation (taux de matière sèche, densité, ...) sont rarement suffisantes pour décrire le comportement d'un produit. Elles fournissent tout au plus une indication pour une gamme de matériau donnée. En pratique, il est difficile de mettre en relation les propriétés mesurées et la mise en œuvre des matériels d'épandage utilisés. Concrètement, seule la boîte à bouchage donne réellement des indications concernant l'épandabilité² d'un effluent liquide. Les autres outils permettent plus ou moins de décrire les matériaux, ce qui donne des informations pour la mise en œuvre des épandages, mais cela reste qualitatif (donc très subjectif) et non quantitatif.

Parallèlement, la grande hétérogénéité des produits (consistance, présence de fibre, tenus en tas, siccité, etc.) peut rendre les mesures difficilement répétables, quelle que soit technique utilisée. Il devient alors nécessaire de réaliser de nombreux essais de façon à pouvoir établir des résultats statistiquement valables. Jusqu'à présent, de telles campagnes de mesures n'ont pas pu être réalisées.

Il faut aussi noter que seuls des outils très simples pourraient être utilisés sur le terrain, ce qui n'est pas forcément le cas des techniques existantes.

Finalement, un travail important et de nombreuses mises au point restent donc à mener pour mieux cibler quelles propriétés de matériaux peuvent s'avérer utiles pour le réglage des épandeurs et lesquelles peuvent être corrélées à la qualité de répartition du produit. En s'interrogeant là-dessus, il sera alors envisageable d'améliorer les outils existants ou de chercher à en créer d'autres. Il faut aussi garder en mémoire que, du fait de la très grande variabilité des effluents, de la diversité des machines et systèmes d'épandage, de leurs réglages, il serait souhaitable de combiner cette étude sur la caractérisation des effluents à des tests systématiques d'épandage.

² Dans le cadre de l'atelier « épandabilité » réalisé le 12 octobre 2010, l'épandabilité a été définie comme la combinaison du produit, de la machine utilisée et de ses réglages, des objectifs agronomiques, des conditions pédoclimatiques et des traitements potentiellement subis par l'effluent.

Références

BAUDEZ, J.-C. Des boues comme du béton. Cemagref, [en ligne]. <http://www-old.cemagref.fr/informations/Presse/InfMedia/im56/im56boues.htm> (Page consultée le 31 janvier 2011).

DEBROIZE, D. Adaptation des lisiers aux pendillards. Chambres d'Agriculture de Bretagne, [en ligne]. [http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/05077/\\$File/050112047Bouchage.pdf?OpenElement](http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/05077/$File/050112047Bouchage.pdf?OpenElement) (Page consultée le 31 janvier 2011).

DEVAUX, J.-F. & GAILLARD, F. (2006). Etude d'outils simplifiés pour la caractérisation physique des fumiers et composts, Cemagref. 9 pages.

HERITIER, P., ROUX, J., DIEUDÉ-FAUVEL, E. (2010). Impact of sludge mechanical behaviour on spatial distribution parameters obtained with centrifugal spreader, AgEng 2010, International Conference on Agricultural Engineering.

MALGERYD, J. & WETTERBERG, C. (1996). Physical Properties of Solid and Liquid Manures and their Effects on the Performance of Spreading Machines, Journal of Agricultural Engineering Research 64: 289 - 298.

Norme NF EN 13406, Matériel agricole : Épandeurs de lisier et dispositifs d'épandage - Protection de l'environnement, Prescriptions et méthodes d'essai pour la précision d'épandage, (2003). Association Française de Normalisation (AFNOR). ISSN 0335-3931.

PIRON, E. (2005). Ecoulement des produits dans les épandeurs à fond mouvant (Mise en évidence des défauts longitudinaux d'épandage liés aux caractéristiques des machines et des produits - Ecoulement confiné et seuils critiques), Cemagref.

THIRION, F. & CHABOT, F. (2006). Etude des phénomènes directs de bouchage en liquides chargés, Cemagref.

