

# Rhéologie des boues de stations d'épuration : études préliminaires pour la maîtrise des stockages et épandages

Jean-Christophe Baudex, Philippe Cousot, François Thirion

Jusqu'à très récemment, l'impact environnemental d'une station d'épuration était défini par la qualité des eaux rejetées en fin de filière. Les produits résiduels de dépollution étaient alors simplement mis en décharge. Aujourd'hui, ces sous-produits font intégralement partie de la filière de dépollution, et, à ce titre, l'exploitant de la station d'épuration est désormais entièrement responsable de leur devenir.

Ainsi, l'utilisation des boues en agriculture s'inscrit dans le cadre de la politique de valorisation des déchets, car elle permet de réincorporer des éléments fertilisants dans les cycles de production. Mais, pour être pérenne, la valorisation agricole doit être effectuée dans des conditions techniques irréprochables, aptes à garantir une efficacité suffisante pour les cultures, et l'innocuité vis-à-vis des utilisateurs et du milieu. Cet article est consacré à la connaissance des lois physiques de comportement de boues dites « pâteuses », il ne traite pas des différents aspects d'innocuité des boues de stations d'épuration (charge polluante, hygiénisation, métaux lourds,...). Dans le domaine de la valorisation agricole des boues, les problèmes essentiels, en dehors du travail requis par les opérations de déshydratation, sont liés à la reprise et à l'épandage des boues déshydratées. Les agriculteurs, soucieux d'une bonne gestion et de la maîtrise technique, souhaitent que les opérations d'épandages aient lieu lorsqu'un apport organique est nécessaire (et non pas lorsque le stockage est plein) et que la répartition des boues sur la parcelle soit la meilleure possible. Il est donc

nécessaire que l'épandeur utilisé disperse les boues de façon homogène, tant longitudinalement que transversalement. Sur ce point, l'épandage des boues pâteuses pose de sérieux problèmes d'émiettement, qui se traduisent par une répartition aléatoire des intrants organiques.

Notre objectif est donc d'améliorer les techniques d'épandage des boues pâteuses, ce qui passe par une étude des modifications comportementales du matériau tout au long du processus. Pour aboutir, il est nécessaire de connaître les lois de comportement des boues résiduaires afin, d'une part, d'optimiser les conditions de stockage et donc de faciliter les opérations de reprise, et d'autre part, de modéliser l'écoulement de la boue, tant à l'intérieur de l'épandeur qu'en sortie. Il est en effet nécessaire d'avoir un débit régulier à l'amont de la table d'épandage avant d'envisager d'améliorer la répartition sur la parcelle.

## La valorisation agricole des boues

### ■ État des lieux

Une conséquence directe de la Directive européenne sur l'assainissement des agglomérations est le doublement, au minimum, de la production de boues de station d'épuration, dans les dix prochaines années. En France, la production devrait passer de 800 000 tonnes de matière sèche par an à 1 300 000 tonnes de MS. Pour l'Union Européenne, on devrait passer de 7 000 000 de tonnes à 15 ou 20 000 000 de tonnes.

Rappelons que le terme rhéologie s'applique à l'étude des caractéristiques et comportements physiques des matériaux (viscosité, élasticité, plasticité,...) lors des écoulements et sous des contraintes diverses.

**Jean-Christophe Baudex,**  
**François Thirion**  
Cemagref  
Domaine des Palaquins  
03150 Montoldre  
**Philippe Cousot**  
LMSGC  
UMR 113  
LCPCCNRS  
2, allée Kepler  
77420 Champs-sur-Marne

De plus, en 2002, les décharges seront fermées à tous les produits humides contenant des matières organiques. Par conséquent, pour l'élimination des boues, les épandages agricoles sont directement concernés. Si l'on aborde le problème des coûts, la valorisation agricole revient à 1500 F/t de MS (incluant le transport, l'épandage, le stockage intermédiaire, le contrôle analytique et un suivi agronomique), tandis que l'incinération tend vers les 3 000 F/t de MS. La méthode la plus économique est l'incinération conjointe des boues et des ordures ménagères (550 à 650 F/t de MS), mais cette technique exige une taille minimale de l'installation pour être réalisée dans des conditions techniques et économiques raisonnables : le mélange des boues ne peut excéder 10 % de la masse totale. Or, en France, le parc de stations d'épuration est très important, avec plus de 10 000 unités, essentiellement de petites tailles : l'incinération systématique ne serait pas rentable.

Toutefois, la filière de la valorisation agricole des boues est fragile. On dénombre plusieurs éléments faibles, développés dans les paragraphes suivants :

- le stockage en station,
- la maîtrise des apports de toxiques d'origine industrielle,
- les techniques de déshydratation,
- la formation des exploitants de STEP (station d'épuration),
- et surtout, l'inadéquation des matériels d'épandage aux différents types de boues.

D'autres facteurs accentuent la fragilisation de la filière. En effet, plusieurs déchets concurrencent les boues, et on assiste à une réticence croissante des populations riveraines (le syndrome NIMBY : Not In My Back Yard), à une réticence des agriculteurs (l'épizootie récente de la vache folle), parfois poussés par les groupes agro-alimentaires (Bonduelle, Carrefour exigeant 10 ans de rétroactivité) ou par certains syndicats (l'Association Générales des Producteurs de Blé). Par conséquent, l'offre augmente, et la demande diminue. Il apparaît donc nécessaire de produire des boues de qualité, mais sans compromettre l'équilibre économique. Dans cette optique, la boue devient un sous-produit à part entière des stations d'épurations, fabriquée selon un cahier des charges précis.

### ■ *Contraintes*

Trois facteurs essentiels sont à considérer dans la production des boues. Elles doivent avoir un intérêt agronomique, être faciles d'utilisation, et présenter des risques limités. Par facilité d'utilisation, on entend qu'une boue doit pouvoir être stockée, reprise, transportée et épandue facilement. La connaissance de sa siccité (teneur en MS) est nécessaire, mais son adhérence, sa friabilité, sa viscosité sont également importantes. Ces caractéristiques sont souvent désignées par le terme « structure ».

L'élément le plus important est la qualité des boues. On estime actuellement que seulement 20 à 30 % des boues sont valorisées conformément à la norme U44-041. Cette norme fixe des valeurs limites à respecter pour huit éléments métalliques présents dans les boues valorisables en agriculture et pour les sols aptes à les recevoir, ainsi que les règles de conduite à adopter pour les épandages. Par conséquent, le premier point à démontrer est l'innocuité des boues et leur intérêt en agriculture. Sur le plan agronomique, les boues sont des fertilisants organiques, mais la matière organique apportée a un effet isohumique nul (minéralisation rapide), ce qui signifie que le taux d'humus des sols ne remonte pas après un épandage. Par conséquent, l'épandage doit être pratiqué uniquement lorsque les cultures sont susceptibles d'utiliser les boues, ce qui signifie que le stockage a un rôle primordial. Or, dans ce domaine, le parc français est sous-équipé.

Autre point à améliorer : l'adéquation de l'équipement à l'épandage. Par exemple, les boues pâteuses (10 à 30 % de MS) apportées avec un épandeur de fumier se déposent par paquets sur le sol, entraînant au labour soit une asphyxie, soit un excès de matière organique. De cette observation découle le problème du suivi agronomique et de sa précision : sur quelle zone prélever un échantillon pour une analyse de sol ?

