



**ENSP**

ÉCOLE NATIONALE DE  
LA SANTÉ PUBLIQUE

**RENNES**

---

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
**Formation des Ingénieurs**  
**du Génie Sanitaire**  
**2001 - 2002**

---

**EPANDAGE DES BOUES DE STATIONS D'EPURATION**  
**D'ABATTOIRS DE RUMINANTS :**  
**QUEL RISQUE MICROBIOLOGIQUE ?**

---

**Présenté par**

Sandrine DEGLIN  
Diplômée de l'ENSCR

**Lieu de stage :** INERIS

**Maître de stage :**

Roseline BONNARD

**Référent pédagogique :**

Michèle LEGEAS

## REMERCIEMENTS

Merci à Madame Roseline BONNARD de m'avoir confié ce sujet.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma reconnaissance à ma correspondante pédagogique, Madame Michèle LEGEAS, dont la réactivité et les conseils avisés m'ont été très précieux dans les moments de doute.

Je remercie également les personnes contactées qui ont bien voulu m'apporter leur aide dans ma quête d'information.

Enfin, merci à Mademoiselle Laure DELERY et Monsieur Hubert BRUGERE pour leurs conseils avisés.

## RESUME

L'objectif de cette étude est d'évaluer les risques microbiologiques liés à l'épandage des boues de stations d'épuration recevant des effluents d'abattoirs de ruminants, ceci après avoir passé en revue les informations disponibles dans la littérature.

Parmi les nombreux pathogènes susceptibles de se trouver dans ce type de boues, *Escherichia Coli O157:H7*, *Salmonella.sp*, *Cryptosporidium parvum*. ainsi que l'agent responsable de la transmission de l'E.S.B. (un A.T.N.C.) ont été retenus comme étant susceptibles de poser un problème sanitaire pour les personnes chargées d'épandre les boues, les enfants pouvant se trouver exposés à des sols où ont été enfouies des boues ou encore des individus se livrant à la cueillette de plantes (pissenlits) à proximité des zones d'épandage. Les critères sur lesquels repose ce choix sont essentiellement la gravité des infections par ces pathogènes chez l'homme, ainsi que l'existence de portages sains chez le bétail, rendant difficile la mise en évidence de ces germes à l'abattoir.

La présente étude est une approche simplifiée de l'évaluation des risques, en raison de nombreuses lacunes dans l'état des connaissances sur le sujet abordé. Le formalisme et la transparence de la démarche, révèlent les limites de l'étude et permettent de mettre en évidence les points à éclaircir afin de pouvoir dans le futur affiner la conclusion en matière de risque sanitaire.

La présente étude permet donc de réaliser une première approche de l'enjeu sanitaire lié à ce type de boues. Elle n'en demeure pas moins un outil d'aide à la décision. A ce stade, elle nous amène à conclure à la nécessité d'une vigilance vis-à-vis des zones d'épandage tout en gardant à l'esprit que les risques existants sont également facilement maîtrisables par la mise en œuvre de mesures simples. Il est donc déconseillé de faire paître des animaux sur des prairies où ont été épandues ces boues. L'épandage des boues doit se faire dans le respect de bonnes pratiques de travail et de mesures d'hygiène strictes. En outre, il est déconseillé de pratiquer la cueillette de plantes sauvages à proximité des zones d'épandage. Enfin, il est préférable d'éviter que les enfants soient en contact direct avec le sol des champs où ont été épandues ces boues.

En dehors de ces principes élémentaires, on peut dès l'abattoir, envisager la mise en place d'une politique de prévention dont le but serait de limiter la contamination de l'effluent et donc des boues, par exemple grâce à des systèmes de collecte sélective des eaux usées.

Cette études fait également ressortir la nécessité d'acquérir davantage de connaissance dans certains domaines tels que l'épidémiologie du bétail ou l'écologie bactérienne des boues en question ici, afin de pouvoir mener à bien une évaluation des risques plus complète.

En tout état de cause, si les boues de STEP recevant des effluents d'abattoirs de ruminants peuvent poser un problème sanitaire, les risques peuvent être facilement endigués. L'épandage de ces boues semble donc demeurer une solution économique et sûre pour peu que les comportements "à risque" restent limités

## ABSTRACT

LAND TREATMENT WITH SLUDGE  
FROM WASTEWATER TREATMENT PLANTS  
OF RUMINANTS SLAUGHTERHOUSES :  
WHICH MICROBIOLOGICAL RISK ?

This study consists of an assessment of the microbiological risk due to land spreading of sludge stemming from the wastewater treatment plants of ruminants slaughterhouses.

Many pathogenes can be found in this kind of sludge. However, *Escherichia Coli O157:H7*, *Salmonella sp.*, *Cryptosporidium parvum* and the prion implying the Bovine Spongiform Encephalopathy (B.S.E.), seem to be the pathogenes of real concern.

These microorganisms have been chosen for they can cause serious infections among humans. Moreover, most ruminants are healthy carriers of these pathogenes, which make impossible the detection of the germs at slaughterhouse. As a consequence, they tend to contaminate the effluent and the solid waste form wastewater treatment plants.

Although this study tends to overestimate the risk, it leads to the conclusion that the exposure to this kind of sludge may be risky for people spreading them on land or for presons ingesting plants they picked near a field treated with sludge. Children playing on these fields can also be infected, especially with *Escherichia Coli O157:H7* and *Cryptosporidium parvum*.

In addition, it is easy to prevent it by a limited exposure to these sludge. In addition, mitigation measures can be implemented at slaughterhouse to prevent sludge contamination with pathogenes.

Finally, sludge landspreading seems to remain a safe solution for sludge disposal, as far as people are aware of the fact they must not be overexposed to these substances.

# TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations utilisées

Table des annexes

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2. GENERALITES</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Les abattoirs de ruminants</b>	<b>3</b>
2.1.1 Aspect réglementaire	3
2.1.2 Contrôles	3
2.1.3 Fonctionnement	4
2.1.4 Bilan des déchets et effluents produits et de leur devenir	6
<b>2.2 Les boues</b>	<b>7</b>
2.2.1 Aspect réglementaire	7
2.2.2 Les boues : de la production à l'épandage (42, 63, 103)	9
<b>2.3 Evolution de la réglementation</b>	<b>10</b>
<b>3. Evaluation des RISQUES MICROBIOLOGIQUES LIES A L'EPANDAGE</b>	<b>11</b>
<b>3.1 Pourquoi un risque microbiologique ?</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Identification des dangers</b>	<b>11</b>
3.2.1 Pathogènes d'intérêt et leurs effets	12
3.2.2 Prévalence des pathogènes chez le bétail	15
3.2.3 Résistance de ces pathogènes	17
<b>3.3 Courbes dose-réponse ou DMI</b>	<b>20</b>
3.3.1 Approche avec seuil	20
3.3.2 Approche sans seuil	21
<b>3.4 Evaluation de l'exposition</b>	<b>23</b>
3.4.1 Contamination directe	23
3.4.2 Contamination indirecte	24
3.4.3 Exposition du bétail	25
3.4.4 Scénario d'exposition	30
<b>3.5 Caractérisation des risques</b>	<b>31</b>
3.5.1 Risque Prion :	31
3.5.2 Risques dus aux autres pathogènes	32
<b>3.6 Bilan</b>	<b>37</b>
<b>4. GESTION DES RISQUES</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Identification des besoins en terme de connaissance</b>	<b>38</b>
4.1.1 En terme de prévalence des pathogènes chez le bétail	38
4.1.2 Quantification des pathogènes dans les boues	39
4.1.3 En terme de persistance dans l'environnement	39
4.1.4 Connaissance du bruit de fond du sol :	39
<b>4.2 Préconisations en matière d'élevage.</b>	<b>40</b>
<b>4.3 Préconisations en matière d'épandage.</b>	<b>40</b>
4.3.1 Mesures d'hygiène et bonnes pratiques de travail	41
4.3.2 Information du public	41
<b>4.4 Préconisations à l'abattoir</b>	<b>42</b>
4.4.1 Germes autres que le prion	42
4.4.2 Risque prion	43
<b>4.5 Possibilité de traitement des boues</b>	<b>45</b>
<b>5. DISCUSSION ET CONCLUSION</b>	<b>46</b>

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : Siccité des différents types de boues

TABLEAU 2 : Résistance de *Salmonella* dans les boues

TABLEAU 3 : Résistance d'*Escherichia coli*

TABLEAU 4 : Résistance de *Cryptosporidium*

TABLEAU 5 : D.M.I. des germes pathogènes étudiés

TABLEAU 6 : D.I.<sub>50</sub> du prion pour les bovins et pour les humains

TABLEAU 7 : Risque d'ESB attendu pour une exposition à une fraction de D.I.<sub>50</sub> selon deux modèles statistiques

TABLEAU 8 : Récapitulatif des types d'exposition classés par importance croissante au sens épidémiologique

TABLEAU 9 : Données relatives à l'abattoir

TABLEAU 10 : Paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *E. Coli O157 :H7*

TABLEAU 11 : Paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *Salmonella sp.*

TABLEAU 12 : Paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *Cryptosporidium*

TABLEAU 13 : Récapitulatif des concentrations en pathogènes dans les boues et le sol

TABLEAU 14 : Récapitulatif des étapes du calcul de l'excès de risque

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : Bilan des voies d'exposition aux boues

FIGURE 2 : « Points critiques » a l'abattoir : production d'effluents contamines par des germes autres que le prion

FIGURE 3 : « Points critiques » propres au risque prion

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

A.F.S.S.A. : Agences Française de Sécurité Sanitaire des Aliments  
D.B.O.<sub>5</sub> : Demande Biologique en Oxygène sous 5 jours  
D.C.O. : Demande Chimique en Oxygène  
D.R.A.S.S : Direction Régionale de Affaires Sanitaires et Sociales  
D.S.V. : Direction des Services Vétérinaires  
E.H.E.C. : Escherichia Coli Entéro-Hémorragiques  
E.S.S.T. : Encéphalopathies Spongiformes Subaiguës Transmissibles  
E.T.M. : Eléments Traces Métalliques  
E.S.B. : Encéphalopathie Spongiforme Bovine  
F.V.O. : Farines des Viande et Os  
I.C.P.E. : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement  
I.F.E.N. : Institut Français de l'Environnement  
M.E.S. : Matières En Suspension  
M.S. : Matières Sèche  
N.P.P. : Nombre le Plus Probable  
N.P.P.U.C. : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques  
S.A.U. : Surface Agricole Utile  
S.H.U. : Syndrome Hémolytique et Urémique  
S.T.E.P. : STation d'EPuration



## TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Liste des maladies à déclaration obligatoire chez les ovins et bovins

ANNEXE 2 : Processus d'abattage et de découpe (annexe non publiée)

ANNEXE 3 : Résumé du décret du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées

ANNEXE 4 : Différents types de traitement des boues

ANNEXE 5 : Pathogènes pouvant se trouver dans les boues d'abattoirs de ruminants

ANNEXE 6 : Définition des lois Béta-Poisson et exponentielle

ANNEXE 7 : Calcul de la concentration en pathogènes dans les sols après épandage

# 1. INTRODUCTION

---

Le terme de "boues" désigne les sédiments résiduaux des installations de traitement des eaux usées, exception faite des matières de curage. En France, plus de 60 % des boues d'épuration sont épandues en agriculture (donnée IFEN). La solution de l'épandage se justifie par l'intérêt agronomique des boues. Celles-ci sont un apport nutritionnel pour les plantes et permettent également d'améliorer les caractéristiques des sols. Ceci se vérifie en particulier pour des boues chaulées ou compostées. En outre, cette pratique met en œuvre la capacité épuratoire du sol. Ainsi, lorsqu'il est effectué de manière raisonnée et dans le respect de l'environnement, l'épandage des boues est une solution plus que satisfaisante.

Cependant, la présence d'éléments trace métalliques (E.T.M.), de micro polluants organiques et de germes pathogènes contenus dans les boues, peuvent *a priori* représenter un problème sanitaire. Cette réalité crée une véritable crispation autour de la valorisation des boues en agriculture.

L'image de la filière souffre sans aucun doute du statut de déchet attribué aux boues par la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 ; mais à cela il faut ajouter les diverses crises sanitaires survenues ces dernières années, dont on peut croire qu'elles ont accru la sensibilité du public quant aux problèmes de santé publique. Ce phénomène est probablement un facteur de poids influençant la méfiance générale vis à vis de l'épandage des boues.

