

Apports de la simulation numérique pour l'étude des technologies d'épandage de produits organiques

François Thirion

L'optimisation des épandeurs requiert à la fois une bonne compréhension de leur fonctionnement et une bonne connaissance des caractéristiques d'écoulement du produit à épandre. Or, l'étude de la circulation de ces diverses matières épandues, tant à l'intérieur des caisses d'épandeurs qu'au niveau des rotors d'épandage, demande un dispositif expérimental très conséquent et des tonnages de produits organiques tout aussi lourds à gérer. En outre, ce mode d'expérimentation ne permet finalement de connaître que certains phénomènes superficiels. En effet, il n'est pas possible d'observer les déplacements à l'intérieur de la masse de produit elle-même, comme cela pourrait se faire avec des liquides transparents. Pour réduire les difficultés liées au volume mis en oeuvre, on peut aussi travailler sur maquette à échelle réduite. Il faut alors vérifier que les paramètres d'installation sont bien conformes aux lois d'analyse dimensionnelle et contrôler que les résultats obtenus sont bien extrapolés à l'échelle 1.

Une autre méthode d'étude est aujourd'hui en fort développement : il s'agit de la simulation numérique. Cette évolution est principalement liée à l'accroissement rapide de l'utilisation d'ordinateurs personnels et au développement de leur capacité de calcul. Elle bénéficie à de nombreux domaines industriels ou environnementaux et permet d'obtenir une analyse détaillée de phénomènes physiques complexes comme la turbulence, les transferts de masses et de chaleur, etc. Une fois la méthode d'analyse mise au point, il est envisageable de procéder à

du prototypage virtuel, c'est-à-dire à la définition de pièces et l'examen de leur fonctionnement par ordinateur. Dans le domaine environnemental, cette méthode est par exemple utilisée pour concevoir des réseaux de transport (Chilton *et al.*, 1996) ou des systèmes d'agitation (Börjesson et Fahlgren, 2001). Par contre, aucune application ne semble avoir été développée dans le domaine des épandages de produits organiques.

L'objet de cet article est de restituer les premiers résultats d'une étude que nous avons réalisée dans le cadre du thème de recherche Techpropre¹. Le but de cette étude était d'explorer les possibilités de développement de la simulation numérique pour l'épandage des produits organiques. Après un bref rappel des principes de modélisation et une présentation du dispositif expérimental mis en oeuvre, nous expliquons et commentons les premiers résultats obtenus par comparaison entre un scénario réel et un processus de modélisation.

Principe et définitions

Nous appelons « **modèle** » une représentation des relations qui existent entre des phénomènes ou entre les différents éléments d'un système.

La « **modélisation** » est donc la mise sous forme de modèle d'un phénomène ou d'un processus complexe. Dans notre type d'application, deux étapes sont nécessaires pour pouvoir aborder la simulation. Il faut d'une part réaliser une modélisation géométrique du système définissant

1. Le thème de recherche Techpropre – Technologies et procédés d'épandage – est un thème de recherche du Cemagref, dont les objectifs sont de contribuer à élever les performances des technologies et procédés d'épandage au niveau requis par les exigences de l'agriculture raisonnée, en agissant sur la compréhension du comportement des matériaux et sur les technologies et les pratiques mises en oeuvre.

