

En 7801

VALORISATION ET DÉGRADATION DES EFFLUENTS D'ÉLEVAGE PORCIN

Michèle HEDUIT (1), J.L. ROUSTAN (2), B. LEFEVRE (3) et C.R. BERNARD (4).

(1) G.I.D.A. - I.T.P. - M.N.E.,
149, rue de Bercy 75579 Paris cédex 12

(2) I.N.R.A. - Station de Recherches sur l'Élevage des Porcs
78350 Jouy en Josas

(3) C.T.G.R.E.F. - Division Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture,
14, Avenue de St Mandé 75012 Paris

(4) U.C.A.A.B. - Chierry
02400 Chateau Thierry

I. INTRODUCTION

1°/ Généralités

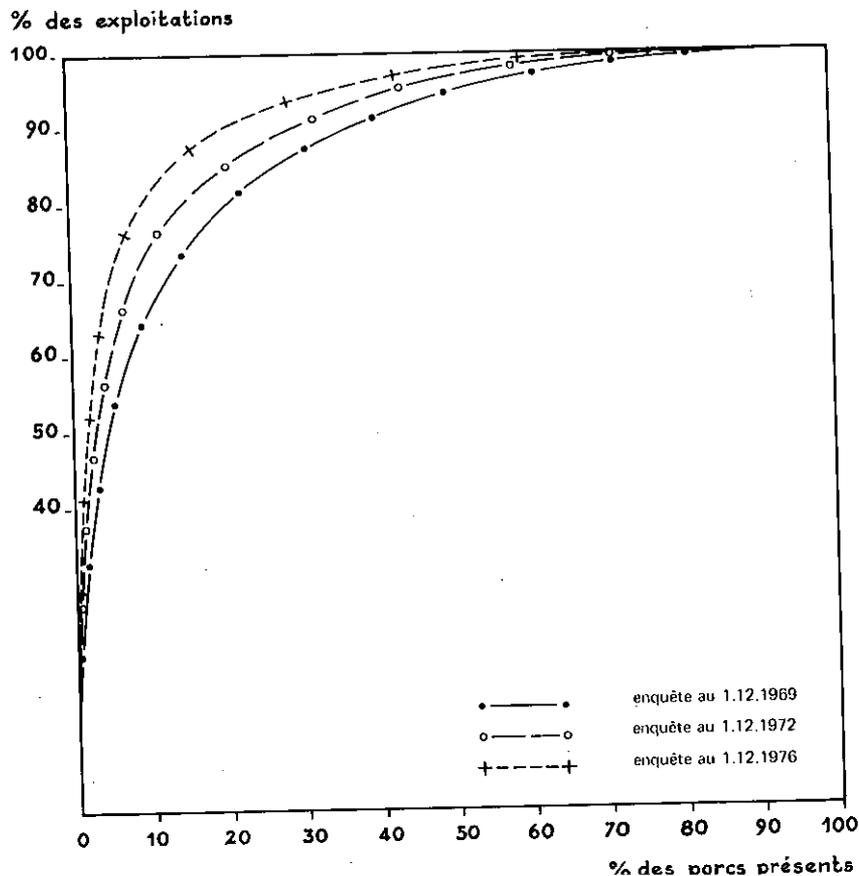
Depuis plusieurs années la structure de l'élevage porcin s'est modifiée ; les petites exploitations tendent à disparaître au profit des moyennes et grosses unités d'élevage ou d'engraissement.

Les enquêtes sur la structure des exploitations publiées dans le numéro de la Note de Conjoncture de production porcine (N° 83 Mai 1977) notent qu'en 9 ans (de 1969 à 1975) le taux de variation différent suivant les classes (-5 % pour les 1 - 2 porcs, -8 % pour les 3 à 50 porcs) est nul pour les porcheries de plus de 50 porcs et fortement positif (+ 50 %) pour les unités ayant plus de 100 porcs.

Les courbes de concentration de structure des élevages porcins, données par le Service Statistique du Ministère de l'Agriculture est reportée sur le graphique suivant :

FIGURE N° 1

**STRUCTURE DES ÉLEVAGES PORCINS
COURBES DE CONCENTRATION**



Ces ateliers de production se sont progressivement concentrés dans des régions définies, quelquefois au détriment de certaines zones qui ont vu non seulement leur production stagner mais parfois même diminuer.

En particulier l'élevage porcin s'est développé dans quatre régions : BRETAGNE - NORD - PAYS DE LOIRE - AQUITAINE. Ces quatre régions regroupent 38,3 % des élevages français et 62,4 % des animaux.

Or, les départements où la production porcine s'est développée ne sont généralement pas producteurs de céréales à paille ou de tout autre culture susceptible de fournir un substrat utilisable comme litière pour les animaux. Corrélativement, l'augmentation du coût de la main d'œuvre a été telle que, les deux facteurs conjoints, la conception des bâtiments a évolué vers un équipement permettant de diminuer la main d'œuvre et de supprimer la litière.

Le caillebotis a remplacé la litière et les déjections n'ont plus été collectées sous forme de fumier mais sous forme liquide.

Cette présentation liquide des déjections animales, si elle favorise la manutention, a soulevé et soulève encore des contestations quant aux risques de pollution potentielle, relatifs à leur forte charge organique, aux odeurs qui émanent des lisiers ainsi qu'à leur valorisation par une utilisation rationnelle.

Il y a quelques années l'accent était surtout mis sur l'aspect pollution, considérant les effluents d'élevage au même titre que les rejets d'industries agro-alimentaires (SALMON LEGAGNEUR 1973 - BALLAY 1974). Les traitements d'épuration appliqués dérivait des techniques utilisées sur les effluents urbains et industriels. Cette solution consistant à dégrader le lisier en vue d'un rejet en rivière, peut être envisagée dans le cas d'exploitations hors sol et ne disposant donc pas de surface agricole suffisante, ou dans le cas de porcheries annexées à des fromageries. En effet, les effluents issus de ces complexes sont des effluents «mixtes» dont la concentration en charge polluante et en MST (1) se rapproche de la qualité des eaux résiduaires urbaines. Le traitement peut alors mieux être appliqué aux effluents porcherie-fromagerie.

Par ailleurs, l'utilisation de parcelles «décharges» recevant un volume important de lisier a sensibilisé les chercheurs sur les risques de pollution des nappes phréatiques que faisait encourir une telle pratique. Or, si l'on considère la digestibilité moyenne relative aux trois éléments fertilisants majeurs, on peut estimer que l'on retrouvera dans les déjections de porcs, environ 20 % de N, 40 % de P et 15 % du K apportés par l'aliment. Il semble qu'actuellement l'utilisation plus rationnelle du lisier ait modifié l'objectif des recherches pour s'orienter sur l'effet fertilisant des déjections et sur ses conséquences agronomiques.

Cependant, s'il apparaît comme une valorisation souhaitable des effluents d'élevages porcins, l'épandage se heurte aux problèmes des odeurs émises lors de l'apport du lisier sur le sol.

A la suite de plaintes répétées de tiers, une évolution de pensée et de pratique ont conduit les techniciens et les chercheurs à concevoir des systèmes de désodorisation qui, dérivant des techniques d'épuration, ont su être adaptés aux contraintes liées à l'exploitation.

2^o/ Connaissance du produit

Les effluents d'élevages porcins sont très variables tant au point de vue présentation qu'au point de vue composition physicochimique. Si nous pouvons considérer que le fumier est obtenu par le mélange des déjections et de la litière grâce au piétinement des animaux, nous serons obligés de définir quatre termes applicables au lisier. Ces différences sont surtout liées à un facteur dilution (volontaire ou non), souvent conditionné par la conduite d'élevage ou le système d'évacuation du lisier.

Lisier complet : mélange intégral de fécès, d'urines, de poils et de déchets d'aliments en proportion naturelle.

(1) M.S.T. : Matière sèche totale.

Lisier dilué : lisier ayant au moins 50 % d'apport d'eau volontaire (lavages - facilité de reprise) ou involontaire (fuite d'abreuvoirs).

Lisier liquide : lisier ayant 10 à 20 % d'apport d'eau (système d'évacuation hydraulique du lisier).

Lisier frais : lisier âgé de moins de 48 heures, n'ayant donc pas encore subi une fermentation anaérobie importante.

a) Les quantités journalières

Les quantités de lisier rejetées par jour et par animal peuvent être estimées en moyenne à 7 % du poids vif. Les chiffres rencontrés dans la bibliographie sont variables (TIETJEN de 5 à 9 %, JONES 10 %...) mais il faut tenir compte des conditions d'élevage et de mesure, ainsi que de l'alimentation et de l'âge des animaux.

Si l'on considère comme moyen un rejet journalier de 7 litres, le volume produit pendant la durée d'engraissement (140 j.) sera d'1 m³ environ. Cependant, cette production moyenne semble diminuer par le fait que la durée d'engraissement tend à être réduite (meilleures performances des animaux - carcasses moins lourdes) et que les pertes d'eau involontaires sont limitées.

JAENISCH (1974) dans son article rapporte des résultats de mesure des volumes produits dans différents élevages : A et B engraissement de 12 000 porcs, C - naisseur de 1 300 truies. Entre A et B variaient seulement le type de nettoyage et le système d'évacuation du lisier.

TABLEAU 1
VOLUME DE L'EFFLUENT PRODUIT DANS DIVERS TYPES D'ÉLEVAGES
(JAENISCH - 1974)

	Unité de mesure	Élevage A 11600 porcs	Élevage B 12000 porcs	C 1300 truies
Production totale de lisier	m ³	74.825	53.730	48.290
dont :				
— fécès + urine	%	32,9	53,7	21,3
— eau de nettoyage		8,8	21,4	13,6
— consommation d'eau (racloirs et caniveaux)		-	1,8	3,1
— eau pour personnel		1,0	-	5,8
— pertes		57,3	23,1	56,2

b) Composition physico-chimique

La digestibilité relative de chaque élément implique une excrétion différente suivant la composition de l'aliment. Ainsi SALMON LEGAGNEUR et al (1973) ont mis en évidence l'influence du régime sur la composition des lisiers et sur leur charge polluante. De la même façon la présentation de l'aliment (soupe, granulé ou maïs humide) influe sur la composition (HEDUIT et al. 1976) pour deux raisons : la richesse relative de l'aliment (maîtrise plus ou moins précise des nutriments dans la fabrication) et par un effet dilution (la présentation en soupe suppose généralement l'absence d'abreuvoirs) qui détermine un volume de déjections excrétées plus ou moins important pour une quantité NPK rejetée constante avec un aliment de même composition.

Le stade physiologique ne semble pas jouer un rôle prépondérant : les régimes étant adaptés à chaque stade physiologique, l'influence des besoins en nutriments de l'organisme sur les coefficients de digestibilité se trouve ainsi compensée. Si l'on rapporte les concentrations en éléments à la matière sèche excrétée, l'alimentation est le facteur qui influence le plus la composition du lisier (SALMON LEGAGNEUR, 1975 - HEDUIT, 1977)

La matière sèche et la matière minérale : la digestibilité de la matière sèche est estimée en moyenne à 80 - 90 %. Un lisier complet obtenu en cage de digestibilité contiendra donc théoriquement 80 g/l de matière sèche dans le mélange fécès-urine (SALMON LEGAGNEUR 1975). Les variations très importantes dans la concentration en matière sèche est liée, d'une part à la conduite d'élevage (eaux de lavage - fuite d'abreuvoirs), d'autre part à l'étanchéité des fosses de stockage (pertes de liquide du lisier - entrée d'eau dans la fosse - eaux pluviales - JAMBOU, 1974).