Parmi les crises sanitaires précédemment évoquées, on peut citer la "crise de la vache folle" qui en éclatant en 1996 ébranle l'opinion et marque le début d'une série de bouleversements dans la gestion des produits, sous-produits et déchets de la filière viande. Le but est alors de protéger l'homme et l'animal du risque de contamination par le prion. D'autres crises sanitaires alimentaires, tels que des épisodes de salmonellose ou listériose ont également conduit à une prise de conscience de l'existence d'un risque microbiologique. Les germes pathogènes, et en particulier ceux de la filière viande, sont donc aujourd'hui "sur le devant de la scène" et constituent en quelque sorte une nouvelle préoccupation de santé publique.

Ainsi, les études des risques microbiologiques associés aux rejets des établissements en lien avec la filière viande, font l'objet d'un intérêt croissant. Les incertitudes sur le risque prion ont motivé un projet de règlement européen (en cours de réalisation) relatif aux "règles sanitaires applicables aux sous produits animaux non destinés à la consommation humaine". Les sous produits de l'épuration des effluents d'abattoirs tombent sous la coupe de ce règlement. Or la plupart des abattoirs sont raccordés à des stations d'épuration urbaines. Ainsi, le règlement en question pourrait avoir pour conséquence d'imposer le dé-raccordement des abattoirs, des dispositifs d'épuration urbains ou bien d'interdire l'épandage des boues provenant des stations recevant des effluents d'abattoirs.

Ce projet de règlement a donc incité le Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire (aujourd'hui Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable) à demander une étude des risques microbiologiques induits par l'épandage des boues de station d'épuration recevant des effluents d'abattoirs de ruminants (bovins, ovins).

L'objectif du stage est donc de réaliser une première approche de l'évaluation des risques microbiologiques liés à ce type de boues.

Un rappel préalable de considérations réglementaires concernant les boues et leur épandage est cependant nécessaire, ainsi qu'une description du fonctionnement général d'un abattoir et du type de déchets qu'il produit.

Il sera suivi de la démarche d'évaluation des risque s'appuyant sur les données de la littératures et s'articulant autour des quatre étapes habituelles, à savoir :

- L'identification des dangers, qui permet de mettre en lumière les germes pathogènes présentant un intérêt sanitaire,
- La recherche des relations dose-réponse appropriées
- L'évaluation des expositions,
- La caractérisation des risques

Les résultats obtenus débouchent ensuite sur un certain nombre de recommandations en matière de prévention et de gestion des risques. Cette démarche permet également de faire le point sur les lacunes dans les connaissances qu'il serait bon de combler pour pouvoir mener à bien une évaluation des risques complète et précise.

## 2. GENERALITES

---

### 2.1 LES ABATTOIRS DE RUMINANTS

#### 2.1.1 Aspect réglementaire

La loi n°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (I.C.P.E.) s'applique à "toute installation pouvant présenter des dangers ou inconvénients pour le voisinage, la santé, la sécurité et la salubrité publiques, l'agriculture ou pour la protection de l'environnement. Ces installations en question sont définies dans la nomenclature des installations classées", établie par décret en Conseil d'Etat. Elles ont ainsi réparties en deux catégories selon l'importance des dangers qu'elles induisent. On distingue les installations soumises à déclaration des installations soumises à autorisation dont l'impact sur l'environnement est plus conséquent.

Les stations d'épuration d'abattoirs font partie des I.C.P.E. Elles sont soumises à autorisation et se trouvent à la **rubrique 2751** de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

A la **rubrique 2752** de la même nomenclature, on trouve également soumises à autorisation les **stations d'épuration mixtes**, définies comme les stations «recevant des eaux résiduaires domestiques et des eaux résiduaires industrielles, ayant une capacité nominale de traitement d'au moins 10 000 équivalents-habitants, lorsque la charge des eaux résiduaires industrielles en provenance d'installations classées autorisées est supérieure à 70 % de la capacité de la station en demande chimique en oxygène ».

#### 2.1.2 Contrôles

De très nombreux contrôles sont effectués par la Direction Générale des Services Vétérinaires tout au long de la filière viande, ceci dès l'élevage. Ces contrôles, qui commencent très en amont de la mise sur le marché des produits carnés, sont d'une importance capitale pour assurer un bon suivi des animaux destinés à l'abattage. Ces contrôles permettent en théorie de détourner de la filière traditionnelle tout animal présentant des symptômes de maladie.

La surveillance des maladies repose sur différents acteurs :

- Les vétérinaires sanitaires qui sont tenus d'informer le préfet et le directeur des services vétérinaires de tous les problèmes relevés par les éleveurs ou par eux-mêmes, susceptibles d'être rapportés à une maladie contagieuse (*cf. Annexe 1*),
- Les agents du service d'inspection vétérinaire en abattoir, où une inspection permanente *ante* et *post mortem* permet de déceler les anomalies ou lésions suspectes à partir d'un contrôle visuel,
- Les laboratoires départementaux d'analyses,
- Des réseaux spécifiques, mis en place à l'échelle nationale dans le cadre de la surveillance de certaines maladies, comme la fièvre aphteuse ou l'ESB.

Dans le cas de l'ESB (maladie réputée contagieuse à déclaration obligatoire depuis le 13 juin 1990), les réseaux de surveillance précédemment évoqués jouent un rôle capital. Ils permettent notamment de repérer tout bovin vivant présentant des troubles neurologiques suspects, mais aussi de déterminer si les animaux morts au sein de leur élevage étaient atteints d'ESB. Enfin, ils assurent la collecte et l'analyse de l'encéphale des bovins de plus de 24 mois afin de diagnostiquer les cas d'ESB et de pouvoir intervenir dans les meilleurs délais. En effet ce réseau d'épidémiologie-surveillance est fondé sur l'examen *post mortem* systématique du système nerveux central des bovins présentant des signes cliniques évocateurs de la maladie.

Les méthodes analytiques de référence utilisées (au niveau national et international) sont :

- l'examen histopathologique du tissu nerveux,
- le "Western-blot", un test très sélectif permettant d'associer les anticorps aux protéines virales contre lesquelles ils agissent.

Plus précisément, au stade de la transformation des viandes, la DSV assure :

- l'agrément des établissements,
- l'inspection permanente en abattoir,
- le contrôle régulier de tous les établissements et de leur système de maîtrise de la qualité sanitaire,
- le contrôle micro-biologique ou chimique de certains produits par la réalisation de prélèvements,
- le contrôle des rejets et déchets.

### **2.1.3 Fonctionnement**

(Les informations qui suivent ont été obtenues par communication personnelle avec des DRASS, DSV et professeurs d'écoles vétérinaires)

Une fois arrivés à l'abattoir, les animaux sont mis en stabulation pour une durée ne dépassant pas en général quelques heures. Là, on les laisse jeûner de manière à limiter les quantités d'excréments produits et la souillure de la carcasse après l'abattage. La diète hydrique, quant à elle a pour but de limiter les phénomènes de bactériémie digestive. Un apport alimentaire est toutefois assuré dans les cas où l'attente à l'étable doit se prolonger. Celle-ci ne dépasse cependant jamais 48 heures.

Avant l'abattage, chaque animal est soumis au contrôle *ante mortem*. Si une pathologie est détectée, l'animal est sorti de la filière d'abattage régulier et euthanasié sur place. Son cadavre est ensuite envoyé en équarrissage. Si un animal arrive blessé à l'abattoir, il est envoyé vers une salle d'abattage sanitaire de manière à ne pas ralentir la chaîne d'abattage. Notons que seuls les bovins accidentés âgés de moins de 2 ans peuvent être abattus d'urgence dans ces conditions. Il arrive qu'un cheptel entier doive être abattu. Ceci est en particulier vrai lorsqu'un ou plusieurs animaux du troupeau sont atteints de maladies à prophylaxie obligatoire (tuberculose, leucose ou brucellose). Le nombre important d'animaux à abattre impose alors l'utilisation de toute la capacité de la chaîne d'abattage. Ce type d'abattage est en général effectué en fin de journée et il est impérativement suivi d'une désinfection poussée de tous les locaux et appareils utilisés pour cette procédure.

Au moment de l'abattage, l'animal est étourdi par une décharge électrique avant d'être saigné. Le sang est recueilli séparément des eaux de lavage, dans des cuves prévues à cet effet. Considéré comme une substance à risque, il est alors envoyé en incinération. Dans la plupart des cas, les cuves tampon sont enlevées par l'entreprise d'équarrissage. Il peut aussi arriver que le contenu de ces cuves soit pompé des cuves vers une citerne. La cuve est alors nettoyée sur le site même de l'abattoir.

Si le contrôle *post mortem* révèle une anomalie, tout ou partie de la carcasse peut être saisi et envoyé en équarrissage. Les pièces saisies sont entreposées dans une « salle de saisie ».

Après la saignée, la tête et les membres sont coupés puis l'animal est dépecé. La carcasse, pendue par les membres postérieurs est alors ouverte par tronçonnage longitudinal, avant éviscération. Dans le cas des bovins, les organes considérés comme étant à risque sont envoyés en incinération. C'est le cas des intestins, de la rate, des amygdales, du thymus, du crâne, (y compris la cervelle et les yeux), et des ganglions rachidiens. Il en est de même de la colonne vertébrale et de la moelle épinière, extraite de l'épine dorsale par aspiration.

Il faut souligner qu'une fois la tête coupée, l'obex (partie du bulbe rachidien) des bovins de plus de 24 mois est retiré pour faire l'objet du test de détection de l'ESB. Les carcasses sont mises en attente dans des locaux réfrigérés en attendant les résultats du test. Tout test positif entraîne la saisie de la carcasse. La salle de saisie est désinfectée environ 2 fois par semaine.

Ces dernières opérations sont suivies d'un lavage à grande eau. Une fois par jour, l'abattoir est lavé à l'aide de détergents à base d'ammoniums quaternaires : « lavage à la mousse ». Pour éradiquer le risque prion, il est recommandé que ce type de lavage journalier s'effectue avec un mélange de soude et de chlore, mais le temps de contact nécessaire à cette pratique empêche sa mise en application.

Les effluents générés par ces différents lavages sont dirigés vers la station d'épuration de l'abattoir s'il en existe une, ou vers la station d'eaux usées urbaines, après avoir suivi un prétraitement plus ou moins poussé selon les structures. Celui-ci consiste en général en des traitements mécaniques de dégrillage, tamisage, déssablage et dégraissage.

Les conditions de fonctionnement des abattoirs influent profondément sur les caractéristiques, tant en volume qu'en charge des effluents. Il faut par exemple prendre en compte :

- La polyvalence de l'abattoir (abattage spécifique d'une espèce ou de plusieurs espèces successivement ou simultanément),
- Le taux de récupération du sang,
- L'existence sur le site d'activités annexes telles que triperies, boyauderies, stockage et salage des peaux,
- Du mode de transport (flux d'eau ou système pneumatique) et de traitement des matières stercoraires (contenu des estomacs et tubes digestifs),
- La récupération du purin en provenance des locaux de stabulation des animaux dans les eaux résiduaires.

Pour les abattoirs d'animaux de boucherie, le volume d'effluent produit est en moyenne de  $5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  de carcasse (36) (entre 2 litres et 12 litres d'eau par kilogramme de viande selon la qualité de gestion de la consommation d'eau). Notons que les eaux issues du processus d'abattage sont très chargées en  $\text{DBO}_5$ , DCO, MES, et nutriments. La charge en microorganismes est elle aussi importante et il ne faut pas négliger le fait que parmi cette flore abondante, peuvent se trouver des germes pathogènes, qu'ils soient bactériens, viraux ou parasites.

Un schéma récapitulatif du processus d'abattage et de découpe est joint en *annexe 2*.

#### **2.1.4 Bilan des déchets et effluents produits et de leur devenir**

Les déchets produits au sein d'un abattoir sont de diverses natures. Ce paragraphe n'évoque que les déchets produits entre l'arrivée de la bête à l'abattoir et son entrée sur la chaîne de découpe.

**Des fumiers** sont issus des camions qui transportent les animaux à l'abattoir ainsi que des étables où ceux-ci sont mis en attente avant la tuerie. Ces fumiers sont le plus souvent épandus en agriculture, plan d'épandage à l'appui.

Les **matières stercoraires** (contenu de panse et d'intestins) récupérées après éviscération, une fois pressées sont quelque fois incorporées aux fumiers. En théorie, ces déchets devraient être enlevés par une entreprise d'équarrissage. Certains abattoirs ne vident plus les tubes digestifs et estomacs mais considèrent le tout comme matière à risque et l'envoient en équarrissage.

Les **déchets de dégrillage ainsi que les sables et graisses** sont quelque fois mis sur la fumière dans le cas des plus petites structures, même si cette pratique n'est pas recommandée. De façon générale, ces déchets sont enlevés par les entreprises d'équarrissage.

Les **effluents liquides** quant à eux sont essentiellement issus des lavages des diverses structures de l'abattoir telles que les étables, le bac de saignée, la halle d'abattage (sol, murs, matériel) les salles d'abattage sanitaire ou de saisie, les différents ateliers de traitement des co-produits ou de découpe, mais aussi les camions transportant la viande ou acheminant les bêtes à l'abattoir. Les eaux de lavage des étables et des camions, peuvent aussi être dirigées vers une fosse à lisier.