Les deux étapes les plus déterminantes qui viennent d'être évoquées, à savoir le stockage et l'épandage, relèvent tous deux du domaine des écoulements. Au stockage, la boue ne doit pas s'écouler lorsqu'elle est mise en tas, tandis qu'à l'épandage, l'objectif est un écoulement régulier. Aussi, des connaissances supplémentaires peuvent être apportées par l'étude rhéologique des boues résiduaires. En effet, la rhéologie, que l'on pourrait défi-

nir par science des écoulements, permet de déterminer les lois de comportement mécanique en cisaillement simple des matériaux étudiés. Ainsi, par exemple, la détermination précise d'un éventuel seuil d'écoulement serait un élément important du comportement au stockage. De même, le transport de la boue dans l'épandeur vers les disques d'épandage dépend du comportement à l'écoulement dans la trémie : il apparaît un effet de voûte si la boue est trop solide ou un écoulement indépendant de la vitesse des vis d'alimentation si le matériau est trop liquide.

### La production de boue

Le traitement des eaux usées a pour résultat de produire une eau propre, apte à être rejetée dans le milieu naturel, en faisant appel aux procédés de séparation liquide-solide. Les phénomènes physiques, physico-chimiques et biologiques mis en jeu permettent de concentrer les éléments polluants l'eau et leurs produits de transformation dans des suspensions plus ou moins concentrées dénommées « boues ». Ces sous-produits, solides, se caractérisent principalement par leur siccité et leur teneur en éléments minéraux et organiques. Il est à noter que les éléments polluants souillant l'eau ne se retrouvent dans les boues que s'ils sont effectivement extraits de l'eau à rejeter. Par exemple, toutes les stations ne sont pas équipées pour opérer une déphosphatation, ce qui implique que certaines boues contiennent plus d'éléments dérivés du phosphore que d'autres, simplement en raison des étapes entreprises dans la filière eau. La caractérisation des boues résiduelles commence donc dès l'épuration des eaux.

#### ■ La filière eau

Elle interfère sur la filière boue, sur le plan de ses performances, de la masse produite, et de l'évolution de la matière organique selon les types de traitement considérés : biologique ou physico-chimique. La filière physico-chimique fait intervenir des étapes de décantation et de coagulation-floculation par l'emploi de réactifs minéraux et de poly-électrolytes, tandis que la filière biologique utilise des bactéries (par boues activées ou lits bactériens) qui consomment la pollution carbonée<sup>1</sup>.

À chaque étape du traitement de l'eau, des éléments polluants sont extraits et forment, selon leur composition, différents types de boue que l'on regroupe en cinq classes (tableau 1).

|                   |  |
|-------------------|--|
| Boue de classe A  | boues primaires<br>boues primaires physico-chimiques<br>boues de forte et très forte charge <sup>2</sup>                     |
| Boue de classe B1 | boues biologiques en eau brute :<br>– boues de faible charge<br>– boues d'aération prolongée                                 |
| Boue de classe B2 | boues biologiques en eau décantée :<br>– boues de faible charge<br>– boues de moyenne charge                                 |
| Boue de classe C  | boues mixtes de type A+B2  |
| Boue de classe D  | boues stabilisées biologiquement<br>– boues de digestion anaérobie mésophile<br>– boues de stabilisation aérobie thermophile |

#### ■ La filière boue

L'élaboration d'une filière boue doit prendre en compte plusieurs aspects, tant économiques que techniques, tels que :

- le niveau de siccité souhaité,
- le degré de stabilisation recherché,
- la nature des boues à traiter,
- les coûts d'investissements,
- les coûts d'exploitation.

L'objectif principal d'une filière boue est la réduction des nuisances, que ce soit l'élimination des odeurs (par stabilisation : on dégrade une partie de la matière organique) ou les réductions de masse et de volume (par épaissement et déshydratation). Les grandes étapes sont représentées sur la figure 1.

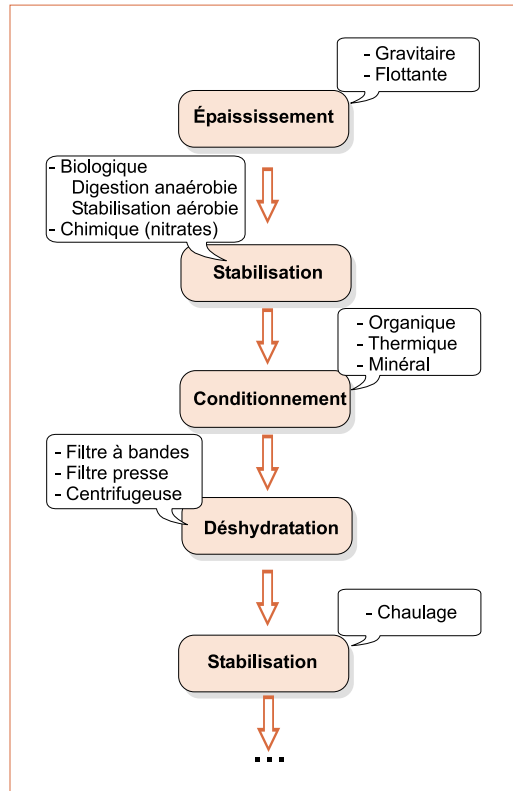
D'autres étapes peuvent venir se greffer sur ce schéma, telles que le conditionnement initial ou le séchage final, mais la majorité des petites et moyennes stations d'épuration rurales, (l'essentiel du parc français), se limite à cette architecture, essentiellement pour des raisons de coûts. Les boues ainsi produites sont liquides ou pâteuses, selon la technique de déshydratation employée, et sont valorisables en agriculture (si elles obéissent toutefois aux conditions fixées par le législateur). Si les boues liquides ne posent que peu

▲ Tableau 1. – Les différentes classes de boues (source OTV).

1. En France, au niveau des petites et moyennes stations d'épuration rurales, la filière biologique en eau brute est la plus répandue.

2. La charge applicable est la quantité de matière sèche (produite par équivalent habitant, en fonction du type de traitement) par unité de surface. Un équivalent habitant est considéré comme produisant 60 g de DBO<sub>5</sub> par jour.

Figure 1. – Principe d'une filière boue. ▶



Les propriétés mécaniques des boues apparaissent à la fois liées à leur humidité et à leur structure, c'est à dire aux interactions qui existent entre les grains constitutifs de matières solides, organiques ou minérales. De fait, en évacuant l'eau interstitielle de la matrice boueuse, on oblige les particules solides à se rapprocher, et donc à interagir plus fortement. Selon la teneur finale en eau, la taille des particules solides et l'importance de la fraction volatile – très évolutive – les interactions dominantes peuvent être très différentes d'une boue à l'autre. Les différentes techniques de déshydratation, en relation avec la fraction organique, pourraient alors commander le comportement mécanique de la boue. Des travaux sur la déshydratation des boues ont par exemple montré que les boues résiduelles suffisamment épaissies avaient un comportement non newtonien, à seuil, et souvent thixotrope (Campbell et Crescuolo, 1982 ; Colin *et al.*, 1976).