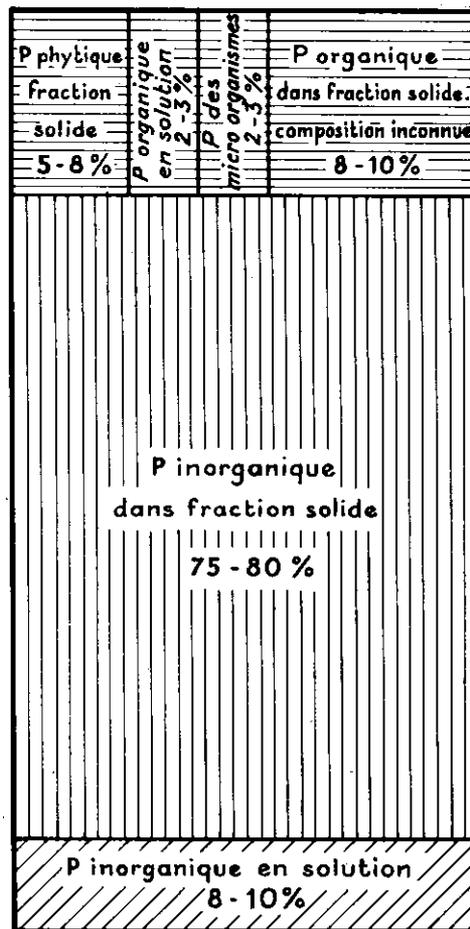
Dans un lisier frais 20 % de la MS représentent les matières minérales. Au cours du vieillissement le pourcentage de matière minérale par rapport à la matière sèche augmente jusqu'à représenter 50 % (HEDUIT et al 1977).

Les éléments fertilisants majeurs : l'azote excrété représente en moyenne 20 % de l'azote ingéré et est contenu pour 30 % dans les fécès et 70 % dans les urines. L'azote urinaire est sous forme ammoniacale et uréique biodégradable alors que l'azote fécal, sous forme organique, sera plus lentement dégradé. Ainsi, en fin de stockage, l'azote ammoniacal représentera environ 75 % de l'azote total Kjeldhal ($N_{org} + N_{NH_3}$). Chez le porc, la totalité de l'azote soluble est sous forme ammoniacale.

Le phosphore est à 90 % excrété dans les fécès. Il est présent sous différentes formes dont les pourcentages sont apportés dans le schéma suivant (GERRITSE, 1976).

FIGURE 2

RÉPARTITION RELATIVE DES DIFFÉRENTES FORMES DE PHOSPHORE
DANS LES LISIERS DE PORCS



L'excrétion du potassium est à 80 % assurée par les urines. Il se trouve dans le lisier sous forme soluble et son efficacité en tant qu'élément fertilisant est équivalente à celle d'un engrais minéral.

Ces éléments sont très fortement corrélés à la matière sèche du lisier suivant les équations de la forme $y = ax + b$.

TABLEAU 2

PRINCIPALES ÉQUATIONS DE RÉGRESSION OBTENUES
SUR DES ÉCHANTILLONS DE LISIERS AU STOCKAGE (HEDUIT et al. 1977)

Équations de régression	Coefficients r
$N_{TK} \text{ g/l} = 0,53 \text{ MS \%} + 3,16$	0,80
$P_2 O_5 \text{ g/l} = 0,7 \text{ MS \%} + 1,25$	0,84
$K_2 O \text{ g/l} = 0,13 \text{ MS \%} + 1,7$	0,56

Les données présentées recouvrent un large éventail de valeur, mais en fait au niveau d'un élevage, si l'on effectue plusieurs prélèvements dans le temps, on constate que les données obtenues sont homogènes, ce qui justifierait, au niveau de chaque élevage la réalisation d'au moins une mesure de la composition du lisier (HEDUIT 1976).

Les éléments minéraux : en dehors du sodium (excrété au 2/3 par l'urine) les éléments minéraux sont apportés par les fécès. Il faut relier ceci à la physiologie digestive des porcs, les minéraux étant faiblement assimilables.

Parmi les éléments minéraux, il faut noter le cas particulier du cuivre et du zinc qui, additifs alimentaires apportés en tant que facteurs de croissance, se retrouvent en grande quantité dans le lisier.

c) La charge polluante

Si l'on reprend les trois paramètres classiques de la charge polluante, on parlera de MES*, DBO₅* et DCO*.

La DBO₅ d'un lisier complet est apportée à 33 % par les urines et 66 % par les fécès. Par contre, la DCO des fécès représente 85 % de la DCO totale.

Les fécès constituent donc une charge difficilement biodégradable puisque pour un équivalent porc le rapport DCO/DBO₅* = 3,4. Le lisier complet avec un rapport DCO/DBO₅ de 2,6 peut être considéré comme un effluent susceptible d'être traité par des moyens biologiques (SALMON LEGAGNEUR 1973).

Si l'on rapporte la charge polluante émise par un porc à la pollution rejetée par un habitant, on peut définir la notion d'équivalent habitant*.

Si l'on ne considère que le seul paramètre de DBO₅ un porc représenterait 2,5 équivalent habitant.

- * MES : Matières en suspension déterminées par centrifugation.
- * DBO₅ : Demande Biochimique en oxygène en 5 jours. Elle correspond à la fraction dégradée par les microorganismes aérobies du milieu (AFNOR T 90 - 103).
- * DCO : Demande chimique en oxygène. C'est la fraction oxydable par un oxydant chimique puissant (AFNOR T 90-101).
- * DCO/DBO₅ : Ce rapport représente la biodégradabilité d'un effluent et donc son aptitude à être épuré par voie biologique : supérieur à 3, l'effluent est considéré comme difficilement biodégradable.
- * Équivalent habitant : Estimation du rejet en DBO₅ d'un habitant exprimé en g/j (en moyenne 54 g DBO₅/j).
- * Équivalent porc : On considère comme l'équivalent porc, un porc charcutier de 70 kg..

d) Composition moyenne

les tableaux suivants regroupent quelques compositions moyennes d'un lisier de porc (extraites de la littérature)

TABEAU 3
COMPOSITION EN ÉLÉMENTS MAJEURS (1)

Référence paramètre	HEDUIT et al. 1977			CT GREF		KAHARI 1974
	Soupe	Granulé	Maïs humide	1973 Farine	1977 Lactosérum	
Type d'alimentation						Non précisé
MST g/ l	104,9 (72,8-136,1)	68,5 (35-102)	53,2 (24,5-77,7)	65 (33-98)	42 (20-94,4)	60 (2-16)
NTK g/ l	9,9 (7,7-12,1)	6,9 (6,1-7,7)	4,9 (2,7-7,1)	5,7 (2,6-9,1)	3,2 (1,1-5,2)	4,0 (1,5-8,4)
P2 O5 g/ l	8,7 (5,9-11,5)	6,6 (4,4-8,8)	3,9 (1,3-6,5)	5,3 (2,1-8,6)	2,7 (0,5-7,5)	3,6 (2,4-5,2)
K2 O g/ l	3,3 (2,6-4,0)	2,4 (1,9-2,9)	2,2 (1,3-3,1)	3,1 (1,6-5,3)	3,0 (1,7-4,9)	3,2 (0,6-7,6)

(1) Entre parenthèses : valeurs extrêmes

TABEAU 4
COMPOSITION MINÉRALE (1)

Référence paramètre	HEDUIT et al. 1977	CT GREF (1977 - lactosérum)	KAHARI 1974	CT GREF 1975
Ca (% MS)	4,8 (3,2-11)	14 (0,5-4,8)	2,8 (1,4-3,5)	6,8
Mg (% MS)	1,5 (0,8-2,16)	0,46 (0,12-1,1)	0,7 (0,5-1,3)	1,6
Cu (ppm MS)	838 (348-1365)	— —	4,8 (96-846)	711
Zn (ppm MS)	576 (280-1200)	— —	345 (96-864)	541

(1) Entre parenthèses : valeurs extrêmes

TABLEAU 5
CHARGE POLLUANTE

Référence paramètre	I T P 1972 (1)	CT GREF Enquête 70-74 (2)	SALMON LEGAGNEUR (3)	JONES (4)
MES g/j porc	460 (a) 270 (b) 500 (c)	430	—	
DBO ₅ g/j porc	205 (a) 138 (b) 271 (c)	175	122 (d)	155 (b)
DCO g/j porc	537 (a) 329 (b) 537 (c)	600	333 (d)	570 (b)
DBO/DCO éq/hab.	0,38 3,8	0,29 3,2	0,38 2,3	0,27 2,8

(a) porc de 70 kgs (éq. porc)

(b) porc de 40 kgs

(c) porc de 100 kgs

(d) porc de 80 kgs

(1) (2) mesuré dans des conditions d'élevages

(3) cage de digestibilité

(4) moyennes

II. FERTILISATION PAR ÉPANDAGE DU LISIER

1^o/ Buts

L'épandage peut être défini comme «l'action d'étendre en dispersant sur le sol». Appliqué aux engrais tels que les effluents d'élevages porcins, la notion de répartition est doublée d'un but de fertilisation : rapporter aux sols les éléments fertilisants exportés par les plantes de la culture précédente.

Si le fumier a été de toujours apporté sur les champs, le lisier a longtemps été considéré comme un sous produit dont il fallait se débarrasser, d'où l'apparition de parcelles «décharges» dans certaines régions bien que l'exploitation disposât de surfaces suffisantes.

Or une évolution a marqué un nouvel intérêt pour la valeur fertilisante du lisier et l'épandage rationnel dans un but de fertilisation est de plus en plus pratiqué.

2^o/ Matériel

Les premières tonnes utilisées pour l'épandage des déjections liquides étaient les mêmes que celles utilisées traditionnellement pour le purin, tonnes à remplissage et vidange par gravité. C'est un matériel simple mais ancien.

Compte tenu de certaines contraintes que constituaient la texture et la composition du lisier (viscosité et matière sèche élevées), les différents constructeurs ont amélioré le matériel pour présenter un équipement à caractéristiques performantes. Ces tonnes se différencient surtout par le mode de remplissage et de vidange.

- compresseur d'air ou tonnes à vide
- pompe centrifuge
- pompe à vis
- remplissage direct (vidange par gravité).

Certaines sont équipées d'un dispositif de brassage qui évite la sédimentation et permet l'épandage d'un liquide homogène.

Les dispositifs d'épandage sont généralement constitués de platines d'éclatement ou buses latérales qui propulsent le lisier à des hauteurs relativement importantes. La largeur de la bande traitée est variable (2 à 8m) suivant l'inclinaison de la platine et le débit d'éjection du lisier. La dose de lisier apportée à l'hectare est fonction des deux paramètres cités précédemment ainsi que de la vitesse d'avancement du tracteur.

Ainsi la formule suivante permet de raisonner le chantier d'épandage pour apporter la dose requise de lisier : $G = \frac{q \times 0,6}{b \times V}$

- G : dose de lisier en m³/ha
- q : débit en litre par minute
- b : largeur d'épandage en mètres
- V : Vitesse d'avancement en km/h

b) Les doses à épandre

En fonction de ce que nous avons vu précédemment, les doses de lisier à épandre peuvent être calculées de façon relativement précise lorsqu'aucun handicap ne vient gêner le chantier d'épandage (bouchage de la tonne - embourbement du tracteur...)