A l'issue du pressage des matières stercoraires précédemment cité, le liquide recueilli rejoint lui aussi les eaux usées. Quoiqu'il en soit, la halle d'abattage est bien entendu l'endroit où est produite la plus grande quantité d'effluents.

Certains abattoirs disposent de bassins tampon pour homogénéiser ces effluents liquides. Une fois collecté, l'effluent peut selon les abattoirs, partir directement en STEP urbaine après un pré-traitement plus ou moins élaboré, pouvant aller du simple dégrillage dessablage dégraissage, au traitement physico-chimique poussé, voire même dans certains cas à un traitement biologique.

Soulignons que la contamination microbiologique des ces effluents est indissociable de la contamination des boues issues de leur traitement.

## 2.2 LES BOUES

### 2.2.1 Aspect réglementaire

Les boues sont considérées comme des matières fertilisantes par la loi du 13 juillet 1979 sur le contrôle des matières fertilisantes. Cependant, l'épandage des boues ou d'effluents issus d'installations classées soumises à autorisation, est réglementé par l'arrêté du 17 août 1998, qui modifie les articles 36 à 42, relatifs à l'épandage de l'arrêté du 2 février 1998. Les prescriptions sont applicables à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2002 aux installations existantes pour lesquelles une autorisation d'épandage est déjà donnée. Ces textes confirment en outre que les boues de STEP sont des déchets régis par la loi du 15 juillet 1975 sur l'élimination des déchets.

#### 2.2.1.1 Dispositions relatives aux déchets

➤ *Loi n°75-633 du 15 juillet 1975*

Elle concerne les déchets et la récupération des matériaux. Est considéré comme déchet, "tout résidu du processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son utilisateur destine à l'abandon." Cette loi impose un suivi rigoureux de l'origine, de la nature et des quantités de déchets produits, mais aussi de leur destination et de leurs modes d'élimination. Ainsi, ce texte donne aux boues le caractère de déchets ce qui implique une responsabilité du producteur ou du détenteur de ces boues pour leur élimination.

➤ *La directive européenne du 15 juillet 1975*

Cette directive (modifiée par la loi du 13 juillet 1992 et celle du 2 février 1995), relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux, fixe des prescriptions en terme de collecte, transport, stockage, tri, élimination et valorisation des déchets. Selon ce texte, il faudrait qu'à terme, la moitié de la production de déchets à l'échelle nationale soit collectée pour récupérer les matériaux, les réutiliser, les recycler, ou encore les épandre en agriculture. Finalement, la tendance est de limiter les recours à l'incinération et à la mise en centre d'enfouissement technique. L'accent est également mis sur une élimination des déchets respectant l'homme et l'environnement.

#### 2.2.1.2 Dispositions spécifiques aux boues

➤ *Directive du conseil 86/278/CEE*

La directive du conseil 86/278/CEE du 12 juin 1986 vise à la protection de l'environnement et notamment des sols lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. Son principal objectif est de réglementer l'épandage de manière à éviter d'éventuels effets nocifs sur les sols, la végétation, les animaux et l'homme. Pour ce faire, le texte évoque la prise en compte des types de sols et des besoins nutritionnels des plantes avant de réaliser un épandage. En outre, l'utilisation en agriculture de ce type de produits doit tenir compte des besoins nutritionnels des plantes. Le texte prescrit également l'interdiction de l'épandage dans certaines conditions bien précise.

L'interdiction d'épandre est explicitement exprimée dans le cas :

- Des herbages ou des cultures fourragères, s'il est procédé au pâturage ou à la récolte de cultures fourragères sur ces terres avant l'expiration d'un certain délai fixé par les Etats membres. Ce délai ne peut être inférieur à trois semaines,



- Sur les cultures maraîchères et fruitières pendant la période de végétation à l'exception des cultures d'arbres fruitiers,
- Sur les sols destinés à des cultures maraîchères ou fruitières qui sont normalement en contact avec le sol et consommées crues, pendant une période de dix mois qui précède la récolte pendant la récolte elle-même.

➤ *Décret du 8 décembre 1997 et arrêté du 8 janvier 1998*

Ces textes, relatifs à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées urbaines, définissent les différents types de boues d'un point de vue réglementaire.

Ainsi sont précisées les définitions de boues traitées, boues solides ou stabilisées, boues hygiénisées.... Ce texte fait également figurer les conditions d'interdiction de l'épandage ainsi que les délais et autres contraintes à respecter, sans oublier les méthodes d'exécution de l'épandage (*cf. Annexe 3*).

➤ *Arrêté (modifié) du 2 février 1998*

Ce texte concerne les prélèvements et la consommation d'eau ainsi que les émissions de toute nature des I.C.P.E. soumises à autorisation.

Le cas des épandages est traité à la section IV de ce texte.

Pour pouvoir être épandu, un effluent ne doit présenter aucun risque pour l'environnement, et avoir des vertus agronomiques. En outre, le sol où est effectué l'épandage ainsi que le couvert végétal doivent être dotés d'une efficacité épuratoire acceptable.

L'arrêté en question préconise également un suivi analytique de l'effluent épandu ainsi que la constitution d'un plan d'épandage fondé sur des études agropédologiques et hydrogéologiques. Celui-ci permet de préciser :

- L'emplacement, la superficie et l'utilisation des terrains disponibles,
- La fréquence et le volume prévisionnel des épandages sur chaque parcelle ou groupe de parcelles.

Certaines zones tombent sous la coupe d'une interdiction d'épandage. Elles sont délimitées par des périmètres spécifiés dans le texte en question. Citons pour exemple l'impossibilité d'épandre à moins de 50 mètres des points de prélèvement d'eau destinée à l'alimentation des collectivités humaines ou à moins de 50 mètres de toute habitation.

Il est également interdit d'épandre :

- Sur les sols gelés (sauf pour les déchets solides),
- En cas de forte pluviosité ou lorsqu'il existe un risque d'inondation,
- En dehors des terres régulièrement travaillées et prairies ou forêts exploitées,
- Sur terrain à forte pente

L'aérodispersion est interdite quand l'effluent est susceptible de contenir des pathogènes. IL est également interdit d'épandre les boues issues de STEP d'équarrissage telles que les installations de traitement des cadavres, des saisies sanitaires d'abattoirs et matériels à risque spécifié au regard des ESST ou encore des centres de collecte et dépôts de cadavres dans lesquels les cadavres sont soumis à un premier traitement.

Les déchets solides ou pâteux doivent être enfouis le plus tôt possible dans un délai maximum de 48 heures afin d'éviter les odeurs et pertes par volatilisation.

Tout épandage est soumis à une étude d'impact préalable, montrant l'innocuité et l'intérêt agronomique des effluents ou des déchets. Sont également précisés les périmètres et les modalités de mise en œuvre de cet épandage. Cette étude contient des détails quant à la nature des déchets en question, à la zone d'épandage, aux contraintes éventuelles liées au milieu environnant (activités humaines) aux nuisances. Sont également renseignées les modalités techniques de l'épandage ainsi que les procédures de contrôle de la qualité de l'effluent.

Les conditions de pH des sols ainsi que la présence en quantité plus ou moins importante d'éléments trace, déterminent si l'épandage peut être effectué ou non. Cependant, si l'effluent contient des organismes pathogènes, une étude préalable doit permettre d'apprécier l'innocuité des déchets dans les conditions prévues. Les limites à ne pas dépasser sont fixées par l'arrêté d'autorisation.

Il est à noter que les boues destinées à l'épandage sont analysées la première année d'épandage ou en cas de changement dans le process, pouvant changer la teneur en ETM. Ces analyses portent sur les teneurs en matière sèche, les éléments de valeur agronomique, substances chimiques ainsi que sur les pathogènes susceptibles d'être présents. Des analyses périodiques dont la fréquence est fixée par l'arrêté d'autorisation sont également effectuées.

### **2.2.2 Les boues : de la production à l'épandage (42, 63, 103)**

La composition des boues varie selon le type de traitement, chimique ou biologique qu'a subi l'effluent sur la station d'épuration. Dans le cas des eaux usées, les stations biologiques sont très fréquentes. Le traitement doit permettre un abattement des matières en suspension, des pathogènes et autres éléments indésirables contenus dans l'effluent. Ainsi, les boues sont un concentrat de toutes ces matières indésirables. Sachant que les pathogènes ont tendance à s'adsorber aux solides en suspension, on peut facilement concevoir que les boues constituent un milieu riche en éléments pathogènes. (3)

Le traitement des eaux usées permet un abattement des pathogènes compris entre 90 et 99% pour les bactéries, 76 et 99% pour les virus. (15) En revanche, l'efficacité des différents traitements que l'on peut faire subir aux boues n'a pas été clairement quantifiée. Le compostage et le chaulage sont deux autres modes de traitement assez couramment employés. Dans certains cas, on peut aller jusqu'à l'hygiénisation des boues au sens de l'arrêté du 8 janvier 1997 (cf.annexe 3) (63). Une description des traitements possibles est joint en annexe 4.

Les boues issues du traitement de l'effluent peuvent être épandues liquides mais elle peuvent également subir des opérations visant à augmenter leur siccité (déshydratation par presse à bande par exemple). Les boues les plus sèches sont les moins problématiques d'un point de vue bactériologique. On rencontre des boues liquides, épaissies, pâteuses ou solides selon le degré de dessiccation. (63)

Tableau 1 : Siccité des différents types de boues.

Type de boue	Liquide	Pâteuse	Solide	Sèche	Chaulée	Compostée
Siccité (%)	2 à 7	16 à 25	> 25	90 à 95	25 à 40	40 à 60

Les boues liquides, sont épandues brutes à hauteur de 1,5 à 2 tonnes de matière sèche à l'hectare, ce qui représente environ 50 m<sup>3</sup>. L'épandage est effectué au moyen d'une tonne à lisier.

Les boues pâteuses, quant à elles sont en moyenne à 20% de siccité. On épand 20 à 25 tonnes à l'hectare soit 4 à 5 tonnes de matière sèche à l'hectare. L'épandage se fait avec un épandeur à fumier.

Dans les deux cas, l'épandage se fait de manière cyclique de façon à respecter les besoins nutritifs du sol. Ainsi, on essaie d'épandre les parcelles tous les 3 à 4 ans. Notons cependant que ceci est possible dans les départements disposant d'une surface agricole utile suffisamment importante pour la quantité de boues produites. Dans le cas contraire, les épandages successifs sur un même site sont beaucoup plus fréquents.

Ceci peut entraîner des problèmes de saturation du sol et avoir des conséquences néfastes sur l'environnement voire sur la santé. En effet, un sol surchargé peut donner lieu à des phénomènes de ruissellement ou de contamination des végétaux dont il est planté. (informations communiquées par la chambre d'agriculture de l'Oise)

Les boues chaulées permettent de limiter la teneur des boues en microorganismes pathogènes. Cependant, le chaulage n'est obligatoire que si l'épandage a lieu sur des sols dont le pH est compris entre 5 et 6.

### **2.3 EVOLUTION DE LA REGLEMENTATION**

Un règlement européen (62) visant à réglementer l'élimination des sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine est en cours de préparation. (dernière version: 12 décembre 2001). Il concerne plus précisément les sous produits provenant d'usines de transformation de matières d'origine animale dont les abattoirs et ateliers de découpe. Ce règlement vise à supprimer les notions actuellement utilisées de déchets à "bas risques " et "hauts risques". Pour les remplacer, il introduirait trois catégories de "sous produits", en fonction du risque qu'ils représentent, chacun faisant l'objet de filières d'élimination différentes.

Il est également fait mention que les sous produits de l'épuration des eaux ayant pu être en contact avec des matières à haut risque, devront être éliminés comme des déchets. Il est donc question d'interdire l'épandage des boues provenant du traitement de effluents d'abattoirs, que celles-ci soient générées sur site ou au sein de stations d'épuration urbaines raccordées à des abattoirs.

De toute évidence, l'application de ce texte s'ensuivrait d'un "dé-raccordement" des établissements reliés au système d'assainissement collectif et la mise en place d'un traitement sur site. Une augmentation considérable du volume des déchets à mettre en décharge ou à incinérer serait alors inévitable.

Ce projet de loi laisse penser à la présence d'un danger, essentiellement microbiologique, inhérent aux boues issues du traitement des effluents d'abattoirs. D'où ce danger peut-il provenir ?