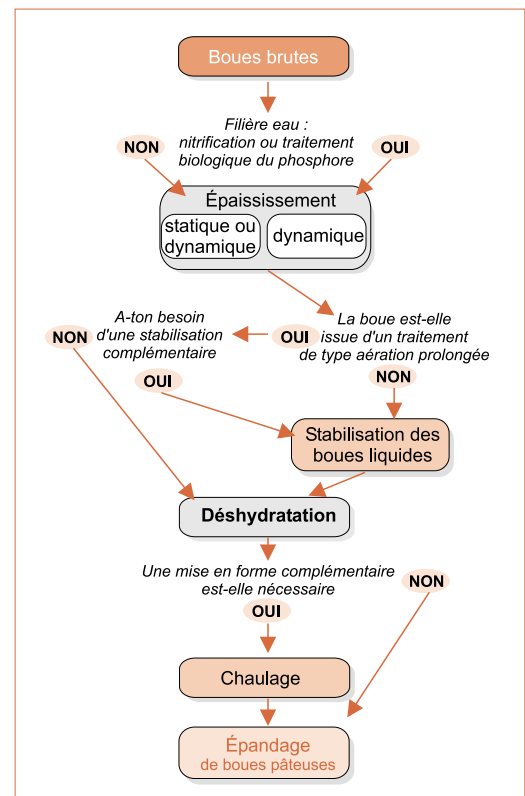
Figure 2. – La filière de production de boue pâteuse. ▼

de problèmes, hormis sur le plan des importants volumes à stocker, il en va tout autrement pour les boues pâteuses, tant au stade de l'épandage (*cf. Contraintes* p. 34) que pour le stockage, où la mise en tas s'avère plus que délicate. Mais avant d'approfondir ce sujet, il est nécessaire de définir le terme de boue pâteuse.

■ **Les boues pâteuses**

**Principe de production**

La filière de production des boues pâteuses est fréquemment mise en place dans les stations de taille moyenne. Après avoir été épaissie, la boue est éventuellement stabilisée en phase liquide afin d'éliminer une partie de la matière organique responsable, au cours de sa dégradation, des nuisances olfactives. Ensuite, la boue est déshydratée selon trois modes mécaniques très répandus, qui sont le filtre à bandes presseuses, le filtre presse et la centrifugeuse. À titre indicatif, d'autres techniques existent (comme les lits de sable) mais ne sont pratiquement plus utilisées, en conséquence elles ne seront pas décrites ici. La figure 2 reprend avec plus de détails la figure 1 et décrit la filière de traitement des boues pâteuses.



Plusieurs modèles ont alors été proposés pour décrire le comportement d'un tel matériau, et les plus courants sont de trois types :

– Herschel-Bulkley (Johnson, 1961 ; Mulbarger *et al.*, 1981),

– Ostwald pseudo-plastique (Hatfield, 1938 ; Behn, 1962 ; Valioulis, 1980),

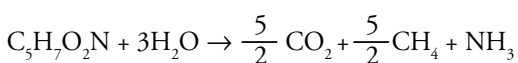
– Bingham plastique (Babbit, 1939 ; Geinopolos et Katz, 1964 ; Frost et Owens, 1982 ; Spinosa *et al.*, 1989).

Dans les paragraphes suivants, nous allons donc décrire le principe de la stabilisation ainsi que les avantages et inconvénients des trois modes de dés-hydratation mécanique.

### La stabilisation des boues

La boue doit souvent être stockée durant de longues périodes avant d'être valorisée en agriculture. Très chargée en matières volatiles (la matière organique), elle a alors tendance à fermenter spontanément (notamment en l'absence d'air) et à générer des nuisances olfactives. La stabilisation sur boue épaissie, en grande majorité par voie biologique (digestion anaérobie ou réaction aérobie), vise à réduire les problèmes d'odeurs en limitant une reprise de la fermentation après traitement.

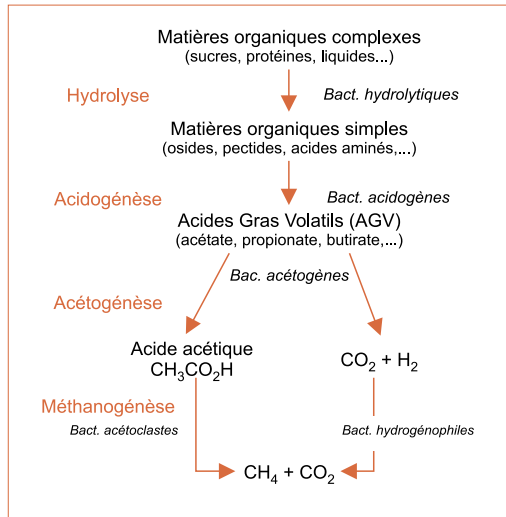
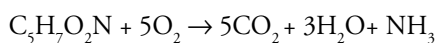
La **digestion anaérobie** est un procédé biologique qui permet de transformer les substances de la boue en dioxyde de carbone et en méthane :



( $C_5H_7O_2N$  représente les matières volatiles biodégradables).

C'est en fait une succession de réactions biochimiques (figure 3) assurées par diverses populations bactériennes ayant des taux de croissance et des exigences de milieu de développement différentes, qui permet d'éliminer 45 à 50 % de la matière organique initiale (digérable, dissoute ou particulaire).

La **stabilisation aérobie** est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie avec dégagement de chaleur et production de dioxyde de carbone (figure 4).

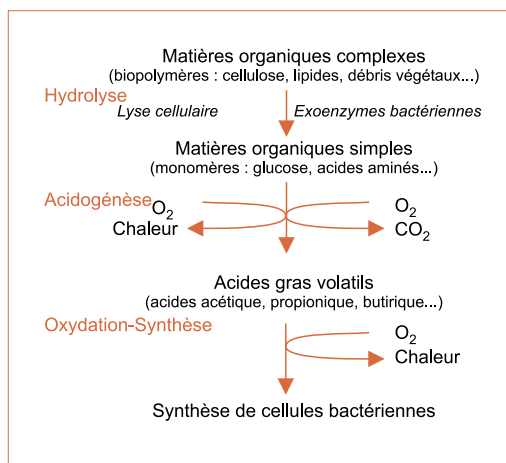


◀ Figure 3. – Principe de la digestion anaérobie.

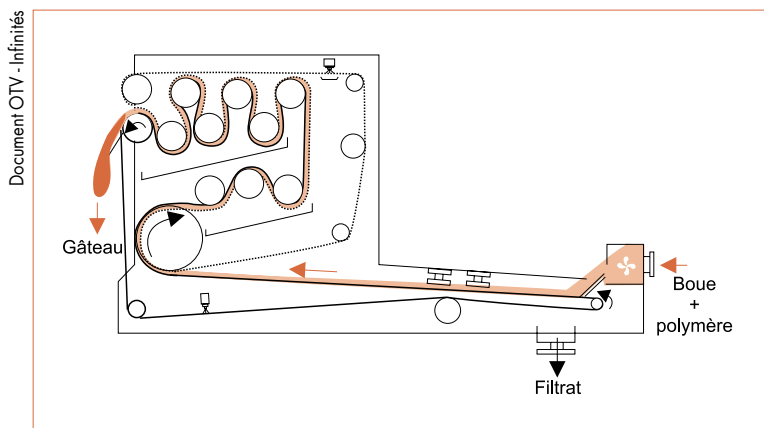
On élimine ainsi jusqu'à 50 % de la matière organique, si la stabilisation est aérobie thermophile autothermique. Dans le cas des procédés conventionnels, le taux d'élimination est inférieur à 15 %. Le procédé repose sur une transformation de la matière organique de haut poids moléculaire en monomères par des enzymes extracellulaires libérées par les micro-organismes. La matière organique ainsi dissoute est transportée dans les cellules où se déroule le métabolisme. L'oxydation de la matière organique libère de l'énergie (catabolisme) et permet la synthèse de biomasse (anabolisme).