Les contacts

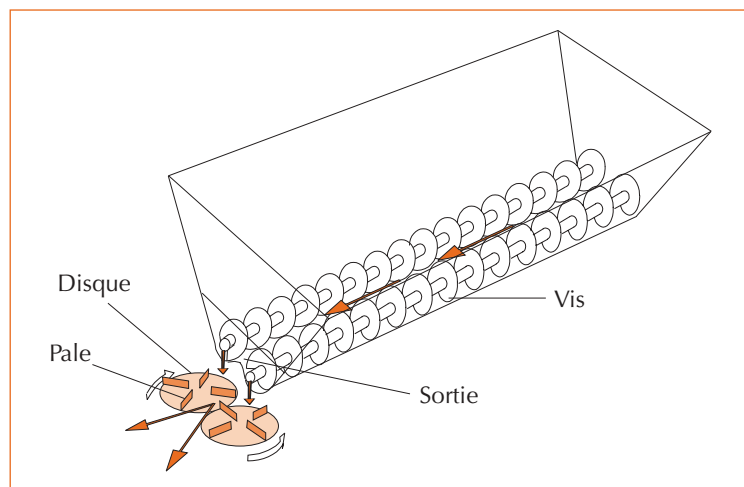
Cemagref, UR Technologies, systèmes d'information et procédés pour l'agriculture et l'agroalimentaire, Domaine des Palaquins, 03150 Montoldre

l'ensemble des coordonnées des éléments qui le composent. Il faut d'autre part effectuer une modélisation physique qui établit des relations mathématiques entre les différents paramètres de ce système.

La « **simulation numérique** » consiste alors en la mise en œuvre des modèles définis pour étudier les variations du système. Le succès de la simulation dépend de la qualité des informations entrées dans les modèles, de la solidité de ces modèles et de la puissance du système informatique. Le développement d'une simulation numérique doit donc passer par des phases probatoires telle que celle décrite dans cet article.

La **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*) est une méthode de simulation numérique basée sur les modèles de la mécanique des fluides. Elle est dite à « **éléments finis** ». En effet le volume total de fluide est divisé en unités élémentaires déterminées par un maillage du système. Les équations constitutives des modèles physiques sont résolues sur chaque volume élémentaire. Il s'agit de l'équation de conservation de la masse (ou équation de continuité), ainsi que de l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Les paramètres sont donc déterminés sur un volume élémentaire puis de proche en proche sur les éléments adjacents. Les calculs sont reconduits par itérations successives de façon à intégrer les variations obtenues sur les autres éléments du système lors du cycle de calcul précédent. Les calculs sont arrêtés lorsqu'ils sont convergents, c'est-à-dire que les résultats tendent vers une valeur unique avec une déviation inférieure à un seuil fixé initialement. En matière d'épandage,

▼ Figure 1 – Schéma de fonctionnement des épandeurs à boues pâteuses.



l'application de la CFD peut s'envisager pour des produits liquides et pâteux.

La **DEM** (*Discret Elements Method*) est une méthode de simulation numérique considérant un matériau constitué de particules élémentaires décrites sous forme de sphères de diamètre déterminé. Les sphères ou agglomérats de sphère peuvent être reliées entre elles par un milieu visqueux. Parmi les modèles utilisés le modèle de contact des particules doit définir la rigidité de ce contact ainsi que les forces en action à ce niveau. Les équations sont résolues sur chaque sphère et déterminent son mouvement dans ce système. L'application de la DEM à l'épandage de produits organiques solides ou semi-solides fait actuellement l'objet d'une thèse de doctorat au Canada (Landry *et al.*, 2002).

Matériels et méthodes mis en œuvre

L'épandeur utilisé

L'étude a été menée sur l'épandage de boues pâteuses, c'est-à-dire de produits intermédiaires entre le liquide et le solide. L'épandeur utilisé est un Hill 15-2000 de fabrication suédoise dont la conception est proche de celle des autres épandeurs spécifiques de l'épandage de ce type de boues. La figure 1 représente le fonctionnement de ces appareils.

La trémie (ou caisse) étanche est remplie de boue pour le transport et l'épandage. Sa forme en V permet d'éviter les angles morts et de centrer le produit sur les vis situées en fond de trémie. Une ou deux vis entraînent la boue vers la sortie dont l'ouverture est réglée par une trappe. À cet endroit, elle tombe sur deux disques en rotation. Elle est projetée sous la forme de nappe qui va recouvrir le sol à l'arrière de l'épandeur. La vitesse de rotation des vis convoyeuses n'est généralement pas réglable. Le réglage du débit est donc réalisé à l'aide de la trappe arrière. La dose épandue à l'hectare est finalement dépendante du débit de l'appareil, de la vitesse d'avancement du tracteur et de la largeur de projection.