Annexes

Annexe I – Protocole d'utilisation du fluidimètre

Le protocole de mesure de fluidité est présenté ci-dessous :

1. Prélever 3 échantillons sur chacun desquels 3 essais seront effectués, soit un total de 9 essais.
2. Equilibrer le fluidimètre et s'assurer que l'orifice de sortie est bien fermé.
3. Remplir le fluidimètre de lisier.
4. Enlever la mousse éventuelle de la surface de lisier. S'assurer que la surface du lisier est au même niveau que l'orifice de débordement. Attendre que tout mouvement ait cessé avant d'effectuer la mesure.
5. Ouvrir l'orifice rapidement en soulevant le plus possible la balle de caoutchouc et simultanément commencer la mesure du temps.
6. Arrêter la mesure du temps lorsque la surface du liquide s'écoulant disparaît. Le chronomètre doit avoir une précision de 0,01 seconde.
7. Procéder ensuite aux 2 autres essais sur le même échantillon.
8. Vérifier que la différence entre la plus élevée et la plus faible des trois déterminations de fluidité n'excède pas 0,15 seconde. Si c'est le cas, alors effectuer de nouvelles déterminations sur le même échantillon jusqu'à ce que cette prescription soit satisfaisante.
9. Effectuer ensuite les déterminations des deux autres échantillons de la même manière que sur le premier.
10. Calculer la moyenne arithmétique des neuf déterminations et vérifier que les valeurs de fluidité ainsi obtenues se situent dans les limites indiquées par la norme.

Le temps d'écoulement ainsi mesuré est inversement proportionnel à la capacité du lisier à s'écouler.

Annexe II – Méthode du bocal pour la mesure de densité

La procédure de mesure de densité avec la méthode du bocal est la suivante :

1. Le bocal est pesé à vide.
2. Le bocal d'environ 2,5 litres est rempli de lisier et ses bords sont nettoyés des éventuels débordements.
3. Le bocal est pesé chargé de lisier.
4. Le couvercle est mis en place sur le bocal avec son collier de serrage. Par l'orifice de petit diamètre, le remplissage du bocal est complété jusqu'à débordement avec de l'eau.
5. Une nouvelle pesée est faite pour obtenir le poids total.

A partir de la masse lisier (plus de l'eau) et du volume du bocal, il est alors possible de calculer la masse volumique du produit (en kg/m^3).

Annexe III – Slump test

Le matériau est introduit dans un cylindre. Un « chapeau » est posé dessus, sur lequel il est possible de rajouter des masses. A partir de la hauteur d'effondrement du matériau, il est possible d'en déduire son seuil de contrainte, c'est-à-dire la contrainte à partir de laquelle le matériau entre en régime d'écoulement. L'unité de mesure est le Pascal (Pa) ou le N.m.

A l'intérieur du cylindre de rayon R , la masse m_0 ajoutée sur le matériau exerce une pression p_0 telle que la pression totale devient :

$$p = \rho g z + p_0 \text{ avec } p_0 = \frac{m_0 g}{\pi R^2} \text{ et } \rho \text{ la masse volumique du matériau.}$$

Sans détailler les calculs, la contrainte seuil τ_c est déterminée à partir de la hauteur d'effondrement s par le biais de la relation suivante :

$$s = H + z_0 - \frac{\sqrt{3} \cdot \tau_c}{\rho g} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{\rho g (H + z_0)}{\sqrt{3} \cdot \tau_c} \right) \right)$$

où z_0 représente la hauteur virtuelle de l'échantillon matérialisée par le chapeau additionnel et H la hauteur initiale de produit.

Annexe IV – Mesure de masse volumique en stabulation

Des tests ont été réalisés sur la caractérisation du fumier in situ (en stabulation). Des mesures de masse volumique (par carottage) ainsi que la quantification des matières sèches et des cendres ont été effectuées.