### **3. EVALUATION DES RISQUES MICROBIOLOGIQUES LIES A L'EPANDAGE**

---

#### **3.1 POURQUOI UN RISQUE MICROBIOLOGIQUE ?**

La contamination des effluents par des agents pathogènes est limitée par l'intervention des services vétérinaires précédemment évoquée. Cependant, il faut aussi envisager le cas de porteurs sains pour lesquels une éventuelle contamination ne pourra être détectée. Un animal porteur de germes pathogènes mais non identifié devient alors une source de contamination microbiologique de l'effluent et rend plus probable la contamination des boues par des germes pathogènes.

Avant d'être épandues, les boues peuvent être traitées ou non. Des traitements conventionnels tels que des processus thermiques, le chaulage ou le compostage éliminent jusqu'à 99% des microorganismes mais le 1% restant peut constituer un risque non négligeable. Les boues brutes, quant à elle présentent une flore bactérienne beaucoup plus abondante parmi laquelle on compte de nombreux pathogènes. On conçoit alors que les risques sanitaires sont plus importants que dans le cas des boues traitées.

Il faut cependant souligner que le risque sanitaire en question est limité par un certain nombre de facteurs environnementaux. Les étapes entre l'excrétion d'agents pathogènes et la survenue d'une pathologie résultant d'une contamination par ces agents sont nombreuses et complexes. La survie de l'agent infectieux dans les boues conditionne la quantité de microorganismes appliquée sur les sols. Le type de pratiques agricoles, (conditions de mise en œuvre des épandages) ainsi que la résistance des pathogènes dans les sols influent également sur la dose infectante atteignant l'homme. Enfin, le niveau d'immunité ainsi que du comportement des individus (hygiène...) sont d'autres paramètres déterminants.

#### **3.2 IDENTIFICATION DES DANGERS**

Le risque microbiologique lié aux boues d'abattoirs émane principalement des germes contenus dans les matières fécales. Ainsi, les excréments recueillis dans les étables ou les camions de même que les contenus de tubes digestifs et d'estomacs (matières stercoraires) sont les principaux réservoirs de pathogènes. L'identification des dangers passe donc par le recensement des germes potentiellement pathogènes, susceptibles de coloniser ces réservoirs particuliers. Une attention toute particulière est portée aux microorganismes pouvant induire des zoonoses (maladies transmises de l'animal à l'homme). Cependant, il ne faut pas négliger les risques de contamination des animaux eux-mêmes par ingestion du boue. En effet le bétail est le plus souvent et le plus directement exposé en pâturant sur des prairies où a eu lieu un épandage de boues. Des boues contaminées peuvent donc contribuer à entretenir le portage de certains pathogènes au sein du bétail et par conséquent faire perdurer le risque pour l'homme.

Certains germes pathogènes ne se retrouvent qu'en très faible quantité dans les boues en raison d'une très faible prévalence des pathologies qu'ils induisent (ex: la brucellose). D'autres germes propres au bétail ne représentent aucune menace particulière pour l'homme. Enfin, certains pathogènes, bien que dangereux pour l'homme ne sont pas hébergées dans les matières fécales et par conséquent ne posent pas un problème majeur de contamination par les boues. C'est par exemple le cas du bacille du charbon qui reste localisé dans les tissus. Il serait donc peu pertinent et inutile d'étudier chaque germe pathogène en détail.

Pour mieux cibler les dangers, il est préférable d'établir des priorités en fonction :

- Du portage sain, (plus il est fréquent plus les risques de contamination des boues sont élevés)
- De la prévalence de ces germes dans les boues en question,
- De leur résistance,
- De leur pathogénicité,
- De la gravité de la pathologie induite par le germe,
- De l'existence ou non d'un vaccin ou d'un traitement curatif,
- De la possibilité d'une contamination inter-humaine.

### 3.2.1 Pathogènes d'intérêt et leurs effets

Une liste des pathogènes pouvant se trouver dans les boues d'abattoirs de ruminants est reportée (cf. annexe 5) Il convient cependant de ne sélectionner que quelques-uns de ces pathogènes en se fondant sur les critères objectifs ci-dessus. Un certain nombre de pathologies animales sont soumises à réglementation mais peuvent d'emblée être écartées en raison d'une prévalence faible ou nulle. (Maladies des listes A et B de l'O.I.E) La prévalence de la brucellose par exemple n'est que de 0.02%. En revanche, certains microorganismes, comme *Salmonelle* par exemple, bien qu'ils ne provoquent pas de maladie soumise à déclaration, posent de réels problèmes sanitaires, en particulier à cause d'un important phénomène de portage sain. Ainsi, l'animal porteur du pathogène ne présente aucun symptôme, mais il contribue à la dissémination du germe dans l'environnement, notamment par l'intermédiaire des excréments.

Les pathogènes présentant un réel intérêt sanitaire doivent également être susceptibles d'induire une contamination environnementale de l'homme et de provoquer chez lui des effets potentiellement graves ou /et difficilement curables. Ils sont résistants aux éventuels traitements des boues, ainsi qu'aux agressions qu'ils subissent dans l'environnement une fois les boues épandues. (3)

De sérieuses épidémies dues à des espèces entérohémorragiques *d'Escherichia Coli*, (en particulier *Escherichia Coli O157:H7*) ont été rapportées à plusieurs reprises sur le continent américain. On peut en particulier citer l'épidémie de Walkerton (Ontario) en mai 2000 ayant fait 5 morts. *Salmonella sp.* ou encore *Cryptosporidium* peuvent aussi provoquer des affections relativement graves pouvant entraîner la mort des individus les moins résistants: jeunes enfants, personnes âgées et/ou immunodéprimées. Les agents transmissibles non conventionnels (A.T.N.C.) encore très méconnus, sont actuellement placés sur le devant de la scène avec toutes les questions qui entourent la "crise de la vache folle". Ce rapport se focalise plus particulièrement sur l'agent responsable de l'ESB bien que d'autres types de prions soient à l'origine d'autres maladies, comme par exemple la scrapie chez le mouton.

Les parasites, ne posent pas de problème en ce qui concerne les boues issues du traitement des effluents d'abattoirs. L'ascaridiose par exemple, n'est pas une zoonose. La taeniose, quant à elle, n'est transmise à l'homme que par l'ingestion de viande bovine contaminée par des cysticerques, forme larvaire du cestode (4). Les parasites n'entrent donc pas dans le champ de l'étude.

On rencontre également peu de zoonoses virales. En outre, les particules virales sont extrêmement fragiles dans l'environnement et leur transmission passe en général par des vecteurs vivants. L'anaplasmose, par exemple, est transmise par les tiques et autres arthropodes piqueurs. (17) Les particules virales éventuellement contenues dans les boues peuvent donc être écartées de la problématique.

Ainsi, seront retenus comme présentant un intérêt sanitaire, les germes suivants :

- ◆ *Escherichia Coli O157:H7*
- ◆ *Salmonella sp.*
- ◆ *Cryptosporidium*
- ◆ Les A.T.N.C., plus particulièrement l'agent responsable de l'ESB

### 3.2.1.1 Généralités sur les bactéries retenues.

#### *E.Coli O157:H7*

Cette bactérie fait partie de la famille des *Escherichia Coli* Entéro-Hémorragiques (EHEC). Elle produit en effet une puissante toxine pouvant provoquer des affections graves chez l'homme. Il est important de noter que ce microorganisme peut se trouver dans les fèces de bétail parfaitement sain, ce qui rend difficile sa détection avant comme après l'abattage.

Le principal risque d'infection est dû à la contamination de nourriture par des excréments animaux contenant la bactérie. Les humains en sont rarement porteurs, cependant les jeunes enfants peuvent l'être jusqu'à deux semaines après l'infection. L'ingestion de quelques organismes seulement (une dizaine) peut provoquer la maladie qui se transmet très facilement d'individu à individu par voie fécale orale. Cette bactérie affecte principalement les jeunes enfants, les personnes âgées et les individus immunodéprimés. La toxine émise par *E.Coli O157:H7* provoque des colites hémorragiques qui se manifestent par des diarrhées sanglantes et d'intenses douleurs abdominales. Chez les enfants, entre 2 et 10% des cas dégénèrent en syndrome hémolytique et urémique (S.H.U.) qui conduit à des insuffisances rénales aiguës (25). Le S.H.U peut à son tour dégénérer en purpura thrombopénique, une affection du système nerveux central se manifestant par des pertes de connaissance et le coma. Chez les patients souffrant de ces troubles, on observe souvent la formation de caillots de sang au niveau du cerveau puis la mort.

En France, s'organise un suivi des cas de syndrome hémolytique et urémique chez les enfants de moins de 15 ans, ceux-ci étant les plus sujets à ce type d'infection. Le taux d'incidence observé à l'échelle nationale est d'environ 1 SHU pour 100 000 personnes dont 63 % sont à imputer à *E.Coli O157:H7* (25). Notons aussi que les taux d'incidence régionale observés peuvent dans certains cas largement dépasser ce chiffre. En Bretagne, par exemple, le taux d'incidence de SHU est de 1,6 pour 100 000 et en Auvergne, il atteint 2,6 pour 100 000.

Les boues tendant à concentrer les pathogènes, les risques induits par *E.Coli O157:H7* par leur intermédiaire doivent être pris en considération.

### Salmonella sp.

La présence de Salmonelles dans les boues d'épuration n'est plus à démontrer. On peut par conséquent supposer que le microorganisme sera présent en plus grande quantité dans des boues provenant d'une station qui reçoit exclusivement ou pour partie, des effluents d'abattoir. En effet, si les porcs et les volailles sont les principaux réservoirs de la bactérie, il ne faut pas négliger l'importance des bovins et ovins en tant que porteurs du microorganisme.

En outre, ces animaux vivant en troupeaux, la contamination d'un individu peut très rapidement s'étendre aux autres et ainsi amplifier le problème de manière radicale. La maladie est endémique dans certaines fermes avec des épidémies sporadiques.

Les individus infectés par *Salmonella sp.* développent des fièvres, diarrhées et crampes abdominales après 12 à 72 heures. La maladie dure en général moins d'une semaine et la plupart des individus guérissent sans traitement. Cependant, chez certaines personnes, des diarrhées sévères nécessitent une hospitalisation et l'infection peut de façon occasionnelle s'étendre au système sanguin et à d'autres endroits du corps. Dans ce cas, l'issue de la maladie peut être fatale. En France, en 1998, on a recensé 2485 cas de salmonellose (26). La prévalence de Salmonelle tous sérotypes confondus au sein de la population française est de 13.8 pour 100 000 (7). La contamination inter individus se fait très facilement par voie fécale orale.

Il existe plus de 2300 sérotypes de *Salmonelles*. Parmi eux, *Salmonella paratyphi B* peut causer des troubles intestinaux graves à la fois chez les humains et chez le bétail, tandis que *Salmonella dublin* affecte principalement le bétail.

Un autre sérotype s'avère particulièrement inquiétant en raison de l'antibio-résistance qui le caractérise ainsi que le fait que le bétail soit porteur sain de cette souche. *Salmonella Typhmuri* DT 104 est à l'origine de taux de morbidité et de mortalité plus élevés chez les animaux infectés que les autres souches de Salmonelles non typhoïdes. En effet, le taux de mortalité pour les animaux affectés par cette souche a atteint 50 à 60 % dans des épidémies survenues au Royaume Uni. Certaines études cas-témoins menées sur du bétail au Royaume Uni, ont révélé chez les cas des taux de mortalité pouvant atteindre 40% avec cependant un taux plus élevé chez les génisses que chez les bovins adultes.

Les signes cliniques de cette pathologie comprennent fièvre, dépression, baisse de la production de lait, anorexie, déshydratation, production abondante de salive et diarrhée évoluant vers une dysenterie. Il faut tout de même souligner que les animaux peuvent également être porteurs sains et abriter le microorganisme plus de 18 mois après une épidémie. Le mode de contamination le plus fréquent est la voie fécale orale.

#### 3.2.1.2 Un protozoaire : *Cryptosporidium* (2)

*Cryptosporidium* est un protozoaire, parasite obligé qui se développe dans un animal hôte et reconnu comme un pathogène humain. *Cryptosporidium* infecte les hommes et le bétail. Chez les immunocompétents, la maladie est le plus souvent asymptomatique. Cependant *Cryptosporidium* demeure une cause assez courante de gastro-entérite, qui peut mettre en danger la vie des personnes affaiblies. Il entraîne en effet des diarrhées liquides profuses (jusqu'à 3L/jour) accompagnées de douleurs abdominales, vomissements et fièvres faisant suite à une incubation silencieuse de 3 à 8 jours. (2). La présence de *Cryptosporidium* dans les eaux n'est pas corrélée celle d'indicateurs de contamination fécale tels que les coliformes, coliformes fécaux.

Les études les plus récentes montrent qu'au delà d'une zoonose, la Cryptosporidiose est également une maladie hydrique. Le protozoaire incriminé a été trouvé à quelques reprises dans les eaux de consommation mais, lors des cas d'épidémie, on n'a pu identifier de manière précise la cause de sa présence dans ces eaux.