Outre les mesures effectuées sur l'épandeur mentionné, des expérimentations complémentaires ont été menées sur une maquette d'épandeur à l'échelle 1/5. Pour des raisons pratiques, la boue utilisée avec cette maquette est constituée d'un mélange de kaolin et d'eau, de consistance similaire à celle des boues résiduelles épandues avec ce type d'appareil.

La boue épandue

Les boues épandues ont été caractérisées par mesure rhéologique suivant un protocole de mesure adapté à leur nature pâteuse (Baudez, 2001). Les produits utilisés (boues résiduaires ou boues de kaolin) ont finalement été ramenés à 3 catégories liées à une équation type comme l'indique le tableau 1.

Nous constatons que dans les trois cas considérés, il s'agit de fluide à seuil de contrainte (20, 60 et 300 Pa) dont la courbe d'écoulement suit un modèle de type Herschel Bulkley.

Les logiciels utilisés

La simulation numérique a été effectuée avec les codes de calcul CFD disponibles : CFX 4.4 et Fluent 6.0. Le volume de fluide dans l'épandeur varie au fur et à mesure de la vidange de la trémie. Il en est de même pour la masse de produit propulsée par le disque. Il s'agit dans ces deux cas d'un écoulement transitoire qui sera étudié avec un pas de temps spécifique. Il faut constamment déterminer le volume réellement occupé par la boue. Le calcul est effectué suivant un mode dit à « surface libre » (« *Homogenous* » sous CFX et « *Volume of Fluid* » sous Fluent). Le système est rempli par deux phases différentes : l'air et la boue. Chaque cellule est remplie d'une phase liquide (boue) ou d'une phase gazeuse (air). Seules les cellules placées à l'interface sont de composition mixte. En raison de la viscosité importante de la boue, les écoulements sont considérés comme laminaires. Les contacts avec les parois sont supposés sans glissement, hypothèse qui fait l'objet d'études complémentaires actuellement.

Les écoulements à l'intérieur de la trémie

Des mesures de débit ont été effectuées avec l'épandeur Hill et des boues résiduaires appar-

Types de boues	Modèle rhéologique
Pâteuse fluide	$\tau = 20 + 10 \times \dot{\gamma}^{0,30}$
Pâteuse moyenne	$\tau = 60 + 30 \times \dot{\gamma}^{0,30}$
Pâteuse plastique	$\tau = 300 + 150 \times \dot{\gamma}^{0,20}$

▲ Tableau 1 – Modèles rhéologiques utilisés pour décrire les boues pâteuses fluides, moyennes ou plastiques.

tenant aux trois catégories précédemment définies. La variation de débit au cours du temps de vidange est déterminée par une pesée continue de l'ensemble tracteur et épandeur maintenu immobile durant l'épandage. Le débit correspond donc à la variation du poids total pour chaque unité de temps. Nous obtenons ainsi les trois courbes de répartition longitudinale (figure 2) où le débit devrait rester théoriquement invariable dans le temps.