Pour un épandage rationnel il est recommandé de se référer à l'analyse du lisier pour calculer, en fonction des exportations des cultures, les besoins en éléments fertilisants. Jusqu'à présent l'élément de référence est l'azote Kjeldhal ($N_{TK} = N_{org.} + N_{NH_3}$)

Or les éléments nutritifs d'un engrais organique sont libérés progressivement par minéralisation ce qui introduit la notion de coefficient d'utilisation. Le coefficient d'utilisation d'un élément nutritif (d'un fumier ou d'un lisier) est la quantité de cet élément, qui, sous forme d'engrais chimique, est susceptible de fournir la même augmentation de rendement que 100 kgs de cet élément dans la fumure organique. KOLENSBRADEN et DE LA LANDE CREMER (1972), ont empiriquement déterminé ces coefficients cités dans le tableau N° 6.

TABLEAU 6

	Fumier	Purin	Lisier
N	33 %	50 %	50 % printemps Labour 25 % automne
P ₂ O ₅	100 %	100 %	100 %
K ₂	100 %	100 %	100 %

COPPENET estime que 50 % seulement de l'azote est disponible la première année, et RILEY (1964) admet comme immédiatement assimilable 67 % de l'N, 75 à 80 % de P₂O₅ et 67 à 80 % du K₂O. Par contre RAUKE (1968) estime que 35 à 38 % d'N est disponible sur sols bruns podzoliques (effet résiduel de 10 % environ sur deux ans).

Il semble qu'actuellement l'efficacité des éléments nutritifs du lisier soit encore mal connu, en particulier pour l'acide phosphorique dont l'insuffisance dans les sols de nombreuses exploitations perturbe les résultats escomptés.

Il est donc possible d'envisager deux types de calcul.

- se référer à la teneur en N_{TK} diminué de 20 % (pertes par volatilisation) et calculer les doses à épandre en fonction des besoins en azote des plantes. Il est possible de majorer la première année de 50 % à 60 %.

- réaliser le même calcul à partir de l'élément qui serait apporté en excès et qui peut être alors considéré comme facteur limitant (P_2O_5 pour le lisier de porc).

Les périodes d'apport doivent également tenir compte :

- de la portance du sol
- du type de culture et de son stade végétatif
- du climat et des périodes d'interdictions
- de l'activité microbienne du sol

c) Conséquences de l'épandage sur le sol

● Devenir de la matière organique

L'action d'une fumure organique, fumier ou lisier, sur le sol ne peut être que bénéfique. En plus d'un apport de matières humiques, fumier et lisier apportent des microorganismes qui enrichissent la flore du sol.

La quantité de MO (1) donnant de l'humus stable est peu définie (contrairement à bien des affirmations, le lisier apporte de la matière humique).

COPPENET (1976) cite qu'une tonne de lisier à 100 kg de matière sèche apporte de 70 Kg de M.O. alors qu'une tonne de fumier apporte 200 Kg. Cependant SCHMIDT prétend qu'un épandage de lisier apporte 50 à 60 % de plus de M.O. que le fumier.

Il faut cependant préciser que certains auteurs donnent au mot «humus» une signification plus large que «l'appellation de la substance organique complexe à pouvoir absorbant très élevé». Parfois dans humus est inclus la quantité globale en carbone du sol.

Les acides fulviques s'associent normalement aux molécules d'argile par l'intermédiaire des ions Ca^{++} et Fe^{++} pour donner un complexe «argile» – acide fulvique dispersé.

– En sols acides et réducteurs les acides fulviques restent longtemps solubles et entraînent vers les nappes phréatiques, les éléments minéraux avec lesquels ils sont complexés (Fe^{++} – Al^{+++} et dérivés soufrés...).

– En sols aérés et suffisamment pourvus en Ca^{++} , la solubilité diminue en raison de la présence d'ions Ca échangeables.

Cette insolubilisation favorise la formation de complexes polymérisés stables qui constituent l'humus stable.

● Devenir de l'azote dans le sol

L'azote organique reste fixé dans le sol et subit une minéralisation plus ou moins importante suivant la date d'épandage et donc de l'activité microbienne du sol (figure N° 3). L'azote organique est transformé en ion ammonium et en nitrates nitrites (figure N° 4).

(1) M.O. : Matières organiques

FIGURE 3
 INFLUENCE DE L'ÉPOQUE D'APPLICATION DU LISIER
 SUR LA MINÉRALISATION DE L'AZOTE

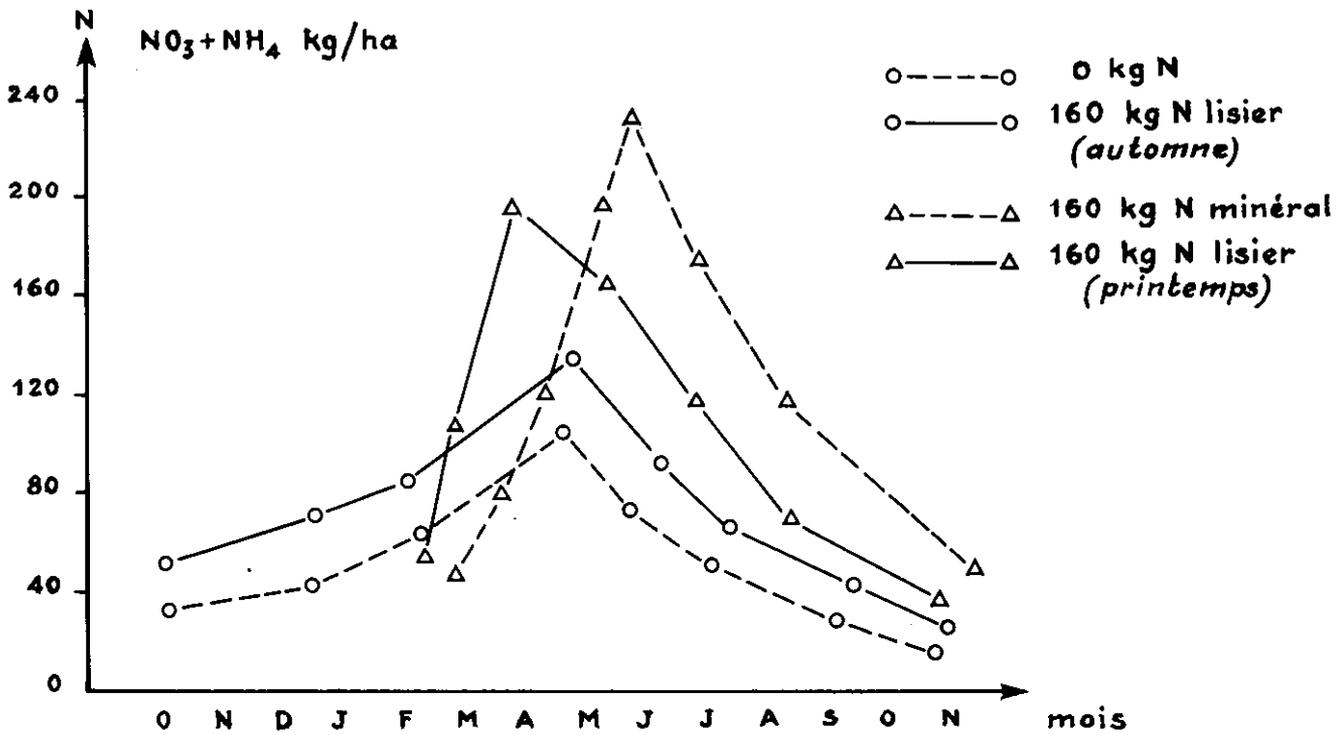
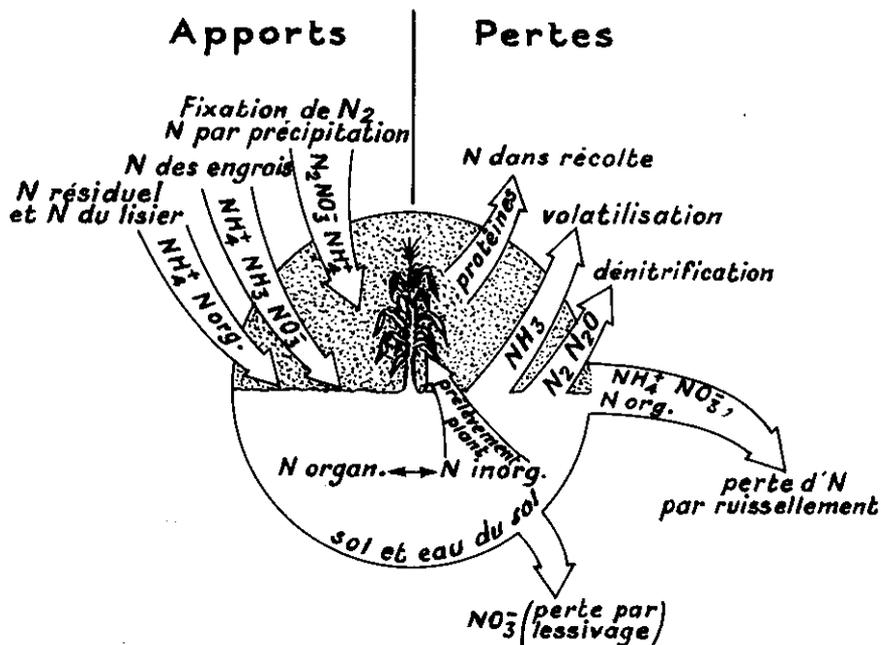


FIGURE 4
 MOUVEMENT DE L'AZOTE
 DANS L'ENVIRONNEMENT



– L'ion ammonium

Le cation NH_4^+ se fixe sur le complexe absorbant du sol et entre en compétition avec les autres cations Ca^{++} , Mg^{++} et K^+ .

La fixation du NH_4^+ favorise le lessivage des ions minéraux, ce qui augmente les phénomènes de battance des sols et la carence en magnésie.

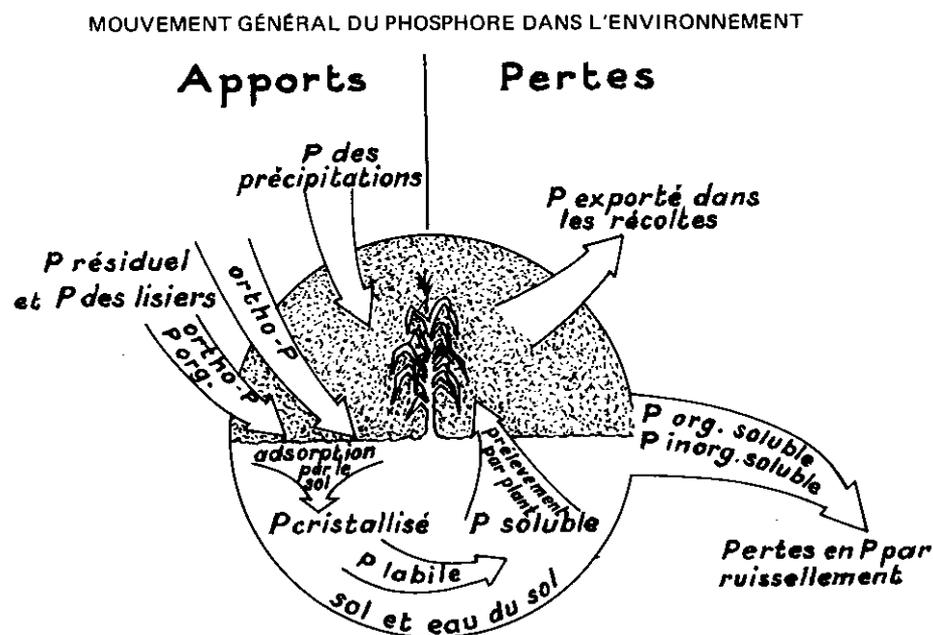
– Nitrites, nitrates

Ces composés qui sont particulièrement solubles peuvent être facilement entraînés dans les eaux de drainage, ce que l'on considère comme étant une perte d'azote par lessivage en profondeur. NO_2^- et NO_3^- sont les formes d'azote directement assimilable par les plantes.