La cryptosporidiose est une pathologie que l'on rencontre partout. Les réservoirs animaux sont nombreux mais le bétail (en particulier les veaux et les agneaux) ainsi que les autres animaux vivant à proximité des hommes représentent un réservoir majeur de parasites pour l'homme. Ceci est dû à l'absence de spécificité d'hôte pour le parasite.

En Europe, la prévalence de Cryptosporidiose dans les selles humaines varie de 0,1 à 14,1 % avec une valeur moyenne de 3,5 %. BLACK (1996) quant à lui, rapporte une estimation selon laquelle 3 à 7 % des cas de diarrhées observés dans les pays développés sont dus à *Cryptosporidium*. La voie fécale-orale est le mode de transmission majeur, après la transmission directe d'animal à personne chez les agriculteurs ou les vétérinaires en contact direct avec le bétail. Il est cependant à souligner que la voie hydrique est à la source de la majorité des épisodes de cryptosporidioses massives.

### 3.2.1.3 Les Agents Transmissibles Non Conventionnels (A.T.N.C.)

Les agents transmissibles non conventionnels ou prions, agents étiologiques des encéphalopathies subaiguës spongiformes transmissibles, ont des propriétés biologiques et physico-chimiques très particulières, qui en font une catégorie à part dans le règne des microorganismes. Ils induisent des maladies humaines et animales strictement neurologiques, d'allure dégénérative qui sont toujours mortelles et qui évoluent selon un mode subaigu après une très longue période d'incubation cliniquement silencieuse. Ces maladies sont transmissibles au sein de la même espèce et entre espèces différentes, et elles répondent à un double déterminisme génétique et infectieux. La nature exacte des agents transmissibles non conventionnels est encore imprécise. On les soupçonne d'être à l'origine de maladies telles que la scrapie chez le mouton ou encore l'encéphalopathie spongiforme bovine (E.S.B.) et la maladie de Creutzfeld-Jacob chez les humains.

Les prions sont très résistants. Ils peuvent être inactivés par un chauffage à 121°C pendant 4 heures ou des chauffages répétés dans de la soude caustique. Cependant, la méconnaissance de ce type d'agents, rend difficile leur isolement et on imagine toute la difficulté de rechercher et qui plus est de trouver des prions dans des boues de station d'épuration. L'évaluation du risque dû à ces pathogènes semble donc une entreprise ardue.

## 3.2.2 Prévalence des pathogènes chez le bétail

Avant d'entrer dans le détail de la prévalence, il convient d'éclaircir la notion de porteur sain.

### 3.2.2.1 Portage sain

Le phénomène de portage sain est un facteur particulièrement important à prendre en compte. En effet, les porteurs sains ne peuvent pas être détectés à l'abattoir et par conséquent peuvent contaminer un effluent de manière notable en fonction de la prévalence du pathogène dans la population animale concernée. Il est donc fondamental de connaître les proportions que peut atteindre le nombre de porteurs sains afin d'évaluer le niveau de contamination de l'effluent. De telles données, lorsqu'elles sont disponibles dans la littérature, sont difficilement utilisables. En effet les études, toutes menées dans des conditions particulières aboutissent à des résultats très différents les uns des autres.



Une tendance est cependant généralisable en matière de portage sain. La prévalence chez les jeunes ruminants est toujours de loin supérieure à celle observée chez les adultes. L'estomac des jeunes qui ne ruminent pas encore soumet les pathogènes à des conditions moins rudes que celles rencontrées dans la panse des adultes. En outre, le phénomène de sevrage et le changement d'alimentation rendent les jeunes plus sensibles à la colonisation par les pathogènes.

### 3.2.2.2 Prévalence

#### *E.Coli O157:H7* (29, 30, 31, 32, 33)

La prévalence d'*E.Coli O157:H7* chez les bovins n'est pas clairement déterminée. Selon les études, elle est comprise entre 1 et 5 % **(8)**, mais peut parfois atteindre 16 % ou plus **(38)**. Notons également que la prévalence tend à être plus élevée chez les animaux les plus jeunes ainsi que chez les animaux laissés à la diète **(8, 47)**. Un animal infecté peut excréter des bactéries pendant 30 jours. Chez le mouton, la prévalence s'échelonne entre 0,9 et 31 % et le microorganisme est excrété pendant une durée allant jusqu'à 50 jours **(29)**.

L'infection des bovins et des moutons par ce pathogène obéit à des cycles saisonniers. En effet l'incidence la plus importante a lieu pendant les mois les plus chauds. Dans la quasi totalité des cas, les animaux sont porteurs sains.

En outre, le régime alimentaire des animaux influence la concentration de l'organisme ainsi que la durée du portage. Un changement brutal de l'alimentation accroît le nombre d'animaux porteurs et enfin le fait que des animaux aient été infectés ne prévient pas les réinfections ultérieures. **(28)**

*E.Coli O157:H7* peut être repris par les plantes depuis un sol contaminé pour atteindre la partie comestible. **(48)**

#### *Salmonella sp.*

La prévalence de *Salmonella* chez le bétail a été évaluée entre 0 et 13% **(30)**. La prévalence moyenne semble s'élever à 5 % **(1, 61)**. La prévalence de *Salmonelle* chez le bétail montre répond en outre à un phénomène saisonnier. La prévalence est en effet plus élevée pendant les mois d'été et ce phénomène est d'autant plus marqué chez au sein des plus grands troupeaux.

Il faut noter que des études précises ont étudié plus en détail le sérotype Typhimurium DT 104 en raison des craintes qu'il suscite, notamment à cause de sa résistance aux antibiotiques. Au début des années 90, la prévalence de *Salmonella Typhimurium DT 104* a augmenté chez les bovins et ovins pour représenter 70% des souches de *Salmonelle* chez les gros bovins, 72% chez les génisses et 70% chez les moutons. (US Dept. Of Food safety and Inspection Service, 1997)

L'excrétion de *Salmonelle* chez le bétail est comprise entre  $10^2$  et  $10^9$  **(41)**. En outre le portage après une infection peut durer jusqu'à 18 mois auquel cas les animaux sont porteurs sains. (EVANS S et al, 1996 ; WALL P.G.et al., 1996 cités dans **57**)

#### *Cryptosporidium parvum*

La prévalence de *Cryptosporidium* connaît une grande variabilité et n'a pas été précisément déterminée. Selon les études, elle peut varier de 1 à 100 % ! Nous savons cependant que les jeunes bovins sont les plus porteurs (GARBER et al, 1994). Une étude menée sur 7369 génisses âgées de 1 à 17 semaines a d'ailleurs révélé une prévalence de 22,4%. En outre, d'après ce même auteur, on peut supposer que tous les troupeaux de plus de 100 bêtes sont infectés par *Cryptosporidium parvum*.

De manière générale, les études de prévalences concernant les animaux entre l'âge de trois ans et l'âge adulte conduisent à une proportion d'animaux porteurs d'oocystes égale à 20 % (33). Nous utiliserons ce chiffre ultérieurement pour la caractérisation des risques. Notons également que la prévalence de *Cryptosporidium* chez le bétail répond à un phénomène saisonnier. On observe en effet une prévalence minimale en été. (33)

Des porteurs sains adultes peuvent excréter jusqu'à 18 000 oocystes par gramme de fèces (Scott et al., 1994 cité dans 32). Cependant une valeur moyenne de 9000 oocystes par gramme de fèces est admise (32)

### **Prion (57)**

En 2001, 274 cas d'ESB ont été confirmés en France, dont:

- 91 cas décelés par le réseau d'épidémiologie-surveillance clinique,
- 100 cas détectés chez les bovins à risque,
- 83 cas issus du dépistage systématique à l'abattoir.,

Ces derniers sont les cas intéressants pour la présente étude. En effet les cas décelés à l'abattoir à l'issue du test de détection de l'ESB ont été abattus selon la procédure régulière et ont donc potentiellement contribué à l'introduction de prion dans les effluents des abattoirs concernés. Il faut rapporter ce nombre de cas au nombre de bovins abattus et normalement testés pendant l'année 2001, à savoir 2 382 225 animaux.

**Ainsi, en 2001, la proportion des cas d'ESB détectés à l'abattoir était de  $3.5.10^{-3}$  %**

Pour l'année 2002, le nombre de cas confirmés au 25 juin était de 138 cas :

- 27 cas décelés par le réseau d'épidémiologie-surveillance clinique,
- 72 détectés chez les bovins à risque,
- 39 cas issus du dépistage systématique à l'abattoir.

### **3.2.3 Résistance de ces pathogènes**

Notons dans un premier temps que la croissance des populations dans le milieu extérieur est très rare. Ceci a par exemple été observé pour *Salmonelle* dans des boues stériles où toute concurrence bactérienne avait disparue (FINDLAY, 1973).

La survie des microorganismes est caractérisée par le  $T_{90}$ , temps au bout duquel la population initiale du germe considéré est réduite de 90%. Cette durée dépend de facteurs intrinsèques aux agents infectieux, mais également de leurs conditions environnementales. Par exemple, *Cryptosporidium* peut se présenter sous forme de kyste, forme extrêmement résistante aux agressions environnementales.

Les facteurs externes influençant la survie des organismes, sont la température ou le degré d'humidité. De manière générale, les microorganismes survivent mieux à basse température et dans des milieux humides. Les pH extrêmes (< 3 ou > 12) ainsi que l'exposition au soleil, tendent à diminuer la survie des germes. Les conditions de survie sur le végétal, sont par exemple beaucoup plus difficiles pour le germe, exposé à la dessiccation et à l'irradiation, que sur ou dans le sol. La présence de nutriments est elle aussi déterminante et enfin, l'activité biologique du milieu peut induire un phénomène de compétition dont l'issue sera favorable à certaines espèces et « fatale » pour d'autres.

Ainsi, les phénomènes de survie vont jouer un rôle capital en ce qui concerne les risques de contamination dûs à l'épandage des boues.

- Bactéries

### Salmonellae

Tableau 2 : Résistance de *Salmonella* dans les boues

Auteurs de l'étude	Espèce	Conditions de survie	Résistance	Commentaires
Braga, 1964 (Cité dans 64)	<i>S. typhimurium</i> <i>S. choléraesuis</i>	29°C	4 à 9 jours	
		6°C	25 à 38 jours	
	<i>S. typhimurium</i>	conditions de décomposition, 25°C	45 jours	
Pohl, 1955 (Cité dans 64)	<i>S. typhimurium</i> <i>S. newport</i> , <i>S. kottbus</i> <i>S. senftenberg</i>	Boues décomposées	7 à 8 semaines	
Findlay, 1973 (Cité dans 64)	<i>S. typhimurium</i> <i>S. dublin</i> <i>S. agona</i>	Boues stériles	Multiplication	Les deux premiers sérotypes tendent à disparaître dans des boues brutes

Une étude menée par STRAUCH D (1979) citée dans (41) sur la viabilité de *Salmonelle* après épandage de boues de STEP biologique caractérise la grande résistance de ce microorganisme. 303 échantillons de sol ayant reçu des boues furent prélevés et analysés. A l'issue de cette étude, il apparaît que :

- 26% des échantillons d'herbe contiennent des *Salmonelles* jusqu'à la cinquième semaine. Tous les échantillons sont négatifs après 6 semaines.
- 59% des échantillons de sol (prélevés en surface) sont positifs jusqu'à la dixième semaine.

### Escherichia Coli

La survie d'E.Coli O157:H7 a essentiellement été étudiée dans les excréments animaux et le fumier. Toute analogie entre les études effectuées et le problème des boues d'abattoir devra donc rester prudente.

Tableau 3 : Résistance d'*Escherichia coli*

Auteurs de l'étude	Espèce	Conditions de survie		Résistance	Commentaires
Winslow et Cohen, 1918 (Cité dans 46)	<i>Escherichia coli</i>	Dans l'eau		Réduction de 99% de la population au bout de 10 jours	Taux de mortalité très élevé au cours des premières 24h
Jordan, 1926 (Cité dans 46)		Dans les selles à température ambiante		Croissance puis décroissance autour de 36 à 48 jours	
Donsel et al, 1967 (Cité dans 46)		Dans le sol	Hiver	13,4 jours	
	Ete		3,3 jours		
(29)	<i>E. Coli O157:H7</i> (conditions environnementales)	Fumier d'ovins non aéré)		> 1 an	
		Fumier d'ovins aéré)		> 4 mois	
		Fèces de bovins aérés		> 47 jours	

La teneur moyenne d'*E.Coli O157:H7* dans le fumier est de  $10^2$  à  $10^3$  CFU / g.(47) Cette teneur initiale peut prendre 10 mois pour décroître jusqu'à 10 à 100 CFU / g dans le cas de fumier ovin non aéré. Dans des condition aérobies, la teneur ne descend pas au dessous de  $10^5$  à  $10^6$  CFU / g.(29)

Assez paradoxalement, *E.Coli O157:H7* survit mieux dans le fumier soumis aux conditions environnementales que dans le tractus gastro-intestinal animal. En outre, la survie est meilleure dans des effluents à haute teneur en M.E.S. en particulier si ceux-ci sont maintenus dans des conditions anaérobies et à des températures inférieures à 23°C. La fourchette de température optimale étant 4 à 10°C.