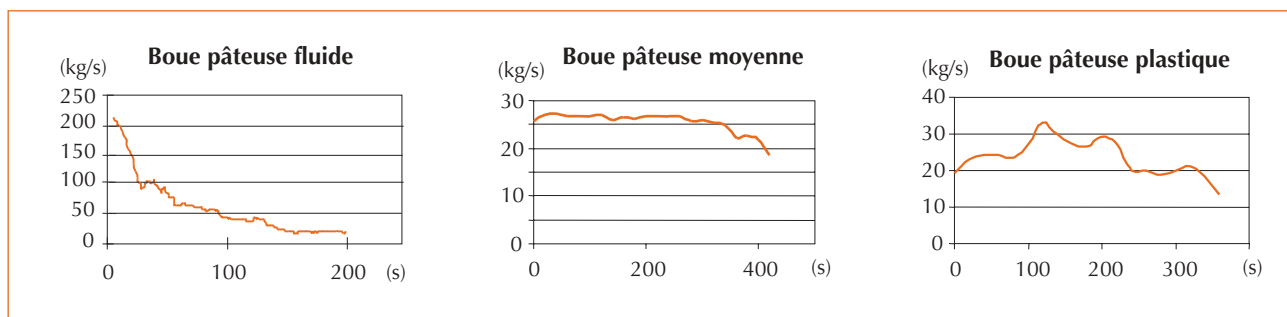
Avec une boue pâteuse fluide, lorsqu'on ouvre la trappe pour commencer l'épandage, le débit est très important. Il diminue rapidement dans un premier temps, baissant de moitié en 30 secondes (environ 15 % du temps de vidange). Il continue ensuite à s'affaiblir progressivement. La répartition longitudinale est très mauvaise.

Avec une boue pâteuse de consistance moyenne, le débit de l'appareil est très régulier, sauf en fin de vidange où il faiblit partiellement.

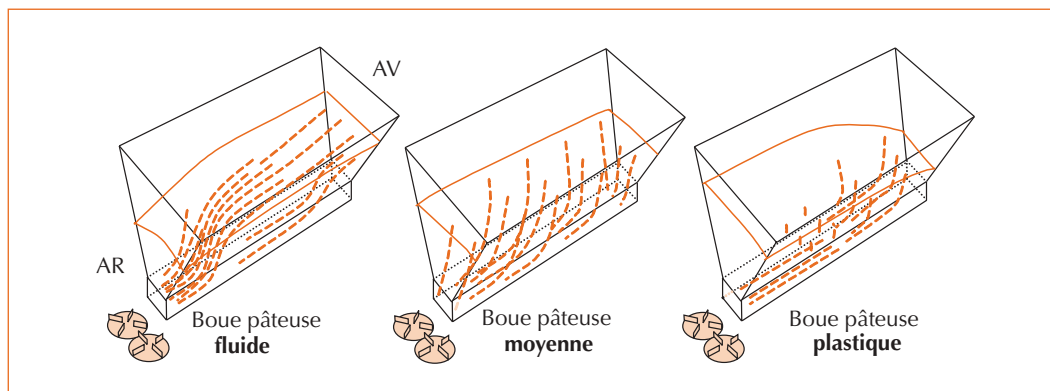
Avec une boue pâteuse plastique, le produit s'écoule par à-coups. Des effets de voûte se produisent au dessus des vis. On constate de grosses augmentations de débit lors de l'effondrement de ces voûtes.

Ces trois courbes montrent la grande influence de la consistance de la boue (tout en restant dans

▼ Figure 2 – Influence de la consistance de la boue sur la régularité longitudinale.



► Figure 3 – Schéma des lignes de courant dans la trémie obtenues par simulation des écoulements de trois boues différentes.

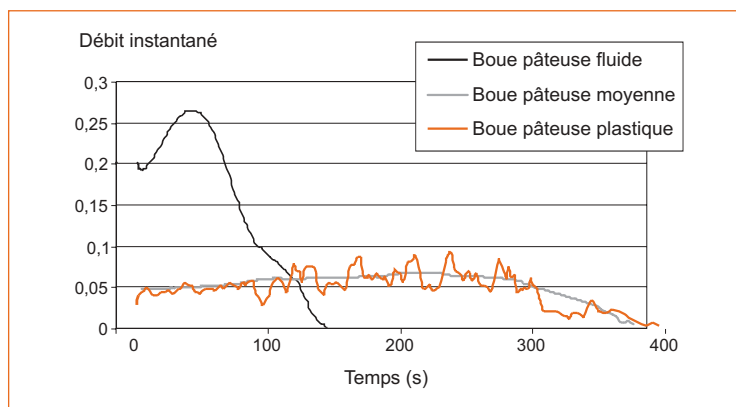


la catégorie des boues pâteuses) sur la régularité longitudinale de l'appareil. Des mesures sur maquette ont montré des résultats similaires à ceux sur épandeur, avec toutefois des résultats moins favorables dans le cas d'une boue moyenne.