### La déshydratation mécanique des boues

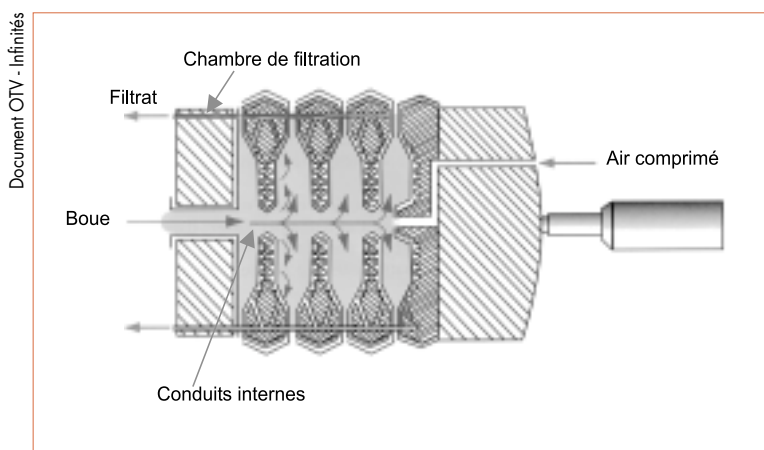
Les procédés de déshydratation généralement utilisés sont le filtre à bandes presseuses, le filtre presse et la centrifugeuse.



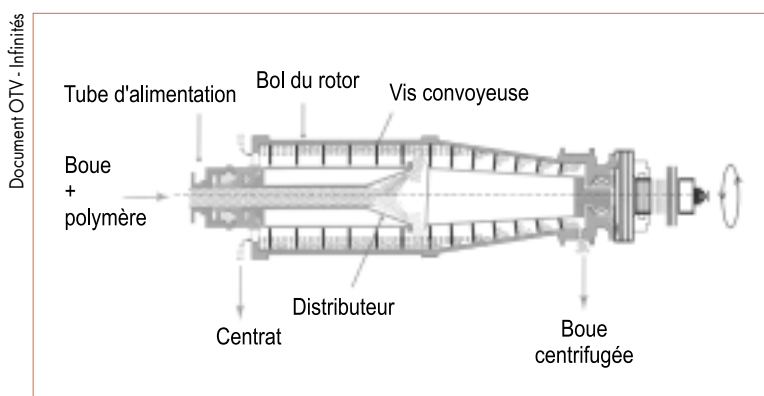
◀ Figure 4. – Schéma de principe de la stabilisation aérobie des boues.



▲ Figure 5. – Principe du filtre à bandes presseuses.



▲ Figure 6. – Principe du filtre presse.



▲ Figure 7. – Principe d'une centrifugeuse.

Le principe du **filtre à bandes presseuses** est la filtration sous pression progressive, de 0,3 à 1 bar : on comprime la boue au moyen de rouleaux entre une bande filtrante et une bande presse (figure 5).

Le processus comporte les étapes suivantes :

- floculation avec des polyélectrolytes,
- égouttage sur un support filtrant de l'eau interstitielle libérée,
- pressage de la boue drainée, entre deux toiles qui la compriment progressivement.

On obtient ainsi une boue pâteuse plastique fluide. À noter que, dans les couches profondes du stockage, on retrouve un environnement anaérobie qui favorise une reprise de la fermentation.

Le **filtre presse** est un appareil qui permet de filtrer des boues en chambre étanche sous des pressions de l'ordre de 5 à 15 bars (figure 6). Il fonctionne en discontinu. Les boues à traiter sont introduites sous pression, au moyen d'une conduite centrale, entre des plateaux verticaux évidés. Ces plateaux sont revêtus, sur leurs deux faces cannelées, de toiles filtrantes de mailles assez fines (10 à 300 µm) qui laissent passer le filtrat. En fin de cycle, les plateaux sont écartés, et le « gâteau » est démoulé manuellement. On forme alors un tas de boue déshydratée très aérée, ce qui limite les reprises de fermentation observables en milieu anaérobie.

Le principe de la **centrifugeuse** peut être assimilé à une sédimentation accélérée, en raison de l'augmentation artificielle du champ de gravitation par l'action de la force centrifuge (à environ 2000 g) (figure 7). La centrifugation est précédée d'un conditionnement à l'aide de polymères de synthèse aboutissant à une boue floculée. Dans le cas présent, et contrairement aux méthodes précédentes, il n'existe pas un mélange intime des particules de toutes tailles, mais une ségrégation en fonction de la masse des constituants. La boue n'est donc pas structurée de la même manière que celle issue des filtres, ce qui peut entraîner, à siccité égale, des différences de comportement lors d'un cisaillement.

### ■ Un complément : le chaulage

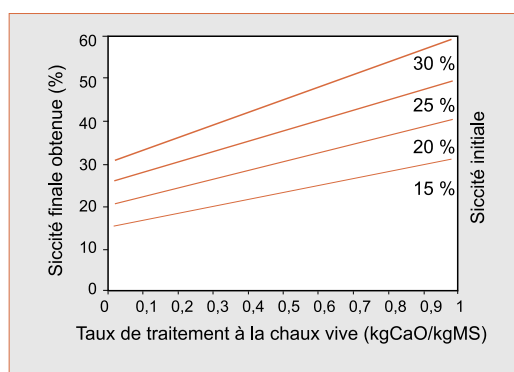
Le chaulage, quand il est pratiqué, remplit deux fonctions principales :

– la stabilisation par voie chimique : le pH élevé inhibe la biomasse responsable de la dégradation de la matière organique,

– l'hygiénisation de la boue. Cet aspect du chaulage ne sera pas développé en raison des controverses actuelles.

Il permet aussi d'en améliorer la siccité et la texture. Par un effet conjoint du mélange de la boue avec un produit minéral sec et (en cas d'utilisation de chaux vive) de l'évaporation de l'eau avec sa transformation en eau de constitution de la chaux éteinte, on réalise une action déshydratante poussée. L'inconvénient de cette technique résulte d'une augmentation significative du volume à stocker. On ajoute en effet des matières solides minérales, dans des proportions pouvant être importantes selon la siccité finale désirée. Ainsi, comme le montre la figure 8, pour une boue de siccité initiale de 20 %, il faut ajouter un kilo de chaux par kilo de matière sèche pour obtenir au final une boue à 40 % de siccité.

Figure 8. – Chaulage à la chaux vive (hors évaporation). ▼



### Les axes de recherche

L'intérêt porté aux boues résiduelles étant relativement nouveau, les connaissances acquises dans ce domaine sont assez éparpillées. Nous nous proposons donc de faire une revue sommaire des connaissances actuelles, avec une brève synthèse du

domaine, plus général, des suspensions concentrées ; et enfin, à partir d'observations expérimentales, nous dégagerons quelques axes de travail. Rappelons toutefois qu'il s'agit d'éléments préliminaires amenés à évoluer, et en aucun cas de résultats figés.