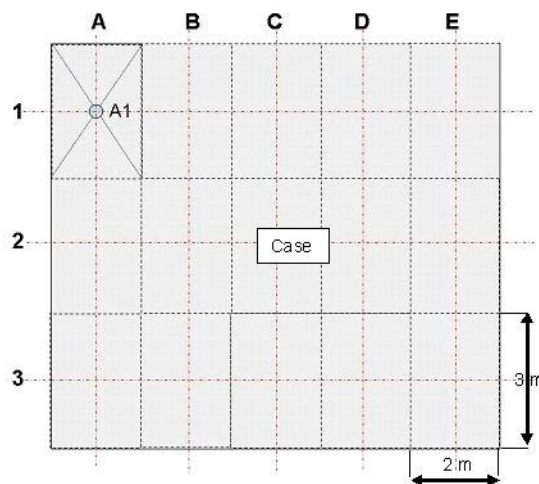


Figure 18 : Plan de prélèvement dans une stabulation.

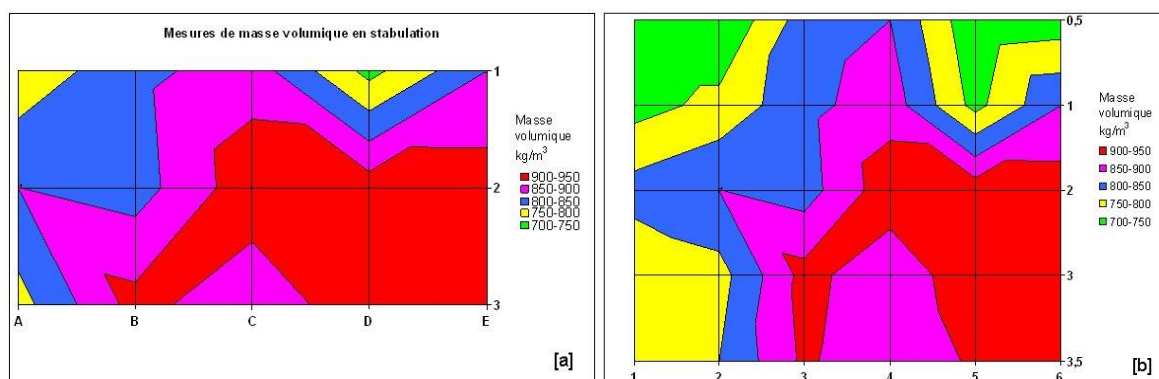


Figure 19 : Cartographie des mesures de masse volumique. (a) données brutes, (b), données extrapolées. La zone la plus piétinée est en rouge, la zone de moindre passage est en vert.

La cartographie établie est conforme avec le comportement des animaux. On distingue l'entrée de la stabulation et une zone de fort passage (liée à la présence de l'abreuvoir). Le

reste de la stabulation (du bleu au vert) correspond à un piétinement plus faible par les animaux et à une zone de repos.

Néanmoins, ces résultats ont été obtenus sur une seule année. Il faudrait reproduire les expérimentations dans plusieurs stabulations et/ou sur plusieurs années, de façon à valider les tendances observées.

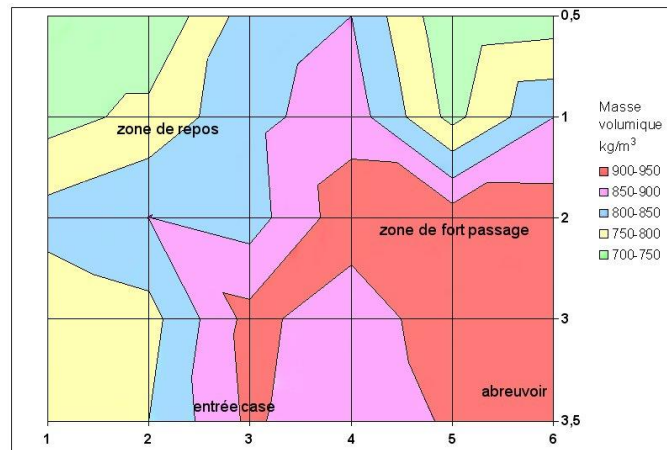


Figure 20 : Répartition du fumier par masse volumique et comportement animal.