La simulation numérique a été effectuée d'après les données de la maquette, avec un modèle géométrique simplifié. La vis de fond trémie n'a pas été représentée de façon à alléger ce modèle géométrique. Nous lui avons substitué un tapis en translation assorti d'une condition de non-glisement, ce qui, technologiquement, semble peu réaliste mais aurait probablement un effet similaire à celui de la vis sans fin. La figure 3 schématise les lignes de courant déterminées par la simulation numérique pour les trois types de boues.

Avec une boue pâteuse fluide, les lignes de courant se dirigent directement vers l'ouverture de sortie. L'écoulement par gravité est prépondérant par rapport à l'écoulement forcé. Quand le niveau baisse l'influence de la pression due à la hauteur de fluide diminue et le débit se stabilise en partie.

▼ Figure 4 – Débits calculés par simulation numérique pour 3 types de boues.



Le niveau de boue baisse en premier à l'arrière de la trémie. Les écoulements seront également très sensibles aux montées ou aux descentes dans la parcelle en cours d'épandage.

Avec une boue pâteuse moyenne les écoulements sont presque verticaux, si bien que le niveau reste pratiquement horizontal. La boue descend régulièrement dans la trémie et va progressivement remplacer celle évacuée par les vis (ici le fond mouvant).

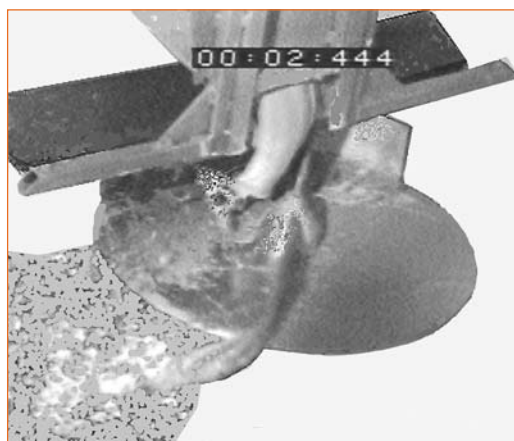
Avec une boue pâteuse plastique, les écoulements sont concentrés vers l'avant de l'appareil. Le niveau baisse en premier à l'avant. Les faibles vitesses de circulation de la boue au milieu de la trémie peuvent expliquer les phénomènes de voûte.

Les résultats de simulation nous indiquent pour chaque pas de temps la quantité de fluide traversant les limites du système. Nous pouvons ainsi connaître le débit théorique de l'appareil. Ces résultats sont représentés sur la figure 4.

Ces courbes peuvent être comparées avec celles de la figure 2 obtenues avec l'épandeur de référence. Comme sur ces mesures expérimentales, la boue pâteuse fluide s'écoule très rapidement à l'ouverture de la trappe avec un débit 5 fois supérieur à celui obtenu pour des boues pâteuses moyennes (7 fois dans les mesures précédentes). Avec ce débit, la moitié du contenu s'écoule en 37 % du temps de vidange (contre 15 % du temps de vidange dans notre expérimentation). Avec une boue pâteuse moyenne, le débit est régulier, mais subit tout de même une variation de 20 % environ. Avec une boue pâteuse plastique, le débit est chaotique. Comme dans la réalité, la vidange de la trémie n'est pas complète dans ce dernier cas, car une partie du produit reste collée aux parois.