### ■ Les éléments constituant la boue

#### Vue d'ensemble

Avant d'être épurée, l'eau usée subit un prétraitement (dégrillage-tamassage-dessablage) qui consiste à éliminer les éléments les plus grossiers. L'eau brute est ainsi débarrassée des particules lourdes d'une taille supérieure à 0,2 mm, avec un rendement maximum de 80 %. On peut toutefois considérer que les éléments de taille supérieure à 1 mm ont été stoppés au niveau du tamassage (maille de 0,75 mm). Les éléments grossiers ainsi récupérés ne sont pas réintroduits dans la filière boue, mais évacués vers un centre de stockage. Par conséquent, la (faible) fraction minérale des boues est composée d'argiles, de limons et de sables fins, au sens de la classification usuelle en mécanique des sols.

Les autres constituants de la boue sont le liquide interstitiel (de 60 à 90 % du volume total) et la matière organique (de 50 à 90 % des matières solides). Il est préférable de parler de liquide interstitiel plutôt que d'eau, car, outre la matière organique dissoute, on retrouve en phase liquide les réactifs ayant servi au traitement, notamment pour le conditionnement. Le comportement de cette solution sera donc à étudier et à comparer avec celui de l'eau. La matière organique, quant à elle, est d'une composition extrêmement complexe, difficile à expliciter. C'est tout d'abord un important bouillon de culture ( $10^6$  à  $10^7$  bactéries par ml.), très actif, mélangé à des débris cellulaires et des matières en suspension, à forte teneur en protéines, issues des eaux vannes.

Globalement, l'amas de boue présente trois états physiques (solide, liquide, gazeux<sup>3</sup>), deux états chimiques (matières minérales et organiques) et une activité biologique, comme un sol ou un compost mais dans des proportions différentes. Aussi, par analogie, l'évolution des matières organiques dans le sol et les composts pourraient permettre de mieux comprendre la matière organique de la boue. En effet, étant donné que le constituant principal de la matière organique des sols est l'humus, fraction colloïdale à évolution lente, on peut

3. Selon les teneurs en eau et matière organique de la boue, cette fraction gazeuse pourra être très faible.

légitimement se demander si cet état stable n'est pas l'état final vers lequel tendent tous les composés organiques, lorsque toutes les conditions propices sont réunies.

#### Des similitudes avec les sols

Dans les sols, on appelle matière organique un ensemble de substances organiques très différentes en cours d'évolution. Classiquement, on regroupe les matières organiques du sol en quatre classes :

- la matière organique vivante, végétale et animale, qui englobe la totalité de la biomasse en activité,
- les débris végétaux, les cadavres et excréments d'animaux qui sont regroupés sous le terme de matière organique fraîche,
- des composés organiques intermédiaires, encore appelés produits transitoires, qui sont les matières organiques en cours d'évolution entre la matière organique fraîche et les composés finaux,
- les composés organiques stabilisés : les matières humiques et composés apparentés désignés par le terme générique d'humus.

Dans tout sol en activité biologique, il existe donc à tout moment un mélange complexe de composés minéraux et de matière organique, mélange variable des quatre grandes classes précédemment définies. En effet, à l'origine de la formation de l'humus dans les sols se produisent des réactions biochimiques qui commencent avec le vieillissement des organismes vivants, végétaux et animaux. Ces substances organiques servent ensuite de nourriture aux micro-organismes du sol. Pratiquement, toute la matière organique fraîche passe par les êtres vivants du sol avant d'aboutir à une molécule organique humique. Dès l'arrêt des fonctions vitales d'une cellule, la sénescence s'accompagne d'une autodestruction de nature enzymatique du cytoplasme :

- les protéines sont hydrolysées en peptides simples et en acides aminés,
- les glucides et les lipides commencent à être hydrolysés respectivement en sucres simples et acides gras.

La matière organique fraîche, hydrolysée en matière organique simple, sert à son tour de substrat à d'autres micro-organismes. Les réactions bio-

chimiques dominantes sont des réactions de polymérisation et de polycondensation, aboutissant à des macromolécules organiques plus stables. Cependant, l'humification de la matière organique n'est pas un processus isolé et indépendant du sol. Elle passe par des interactions fondamentales entre matière organique et particules minérales : le fameux complexe argilo-humique.

#### Des similitudes avec les composts

D'un point de vue général, le compostage est défini comme un processus biologique aérobie assurant la décomposition des constituants organiques des sous-produits et déchets en un produit organique stable. Le compost peut être considéré comme un cas très particulier de sol actif très riche en matière organique en évolution, et pauvre en éléments minéraux figurés.

Lors du compostage, la décomposition des matières organiques s'effectue, comme dans les sols, suivant des chaînes de transformations naturelles. Des relations ont ainsi pu être établies entre l'activité des micro-organismes et l'évolution des composts. Les principaux paramètres du compostage sont les facteurs qui influencent les conditions de vie des micro-organismes, à savoir :

- le taux d'oxygène lacunaire : tout organisme aérobie consomme de l'oxygène pour oxyder les composés organiques qui lui servent de nourriture. Le taux d'oxygène lacunaire, défini comme le pourcentage d'oxygène dans l'air des « vides » joue donc un rôle primordial dans le compostage aérobie des déchets ;
- l'humidité : la teneur en eau est nécessaire, mais la saturation totale réduit l'espace lacunaire à une valeur proche de zéro. Aussi, le taux optimal d'humidité pour un substrat donné est déterminé par le taux minimal d'espace lacunaire qui n'entraîne pas d'inhibition de l'activité des micro-organismes;
- la température : la température optimale permet d'atteindre les objectifs de chaque phase, à savoir hygiénisation des substrats, vitesse de dégradation rapide, humification active,
- les caractères physico-chimiques des matériaux mis en compostage : les facteurs majeurs retenus comme indicateurs sont les rapports entre éléments majeurs (C, N, P, K, S), le pH et les taux de matière sèche et de matière organique. Au cours



de leur évolution, les substrats organiques perdent plus rapidement leur carbone que leur azote. Le rapport C/N décroît donc constamment au cours du compostage, pour se stabiliser vers 10 dans un compost fini.

### Les spécificités de la boue

En comparaison avec un sol, plusieurs éléments différencient la boue. Au niveau de la matière organique vivante, qui englobe la totalité de la biomasse en activité, on ne trouve que des micro-organismes. Quant à la matière organique fraîche, elle a déjà été décomposée en grande partie (surtout pour les filières biologiques) pendant la phase de traitement de l'effluent liquide. Elle est donc probablement constituée en majorité de composés organiques intermédiaires. De plus, la faible minéralisation de la boue interdit des interactions fortes entre la matière organique et les particules minérales, à l'origine de l'humification. Le taux de matière minérale de la boue est donc, toute chose égale par ailleurs, le facteur limitant dans le processus de transformation de la matière organique en matières humiques.

De plus, la boue peut aussi être comparée à un embryon de compost, trop tassé, qui s'étouffe. C'est un substrat fermentescible, le plus souvent sans porosité, plastique, avec une tendance nette à la compaction sous son propre poids, et saturé en eau. Le taux d'oxygène lacunaire est par conséquent très faible, et il est alors probable que l'activité des micro-organismes aérobies soit rapidement inhibé par asphyxie : le milieu se trouve dans des conditions anaérobies de fermentation<sup>4</sup>. Les fermentations contrôlées (lors des phases de stabilisation anaérobie) conduisent à une méthanisation. En revanche, la méthanogénèse spontanée au cœur du stockage est peu probable. La fermentation est limitée à la production d'acides gras volatils et de dioxyde de carbone. Une exception toutefois : si la boue a subi un traitement de stabilisation anaérobie, l'absence d'oxygène à l'intérieur de l'amas de boue permet de continuer la biométhanisation à température ambiante. Mais les bactéries méthanogènes sont très fragiles. L'acidification du milieu tue cette masse bactérienne, et ne laisse que les bactéries fermentatives, pratiquement indestructibles. Dans ce cas, il n'y a plus que du dioxyde de carbone produit. Par conséquent, à l'exception de conditions favorables précaires, la fermentation des boues pâteuses

conduit à une production d'acides gras volatils et de dioxyde de carbone. On a donc une diminution de la masse organique et une liquéfaction du milieu.