Des mesures de matières sèches et de teneur en cendres ont été effectuées en parallèle sur les échantillons prélevés. Aucun lien n'a été établi entre ces grandeurs et la masse volumique des échantillons.

Une autre piste envisagée pour expliquer (voire prédire) l'état de la litière est d'essayer de faire le lien avec l'alimentation animale et les pratiques (changement, renouvellement de la litière).

Annexe V – Cas du bouchage

Le bouchage a fait l'objet de plusieurs travaux de caractérisation.

Thirion et al. (2006) se sont notamment intéressés aux phénomènes directs de bouchage en liquides chargés.

En présence de brins de paille, les filasses et les brins s'alignent sur le courant (sens de l'écoulement). Ensuite, des bouchons se créent, principalement au niveau de restrictions ou d'obstacles à la circulation hydraulique. Cela résulte en une concentration des flux. La « force » ou résistance du bouchon dépend de son amorce, de sa forme et sa consistance. Ainsi, un bouchon pourra se détruire sous l'impact de la montée en pression du liquide, se consolider, ou rester partiel, en fonction du contexte. Des mesures et enquêtes réalisées auprès d'une vingtaine d'élevages montrent que la teneur en pailles (brins de plus de 20mm), en matières sèches et la présence de corps étrangers jouent un rôle sur la formation de bouchons. Néanmoins, chacun de ces paramètres, indépendamment, n'est pas nécessairement source de bouchage.

Concernant l'utilisation de la boîte à bouchage (cf. précédemment), un résultat avec un indice inférieur à 100 indique un risque faible et supérieur à 140 un risque fort. Dans l'intervalle intermédiaire, le risque est moyen.

Annexe VI – Les outils de mesure chimique au champ.

Mesure de la concentration en éléments nutritifs

Le **Fertimeter³ NPK2** est un dispositif électronique de mesure de la concentration des éléments nutritifs des lisiers.

Le principe électronique de la mesure est basé sur la conductivité électrique. Le calculateur demande à l'opérateur de paramétrer la gamme de lisier à mesurer : bovin, porcin, etc. La valeur de conductivité électrique fournie permet l'affichage des éléments fertilisants par le biais de tableaux d'équivalence préalablement chargés en mémoire du calculateur. Le Fertimeter est composé d'une sonde et d'un calculateur électronique (Figure 21).



Figure 21 : La sonde est plongée partiellement dans le lisier (à gauche). L'écran du calculateur fournit les valeurs des composantes : azote, phosphore, potassium (à droite).

Les tableaux d'équivalence fournis avec l'appareil sont logiquement issus des élevages italiens et ne sont pas obligatoirement applicables sur d'autres régions. De plus les lisiers d'une même espèce animale varient dans leur composition en fonction de nombreux facteurs : conduite d'élevage, type de bâtiment, alimentation, etc. Aussi, des imprécisions de mesure après analyse en laboratoire ont été constatées sur les lisiers bretons.

Mesure de la teneur en azote ammoniacal des lisiers

Le **Quantofix** (Figure 22) ou l'**Agrolisier** (Figure 23) fonctionnent selon le même principe et permettent de mesurer rapidement sur le terrain la teneur d'azote ammoniacal à partir de laquelle on peut estimer la teneur d'azote total. Pour échantillonner correctement il est nécessaire de prélever du lisier à plusieurs endroits dans la fosse de retenue des effluents préalablement brassés.

Le protocole de mesure du Quantofix est détaillé en Annexe VII. Il se base sur une réaction chimique entre l'azote de l'échantillon et un réactif spécifique, produisant une quantité de gaz qui permet de remonter au taux d'azote ammoniacal de l'échantillon.