Plusieurs études concluent que dans le cas où *E.Coli O157:H7* se trouve à la surface du sol, elle peut survivre, se multiplier et être transportée verticalement dans le sol. Les précipitations contribuent grandement à la dispersion du pathogène dans le sol par ruissellement ou infiltration. Les caractéristiques du sol jouent bien sûr un grand rôle dans la survie de cette bactérie. Notons que les sols herbeux lui sont très favorables.

Une étude a montré que *E.Coli O157:H7* pouvait survivre et même se multiplier sur de la salade stockée à 12°C et 21°C ceci pendant plus de 14 jours. (ABDOUL - RAOUF UM et al, 1993)

Dans l'eau de rivière on a observé un abattement de  $10^6$  à un niveau non détectable au bout de 27 jours, tandis que dans l'eau de consommation, la survie peut atteindre 4 à 12 semaines selon les conditions.

De manière générale, *E.Coli O157:H7* se comporte de façon analogue à l'espèce non pathogène. On peut donc en conclure qu'*E.Coli* est un indicateur convenable pour évaluer la survie de l'espèce pathogène.

- *Protozoaires*

### *Cryptosporidium*

Tableau 4 : Résistance de *Cryptosporidium*

Auteurs de l'étude	Espèce	Conditions de survie	Durée de survie
OLSON et Al (Cité dans 46)	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Stockage à -4°C ou à 4°C	12 semaines
		25°C dans le sol ou dans l'eau	> 6 semaines

Une étude de JENKINS et al (2002) (cité dans (31)) compare la survie de *Cryptosporidium* dans différents types de sol (sableux, argileux...) et à diverses températures. Cette étude conclut que la température est le facteur le plus déterminant pour la survie de *Cryptosporidium* après le type de sol. D'après cette étude, un sol où on a été épandus des déchets animaux contenant ce protozoaire, constituent un réservoir à long terme d'oocystes infectieux. En outre, dans certaines conditions de climat et de topographie une contamination des eaux de surface est possible. De cette même étude sont tirés les taux d'inactivation de ce germe dans les différents environnements en supposant une loi de décroissance d'ordre un. La température joue un rôle capital dans la variation des durées de survie du pathogène, celle-ci étant allongée pour des températures basses. Ces taux varient entre  $0,0012 \text{ jour}^{-1}$  (à 4°C dans du limon sableux) et  $0,0205 \text{ jour}^{-1}$  (à 30°C dans du limon argilo sableux). Dans l'eau, la constante de décroissance varie entre 0,0077 à 4°C et 0,0327 à 30°C.

- *Le prion responsable de l'E.S.B.*

La résistance de ces agents a été précédemment évoquée. Un chauffage à 121°C pendant 4 heures ou des chauffages répétés dans de la soude caustique semblent pouvoir les inactiver. La désinfection chimique et les radiations ont une efficacité limitée. (Il est préconisé à l'abattoir de faire tremper les ustensiles de découpe et autre matériel dans une solution d'eau de javel à 20 000 ppm pendant au moins une heure pour les décontaminer). (13) Quant à l'enfouissement, il contribue à diviser chaque année par dix le potentiel infectieux des tissus. (16)

Au sein de la communauté européenne, pour contrôler le prion, on chauffe les déchets animaux à une température supérieure à 133°C pendant 20 minutes et à une pression absolue de 3 bars, ceci sous la condition que la taille des particules ne dépasse pas 50 mm.

NOTA BENE : Quelles que soit les données sur la durée de survie des germes, celles-ci sont à utiliser avec prudence car elles se bornent en général à mettre en évidence la persistance des germes sans préciser en parallèle la densité d'inoculation, les conditions d'environnement ou l'importance de la population survivant au bout d'une période donnée. Or la connaissance de ces paramètres est indispensable pour juger du risque généré par ces germes.

### 3.3 COURBES DOSE-REPONSE OU DMI

#### 3.3.1 Approche avec seuil

La dose minimale infectante (D.M.I.) est la plus petite dose de bactéries susceptible de provoquer une infection chez des individus exposés. Elle est en général établie pour l'ingestion. Il est également possible d'établir une « Dose Infectieuse 50% », (D.I.<sub>50%</sub>), dose pour laquelle 50% des individus exposés développeront la maladie.

La littérature ne fournit pas les valeurs de doses minimales infectantes pour tous les microorganismes existants. Certaines sont disponibles, mais de manière plus générale, on dispose d'ordres de grandeur en fonction des différentes familles de pathogènes. ( $10^2 - 10^6$  pour les bactéries et  $10^1 - 10^2$  pour les protozoaires)

Le tableau qui suit récapitule plus précisément les doses minimales pour l'homme trouvées dans la littérature, pour les pathogènes étudiés ici:

Tableau 5 : D.M.I. des germes pathogènes étudiés

	Micro-organismes	DM.I. ou D.I. <sub>50</sub>
DMI	<i>E.Coli O15H7:</i>	< 100 organismes (22)
	<i>Salmonella</i>	$10^5$ à $10^9$ organismes (2)
DI <sub>50</sub>	<i>Cryptosporidium</i>	132 organismes (64)

Dans le cas du prion, des études réalisées sur du bétail et également sur des souris (Hawkins and G.Wells cités dans (20) ont permis d'établir une D.I.<sub>50</sub> propre aux bovins, mais également d'extrapoler les résultats obtenus afin d'obtenir une D.I.<sub>50</sub> pour l'homme (20).

On a fait ingérer aux animaux, des quantités croissantes (1 à 100 g et 3 X 100g) de cervelle de bovin infectée par l'ESB. Les résultats concernant les bovins ont été analysés au bout de neuf ans.

Les résultats nous donnent la masse de cervelle infectée qui doit être ingérée pour observer un développement de l'affection chez 50 % des individus exposés. Ils sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 6 : D.I.<sub>50</sub> du prion pour les bovins et pour les humains (20)

	D.I. <sub>50</sub> (g)		I.C. <sub>95%</sub>
	<b>Bétail</b>	Valeur expérimentale	0,38
Valeur utilisée pour l'analyse de risque		0,1	-
<b>Humain</b>	1		-

La probabilité d'être infecté par ingestion de 1 gramme de cervelle ou de moelle épinière infectées est de 50 %. Cependant, les approximations utilisées pour l'obtention de ce chiffre sont si nombreuses que l'on admet communément que cette probabilité est de 1. En outre l'issue de la maladie de Creutzfeld Jacob étant toujours fatale, on assimile la D.I.<sub>50</sub> à la D.L.<sub>50</sub> (dose létale 50).

Notons toutefois l'approche avec seuil, fondée sur l'utilisation de D.M.I. ne tient pas compte des différences de sensibilité que l'on peut rencontrer au sein de la population humaine. Les D.M.I. sont établies sur des animaux puis extrapolées aux humains en prenant un facteur de sécurité le plus souvent égal à 1000, tenant compte entre autres de la barrière d'espèce. En revanche, l'approche sans seuil, s'appuie en général sur des lois statistiques type "exponentielle" ou "Béta-Poisson" et permet de tenir compte d'une distribution des sensibilité des individus exposés au pathogène considéré.

### 3.3.2 Approche sans seuil

Le risque microbiologique peut-être abordé avec une approche sans seuil. Une loi statistique propre à chaque microorganisme doit alors être définie pour caractériser le risque induit par le germe en question. On détermine expérimentalement ou à partir de données épidémiologiques quelle loi décrit avec le plus d'exactitude la réponse à l'exposition d'un microorganisme donné. Les lois les plus souvent utilisées sont la loi exponentielle négative (1) ou Béta - Poisson (2) dont le descriptif est joint en *annexe 6*. Leurs équation sont les suivantes :

$$P = 1 - \exp(-rd) \quad (1)$$

$$P = 1 - (1 + d / \hat{a})^{-\hat{a}} \quad (2)$$

Il faut alors pour chaque germe déterminer les paramètres entrant dans l'expression de la formule mathématique choisie. Ceci fait toute la difficulté de ce type d'approche en matière de risque microbiologique. En effet, les paramètres indispensables à l'application des lois statistiques n'ont été déterminés que pour une très petite quantité de microorganismes et ils sont en général définis pour une population bien définie.

### 3.3.3 Courbes dose-réponse des germes sélectionnés

#### 3.3.3.1 Prion

Dans le cas du prion, une approche sans seuil a été choisie (20) Bien que les modèles exponentielle décroissante et Log-Probit fournissent des résultats sensiblement identiques pour les doses dépassant  $10^{-2}$  DI<sub>50</sub>, la loi exponentielle négative est mieux appropriée pour décrire les expositions aux faibles doses. Pour des expositions inférieures à  $10^{-2}$  DI<sub>50</sub>, la loi exponentielle négative fournit une relation dose-réponse linéaire. Le risque attendu est égal à 0,69 fois la fraction de DI<sub>50</sub> à laquelle est exposé un individu animal ou humain.

$$\text{Risque} = 0.69 \times \text{fraction de DI}_{50} \text{ ingérée}$$

Cette loi permet d'une part de majorer le risque et d'autre part de ne pas tenir compte des distributions spatiale et temporelle des expositions. Par exemple, l'ingestion d'une D.I.<sub>50</sub> par une personne équivaut à l'assimilation d'un millième de D.I.<sub>50</sub> par 1000 personnes.

Tableau 7 : Risque d'ESB attendu pour une exposition à une fraction de D.I.<sub>50</sub> selon deux modèles statistiques.

Fraction de D.I. <sub>50</sub> ingérée <sub>≈</sub>	RISQUE ATTENDU (cas humain ou bovin)	
	Modèle Exponentiel décroissant	Modèle Log-probit
10 <sup>-7</sup>	0,69.10 <sup>-7</sup>	0,59.10 <sup>-23</sup>
10 <sup>-6</sup>	0,69.10 <sup>-6</sup>	0,42. 10 <sup>-17</sup>
10 <sup>-5</sup>	0,69.10 <sup>-5</sup>	0,40. 10 <sup>-12</sup>
10 <sup>-4</sup>	0,69.10 <sup>-4</sup>	0,50. 10 <sup>-8</sup>
10 <sup>-3</sup>	0,69.10 <sup>-3</sup>	0,87. 10 <sup>-5</sup>
10 <sup>-2</sup>	0,69.10 <sup>-2</sup>	0,21. 10 <sup>-2</sup>
10 <sup>-1</sup>	0,69.10 <sup>-1</sup>	0,76. 10 <sup>-1</sup>
1	0,69	0,50

#### 3.3.3.2 E.Coli O157:H7

Aucune courbe dose-réponse n'a été établie pour ce colibacille. En revanche, sa similitude avec *Shigella M31* (22) ayant été mise en évidence, on admet pouvoir utiliser la courbe dose-réponse de celui-ci. Les études des relations dose-réponse ont été effectuées sur des hommes adultes et en bonne santé.

Ces études ont abouti à une loi Béta-Poisson ( $P = 1 - (1 + d / \beta)^{-\alpha}$ ) avec les paramètres suivants (24) :

$$\beta = D.I._{50} / (2^{1/\alpha} - 1)$$

Avec

- $\alpha = 0.277$
- D.I.<sub>50</sub> = 238

### 3.3.3.3 *Salmonella* sp.

*Salmonella* sp. répond également à une loi Béta-Poisson de paramètres : (24)

- $\alpha = 0.3126$
- $D.I_{.50} = 2.36.10^4$

Cette courbe dose-réponse a été établie en faisant ingérer des œufs contenant des *Salmonelles* à une population humaine (Mc CULLOUGH et EISELE cités dans 44)

### 3.3.3.4 *Cryptosporidium*

La démarche est la même que pour *E.Coli O157:H7* et *Salmonelle*, mais cette fois on utilise une loi exponentielle de paramètre  $k = 214$ . (24, 7)

Cette loi a été établie par des études sur des volontaires à qui on a fait ingérer des oocystes de *Cryptosporidium*.

## 3.4 EVALUATION DE L'EXPOSITION

### 3.4.1 Contamination directe

Les populations exposées sont avant tout les personnes au contact direct de boues, à savoir les **ouvriers de la filière épandage et agriculteurs**. Les mains portées à la bouche sont une voie de pénétration privilégiée, mais d'autres sont possibles, telles que les petites écorchures, les yeux, les voies respiratoires ou transcutanée.