En théorie, toute la tranche organique se dégrade, mais à des cinétiques différentes : au niveau des stations, on s'occupe essentiellement des matières les plus facilement biodégradables, et la nature est chargée d'achever le processus.

Plusieurs orientations semblent se dégager. D'une part, l'évolution naturelle de la matière organique sous l'effet de micro-organismes ou par interaction avec les matières minérales entraîne des modifications dans la composition du substrat, avec une augmentation des teneurs en eau, ce qui pourrait influencer le comportement rhéologique. D'autre part, l'oxygène est un élément essentiel qui régit les conditions de la dégradation de matière organique. Aussi, pour un stockage aéré, comme pour les boues issues de filtre presse, les conditions d'anaérobiose seront très limitées, tandis que pour les boues déshydratées par filtre à bandes presseuses et centrifugeuse, on aura un milieu saturé en eau, donc très fermentescible. La technique de déshydratation employée peut donc avoir un effet non négligeable sur l'évolution du matériau étudié.

### ■ Les différentes interactions possibles entre les particules

Outre les interactions chimiques, des interactions physiques peuvent se produire entre les constituants de la boue. En proportions variables d'un échantillon à un autre, on trouve dans la boue des colloïdes, minéraux et organiques, et des grains solides. Cette variété de particules induit différents effets rhéologiques que nous allons décrire succinctement.

#### Les effets hydrodynamiques

Ils sont la conséquence immédiate et incontournable de la présence de particules solides dans un milieu liquide. En effet, les particules occupant un certain volume initialement rempli de fluide modifient les conditions d'écoulement : la viscosité macroscopique de la suspension augmente avec la fraction solide. Lorsque le taux de remplissage maximal est atteint, (il dépend de la forme des particules), la viscosité est théoriquement infinie.

4. On appelle fermentation une réaction d'oxydo-réduction dans laquelle le donneur et l'accepteur d'électrons proviennent de la même molécule. Les fermentations produisent diverses molécules organiques volatiles responsables des mauvaises odeurs.

Les premières études rhéologiques ont concerné le calcul de la viscosité d'une suspension très diluée de sphères identiques non interactives, dans un liquide newtonien (Einstein, 1956). Pour une fraction solide inférieure à 2 %, dans un liquide de viscosité  $\mu_0$ , l'expression exacte de la viscosité résultante est :

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + 2,5\Phi)$$

Lorsque la fraction solide augmente, le champ de contrainte du fluide interstitiel devient complexe. Batchelor et Green (1972) ont établi l'expression au second ordre d'une telle suspension :

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + 2,5\Phi + 7,6\Phi^2)$$

Cette expression n'est cependant valable que pour des écoulements en allongement simple, et pour une fraction solide de l'ordre de quelques % (régime moyennement concentré).

Pour des suspensions concentrées de particules non interactives, plusieurs modèles empiriques ont été proposés et donnent la viscosité d'une suspension comme une fonction de la concentration solide. Tous ces modèles prédisent l'augmentation de la viscosité avec la concentration solide, jusqu'à une limite qui est le taux de remplissage maximal pour lequel la viscosité est théoriquement infinie. Citons par exemple le modèle proposé par Chong *et al.*, (1971), s'adaptant à une suspension, mono ou polydisperse, de sphères :

$$\mu = \mu_0 \cdot \left( 1 + \frac{0,75}{\left( \frac{\Phi_m}{\Phi} - 1 \right)} \right)^2$$

Enfin, Nicodemo *et al.* (1965) ont observé, dans le cas de matériaux rhéofluidifiant, que par rapport à la courbe représentant la viscosité du solvant en fonction de la vitesse de cisaillement, la présence de particules accentue la pente de cette courbe. Cette modification est plus importante aux faibles vitesses qu'aux vitesses élevées. Au delà d'une certaine concentration particulière, la pente de la courbe devient infinie : le seuil apparaît.

### La diffusion brownienne

Ce sont des mouvements aléatoires qui se superposent aux déplacements moyens résultant de l'écoulement des particules. Le mouvement brownien est indépendant de l'intensité d'écoulement, impliquant des effets significatifs pour les écoulements très lents, lorsque les dissipations d'énergie dues aux autres types d'interaction sont négligeables. Dans ces conditions, la viscosité du mélange augmente quand la vitesse de cisaillement diminue. Le mouvement brownien permet ainsi d'expliquer le caractère rhéofluidifiant de certaines suspensions diluées (Ferguson et Kemblowski, 1991).

### Les interactions colloïdales

Sous cette dénomination, on retrouve essentiellement les forces de Van der Waals, électromagnétiques interatomiques attractives, (proportionnelles à  $r^{-7}$ ) et les forces d'origine électromagnétiques, répulsives, (variant comme  $e^{-k \cdot r}$ ), liées à la présence d'espèces ionisées à la surface des particules. Ces deux forces étant antagonistes, il existe une distance d'équilibre entre deux particules pour laquelle la force mutuelle résultante est nulle, et l'énergie potentielle minimale. À l'équilibre, les suspensions colloïdales se trouvent donc un puits de potentiel. Pour que cette configuration soit brisée, une certaine quantité d'énergie correspondant à la hauteur de la barrière de potentiel local, est nécessaire pour éloigner définitivement deux particules du champ d'action des forces qu'elles exercent mutuellement. Pendant ce mouvement, d'autres particules, initialement distantes, peuvent se rapprocher, et interagir significativement (comme si, schématiquement, l'une d'entre elle était tombé dans un puits de potentiel créé par une autre). Tout se passe alors comme s'il existait des liaisons entre les particules qui pourraient réversiblement être cassées ou restaurées pendant l'écoulement. Au cours d'un écoulement donné, il faut donc attendre un certain temps avant que tous les puits de potentiels laissés « vacants » ne soient occupés et que toutes les liaisons initiales ne se soient reformées, et ainsi revenir à l'équilibre. Ces changements dans la configuration des particules sont à l'origine des effets thixotropiques observés. De plus, pour des déformations suffisamment petites, les particules peuvent bouger les unes par rapport aux autres, sans toutefois vaincre leur barrière de potentiel, ce qui induit les effets élastiques.

Il apparaît par conséquent que les dispersions ont des propriétés rhéologiques plus complexes que les suspensions modérément concentrées de particules non colloïdales, (Mewis et Spaull, 1976). Les principales sont les suivantes :

- seuil d'écoulement,
- thixotropie,
- rhéofluidité,
- élasticité.