● Devenir du phosphore

Selon GERRITSE (1976) 75 à 80 % du phosphore se trouve sous forme de composés minéraux non solubles qui sont fixés par le complexe absorbant du sol (figure N°5).

FIGURE 5



Les pertes par ruissellements sont plus importantes suivant la nature du sol, la dose de lisier apportée et le climat.

Le lessivage en profondeur est attribué à la migration de fines particules à travers les micro-porosités du sol.

● Devenir du potassium

Le potassium du lisier est sous forme minérale soluble. Le K^+ se fixe sur le complexe absorbant et des épandages répétés se traduisent par un enrichissement en potassium. Même avec de fortes doses, la quasi totalité reste sous forme échangeable et les risques de lessivage en profondeur ne concernent que les sols à faible CEC (1) (ex. : sols sableux)

(1) C.E.C. : Capacité d'échange de cations

● Les oligoéléments Cu-Zn-Mn

— Le cuivre

COPPENET a calculé que le lisier contenait de 9 à 47 ppm de cuivre selon le complément minéral utilisé. Le cuivre peut être

- immobilisé dans le sol sous forme de sels insolubles (phosphates de cuivre)
- cuivre échangeable sur le complexe absorbant, liaisons spécifiques très énergiques à de faibles concentrations
- cuivre chélaté par la matière organique qui reste mobile dans le sol.

— Le zinc et le manganèse

Le comportement du zinc est similaire à celui du cuivre.

En ce qui concerne le manganèse son «échangeabilité» est très variable et dépend du pH et de l'état d'aération du sol.

● Rôle épurateur du sol

Le lisier est un milieu de culture particulièrement riche en microorganismes pathogènes et non pathogènes (1). L'apport de lisier sur les sols introduit donc une microflore importante dont l'évolution n'est pas toujours bien connue.

Si le sol est bien pourvu en matière humique, les germes pourront se fixer sur cette dernière : mais ceci suppose une percolation lente et prolongée. Le sol peut alors jouer un rôle épurateur assurant une composition des eaux de drainage satisfaisante JAMBOU (1976). Ces eaux, si elles restent impropres à la consommation par la présence de germes de contamination fécale ne contiennent pas de germes pathogènes (salmonelles et shigella).

Par contre, les eaux de drainage présentent une composition chimique et une charge polluante qui permettraient un rejet en rivière (si l'on se réfère aux normes en vigueur).

Cependant, le rôle épurateur du sol, comme le montrent les tableaux suivants, cités par JAMBOU (1977) est fonction de la qualité du sol, de la pluviométrie et des doses de lisier apportées.

(1) En ce sens le lisier diffère considérablement des fumiers : lors du stockage en pile, le fumier s'échauffe fortement, ce qui assure une pasteurisation de la masse.

TABLEAU 7

(ÉVOLUTION DES RÉSULTATS MOYENS D'ANALYSE ENTRE JANVIER ET MARS)

Éléments recherchés	Janvier Moyenne (9 parcelles) (3)	Mars	
		Moyenne (2 parcelles) (4)	Témoin (5)
Débit des drains (1/s)	9	1	25
Analyses bactériologiques :			
– germes totaux à 22° / ml	10 ⁵	12.10 ³	700
– germes totaux à 37° / ml	35.10 ³	900	400
– coliformes / ml	15.10 ⁴	25.10 ³	12.10 ³
– Escherichia Coli / 100 ml	8.10 ⁴	7.10 ³	12.10 ³
– Streptocoques fécaux / 100 ml	8.10 ³	10 ³	40
– Salmonelles	0	0	0
Analyses chimiques			
– DCO mg/l	33	17	20
– DBO ₅ mg/l	5	3	1
– Azote total mg/l	1,7	0,2	0,3
– Ammoniaque (NH ₄) mg/l	0,3	0	0
– Nitrites (NO ₂) mg/l	0,01	0	0
– Nitrates (NO ₃) mg/l	10	18	16
– Phosphates (PO ₄) mg/l	2,7	2,3	0,4
– Potassium (K) mg/l	9	–	–

TABLEAU 8

VARIATIONS DES RÉSULTATS MOYENS D'ANALYSE D'EAUX PRÉLEVÉES EN JANVIER,
EN FONCTION DES DOSES DE LISIER APPLIQUÉES ET DU TYPE DE SOL

TYPE DE SOL	Sable limoneux	Limon moyen sableux	
		50 m3	
Dose de lisier appliqués / ha / an			20 m3
Date du dernier épandage	Automne 1973	Automne 1973	Automne 1973
Nombre de parcelles concernées	1 (1)	3 (2)	2 (3)
Analyses bactériologiques			
– germes totaux à 22° /ml	40	1 900	1 300
– germes totaux à 37° /ml	10	1 500	300
– coliformes /ml	700	43 000	800
– Escherichia Coli /100 ml	500	34 000	700
– Streptocoques fécaux /100 ml	2	200	10
– clostridium SR /20 ml	4	8	8
Analyses chimiques			
– DCO mg/l	9	13	21
– DBO ₅	–	–	–
– Azote total mg/l	0	0,7	1
– Ammoniaque (NH ₄) mg/l	0	0	0
– Nitrites (NO ₂) mg/l	0	0	0
– Nitrates (NO ₃) mg/l	24	22	11
– Phosphates (PO ₄) mg/l	0	0,7	0,1
– Potassium (K) mg/l	0,7	5,9	4,2

III. TRAITEMENTS PARTIELS : AVEC RETOUR AU SOL DU LISIER TRAITÉ.

Compte tenu de certaines difficultés auxquelles peuvent se heurter la technique de l'épandage du lisier brut, (concentration en MST - odeurs...) l'utilisation de traitements partiels ou prétraitements permet de limiter certains de ces inconvénients.

1^o/ Séparation de phase

Le lisier complet représente, comme nous l'avons dit précédemment, le mélange intime de fécès, d'urine et de refus d'aliment. Il contient donc une phase liquide (urine, eaux) et une phase solide (fécès, aliments, partie de litières). La séparation en deux phases permet d'obtenir :

- d'une part, un liquide moins chargé en MES et en MST mais conservant la valeur fertilisante du lisier brut (exprimée en concentration),
- d'autre part, un résidu solide, titrant 15 à 20 % de MST environ mais dont la texture permet une évolution sans odeur dans des conditions de stockage correctes. Ce refus représente la quasi totalité des résidus celluloseux et peut constituer un excellent amendement humide.

a) Granulométrie du lisier de porc

STAMBOULI, au cours des journées de la Recherche Porcine 1974 a montré la répartition MES en fonction de la taille des particules. C'est ainsi que 50 % environ des particules sont supérieures à 40 μ et 27 % supérieures à 800 μ .

La répartition des éléments fertilisants au sein du liquide est fonction de la solubilité relative des composés considérés. La charge polluante différenciée en pollution «soluble» ou «insoluble», est apportée à la fois par la fraction solide ou liquide.

Schématiquement, la DBO_5 représentant la charge biodégradable est apportée pour 80 % par le liquide et les particules inférieures à 40 μ . Inversement, la DCO du lisier est à 40 % due aux solides (400 μ) (STAMBOULI - 1974).

b) La séparation gravitaire solide-liquide

Le lisier au repos subit une sédimentation naturelle : les particules les plus lourdes se déposent alors que le surnageant ne contient que très peu de matières en suspension. Généralement, cette décantation naturelle n'est pas souhaitée. Améliorée, cette propriété peut avantageusement remplacer un équipement supplémentaire utilisé pour la séparation de phase. Les améliorations sont apportées par l'utilisation de flocculants qui favorisent et accélèrent le processus naturel.

Ces flocculants peuvent être des solutions minérales telles que les sulfates de fer ou d'alumine, ou des solutions de polyélectrolytes (cationiques pour le lisier).

Ces techniques ne sont pas généralisables dans la pratique pour l'instant. En effet, la méthodologie n'est pas encore transposable en vraie grandeur et l'apport de composés supplémentaires n'est pas toujours recommandé lorsque l'on utilise le lisier pour la fertilisation.

En effet, si le liquide clair peut facilement être pompé et épandu, la manutention du sédiment pose un nouveau problème : non stabilisé et à structure pâteuse il évoluera en fermentations anaérobies. De plus son humidité ne permet une reprise ni à la fourche ni par pompage. Le devenir le plus logique de ce sédiment est l'incinération.

c) Le tamisage

Un tamis est caractérisé par trois paramètres :

- charge des matières solides
- charge hydraulique du tamis
- durée d'alimentation

La charge en matières solides est calculée en tenant compte du débit et de la concentration du lisier en M.S. Elle est définie par la formule $Q_s = q \times c$ (Kg/h) – Q_s en Kg/h – q = débit m³/h – c = concentration g/l.

Les débits d'alimentation effectifs sont compris entre 3 et 6 m³/h pour un tamis statique et entre 6 et 12 m³ pour un tamis vibrant. Il existe généralement un trop plein qui assure une alimentation constante. La charge hydraulique du tamis s'exprime en rapportant le débit maximum admissible horaire à l'unité de surface filtrante. Ces deux paramètres conditionnent le troisième «durée maximum d'alimentation» pour lequel il faut en outre prendre en compte la résistance de la toile pour supporter le poids du gâteau.

Suivant les types de tamis, le gâteau sera essoré soit par pression (passage entre deux rouleaux) soit égoutté par vibration (tamis vibrant).

Le rendement d'un tamis est exprimé par le rapport suivant :

$$\frac{\text{concentration du liquide brut} - \text{concentration du liquide tamisé}}{\text{Concentration du liquide brut}}$$

Dans la pratique, la séparation de phase par tamisage est pratiquée sur des tamis dont les mailles sont de 400 à 500 μ . Ce diamètre des mailles a été choisi car il représente un optimum permettant d'obtenir un refus de tamis relativement peu humide (15 à 20 % de MS suivant les tamis utilisés) et un liquide dont 40 % des MES et 50 % des MST ont été éliminés.

La diminution du rapport DCO/DBO₅ correspondant à une diminution de la fraction non biodégradable du lisier, se traduit par une plus grande facilité de traitement du liquide et sera abordé dans le cadre de l'épuration.

Il existe sur le marché de nombreux types de tamis : tamis statiques, tamis vibrants, tamis rotatifs... dont les qualités et les performances peuvent être comparables.