L'inhalation est conditionnée par la dispersion aérienne qui peut survenir lors de l'épandage. Celle-ci peut survenir lors de l'application de boues liquides en raison de la formation d'aérosols ou encore de boues très sèches, auquel cas des poussières peuvent être mis en suspension dans l'atmosphère. Précisons tout de même le caractère anecdotique de cette situation puisque les boues déshydratées n'atteignent souvent au maximum que 25% de siccité. Les particules de diamètre allant jusqu'à 3 micromètres ne sont pas arrêtées par les voies respiratoires et peuvent donc atteindre les alvéoles pulmonaires. En revanche, les particules dont le diamètre dépasse 3 microns sont remontées par l'ascenseur muco-ciliaire pour être en suite dégluties.

Ce type d'exposition lors de l'épandage est facilement contrôlable et peut donc être limité par de bonnes pratiques de travail. Les buses d'épandage peuvent être réglées de manière à éviter une dispersion trop importante. La vitesse du vent peut aussi être un argument déterminant ainsi que la conformation du site. Ajoutons également que l'aspersion d'eaux usées conduit à des gouttelettes de diamètre atteignant 4 à 5 micromètres. Celles-ci sont donc dégluties et non pas inhalées. (35) Or des boues liquides ont une siccité minimale de 2 %. On peut donc en déduire que dans la majorité des cas d'épandage de ce type de boues, les gouttelettes formées auront un diamètre suffisant pour rendre marginal le phénomène d'inhalation. Celui-ci ne sera donc pas abordé dans cette étude. Seul le cas de l'ingestion sera traité ici, en s'appuyant sur une donnée de l'Exposure Factor Handbook de l'USEPA, à savoir que l'ingestion moyenne journalière de sol par un adulte est de 50 mg par jour.(43)



On ne dispose guère d'études épidémiologiques sur les employés des champs d'épandage. Davantage d'études ont cependant été effectuées sur les employés de stations de traitement d'effluents. Bien que ces études manquent quelque peu de puissance (l'échantillon étudié le plus important se montant à une centaine de personnes), elles n'ont pas réussi à mettre en évidence un accroissement significatif du risque infectieux ou du niveau des défenses immunitaires. Signalons tout de même une augmentation du taux des affections gastro-intestinales mineures chez les personnels récemment recrutés. (6) Le rapprochement des résultats de ces études avec les personnels de la filière épandage doit néanmoins rester très prudent.

### 3.4.2 Contamination indirecte

#### 3.4.2.1 Vecteurs mis en jeu

La contamination indirecte peut avoir lieu par l'intermédiaire de nombreux vecteurs tel que l'eau, l'alimentation ou les animaux susceptibles de transférer le danger pathogène d'un endroit à un autre.

- L'alimentation

Un autre mode de contamination directe est l'ingestion de boues concomitante à l'ingestion de fruits et légumes contaminés. Notons tout de même que ce risque est limité par les textes réglementaires qui interdisent l'épandage sur les sites cultivés ou exigent des délais plus ou moins longs avant la mise en culture de sites où a eu lieu l'épandage. (cf. annexe 3)

Ces délais sont compris entre 3 semaines et 18 mois selon que les boues sont hygiénisées ou non et selon le mode de consommation de la denrée cultivée : est-ce un pâturage, les fruits ou légumes cultivés seront-ils consommés crus, ... ? Ce type de recommandation limite donc le risque d'exposition à des pathogènes par l'intermédiaire des plantes qui croissent sur les sites d'épandage. Peut-on cependant affirmer que tout risque est écarté par ces préconisations sans que le degré de réduction du risque ait été évalué une fois ces délais écoulés ?

Nous avons vu précédemment que les pathogènes ont une durée de survie souvent très longue dans les sols. Des salmonelles peuvent par exemple survivre tout un hiver dans de l'herbe ou encore 17 semaines dans des boues digérées et séchées à l'air. Or la réglementation préconise un délai de 6 semaines avant de faire paître des animaux ou de récolter du fourrage sur un site où ont été épandues des boues non hygiénisées.

Bien que plus anecdotique, il faut signaler la contamination possible d'individus pratiquant la cueillette de baies ou le ramassage de champignons ou de pissenlits à proximité de champs ou dans les forêts où ont lieu des épandages.

- L'eau

Les parcelles où sont épandues les boues peuvent être lessivées par la pluie. Les eaux de ruissellement peuvent alors contaminer les eaux de surfaces et les eaux d'infiltration peuvent gagner les réserves souterraines. Bien que cette situation soit envisageable dans des conditions exceptionnelles de pluviométrie, la plupart des études concordent en affirmant que 90 à 95% des microorganismes s'accumulent à la surface du sol (au plus à 5 cm), tandis que le reste ne transite que sur de très faibles distances. (3) Le phénomène de rétention mis en œuvre dans ce cas, dépend de la taille des microorganismes relativement à la taille des pores du sol, du processus d'absorption sur le complexe argilo-humique du sol, de la vitesse d'infiltration de l'eau. Le pH et la température du sol sont également des éléments importants.

La contamination des eaux de surface par ruissellement est due au transport de particules solides auxquelles peuvent être adsorbés des microorganismes. Le ruissellement dépend donc directement de la pluviométrie, mais également de la pente du terrain. Il est d'ailleurs clairement déconseillé d'épandre les boues pendant les périodes de fortes pluies pour éviter ces phénomènes de ruissellement et infiltration.

La contamination des eaux peut donc être considérée comme accidentelle.

- Les animaux

Le risque de contamination des humains par l'intermédiaire des vecteurs animaux ne doit pas être négligée. Les animaux jouant un rôle dans l'alimentation humaine sont à surveiller avec une attention toute particulière. En effet, les boues en contaminant l'alimentation du bétail peuvent faire entrer des pathogènes dans la chaîne alimentaire humaine.

D'autres vecteurs tels que les insectes, les rongeurs, des oiseaux ou autres invertébrés peuvent également contribuer à un transfert de contamination. Pour exemple, on peut citer plusieurs études ayant identifié les boues d'épuration comme une source de contamination des goélands. Köhler (1993) a mis en évidence l'introduction d'un lysotype de *Salmonella enteritidis* depuis une décharge d'ex Allemagne de l'Est vers un élevage de poulets et aboutissant à une contamination humaine via des produits à base d'œufs.

Les vers de terre, peuvent eux aussi constituer un réservoir protecteur pour certains pathogènes, allongeant alors leur durée de vie dans les sols. Les rats, les lapins, ou même les animaux domestiques peuvent également faire partie des réservoirs bactériens, mais ils peuvent aussi servir d'hôtes intermédiaires ou définitifs à certains parasites. Peu d'informations sont cependant disponibles à ce sujet.

#### 3.4.2.2 Population exposée

**Les familles des employés travaillant à l'épandage** ou les familles d'agriculteurs, peuvent se trouver exposées aux poussières déposées sur les vêtements de ceux-ci.

La **population riveraine** est également exposée, comme précisée précédemment dans l'évocation des modes de contamination. En effet, la pratique de la cueillette est une source d'exposition. Le manque d'hygiène (lavage des denrées récoltées ou des mains) peut favoriser l'ingestion de poussières et donc de boues.

Il faut cependant préciser que certains segments de la population sont plus sensibles que d'autres. Ceci est particulièrement vrai pour les individus immunodéprimés, les très jeunes et les plus âgés. Ces catégories sont en particulier sensibles aux infections contractées par ingestion de nourriture ou d'eaux contaminées. Ces trois catégories de population ont été estimées comme représentant 20% de la population totale. (9) Cependant il n'a pas été démontrée que cette strate tout entière pouvait être déclarée comme étant "à risque" pour des pathogènes bien spécifiques.

#### 3.4.3 Exposition du bétail

Le bétail peut être contaminé en ingérant du fourrage provenant d'une zone où ont été épandues des boues. En outre, en pâturant sur des prairies où a eu lieu un épandage, le bétail peut se trouver exposé par l'intermédiaire de l'herbe ingérée, sans oublier qu'une quantité de sol est également avalée lors du broutage. Un bovin ingère environ 500 g de sol par jour. Ce chiffre sera également utilisé pour l'ingestion de sol par les ovins bien que cette valeur surestime la réalité. En effet, les bovins ont tendance à arracher l'herbe tandis que les ovins la coupent, ce qui réduit les quantités de sol ingérées.

Les boues d'abattoir peuvent poser davantage de problèmes que les boues urbaines en raison de leur forte concentration en microorganismes pathogènes.

La relation directe entre la fertilisation par des boues d'épuration et la contamination par des Salmonelles, du bétail nourri avec du fourrage après un épandage, a été mise en évidence par BREER (1981).

Figure 1 : Bilan des voies d'exposition aux boues

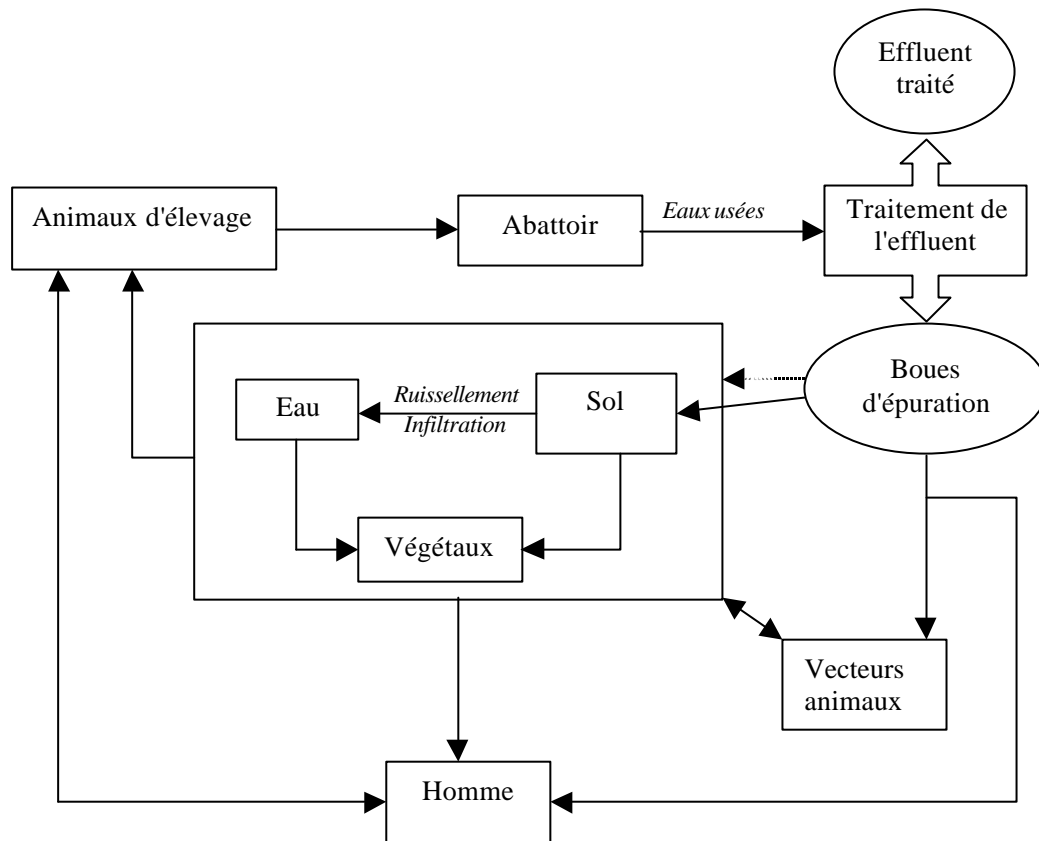


Tableau 8 : récapitulatif des types d'exposition  
classés par importance croissante au sens épidémiologique:

<b>Mode de transmission</b>	
Transmission directe aux animaux de ferme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contamination des prairies</li> <li>• Introduction de pathogènes par stockage et manipulation des déchets a proximité des animaux sensibles</li> <li>• Transmission par l'air au moment de l'épandage</li> </ul>
Transmission directe aux humains	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manutention de produits contaminés</li> <li>• Exposition environnementale à des produits contaminés</li> <li>• Transmission accidentelle aux personnes les plus sensibles (immunodéprimés, enfants, vieillards).</li> </ul>
Transmission indirecte aux animaux de ferme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par l'intermédiaire d'alimentation provenant de sites contaminés</li> <li>• Via des vecteurs vivants</li> </ul>
Transmission indirecte aux humains	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Par introduction d'agents générant des zoonoses dans la chaîne alimentaire</li> <li>• Via de la nourriture contaminée par des vecteurs animaux.</li> </ul>
Introduction dans l'environnement.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Génération de porteurs dans l'environnement.</li> </ul>

Au vu de ces considération la caractérisation des risques se fera pour quatre cas de figure différents:

- Ingestion directe de boues par un agriculteur lors de l'épandage
- Ingestion de sol par un enfant en contact avec un champ d'épandage
- Ingestion pissenlits ramassés à proximité d'un champ où ont été épandues des boues
- Ingestion de sol par un bovin paissant sur une prairie ayant fait l'objet d'un épandage

### **3.4.4 Détermination des concentration en pathogènes dans les sol et les boues**

#### **3.4.4.1 Prion**

On cherche ici à déterminer le nombre de D.I.<sub>50</sub> par masse de boue ou de sol, exprimée en masse de matière sèche. La D.I.<sub>50</sub> n'étant pas la même pour l'homme que pour les bovins, on obtiendra deux concentrations différentes pour chacun de ces cas. (D.I.<sub>50</sub> = 1g cerveau + moelle épinière pour les humains contre 0.1 g pour les bovins)

#### **Hypothèses :**

- 1 % de matériau à risque spécifié (cerveau et moelle épinière) part avec les eaux usées. (21)
- La totalité du matériel infectieux reste dans les boues, ceci est appuyé par le caractère hydrophobe du prion.
- Le prion n'est pas affecté par le traitement des boues.
- Le pouvoir infectieux ne diminue pas après l'épandage.