Les écoulements sur le disque de projection

La maquette réalisée à l'échelle 1/5 possède un disque unique muni de 2 pales. Les prises de vues réalisées avec une caméra vidéo rapide montrent que la boue est saisie par la pale sans être véritablement recueillie par le disque (figure 5). Elle est plaquée sur cette pale et s'écoule le long de celle-ci au fur et à mesure de la rotation. La majorité du produit est projetée après une rotation de l'ordre de 180° (1/2 tour). À la sortie du disque, la nappe est continue, elle se déchire en mottes près de la périphérie.



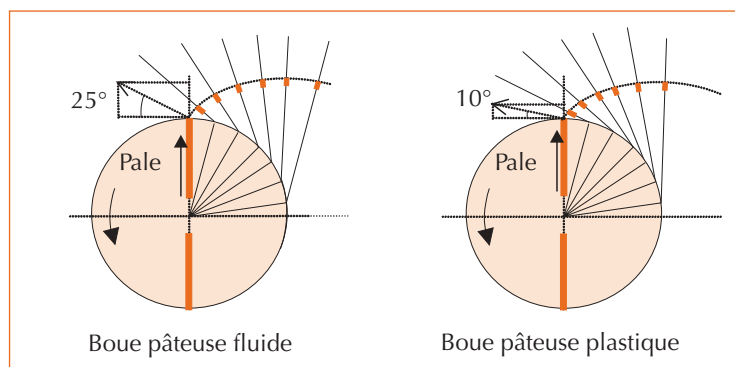
▲ Figure 5 – Vue du fonctionnement du disque d'épandage.

Des photographies de la nappe projetée (schématisées sur la figure 6) montrent que le jet est constitué de gerbes en forme de croissant. La direction de projection varie selon la fluidité du produit.

Les photographies ayant été prises avec un temps d'ouverture de 1/500° de seconde, nous pouvons connaître les distances parcourues par les particules durant ce temps. Ces distances sont corrélées à la vitesse de déplacement par la formule : $d = v \cdot t = 0,002 v$. Nous pouvons en déduire les vitesses de projection présentées dans le tableau 2.

Nous constatons qu'avec une boue plastique, la vitesse radiale est faible. Cela signifie que la vitesse de déplacement sur la pale est également faible, donc que la projection sera retardée. Dans ces conditions, la projection d'une boue pâteuse est déportée sur le côté pour deux raisons :

- le produit sort plus tard du disque ;



▲ Figure 6 – Directions de projection pour deux types de boues pâteuses.

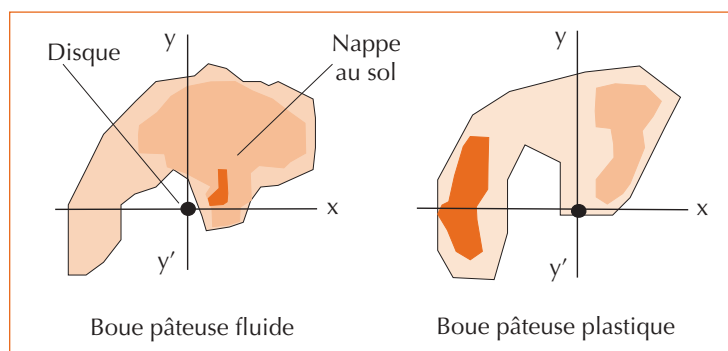
	Boue pâteuse fluide	Boue pâteuse plastique
Angle avec la tangente	25°	10°
V tangentielle	16,65 m.s ⁻¹	16,65 m.s ⁻¹
V radiale	7,76 m.s ⁻¹	2,94 m.s ⁻¹
V totale	18,37 m.s ⁻¹	16,91 m.s ⁻¹