L'utilisation d'un tel équipement tend à se développer dans les exploitations de 500 à 1000 porcs depuis quelques années.

Le tamisage, s'il n'assure pas la désodorisation, permet cependant d'obtenir un liquide à plus faible viscosité (par ailleurs, ce poste est impératif avant un traitement de désodorisation par lit bactérien).

d) Les centrifugeuses

La séparation solide liquide peut être effectuée par décantation centrifuge.

La centrifugation est assurée par un bol cylindroconique tournant à une vitesse supérieure à la vitesse du convoyeur d'alimentation. Les vitesses de rotation sont de l'ordre de 2000 à 3000 tours minute avec une vitesse différentielle de l'ordre de 30 tours minute.

L'efficacité de ces appareils est élevée et peut être encore améliorée par l'utilisation de flocculants.

Cependant, c'est un matériel relativement sophistiqué dont la généralisation dans une exploitation n'est pas pour aujourd'hui.

Elles sont plus souvent placées en tête de station d'épuration plutôt qu'utilisées comme pré-traitement (HAUBRY, 1973).

2°/ Désodorisation

Les fermentations anaérobies que subit le lisier au cours du stockage naturel sont responsables de la formation de composés volatils nauséabonds. Ils se dégagent au moment de l'épandage. Deux techniques sont passées dans la pratique :

- la désodorisation par produits d'addition,
- l'aération du lisier.

a) Désodorisation chimique

L'adjonction avant l'épandage de substances chimiques ou biochimiques permet de limiter l'intensité ou de modifier les odeurs de lisier. Ces produits ont une efficacité très variable, ainsi que l'ont montré de multiples essais comparatifs effectués ces dernières années (BERNARD, 1976).

b) Désodorisation par aération

Le but de cette technique est d'éviter, ou tout au moins de limiter, les fermentations anaérobies et d'oxyder certains composés. L'introduction d'oxygène au sein du liquide peut se faire par insufflation d'air, par aération de surface ou par ruissellement laminaire sur un matériau à grande surface d'échange.

● Lits bactériens

Dans le système à lits bactériens, les microorganismes aérobies sont fixés sur un support inerte. Le liquide à désodoriser ruisselle en couche mince sur ce support, qui présente des vides suffisants pour permettre à l'air de circuler, et une surface de contact importante pour favoriser une aération suffisante du liquide.

Les différents matériaux utilisés pour la constitution de lits bactériens se caractérisent par un pourcentage de vide important (au moins 80 %) et une surface spécifique élevée (en m² de surface par m³ de lit).

Le principe du lit bactérien peut être utilisé pour l'épuration biologique des lisiers (voir plus loin). Son emploi pour la désodorisation reste peu répandu.

Plusieurs installations ont été réalisées en France en utilisant des supports peu coûteux et rustiques : fagots de bois (dans l'installation expérimentale du CNEEMA), briques creuses empilées.

Le lisier doit être tamisé avant stockage, pour éviter que le lit bactérien ne se colmate. Le coût énergétique de l'aération est cependant plus faible que pour les autres systèmes de stockage aéré.

● L'insufflation d'air

Les appareils introduisent l'air soit par dépression soit par surpression. Ce système conduit à une formation de mousse et à une élévation de température.

● L'aération de surface (1)

Le matériel utilisé est généralement une turbine flottante (brassage d'un volume à niveau variable) placée directement dans la cuve. Le liquide est éclaté en gerbes, ce qui augmente la surface d'échange avec l'air et assure une dissolution de l'oxygène dans le liquide.

3°/ Compostage

Le compostage est une fermentation où sous l'action de micro-organismes aérobies le carbone des matières organiques se combine à l'oxygène pour dégager du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et des calories. Il en résulte une élévation de température pouvant atteindre 60°. Pour que cette fermentation se produise correctement, il est nécessaire que le produit ait certaines caractéristiques et soit dans des conditions favorables.

a) Caractéristiques du substrat à fermenter

Bien que l'on parle parfois de «compostage liquide» pour un type particulier de traitement des lisiers, la technique classique consiste à faire fermenter un produit «solide». Un certain nombre de conditions doivent être remplies pour que l'évolution soit correcte.

— Besoin en eau : une teneur minimale est nécessaire pour que les micro-organismes puissent se développer, d'un autre côté un excès d'eau empêche l'air de circuler entre les particules et provoque des fermentations anaérobies, génératrices d'odeurs désagréables. En général la teneur optimale se situe entre 50 et 60 % d'humidité.

— L'air : l'aération des tas en cours de compostage peut se faire de deux façons principales :

- . remuage des tas
- . injections d'air

(1) Les caractéristiques technologiques des différents dispositifs et techniques seront développés dans la mise au point sur la réduction des nuisances olfactives lors de l'épandage du lisier.

— Nature du substrat : celui-ci doit contenir des matières facilement fermentescibles une source de carbone importante et un rapport C/N correct. De plus la taille des particules ne doit pas être trop faible de façon à laisser circuler l'air assez facilement.

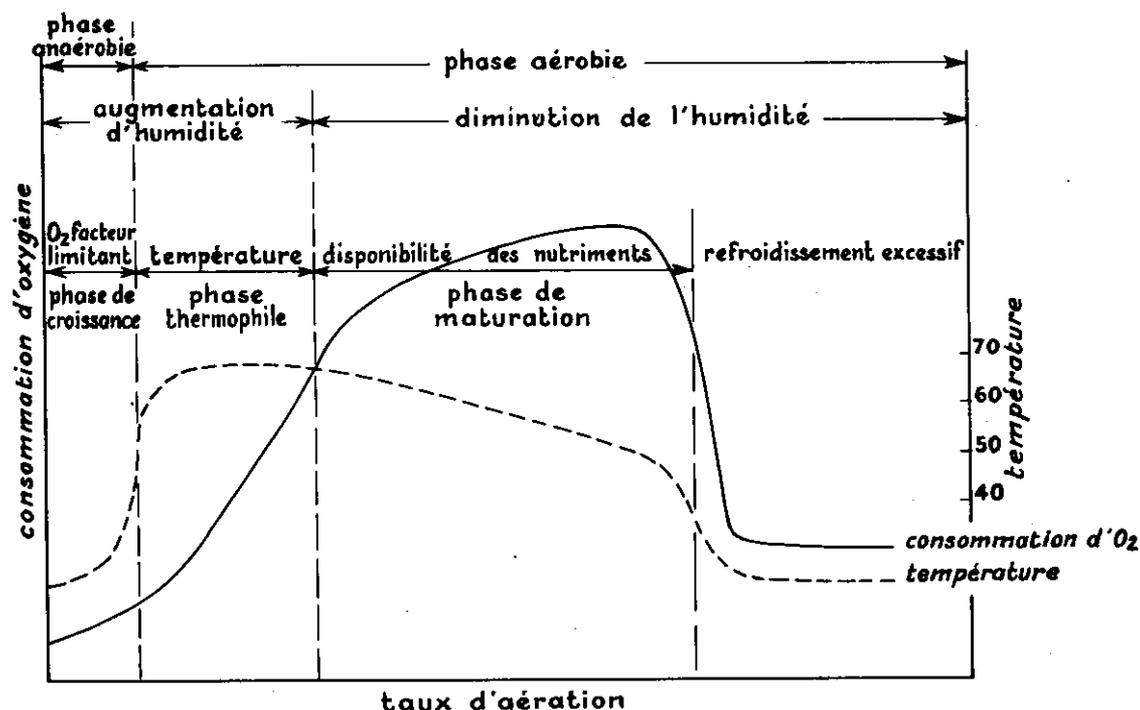
— Taille du tas : Celle-ci varie avec le mode d'aération : dans un tas trop volumineux l'aération est difficile, dans un tas de taille trop faible, les déperditions de calories sont trop importantes pour que l'activité de la flore soit intense.

b) Buts de la fermentation, évolution au cours du traitement

Le compostage a essentiellement pour but d'obtenir une température élevée pour aseptiser le matériau lui-même et d'aboutir à la production de **colloïdes humiques**. Ces deux processus sont dus à l'action, sur la matière organique, de microorganismes contenus dans les produits à traiter et qui prolifèrent dès que les conditions du milieu (air, eau, température) leur sont favorables. On peut distinguer plusieurs phases dans la fermentation, comme le montre la courbe théorique jointe. (figure N°6).

FIGURE 6

COURBES GÉNÉRALES THÉORIQUES DE CONSOMMATION D'OXYGÈNE ET DE TEMPÉRATURE EN FONCTION DE L'AÉRATION



- La phase de latence correspond au temps nécessaire aux microorganismes pour coloniser le milieu.
- la phase de croissance est celle de la montée en température. Elle dépend de la nature du substrat et est d'autant plus rapide que les deux facteurs principaux —air et eau— sont à leur optimum.
- La phase thermophile est celle de la plus haute température. Elle peut durer plus ou moins longtemps selon les conditions du milieu (eau, air), la richesse du substrat en matière organique et l'isolation thermique.
- La phase de maturation, ou de décroissance, correspond à une fermentation secondaire, lente, plus favorable à l'humification, c'est-à-dire à la transformation, sous l'action de microorganismes, de certains composés organiques en colloïdes humiques étroitement associés à des éléments minéraux (fer, calcium, azote, etc...) et finalement en humus.

La fermentation est considérée comme terminée lorsqu'après un retournement la température interne du tas ne remonte pas. Dans des conditions normales de fermentation, ce résultat est obtenu au bout de deux mois et demi à trois mois.

Les effets principaux de ce traitement, sont une réduction de la masse du substrat, une minéralisation, une stabilisation du résidu et une diminution importante du nombre de germes pathogènes par pasteurisation.

c) Application aux effluents d'élevage

Cette technique ne s'applique pas aux déjections prises telles quelles car les caractéristiques ne sont pas favorables, en particulier la teneur en humidité.

Il faut donc ajouter un substrat organique plus sec ou éliminer une partie de l'eau.

Dans le premier cas on ajoute traditionnellement de la paille, mais il est possible d'utiliser efficacement des copeaux, de la sciure ou de la tourbe.

Des refus de tamis obtenus dans de bonnes conditions forment un tas qui se tient et draine l'excès d'eau conduisant la plupart du temps à une fermentation du type compost.

Ce qui est obtenu en ajoutant de la paille et en laissant fermenter après une phase d'oxydation est du fumier. La paille peut être la litière des animaux.

Dans certains cas toutefois l'éleveur peut être amené à obtenir en un premier temps un lisier liquide (pour des problèmes d'économie de main d'œuvre, de manutention...) et à reconstituer ensuite un substrat compostable.

Si cette technique dans bien des cas consiste à obtenir un fumier à partir de la fermentation du mélange déjections-pailles et ne plus entrer dans le cadre d'un exposé sur les lisiers, elle peut être utilisée à la suite de l'obtention d'effluents liquides, après imprégnation d'un substrat ou par séparation des matières solides.

Cette étape peut être motivée par des raisons diverses : obligations de n'épandre que des produits solides, limitation des odeurs ou des germes pathogènes libérés lors de l'épandage, besoin en matière organique du sol, valorisation vers les cultures maraichères, problèmes sanitaires...