■ **Observations expérimentales : le rôle supposé de la matière organique**

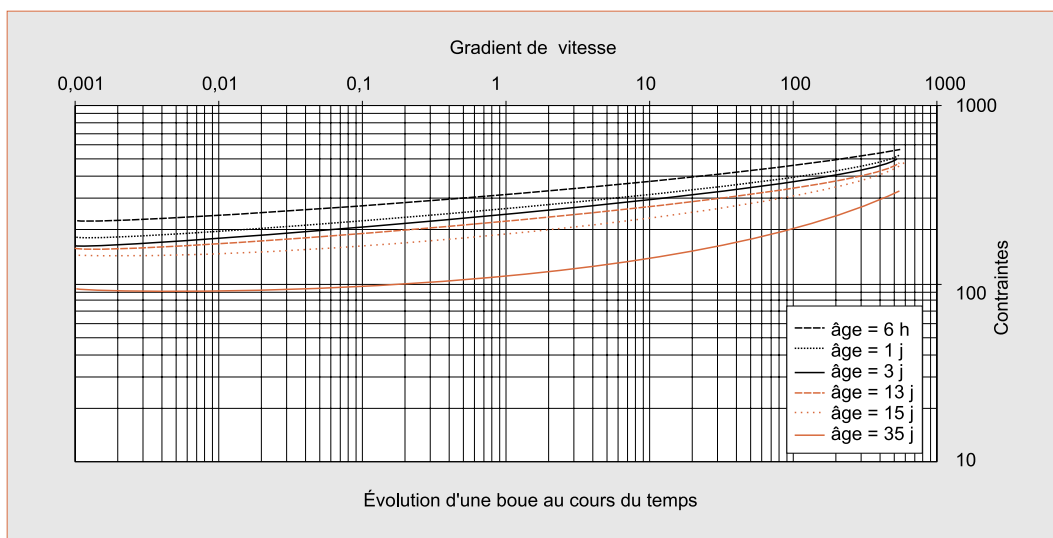
Comme nous l'avons expliqué dans les paragraphes précédents, la boue résiduaire pâteuse est un matériau très humide, la teneur en eau oscillant entre 60 et 90 %, et de constitution très organique. Le ratio MO/MS, c'est à dire le taux de matière organique par rapport à l'ensemble des matières solides oscille entre 50 % sur les boues stabilisées, et 85 % voire plus dans les autres cas. En outre, plus la boue est organique, plus elle est collante, élastique et s'écoule difficilement. Or, ce sont les particules colloïdales qui donnent à la boue sa viscosité importante et ses propriétés élastiques, (Van Damme, 1991). La matière organique pourrait donc être sous forme colloïdale dans la boue. Après avoir vérifié cette hypothèse, une attention toute particulière devra être portée sur le taux de matière organique, parallèlement aux mesures rhéolo-

giques : si la teneur en colloïdes diminue, on peut légitimement attendre des modifications des paramètres de la loi de comportement.

Afin d'illustrer cette hypothèse, nous avons prélevé un échantillon de boue de la station de Saint-Germain-des-Fossés (Allier, Auvergne), à la sortie du filtre à bandes presseuses. Dans cette station, la boue est extrêmement organique, ce qui explique les mauvaises performances du système de déshydratation (10 % de siccité). Notons au passage que la boue n'est pas stabilisée. À des dates différentes, nous avons cisailé la boue avec un système de mesure à plans parallèles, à contrainte contrôlée, et selon le même protocole pour obtenir des résultats comparables. Quelques précautions ont été nécessaires, telles que l'adaptation de surfaces rugueuses sur les outils pour éviter le glissement aux parois, ou prendre en compte le creusement à la périphérie (Coussot et Piau, 1993). La figure 9 présente les évolutions du comportement au cours du temps.

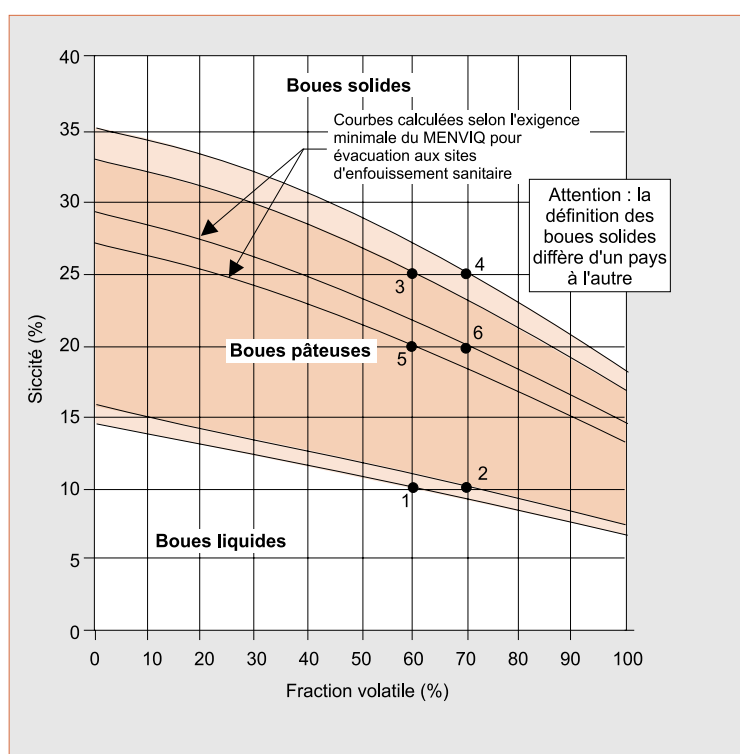
Il y a effectivement une évolution du comportement de la boue, mais que nous ne pouvons actuellement associer à un quelconque paramètre, aucune mesure n'ayant été réalisée en parallèle.

Cependant, des travaux québécois (Desjardins et Roy, 1993) ont montré l'influence, à siccité égale, de la fraction volatile (la matière organique) sur la structure de la boue. Ils ont ainsi développé le concept de siccité équivalente, qui représente « la



◀ Figure 9. – Évolution de la loi de comportement au cours du temps.

siccité que devrait avoir une boue avec une fraction volatile donnée pour que sa consistance soit équivalente à celle d'une boue de siccité connue dont la fraction volatile serait différente ». Selon les auteurs, ce paramètre rend possible la construction de courbes d'isoconsistance séparant les boues liquides des boues pâteuses et les boues pâteuses des boues liquides (figure 10).



▲ Figure 10. – Courbes d'isoconsistance de boues résiduaires basées sur le calcul des siccités équivalentes (source MENVIQ : ministère de l'Environnement du Québec).

Dans ces conditions, prenons un exemple extrême : considérons une boue uniquement constituée d'eau et de matière organique. La fraction volatile est donc de 100 % à tout moment, mais la fermentation de la matière organique entraîne une augmentation de la teneur en eau. L'état physique de la boue évolue en suivant la droite verticale passant par FV=100 %. Alors qu'initialement, la siccité est de 25 % après un temps T suffisamment long, elle peut descendre jusqu'à une valeur très faible. La boue aura donc évolué en passant progressivement par l'état solide, l'état pâteux, puis l'état liquide.

À présent, si l'on ajoute à ce mélange des matières minérales inaltérables, lorsque la matière organique se sera presque entièrement dégradée, on obtiendra un mélange boueux minéral. Les études antérieures sur ce type de matériau montrent que la concentration volumique de matière solide est un élément important du comportement de la boue. Le rôle de la déshydratation se pose alors.

### Conclusion

Les filières de traitement des eaux usées font intervenir de nombreux paramètres pour aboutir à une eau propre et de qualité. Les résidus de dépollution sont eux-mêmes traités sur une chaîne spécifique pour aboutir à un produit final au comportement complexe : la boue.

C'est un mélange très actif de bactéries, de matières colloïdales et non colloïdales, organiques et minérales, variable dans le temps et dans ses proportions d'un échantillon à l'autre, plongé dans un fluide interstitiel lui-même constitué d'un mélange d'eau et de polymère.