Au début des années 1990, un Quantofix automatisé monté sur un épandeur de lisier a été développé par la société Mauguin. Du fait du peu de succès commercial ce projet a été abandonné.

³ Le Fertimeter est commercialisé par PTM s.r.l., Via per Isorella, 22 /A, 25010 VISANO –BS-ITALY

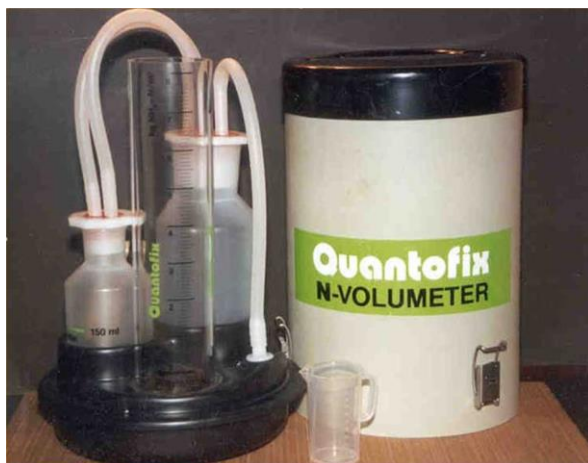


Figure 22 : Dispositif expérimental pour le Quantofix.

La mesure avec l'Agrolisier repose également sur une réaction chimique entre un réactif (l'hypochlorite de calcium) et l'azote ammoniacal (NH_4) des effluents, qui à son contact se transforme en azote gazeux (N_2). Le dégagement gazeux provoque une augmentation de pression mesurée par un manomètre à lecture directe ($\text{kg N-NH}_4/\text{m}^3$).



Figure 23 : Dispositif expérimental de l'Agrolisier.

→ Ces outils ne donnent pas d'indications sur le comportement du matériau à l'épandage ni sur la mise en œuvre de ce dernier. Par contre, il est intéressant de pouvoir estimer la qualité fertilisante des produits épandus, ou encore la teneur en azote ammoniacal car des dégagements gazeux peuvent avoir lieu une fois le matériau épandu.

Annexe VII – Protocole d'utilisation du Quantofix

Utilisation du Quantofix :

1. Remplir le socle de l'appareil avec de l'eau jusqu'à affleurement de l'eau à la graduation 0 de la colonne graduée. Pour cela l'un des flacons doit être ouvert ou bien un tuyau doit être débranché afin de permettre à l'air de s'échapper.
2. Vérifier avant chaque utilisation que le niveau d'eau est bien à zéro.
3. Verser dans le grand flacon **1 mesure de lisier** (100 ml) et **2 mesures d'eau** (200 ml) puis fermer le flacon.
4. Verser dans le petit flacon le réactif jusqu'au niveau indiqué (soit 150 ml).
5. Fermer le petit flacon doucement pour éviter d'emprisonner et de comprimer de l'air qui déplacerait le niveau zéro de la colonne d'eau.
6. Lever le petit flacon contenant le réactif pour le faire s'écouler dans le lisier.
7. La réaction se produit et le gaz formé (azote) fait monter la colonne d'eau.
8. Agiter le grand flacon pour faciliter le mélange et la réaction.
9. Attendre que la colonne d'eau se stabilise et lire le résultat qui est directement exprimé en unités d'azote ammoniacal pour 1 m^3 de lisier.

10. Vider et rincer à l'eau le flacon où s'est effectuée la réaction.

Pour un lisier peu concentré (e.g. lisier de maternité, eaux brunes, vertes ou blanches, fosse ayant récupéré beaucoup de pluie) mettre 2 doses de lisier dans le grand flacon et 1 dose d'eau ou mettre 3 doses de lisier sans rajouter d'eau et diviser respectivement par 2 ou par 3 le résultat.

Le réactif pour Quantofix est constitué de 5 volumes d'eau de Javel à 9,6% ou 9,8% de chlore actif (en berlingots de 250 cm³), plus 1 volume de lessive de soude à 30% (hydroxyde de sodium).