4°/ Le traitement anaérobie

L'anaérobiose est la condition «naturelle» de stockage traditionnel des lisiers, en effet leur charge polluante élevée fait que l'oxygène de l'air ne peut pénétrer à l'intérieur du liquide : or par traitement anaérobie, on entend surtout la fermentation méthanique et peu de fosses à lisier sont capables de se transformer spontanément en générateur efficace de ce gaz. Il faudra donc parler par analogie avec les traitements aérobies de traitement «tiède» ou mésophile.

La première phase qui s'effectue normalement dans une fosse, a parfois été envisagée comme pré-traitement, pour augmenter l'efficacité du procédé aérobie qui suit, mais la capacité de dégradation est très faible. La fermentation méthanique qui a fait et fait l'objet de nombreuses recherches permet par contre une dégradation beaucoup plus importante de la matière organique. Si l'on compare cette fermentation aux systèmes d'épuration aérobie, elle présente sur eux les avantages de la production d'un combustible titrant environ 50 % de méthane et la production d'une biomasse (boues) plus faible. Par contre l'efficacité de réduction de la charge polluante est plus faible et les caractéristiques physiques, décantabilité de l'effluent, sont moins bonnes, ce qui fait que la digestion anaérobie ne peut permettre un rejet dans le milieu naturel. Elle est donc considérée comme un traitement partiel préparant un épandage ou un traitement secondaire avant rejet.

a) Rappel sur la fermentation méthanique :

Elle est divisée classiquement en deux étapes : dans la première étape les hydrates de carbone (cellulose — hémicellulose) sont dégradés en sucres (cellobiose — sucres simples) puis en acide gras volatils (A.G.V.), qui, dans la deuxième étape servent de substrats aux bactéries méthanogènes.

On a donc affaire à un équilibre entre deux populations bactériennes.

- les acido-formateurs (AGV formateurs)
- les méthanogènes, présentant des exigences de milieux beaucoup plus strictes.

L'évolution des substrats sous l'action des acido-formateurs est sensiblement la même quelle que soit la température. On assiste à l'apparition des AGV dans l'ordre suivant de concentration :

$$C_2 > C_3 > C_4 > iC_4 > iC_5,$$

mais le processus s'inhibe de lui-même : une forte teneur en AGV bloque toute poursuite de l'attaque, ce qui explique l'efficacité limitée que l'on peut attendre d'un traitement anaérobie qui ne présenterait que cette dernière phase.

Dans la deuxième phase les méthanogènes ne pourront s'installer que si certains paramètres sont respectés (pH, concentration en AGV : température). Dans ces conditions on n'assistera pas à l'accumulation des acides gras volatils et on pourra atteindre une dégradation plus complète du substrat.

b) Bilan

Si l'on veut tenter un bilan des recherches entreprises sur ce sujet pendant les dix dernières années, il convient de séparer deux types de recherches :

- *Les études entreprises par les pays en voie de développement (INDE - CHINE DE FORMOSE)*

Il s'agit là de produire de l'énergie au niveau de l'exploitation familiale ou même du village, dans un contexte social et économique totalement différent du nôtre.

L'accent a donc été mis sur le développement de la technique et l'installation d'un grand nombre de petites unités, avec des moyens de fortune fonctionnant sans aucune infrastructure (chauffage - agitation).

- *Les études entreprises par les pays « industrialisés ».*

Elles ont d'abord été entreprises dans le cadre de la lutte contre la pollution et ce n'est que lorsque le problème de l'énergie s'est posé avec la gravité qu'il a aujourd'hui que l'on s'est retourné vers ce qui avait déjà été utilisé en période de crise à savoir la production du « biométhane » (DUCELLIER, ISMAN). Or le système commence à être mieux connu sur le plan théorique (BRYANT, 1976) et il semble que l'on puisse fixer ses potentialités : les effluents d'élevages ne diffèrent pas sensiblement des autres substrats et en particulier des boues de station d'épuration. Les rendements en gaz observés varient de 0,4 à 0,5 m³ gaz/kg de matière organique introduite suivant le mode de fonctionnement du digesteur. (LAPP - SUMMERS - ROUSTAN)

Mais les systèmes actuels ne présentent pas toujours un bilan énergétique satisfaisant en particulier l'agitation des digesteurs consomme une part importante de l'énergie produite, de même le chauffage qui peut absorber jusqu'à 50 % de la production (LAPP).

Si l'on reprend les données de l'équipe de chercheurs anglais, les résultats obtenus avec les lisiers de porcs sont les suivants :

– Digesteurs de 15 m ³ fonctionnant avec le lisier de 250 à 300 porcs	}	Production de 25 m ³ de gaz par jour dont 9,9 utilisés pour chauffer le système
– Temps de répartition : 10 jours		
– M.S. à l'entrée : 6 à 7 %		
– Température : 35 °C		

Il reste 15,1 m³ de gaz, soit l'équivalent thermique de 100 KWh d'électricité. L'agitation consommant 20 KWh, le système est donc excédentaire, mais de tels chiffres ne doivent pas faire oublier que l'équipe du ROWETT travaille depuis près de sept ans sur ce matériel.

De plus, si l'on utilise un lisier dilué à 4 % de M.S., pour un temps de séjour de 20 jours, le gaz produit permet de compenser uniquement le chauffage nécessaire pour une température ambiante de 5 °C.

Le traitement anaérobie avait connu un certain développement pendant et après la deuxième guerre mondiale (ISMAN). Par suite de la facilité d'approvisionnement en énergie, il a été progressivement abandonné et le nombre des installations de gaz de fumier encore en fonctionnement est très faible. Parmi les causes de son abandon, il faut aussi citer les manipulations (remplissage - vidange du fumier) ou même l'abandon de l'emploi de la litière. Quel peut être aujourd'hui son avenir ? Il semble difficile de voir là une source d'énergie pour l'agriculture.

Des études économiques réalisées dans le contexte des USA montrent que les installations ne seraient rentables qu'en deçà de 3000 porcs (JEWELL, 1975). Par contre si l'efficacité de ce traitement comme système de désodorisation se confirmait, on aurait alors un système qui entrerait en compétition avec les traitements de désodorisation par aération présentant par rapport à ces derniers l'avantage de conserver la valeur fertilisante du substrat et de produire un sous-produit utilisable comme source d'énergie.

Enfin dans le contexte des pays en voie de développement, ce système représente une source d'énergie non négligeable.

Comme autre procédé généralement associé à la fermentation anaérobie, il faut citer la pyrolyse. La pyrolyse consiste à chauffer à haute température en vase clos (fortes pressions), on récupère en général trois phases :

- 1 phase solide : charbon
- 1 phase liquide renfermant des huiles et des produits chimiques tels les cétones et alcools
- 1 phase gazeuse CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , $\text{C}_n \text{H}_m$

mais l'énergie contenue dans ces produits de réactions ne permet pas en général de compenser la dépense nécessitée par le traitement. En particulier pour des déjections à haute teneur en humidité (cas du lisier) la chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau est trop importante.

IV - TRAITEMENT COMPLETS : SANS RETOUR AU SOL DU LISIER

L'épuration complète des déchets liquides s'applique lorsque leur épandage après désodorisation est impossible. Dans cette éventualité, il est nécessaire d'éliminer le plus complètement possible les matières organiques avant le rejet dans le milieu naturel.

La méthode de traitement utilisée est généralement la voie biologique où les matières organiques sont consommées par une flore bactérienne aérobie. Cependant des traitements physico-chimiques divers ont été proposés ces dernières années.

1^o/ Traitements physico-chimiques

Les traitements physiques et physico-chimique sont couramment employés pour assurer une séparation des matières en suspension et du liquide. Cette séparation plus ou moins complète est largement répandue en tant que traitement partiel. Le liquide résiduel reste chargé en matières colloïdes et matières dissoutes, qui représentent jusqu'à 95 % de la DBO_5 et 89 % de l'ion ammonium NH_4^+ .

Ainsi l'application de chaînes de traitements physico-chimique a été essayée sur le lisier de porc. Ces traitements sont employés dans certains cas sur des effluents industriels non biodégradables, ou des effluents domestiques. Ils consistent généralement en floculation-décantation et stabilisation chimique des boues, pouvant être suivis de traitements complémentaires de la phase liquide : Filtration, désinfection, etc...

Pour le lisier, la phase liquide contient une forte proportion de matières organiques biodégradables. Dans des expérimentations anglaises de décantation-floculation sur lisier (teneur en matière sèche variant de 28 à 43 ‰) on a obtenu des liquides décantés à concentration moyenne en DCO de 5,6g/litre, et DBO_5 de 3,5g/litre. Des traitements chimiques sont alors nécessaires pour parfaire l'épuration.

Plusieurs études ont été réalisées aux Etats Unis (LOEHR, 1975) :

- sur la désorption de l'ammoniac en amenant le liquide à un pH supérieur à 10,
- sur la déshydratation de l'effluent par addition de sulfate d'alumine, chlorure ferrique et de chaux.

Ces derniers traitements ont abouti à de bons résultats techniques mais avec de fortes productions de boue supplémentaire.

La plupart des travaux expérimentaux ont souligné la complexité des opérations et des réglages, la multiplicité des facteurs de variation et les coûts d'exploitations très élevés. Ainsi il semble bien que les filières de traitement physico-chimique utilisées couramment dans d'autres domaines sont inapplicables économiquement aux lisiers. En raison de la concentration initiale importante en MST du lisier, la forte production de boues résultant d'un traitement physico-chimique poserait un problème au moins aussi important que celui de l'épuration proprement dite.

La déshydratation, proposée comme traitement, est fréquente pour les déjections avicoles. Mais le lisier de porc a une teneur en extrait sec beaucoup plus faible et, même en limitant en apports d'eau extérieure au minimum, il faut évaporer de 4 à 5 litres d'eau par porc et par jour pour obtenir un produit sec stockable à 15 % d'humidité.

La déshydratation produit également des gaz et des poussières qu'il faut éliminer avant rejet dans l'atmosphère.

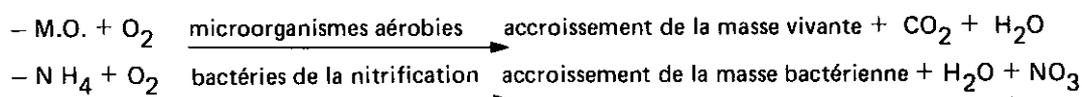
Le produit sec est utilisé comme engrais, et pourrait être éventuellement incorporé à l'alimentation animale. La déshydratation peut également s'appliquer au séchage des boues d'un traitement physico-chimique. Ce procédé est coûteux et doit fournir un produit commercialisable pour pouvoir être pris en considération. Les procédés physico-chimiques n'ont pas donné lieu à un type de traitement économiquement applicable au lisier de porc. Les avantages spécifiques de ce genre de traitement (adaptation rapide aux variations de charge, aptitude à traiter des effluents non biodégradables, encombrement réduit des installations) ne présentent que peu d'intérêt pour les traitements d'effluents d'élevage. Certaines opérations de traitement à caractère physico-chimique peuvent cependant être utilisées en traitement partiel ou prétraitement avant épuration.

2^o/ Traitements biologiques aérobies

a) Théorie :

Un système de traitement biologique se caractérise par le développement contrôlé d'une culture bactérienne aérobie qui théoriquement transforme les matières organiques du lisier en matière vivante, en composés oxydés, en eau et en gaz carbonique.