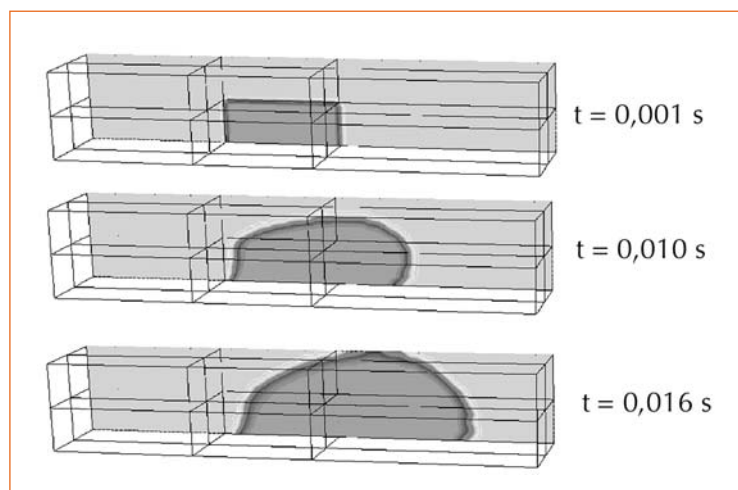
▲ Tableau 2 – Vitesses de projection pour deux types de boue.

– le produit sort presque tangentiellement par rapport au disque.

Ces observations sont corroborées par l'analyse de la nappe au sol provenant du disque d'épandage (figure 7).

▼ Figure 7 – Aspect de la nappe au sol pour deux types de boue épandue (les zones les plus foncées correspondent aux doses les plus fortes).





▲ Figure 8 – Visualisation de l'écoulement sur la pale – Simulation.

Avec une boue pâteuse fluide, l'observation de la nappe au sol montre que la boue est majoritairement expulsée vers l'arrière, dans l'axe de l'appareil, soit après une rotation de l'ordre de 0,021 s. Une zone d'accumulation sur le côté droit, à proximité du disque, provient de la chute de projections incontrôlées ou du freinage causé par le déflecteur.

Une observation comparable a été réalisée avec une boue pâteuse plastique, l'observation montre une nappe décalée de façon angulaire et latérale. Le temps de séjour correspondant au débit principal est de l'ordre de 0,037 s. Cette différence de temps de séjour est cohérente avec les écarts de vitesse radiale en bout de pale indiqués précédemment.

Une simulation numérique a été effectuée sur le même disque. Le post-traitement permet de visualiser la déformation du bloc saisi par la pale (figure 8). Ce bloc s'aplatit et s'écoule vers l'extrémité de la pale.

Pour une boue pâteuse fluide, la sortie de pale se déroule pendant 0,035 s : de 0,015 s après la saisie de la boue par la pale à 0,050 s. Ce temps

représente un secteur de projection de 160°. Un pic de débit est observé à 0,025 s. Avec une boue pâteuse plastique, l'écoulement se déroule pendant 0,060 s, ce qui représente un secteur de projection de 275°. Le pic de débit se situe après 0,033 s. Nous retiendrons, dans ces intervalles, le temps de résidence sur la pale correspondant au pic de débit, de façon à pouvoir comparer ces résultats aux valeurs expérimentales de débit principal (tableau 4).

Il y a donc bien une augmentation du temps caractéristique de résidence sur la pale entre la boue pâteuse fluide et la boue pâteuse plastique. Une gamme complète de données expérimentales serait nécessaire à ce niveau pour pouvoir statuer sur les écarts observés entre les résultats de la simulation numérique et ceux de l'expérience.

Conclusion

L'étude réalisée montre qu'il est possible d'effectuer des simulations numériques en matière d'épandage de produits organiques. Cette simulation a pu être conduite tant au niveau des écoulements dans la trémie de l'épandeur qu'au niveau des écoulements sur le disque d'épandage. Les résultats obtenus par simulation numérique mettent en évidence des phénomènes similaires à ceux observés expérimentalement. En outre, la simulation numérique propose une analyse des flux à l'intérieur du fluide facilitant la compréhension de ces phénomènes. Par contre, la précision des résultats obtenus est insuffisante. Il y a donc lieu, dans cette optique, d'ajuster les modèles utilisés, en particulier les modèles géométriques et rhéologiques, pour améliorer la qualité de simulation. Le large domaine d'application de la simulation numérique ouvre de nombreuses perspectives de mise en œuvre en matière d'épandage. Le développement du Pôle Épandage Environnement (encadré 1) permettra de définir les axes de recherche pertinents répondant aux besoins des professionnels et profitant des avancées en matière de connaissances sur le comportement physique des produits épandus.