Beaucoup de paramètres susceptibles d'influencer le comportement rhéologique de la boue ont ainsi été mis en évidence. Le travail consiste désormais à observer plus attentivement le rôle de chacun de ces paramètres, indépendamment des autres, puis les uns par rapport aux autres.

Le rôle éventuel de l'évolution de la matière organique sur la modification des paramètres rhéologiques devra être clairement mis en évidence par des mesures parallèles de la fraction volatile des boues (calcination à 550 °C), et de la loi de comportement sur différents échantillons et à des âges croissants.

En fonction des connaissances concernant les suspensions et dispersions dans le domaine fondamental, les différentes fractions solides devront aussi être isolées, afin de déterminer leurs effets respectifs sur le comportement d'une solution. D'autant plus que l'ajout de polymère augmente la viscosité du liquide interstitiel, et le mélange obtenu ne semble pas newtonien.

Enfin, compte tenu de la très grande variabilité de la boue, sur le plan de ses composants, nous envisageons également, en collaboration avec l'Ins-

titut de la filtration et des techniques séparatives, (IFTS), de déshydrater un même matériau, afin de n'avoir que la teneur en eau comme différence entre les échantillons. Cette étape nous permettra d'améliorer nos connaissances concernant l'in-

fluence de la méthode de déshydratation sur le comportement, d'observer l'évolution de la fraction organique dans chacun des cas, mais aussi de ne faire varier que les doses de flocculant sur certains échantillons. □

### Résumé

Les boues résiduaires pâteuses sont des matériaux au comportement complexe. Trop fluides pour tenir sous forme de tas, elles sont néanmoins trop solides pour être épanchées correctement avec les moyens mécaniques actuellement utilisés en agriculture. Aussi, afin de réduire ces deux principales entraves à la valorisation agricole, et hormis les différentes réticences d'ordre psychologique, une étude du comportement mécanique de ces boues a été menée récemment.

Dans cette optique, et après avoir décrit les filières de traitement des boues, nous nous sommes attachés à mettre en évidence les caractéristiques jugées pertinentes. Des parallèles ont été établis dans ce but et dans plusieurs domaines avec d'autres matériaux, tout en gardant à l'esprit les spécificités de la boue.

Enfin, dans le cadre de la mise au point de notre démarche expérimentale, nous avons illustré notre propos par un cas concret.

### Abstract

Soft residual sewage sludge behaves in a complex way. It is too liquid to form into a heap but too solid to be spread properly using current machinery. A study of the mechanical behaviour of this sludge has been undertaken recently to remove these two major obstacles to agricultural recycling, other than various psychological reservations. After a preliminary description of sewerage treatment processes, we have attempted to highlight the characteristics considered to be the most relevant. Parallels are drawn with other materials in several fields, bearing in mind the specific characteristics of sludge.

Finally, in order to finalise our experimental approach, we illustrate our proposal with a specific case.

### Bibliographie

BABBIT, H. E., 1939. *Laminar Flow of Sludges in Pipes with Special Reference to Sewage Sludge*, Eng. Experimental Station, Univ. of Illinois, Urbana, USA.

BATCHELOR, G. K., GREEN, J. T., 1972. *The determination of the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles to order  $c^2$* , J. Fluid. Mech., 56, 375.

BEHN, V. C., 1962. *Experimental Determination of Sludge Flow Parameters*, J. of Sanitary Eng. Div., Proceedings of ASCE, SA3, 39-54.

CAMPBELL, H. W., CRESCUOLLO, P. J., 1982. *The Use of Rheology for Sludge Characterization*, Wat. Sci. Tech., 14, 475-489.

CHONG, J. S., CHRISTIANSEN, E. B., BAER, A. D., 1971. *Rheology of Concentrated Suspensions*, J. Appl. Polymer Sci., 15, 2007-2021.

COLIN, F., CORNIER, J. C., DANIEL, J. L., JACQUART, J. C., LEFORT, D., MATHIAN, R., BRAUNSTEIN, J. P., 1976. *Caractérisation des boues résiduaires, Travaux Français dans le cadre de l'action européenne*, Tech. Sci. Mun., 1, 3-23.

COUSSOT, P., PIAU, J. M., 1994. Techniques de rhéométrie en cisaillement simple dans le cas de dispersions et suspensions concentrées, *Les Cahiers de Rhéologie*, 12, 1, 1-9

DESJARDINS, M. A., ROY, N. A., 1993. Rendement de déshydratation et siccité équivalente : définitions et exemples de calcul, Note Technique, *Sciences et Techniques de l'eau*, 26, 1, 45-50.

- EINSTEIN, A., 1956. *Investigation of the Brownian movement*, Dover publication, New York.
- FERGUSON, J., KEMBLAWSKI, Z., 1991. *Applied Fluid Rheology*, Elsevier, Amsterdam.
- FROST, R. C., OWENS, J. A., 1982. *A Method of Estimating Viscosity and Designing Pumping Systems for Thickened Heterogeneous Sludges*, 8th Int. Conf. Hydr. Trans. Solids in Pipes, Johannesburg, SA, 485-501.
- GEINOPOLOS, A., KATZ, W. J., 1964. *A Study of the Rotating Cylinder Sludge Collector in the Dissolved Air Flotation Process*, JWPCF, 36, 6, 712-721.
- HATFIELD, W. B., 1938. *The Viscosity of Pseudoplastic Properties of Sewage Sludges*, Sewage Works J., 10, 3-25.
- JOHNSON, M., 1961. *First Report on the WRC Sewage Sludge in Landfills*, IAWPRC Sludge Mgt. Conference, Loyola Marymount Univ. Los Angeles, USA.
- MEWIS, J., SPAULL, A. J. B., 1976. *Rheology of Concentrated Dispersions*, Adv. Colloid Interface Sci., 6, 173-200.
- MULBARGER, M. G., COPAS, S. R., KORDIC, J. R., CASH, F. M., 1981. *Pipeline Friction Losses for Wastewater Sludges*, JWPCF, 53, 1303-1313.
- MUSTIN, M., 1987. *Le Compost : gestion de la matière organique*, Éd. François Dubusc, Paris, 954 p.
- NICODEMO, L., NICOLAIS, L., LANDEL, R. F., 1965. *Shear Rate Dependant Viscosity of Suspensions in Newtonian and non-Newtonian Liquids*, Chem. Eng. Sci., 29, 729-735.
- OTV, 1997. *Traiter et Valoriser les boues*, n° 2, Lavoisier, Paris, 457 p.
- PETIT, L., 1991. *Écoulement et mise en structure de suspensions macroscopiques*, Ann. Phys., 16, 155-191.
- RUCKENSTEIN E., MEWIS, J., 1973. *Kinetics of Structural Changes in Thixotropic Fluids*, J. Colloid Interfacial Sci., 44, 532-541.
- SPINOSA, L., SANTORI, M., LOTITO, V., 1989. *Rheological Characterization of Sewage Sludges*, Recycling Int., K.J. Thomékozmiensky, 2, 847-854.
- VALIOULIS, I., 1980. *Relationship between Settling, Dewatering and Rheological Properties of Activated Sludge*, Master of Science Thesis, Cornell Univ., Ithaca, New York, USA.
- VAN DAMME, H., LEMAIRE, E., LEVITZ, P., 1991. *La Physique de la boue*, *Pour la Science*, 167, 82-90.