L'évolution du milieu peut se traduire par les équations simplifiées :



Les conditions de vie de la culture bactérienne sont réglées en grande partie par l'apport de matière organique caractérisé par la **charge massique**, (rapport entre la quantité journalière de DBO_5 apportée et la quantité de microorganismes actifs dans le système) et par la **quantité d'oxygène** introduit. Lorsque la charge est forte, la croissance de la masse vivante est importante et une fraction relativement faible des matières organiques est oxydée, la plus grande partie étant utilisée pour la croissance bactérienne. Aux plus faibles charges, l'oxydation atteint partiellement la matière vivante des microorganismes (respiration endogène). L'épuration est poussée et la masse de boues résiduelles réduite.

Dans tous les cas, l'apport d'oxygène aux microorganismes est assuré par l'oxygène dissous du liquide. Sa vitesse de consommation est proportionnelle à la vitesse de croissance bactérienne : il est donc nécessaire d'introduire une quantité au moins égale d'oxygène.

En régime stable, le transfert d'oxygène dissous se traduit par les équations :

$$R = K^1_T (C^1_S - C^*_S)$$

$$\frac{dC}{dt} = K^1_T (C^*_S - C)$$

R = respiration de la culture bactérienne (boue)

K^1_T = coefficient de transfert d'oxygène dans le liquide à la température T , proportionnel au coefficient (K_T) du transfert en eau claire.

C = concentration d'oxygène dissous au temps t .

C^1_S = concentration d'oxygène dissous à saturation.

C^*_S = concentration d'oxygène dissous à l'équilibre.

La culture bactérienne est soit fixée sur un support inerte, soit maintenue en suspension dans le liquide à épurer. Les systèmes d'aération du liquide sont très différents dans les deux cas.

b) Particularités du traitement aérobic des lisiers.

* **Biodégradabilité** : Elle est généralement caractérisée par la DBO_5 et par son rapport à la DCO. Le rapport DCO/ DBO_5 des lisiers est relativement élevé (de 2,50 à 3,50 environ).

Une forte part de la DCO (au moins 40%) est due à l'importance des matières solides, essentiellement cellulosiques, qui ne représentent qu'une faible part de la DBO_5 et ne sont donc que très faiblement dégradées par un traitement aérobic conventionnel à temps de séjour limité. Les matières en suspension non biodégradables contribuent à augmenter la concentration en MES de la liqueur aérée, et se retrouvent dans les boues en excès qui sont extraites.

* **Temps de séjour et besoins en oxygène.** Le temps de séjour de l'effluent, obtenu par le rapport du volume du bassin au volume journalier introduit, est généralement assez long pour un traitement de lisier. Dans ces conditions les besoins en oxygène du système sont généralement supérieurs à ce qui peut être déduit du calcul des charges en DBO_5 de l'effluent à traiter.

Si la teneur en oxygène dissous est suffisante (1 à 2mg/litre au moins), une population bactérienne nitrifiante se développe. Ces bactéries autotrophes (Nitrosomas et Nitrobacter) oxydent l'ion ammonium en nitrite (NO_2) puis en nitrate (NO_3) et cette oxydation crée une demande supplémentaire en oxygène. D'après des travaux américains et anglais, l'oxydation d'un milligramme de NH_4 utilise 4,33 mg d'oxygène. Cette demande en oxygène doit s'ajouter à celle due à l'oxydation des matières organiques carbonées.

c) Principaux types de traitements aérobies.

Suivant que la culture bactérienne est fixée sur un support ou en suspension dans le liquide, on distingue :

- les systèmes à culture fixée : lits bactériens
- les systèmes à culture en suspension : boues activées lorsque la concentration des microorganismes est contrôlée.
- lagunage aéré, lorsque la concentration des boues n'est pas maîtrisée.

● LITS BACTÉRIENS

La culture bactérienne est fixée sur un support inerte, et forme un film bactérien sur lequel ruisselle l'effluent à traiter. L'aération s'effectue par contact entre l'air et le liquide qui circule en couche mince sur le support. Le bon fonctionnement d'un lit bactérien dans le cas d'un effluent de porcherie nécessite une séparation préalable des matières en suspension grossières, par tamisage, pour éviter le colmatage du lit, et une charge hydraulique suffisante pour entraîner les boues en excès (autocurage du lit).

La forte concentration des effluents à traiter suppose l'emploi de matériaux - supports appropriés - présentant un pourcentage de vide important (90 à 95 %).

Plusieurs stations utilisant ces matériaux ont été réalisées en Grande-Bretagne (A.R.C. 1976) et en France. Les charges appliquées sont fortes (2 à 3 kgs DBO_5 / m³ et par jour) et les rendements d'épuration observés ne dépassent pas 90 % pour la charge en DBO_5 (pour une installation à 2 étages de lits bactériens).

Le liquide à épurer est recyclé plusieurs fois sur le lit et le taux de recyclage est généralement élevé. Ce recyclage augmente la consommation énergétique du système qui est cependant relativement faible par comparaison avec d'autres systèmes aérobies. Le film biologique s'épaissit et se détache périodiquement par lambeaux. Ces boues en excès doivent être séparées par décantation. La charge résiduelle de l'effluent décanté est cependant généralement trop forte pour permettre un rejet en rivière. L'effluent décanté peut alors être épandu par un système d'aspersion semi-mobile (irrigation).

Dans les expériences anglaises, les boues issues des lits bactériens sont floculées chimiquement, (chlorure d'alumine) et la séparation se fait par filtration gravitaire (paille, toile grossière), ou décantation simple.

● BOUES ACTIVÉES

La masse des microorganismes est maintenue en suspension dans le liquide agité et aéré. Les bactéries forment des amas floconneux agglomérés par une masse mucilagineuse, incluant généralement des particules inertes en suspension, ce qui constitue la boue activée: Sur ces particules, se développe une microfaune de protozoaires caractéristique. Après aération, le liquide est décanté pour séparer le surnageant rejeté dans le milieu naturel (rivière) et les boues plus concentrées, dont une partie est recyclée pour maintenir constante la concentration en boues du bassin d'aération. Une station d'épuration à boues activées comporte un prétraitement (éventuel) un bassin d'aération et un décanteur secondaire. L'excès de boues est retiré périodiquement du système et est ensuite deshydraté, naturellement sur des lits de séchage, artificiellement par centrifugation, ou peut encore être épandu sous forme liquide sur des terrains de culture.

Le système d'aération se fait par aération de surface (turbines ou brosses) ou par insufflation d'air comprimé, produit par un surpresseur.

Dans ce dernier cas, l'air est introduit par des ouvertures assez larges (quelques mm de diamètre) pour éviter les risques de bouchage, ce qui entraîne un rendement très faible du système.

Les aérateurs de surface employés, peuvent être soit des brosses horizontales, dans des bassins adaptés (chenal d'oxydation), soit des turbines à axe vertical, à vitesse de rotation lente ou rapide.

Tous ces dispositifs assurent l'introduction d'oxygène dissous et l'agitation du milieu nécessaire pour éviter tout dépôt de matière en suspension dans le bassin. Le même matériel est utilisé pour les traitements de désodorisation aérobie.

Le rendement d'épuration est d'autant meilleur que la charge est plus faible. En appliquant une charge volumique (rapport de la quantité de DBO_5 journalière arrivant sur le volume contenu dans le bassin) de 0,1 à 0,3 kg DBO_5 /m³ on peut obtenir des abattements supérieurs à 95 % et même 99 % de DBO_5 et supérieurs à 90 % pour la DCO. La consommation électrique peut être de l'ordre de 2 KWh/kg DBO_5 éliminé (BALLAY et al., 1974).

Il faut noter que l'épuration réalisée par les microorganismes aérobies concerne surtout la fraction soluble et colloïdale du lisier, et qu'il reste à l'issue du traitement une quantité importante de boues en excès.

La DCO apportée par les particules grossières est peu touchée par le traitement, et il donc envisageable d'éliminer ces matières en suspension avant l'épuration biologique proprement dite. Il reste que dans de nombreux cas où le lisier n'est pas ou peu dilué, le volume des boues en excès représente une fraction non négligeable, parfois équivalente, du volume du lisier brut produit (de 0,3 à 0,8 m³ par porc engraisé).

Le traitement par boues activées du lisier reste donc une solution coûteuse et complexe. Son utilisation peut s'envisager dans les cas du lisier très dilué par des eaux de lavages, ou lorsqu'un traitement biologique commun peut être effectué avec d'autres effluents plus dilués (cas des porcheries associées aux fromageries). Le volume des boues résiduelles stabilisées obtenu est alors bien inférieur au volume du lisier issu de l'élevage.

La généralisation de ce procédé d'épuration ne connaît pas encore un développement important en agriculture.

● LAGUNE AÉRÉE

Cette technique consiste à laisser séjourner l'effluent pendant un temps assez long dans un bassin simplifié où on maintient des conditions aérobies au moyen d'un système d'aération mécanique ou à diffusion d'air. On favorise ainsi le développement de microorganismes aérobies qui assurent l'épuration.

La concentration en matières en suspension qui s'établit à l'équilibre dans la lagune dépend de la charge appliquée et de l'agitation. Elle est toujours plus faible que dans un système de boues activées, car les boues entraînées par l'effluent épuré ne sont pas recyclées.

La production de boues en excès correspondant à la croissance de la culture bactérienne est évacuée en grande partie avec l'effluent traité. Le reste sédimente au fond du bassin où se produit une évolution anaérobie. En effet l'agitation due aux dispositifs d'aération est généralement insuffisante pour maintenir la totalité de la matière vivante en suspension.

Le bassin d'aération est généralement creusé à une profondeur de 2 à 3,5 m de profondeur, sans étanchéité artificielle si le terrain est assez peu perméable. En terrain perméable, il est nécessaire d'utiliser une bâche d'étanchéité souple, ou une couche rapportée d'argile compactée. Le système d'aération est simple (turbines flottantes à vitesse rapide, par exemple).

Le bassin d'aération doit être suivi d'un ou plusieurs bassins de décantation, de construction également rustique. Dans ces bassins, les matières en suspension de l'effluent épuré se déposent et s'accumulent. Le bassin de décantation doit être curé périodiquement (tous les 3 à 4 ans) et il est donc intéressant de pouvoir disposer de deux bassins utilisés en parallèle.

Dans ce type de procédé, on recherche d'abord la facilité d'exploitation, et la rusticité des composants. Il s'agit d'un procédé plus extensif que celui des stations d'épuration à boues activées, mais il est bien adapté à l'utilisation en milieu agricole. Il est répandu aux États-Unis, et plusieurs installations fonctionnent en France.

Des expérimentations et observations effectuées en France permettent de préciser certaines règles de construction (STAMBOULI, 1974). Ainsi un prétraitement par tamisage à 400-500 μ , réduit de moitié le volume des dépôts dans le bassin d'aération, en éliminant avant tout traitement une grande partie de la DCO peu biodégradable.

Le temps de séjour préconisé dans le bassin d'aération est d'une centaine de jours. Cette valeur élevée, permet une minéralisation plus complète des boues, c'est-à-dire une production et une accumulation moindre dans les bassins de décantation. Le choix d'une puissance d'aération suffisante permettra de limiter les dépôts dans le bassin d'aération, et de transférer ceux-ci dans les bassins de décantation où les curages peuvent se faire plus aisément.

Des rendements d'élimination de DBO_5 (sur effluent décanté) de 98 % ont été observés pour des temps de séjour d'une centaine de jours.