► Tableau 4 – Comparaison des résultats expérimentaux et des résultats par simulation.

Temps de résidence sur la pale (débit principal)	Boue pâteuse fluide	Boue pâteuse plastique
Résultat expérimental	0,021 s	0,037 s
Résultat de simulation	0,025	0,033

Encadré 1

Le Pôle Épandage Environnement

Il s'agit d'un projet conduit par le Cemagref avec l'appui financier du FEDER Auvergne et du conseil général de l'Allier. Situé sur le site de Montoldre (Allier), ce pôle comprendra des halls d'évaluation automatisés, des laboratoires, des zones de maquettage, des ateliers informatiques et électroniques. Centre d'échanges et de synthèse internationale, le pôle a vocation, à côté de ses travaux de recherches, à accueillir des entreprises souhaitant évaluer leur matériel, réaliser en incubation leurs projets, ou envisageant de former leurs bureaux d'étude.

L'objectif fondamental des travaux de recherche est la minimisation des nuisances pour l'environnement et l'optimisation de l'efficacité, en particulier agronomique, des matériaux épandus. Les domaines de recherche privilégiés du pôle sont :

- les matériaux et leur caractérisation comportementale,
- les interfaces matériau-matériel : compréhension des lois d'écoulements,
- les matériels et l'amélioration des paramètres technologiques,
- la gestion des informations et l'optimisation des procédés d'épandage.

Résumé

Le développement de la simulation numérique, en particulier dans le domaine de la mécanique des fluides, facilite l'étude et la mise au point d'équipements dans de nombreux secteurs d'application. L'objet de cette étude est de réaliser une simulation numérique sur un épandeur de boues pâteuses et de comparer les résultats obtenus avec des données expérimentales. L'écoulement du produit est successivement analysé à l'intérieur de la trémie et sur le disque d'épandage. Il apparaît que les phénomènes en jeu sont bien reproduits par cette simulation. Ceci ouvre des perspectives variées en matière de développement d'équipement d'épandage pouvant aller jusqu'au prototypage virtuel, si l'on réussit à caler précisément les paramètres de modélisation.

Abstract

The large development observed in the field of numerical modelling contributes to the study and the design of numerous equipments. The aim of this research work is to implement a CFD software and examine the results in comparison with experimental data. The flow behaviour has been analysed inside the tank and on the spinning disk of a pasty sewage sludge spreader. The results show that the phenomena were well described by the numerical modelling. Many applications can be developed once the simulation parameters will be correctly established.

Bibliographie

BAUDEZ, J.-C., 2001, Rhéologie et physico-chimie des boues résiduairees pâteuses pour l'étude de l'épandage et du stockage, thèse de doctorat ENGREF soutenue le 2 avril 2001, 229 p.

BÖRJESSON, T. ; FAHLGREN, M., 2001, Mechanics of fluids in mixing – Bringing mathematical modeling close to reality, *Scientific Impeller (ITT Flygt scientific magazine)*, n° 6, p. 55-68.

CHILTON, R. ; STAINSBY, R. ; THOMPSON, S., 1996, The design of sewage sludge pumping systems, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34-3, p. 395-408.

LANDRY, H. ; ROBERGE, M. ; LAGUË, C., 2002, *Distinct Element Method applied to the study of solid and semi-solid manure properties and machine-product interactions for handling and land application equipment*, communication 021098 à la conférence ASAE/CIGR, juillet 2002, Chicago, USA.