Les rendements d'élimination de l'azote (azote Kjeldahl) vont de 60 à 70 %. Si la teneur en oxygène dissous est supérieure à 1 - 2 mg/litre, une flore nitrifiante peut s'établir.

Le lagunage aéré supporte assez bien (à cause du long temps de séjour) les variations brusques de débit et de charge.

Le rendement d'épuration peut varier avec la saison, en particulier dans les régions où les différences de température sont importantes entre l'hiver et l'été.

CONCLUSION

Jusqu'à ces dix dernières années, la considération des problèmes concernant la dégradation de l'environnement, n'était pas en France, particulièrement développée.

Depuis la dernière décennie, la prise de conscience de la « qualité de la vie » rend le public beaucoup plus sensible aux risques de pollution et aux nuisances perçus dans son environnement.

Dans le domaine agricole, les contraintes de législation et de traitement susceptibles de limiter, voire de supprimer toute atteinte à la qualité de notre patrimoine naturel (sol-air-eau) deviennent de plus en plus strictes.

Un certain nombre de solutions, présentées dans cet article montrent que, techniquement, il est possible de faire face aux contraintes requises.

En ce qui concerne l'épuration du lisier, la transposition des systèmes de traitement appliqués sur les eaux résiduaires urbaines aux traitements du lisier a prouvé que les installations classiques devaient être modifiées pour obtenir des rendements similaires. De par sa concentration et à cause de la présence d'une importante charge inerte du lisier, le système de traitement le mieux adapté est le lagunage aéré. Ce lagunage aéré peut en outre subir de fortes variations de charge (cas fréquent en agriculture) sans que la qualité de l'effluent n'en soit affecté (temps de séjour très long).

La prise de conscience de la valeur fertilisante du lisier a suivi la crise de l'énergie et le renchérissement des engrais. L'utilisation rationnelle des lisiers et l'adaptation de la fumure aux besoins des cultures permet de concilier les contraintes de pollution et d'économie d'engrais. Cependant l'extrapolation de l'expérience acquise repose sur l'utilisation du fumier comme fumure organique : la transformation en compost est, à ce point de vue celle qui permet la meilleure transposition des connaissances en fertilisation.

Parallèlement, le problème des nuisances olfactives liées à l'utilisation des déjections animales comme fertilisant s'intensifie. Cet aspect social est souvent le frein le plus important à la création de nouveaux élevages et réduit de beaucoup la surface accessible à l'épandage. Parmi les solutions proposées, la plus logique consiste en une désodorisation par aération, qui va entraîner, en fait, à l'épandage, l'apparition de nouveaux produits, les lisiers désodorisés, alors que l'on ne connaît pas suffisamment l'épandage du lisier non traité.

Enfin on s'est aussi adressé au lisier comme source d'énergie : par l'intermédiaire de la technique de fermentation du fumier donnant le «gaz de fumier» utilisé pendant et après la deuxième guerre mondiale. Certes, le système avait fait ses preuves dans un contexte économique différent et là encore, l'extrapolation des techniques utilisées auparavant paraît difficile : on ne dispose plus de fumier mais d'un substrat pompable, donc plus facile à manipuler, mais dont les potentialités méthanigènes sont plus faibles.

La fermentation méthanique est le seul procédé directement producteur d'énergie que l'on puisse envisager à partir de déchets liquides tels que les lisiers.

Un dernier point qui n'a pas été abordé dans les chapitres précédents, est la réutilisation des déjections dans l'alimentation animale. Ce système a été étudié en particulier aux U.S.A. mais son utilisation en France est interdite par le législateur.

Dans la plupart des exploitations «en sol» l'épandage reste la voie d'utilisation du lisier la plus justifiable, mais demeurent les questions de savoir comment l'envisager et l'adapter aux conditions locales de sol, de culture et de climat.

De nombreuses recherches, tant en France qu'à l'étranger, nous permettront dans quelques années d'avoir une information précise sur les conséquences et les modes d'utilisation du lisier.

Cependant les autres techniques d'élimination ou de valorisation ne sont pas à rejeter et demandent encore à être perfectionnées. Le choix entre les diverses solutions doit tenir compte du complexe : topographie du lieu - législation départementale - coût d'exploitation du procédé.

La solution sera celle qui optimisera chaque paramètre de l'équation

BIBLIOGRAPHIE (1)

1 - Généralités

- 1973. Development and demonstration of nutrient removal from animal wastes. E.P.A. R2. 73. 095
- Agricultural and Environment, 1976. Seminar on odour characterisation and odour control. Gand (sous presse)
- Agricultural Research Council, 1976. Studies on farm livestock wastes 156 pp.
- A.S.A.E., 1971. Livestock waste management and pollution abatement. Publication PRO 271
- A.S.A.E., 1975. Managing livestock wastes. Publication PRO 275. 633pp.
- Commission des Communautés Européennes, 1976. Utilization of manure by land spreading. EUR 5672 e

(1) Les communications aux Journées de la Recherche Porcine auxquelles cette étude fait référence figurent dans la liste donnée p 22.

- E.N.S.P. de Rennes, 1973. Séminaire sur la réduction des nuisances des porcheries.
- JAENISCH D., ENGERT K., FRANZ W. et TACK F., 1974. Résultats de recherches sur la consommation d'eau et la production de lisier en porcheries industrielles. *Tierzucht'* 1974, 561-564.
- LOEHR R.C., 1974. *Agricultural waste management*. Academic Press ed. 574 pp.
- Midwest Plan Service, 1975. *Livestock wastes facilities Handbook*. 94 pp.
- Midwest Plan Service, 1975. *Livestock waste management with pollution control*. 88pp.
- STRAUCH D. et al' 1977. *Afalle aus der Tierhaltung Ulmer* ed.
- TAIGANIDES E.P., 1977. *Animal wastes*. 428 pp. Applied Science

2 - Études particulières

- Agriculture Canada' 1974. *Methane gaz production from animal wastes* Canada Department of Agriculture, Ottawa ed.
- BALLAY D. et CATROUX G., 1974. Possibilités de limitation des nuisances et des pollutions dues aux élevages porcins. *Annales Agronomiques* 25, 351-381.
- BAKER D.E., 1974. Copper : soil, water, plant relationships. *Proc. Fed. Am. Soc. Exp. Biology* 33 (5), 1188.
- BARLOY J., 1973. Aspects agronomiques de l'épandage du lisier de porc. Séminaire sur la réduction des nuisances des porcheries. E.N.S.P de Rennes.
- BOON R., de VENTER J., 1976. La valeur fertilisante du lisier porcin appliqué sur céréales. *Revue de l'agriculture* 6, 1457-1479
- BRYANT M.P., 1977. The microbiology of anaerobic degradation on methanogenesis with special reference sewage, in *Microbiol Energy Conversion*. 644pp. Pergannon Press éd.
- CHESNIN L., 1976. A new look at animal wastes as fertilizer, in *farm range and home quarterly*, tome 22, n° 4
- COPPENET M., 1974. L'épandage du lisier de porcherie : ses conséquences agronomiques. *Ann. Agron.* 25 (2-3), 403 - 424.
- COPPENET M., 1976. Le lisier et son utilisation agronomique. Congrès International de Reggio - Emilia (Italie).
- C.T.G.R.E.F. de Rennes, Division de la production porcine et des élevages industriels. Influence des apports de lisier de porcheries sur les propriétés physiques et chimiques des sols.
- DUCELLIER SAUZE, 1976. *Le méthane biologique*, France Viticole.
- FRY L. J., 1975. *Practical building of methane power plants*. 96pp. Knox D.A., éd. Andover (Hampshire) U.S.A.
- GERRITSE R.G., 1976. Phosphates compounds in pig slurry and their retention in the soil, in *E.E.C Seminar on land spreading manure (Modena - Italie)*
- de HAAN F.A.M., LEXMOND Th. M. et DIJKMAN F., 1976. Aspects of Cu accumulation in soil following hog manure application, in *EEC Seminar on land spreading manure (Modena - Italie)*
- HOBSON P.N., SHAW B.G., 1973. The anaerobic digestion of waste from on intensive pig unit. *Wates Research* 7, 437 - 449.
- JAMBOU M., 1977. Les lisiers de porcheries : caractéristiques, effets sur le sol et les eaux de drainage. *Bull. Techn. Inform.* 321.

- JEWELL W.J., LOEHR R.C., 1975. Energy recovery from animal wastes. Seminar on animal wastes (Bratislava 1975. 28 Septembre - 5 Octobre) Paper D.5 - 28.
- JONES, 1976. The effect of temperature, solids content and pH on the survival of salmonellas in cattle slurry. Br. Vet. **132**, 284 - 233. Institute of Animal Diseases Research ed. Compton (Newsbury, Berkshire).
- KOLENBRANDER C.J., 1972. The eutrophisation of surface water by agriculture and the urban population. Stickstof **15**, 56 - 67.
- LAPP N.M., 1974. Methane production from animal wastes, in Animal Meeting Canadian Society of Agricultural Research Paper n°74 - 213. Laval University éd. Québec.
- de LEVAL J., 1970. Revue de la littérature relative aux problèmes du lisier de bovidés. Revue de l'Agriculture **6** - 7.
- Mac GILL A.E.J., et JACKSON N., 1977. Changes in the short-chain carboxylic acid content and chemical oxygen demand of stored pig slurry. J. Sci. Fd. Agric. **28**, 424 - 430.
- de MONTARD, 1977. Valorisation des déjections animales : fumier, purin, lisier. Fourrages Mars 1977, 41 - 60
- OWENS J.D. et al, 1973. Aerobic treatment of piggery waste. Water Research **7**, 1945 - 1966.
- PETERS R.E. et REDELL D.L., 1976. Ammonia volatilization and nitrogen transformations in soils used for beef manure disposal. Transactions of the A.S.A.E.
- ROUSTAN J.L., ZELTER S.Z. et al, 1977. in European Seminar on biological solar Energy Conversion Systems (Grenoble, 1977, Mai 9 - 12).
- Revue de l'Élevage 1974. Les Déjections animales. Numéro spécial 16.
- RIVIERE, SUBTIL et CATROUX, 1974. Etude de la l'évolution physico-chimique et microbiologique du lisier de porcs pendant le stockage anaérobie. Annales Agronomiques 1974.
- STEENHUIS, BUBENZER, 1976. Ammonia volatilization of winter spread. Transactions of the A.S.A.E.
- SUPPERS R. et BOUSFIELD S., 1976. Practical aspects of anaerobic digestion. Process Biochemistry Juin 1976, 3 - 6.
- VAN de MAELE F., 1975. Fumures pratiquées dans des exploitations d'élevage intensif. Revue de l'agriculture **6**, 1487 - 1494.
- VASSEUR J., 1975. Les méthodes de traitement avant épandage. CNEEMA étude n° 401 - 402. Mars - Avril 1975.
- VASSEUR J., 1975. Le lisier et ses équipements. CNEEMA Etude n° 403.
- VERSTRAETE W., NEUKERMANS G. et DEBRUYCKERE M., 1976. Aperçu du problème de la transformation des déchets animaux en Belgique. Revue de l'Agriculture **6**, 1195 - 1234.
- WILSON G.B. et HUMMEL J.W., 1972. Aeration rates for rapid composting of dairy manure. Waste management Research Proceedings. Cornell Agricultural wastes management Conference 145 - 158.