### Concentration dans les boues

<b>Cas bovin</b>	$[DI_{50}]_{MS} = 2,2 \cdot 10^6 DI_{50}$ par tonne de MS
<b>Cas humain</b>	$[DI_{50}]_{MS} = 2,2 \cdot 10^7 DI_{50}$ par tonne de MS

$$[DI_{50}]_{MS} = (N \cdot 1 \% \cdot M) / (DI_{50} \cdot Q)$$

### Concentration dans les sols

<b>Cas bovin</b>	$[DI_{50}]_{sol} = 3,7 \cdot 10^{-6} DI_{50}$ par tonne de sol
<b>Cas humain</b>	$[DI_{50}]_{sol} = 3,7 \cdot 10^{-7} DI_{50}$ par tonne de sol

$$[DI_{50}]_{sol} = (Q \cdot [DI_{50}]_{MS}) / (2 \% SAU \cdot H \cdot d)$$

Avec :

- N : Nombre d'animaux atteints d'ESB abattus en 2001 : 83
- M : Masse d'une cervelle + moelle épinière de bovin : 1 kg
- Q : Quantité de boues d'épuration épandue en 2001 :  $10^6$  tonnes de M.S.
- d : Densité du sol (sec) :  $1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
- H : Profondeur moyenne de l'enfouissement lors d'un épandage: 25 cm
- SAU: Surface agricole utile française :  $30 \cdot 10^6$  ha
- L'épandage de boues (toutes origines confondues) à lieu sur 2% de la surface agricole utile française
- I : Masse de sol journalière ingérée par un bovin :500 g / jour

#### 3.4.4.2 Autres pathogènes (*E.Coli O157:H7*, *Salmonella sp.*, *Cryptosporidium*)

L'évaluation des risques repose à nouveau sur une approche sans seuil. Un risque moyen sera caractérisé ici. Les trop nombreuses approximations ne permettent pas de donner une fourchette de valeurs, la borne supérieure (risque maximal) n'ayant jamais une signification suffisante pour asseoir des conclusions.

Nous avons évoqué plus haut le fait que le risque dont il est question ici, est principalement dû aux pathogènes se trouvant dans l'appareil digestif des animaux. La concentration de la flore microbienne pathogène des matières stercoraires et de leurs jus étant inconnue, nous utiliserons comme un chiffre global, la teneur en pathogène des excréments.

Les données de prévalence de la maladie chez les animaux et la concentration en pathogènes dans les fèces sont disponibles dans la littérature. Elles seront utilisées pour évaluer la quantité de pathogènes rejetés dans les excréments. La quantité d'excrément gagnant les eaux usées lors du lavage des étables et des bétailières est évaluée arbitrairement à 5 %.

L'abattement des microorganismes lors du traitement de l'effluent est compris entre 1 et 3 unités log. (15) On suppose un abattement de 2 log et on considère que tous les pathogènes passent de l'effluent aux boues tout en restant viables. On ne tient pas compte de la mortalité des pathogènes pendant un éventuel stockage ou un traitement des boues. Ainsi, la concentration en pathogènes dans les boues est connue ainsi que la masse de boues épandue à l'hectare. En supposant un enfouissement sur une épaisseur de sol de 25 cm et en connaissant la densité du sol ( $1,5 \text{ g} / \text{cm}^3$ ), on calcule la concentration des pathogènes dans les sols après un épandage.

Les équations littérales permettant le déroulement du raisonnement ci-dessus sont joints en *annexe 7*.

Tableau 9 : Données relatives à l'abattoir

Bêtes abattues/semaine		Production de boue	
Bovins	1300	m3/an	1900
Ovins	800	t/jour	5,2
Total/an	<b>109200</b>	Siccité	0,15
		t MS/jour	<b>0,78</b>
Excrément (kg/tête)	<b>0.8</b>	kg/jour	<b>780</b>

➤ CAS DE *E.COLI O157:H7*

Tableau 10 : paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *E.Coli O157 :H7*

Paramètres	Valeur	Source
Prévalence de la maladie	5 %	<b>(8, 47, 29, 11)</b>
Concentration moyenne dans les fèces (CFU/g)	$8.8.10^3$	<b>(47)</b>
Constante d'inactivation dans les sols (jour <sup>-1</sup> )	0.68	<b>(30)</b>

Les chiffres donnant la prévalence d'E.Coli O157:H7 sont variable selon les sources. On admettra ici le chiffre moyen de 5 %. Notons toutefois que le ministère de l'agriculture américain (Service d'inspection et de sécurité des aliments) fait part d'une prévalence du pathogène à l'abattoir comprise entre 13 et 28 %.

La concentration moyenne dans les fèces a été calculé à partir des chiffres trouvés dans une publication de T. ZHAO **(47)**. L'étude a été réalisée sur 47 vaches parmi lesquelles on a observé des concentrations en *E.Coli O157:H7* variables dans les excréments. Les concentration s'étalent entre 100 et 10<sup>5</sup> CFU par gramme, mais le chiffre donné ici est la moyenne arithmétique de des différentes concentrations observées chez les 47 animaux.

Concentration dans les boues : 9,38 CFU / g

Concentration dans les sols :  $4,17.10^{-3}$  CFU / g

La constante de décroissance de la bactérie dans les sols a été utilisée pour calculer la concentration dans le sol deux jours après l'épandage soit 10<sup>-3</sup> CFU / g (le détail du calcul est joint en *annexe 7*)

➤ CAS DES SALMONELLES

Tableau 11 : paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *Salmonelle*

Paramètres	Valeur	Source
Prévalence de la maladie	5 %	<b>(1, 61)</b>
Concentration moyenne dans les fèces (CFU/g)	10 <sup>4</sup>	approximation
Constante d'inactivation dans les sols (jour <sup>-1</sup> )	1,33	<b>(30)</b>

Les concentrations s'échelonnent entre 10<sup>2</sup> et 10<sup>9</sup> **(41)**. 10<sup>4</sup> a été choisi arbitrairement comme une concentration moyenne chez un animal porteur sain.

Concentration dans les boues : 10,7 CFU / g

Concentration dans les sols :  $4,7 \cdot 10^{-3}$  CFU / g

#### ➤ CAS DE CRYPTOSPORIDIUM

Tableau 12 : paramètres nécessaires à la caractérisation du risque *Cryptosporidium*

Paramètres	Valeur	Source
Prévalence de la maladie	20 %	(33)
Concentration moyenne dans les fèces (oocystes/g)	900	(32)
Constante d'inactivation dans les sols (jour <sup>-1</sup> )	k = 0.0012 à 4°C dans du limon sableux	(31)
	k = 0.0205 à 30°C dans du limon argilo sableux.	

L'abattement moyen de *Cryptosporidium parvum* lors du traitement de l'effluent est de 98,6 % (40) On considère donc que 98,6 % des organismes passent dans les boues tout en restant viables.

Concentration dans les boues : 3,8 CFU / g

Concentration dans les sols :  $1,7 \cdot 10^{-3}$  CFU / g

Tableau 13 : Récapitulatif des concentrations en pathogènes dans les boues et le sol

	Concentration dans les boues	Concentration dans les sol
<i>E.Coli O157:H7</i> (CFU / g )	9,38	$4,17 \cdot 10^{-3}$ ( $10^{-3}$ 2 jours après l'épandage)
<i>Salmonella sp</i> (CFU / g )	10,7	$4,7 \cdot 10^{-3}$
<i>Cryptosporidium</i> (organismes / g )	3,8	$1,7 \cdot 10^{-3}$

### 3.4.5 Scénario d'exposition pour l'évaluation des risques

Des scénarios d'exposition sont élaborés pour estimer la quantité de microorganismes susceptibles d'être ingérés par des individus dans des situations bien définies.

#### 3.4.5.1 Scénario 1 : Ingestion de sol par un bovin

Ce cas de figure n'est traité que dans les cas du prion.

Nous prendrons le cas d'un bovin paissant 365 jours par an sur une prairie ayant reçu des boues provenant d'une station d'épuration d'abattoir de ruminant.

L'ingestion de sol par l'animal est d'environ 500 g de sol par jour. (34) Ce chiffre est une donnée médiane, l'ingestion de sol s'étalant entre 0,73 et 0,99 kg de sol par jour selon les saisons.

#### 3.4.5.2 Scénario 2 : Ingestion de boues par un homme lors de l'épandage

Trois fois par an, un agriculteur épand des boues provenant d'une station d'épuration d'abattoir de ruminants. A chaque épandage, l'individu ingère du sol par port des mains à la bouche, inhalation de particules de boues ou aérosols de taille suffisante (> 4 microns) pour être ensuite dégluties...

Aucune donnée n'est disponible quant à l'évaluation de la quantité de boues ingérée par un individu réalisant un épandage. Nous supposons donc que la masse de boues ingérée est égale à la quantité moyenne journalière de sol ingérée par un adulte. Cette donnée est disponible dans l'Exposure Factor Handbook de l'USEPA (1997) (43). D'après cette source, un adulte ingère en moyenne 50 mg de sol par jour.

#### 3.4.5.3 Scénario 3 : Ingestion de sol par un enfant

Prenons le cas d'un enfant allant jouer dans des champs où ont été épandues des boues provenant d'une station d'épuration d'abattoir de ruminants. Le risque est calculé en supposant dix expositions ayant lieu avant que tout abattement de pathogènes dans le sol ait pu avoir lieu. L'ingestion de sol peut avoir lieu par port des mains à la bouche ou ingestion de poussières mises en suspension dans l'air.

L'ingestion de sol par un enfant est de 100 mg par jour. (43).

#### 3.4.5.4 Scénario 4 : ingestion de pissenlits ayant reçu des boues

On suppose cette fois un individu allant ramasser des pissenlits en bordure d'un champ où a été réalisé un épandage de boues provenant d'une station d'épuration d'abattoir de ruminants. Cette personne ramasse 10 pissenlits, les lave de telle sorte que 99 % des boues qui souillent les plantes soient éliminés.

On estime pour le calcul de la quantité de boue ingérée que

- Un pissenlit représente une surface au sol de 25 cm<sup>2</sup>.
- La quantité de boue reçue par la plante lors de l'épandage est égale à la quantité épandue sur le champ par unité de surface. (1,67 t de matière sèche à l'hectare)

### 3.5 CARACTERISATION DES RISQUES

La caractérisation des risques repose sur les trois étapes précédentes, à savoir, l'identification des dangers, l'identification de courbes dose-réponse et l'évaluation des expositions. Le calcul mettant en évidence un excès de risque individuel pour chaque scénario envisagé.

#### 3.5.1 Risque Prion

L'analyse du risque prion effectuée ici s'inspire directement du travail de GALE (2001) (21)

Elle est effectuée pour l'année 2001, au cours de laquelle 83 cas d'ESB ont été détectés par dépistage systématique à l'abattoir.

Il s'agit de calculer le risque de contracter la maladie ( R ) dont nous avons vu qu'il était égal à 0,69 fois la fraction de DI<sub>50</sub> ingérée. (calcul effectué sur une année)

$$R = 0,69 \times [DI_{50}]_{\text{sol}/MS} \times I \times 365$$

Avec I : quantité de sol ou de matière sèche ingérée

#### SCENARIO 1 : INGESTION DE SOL PAR UN BOVIN

$$R = 4,6.10^{-7}$$

On constate qu'en 2001, le risque attendu était de 1 cas sur environ 2.2 millions. En 2001, le nombre de bovins abattus étant d'environ de 2,4 millions de têtes (2 382 325), on pouvait donc s'attendre à 1.1 cas



d'ESB du au broutage. Or, en 2001, on a détecté 274 cas, toutes origines confondues pour ce même cheptel d'environ 2.4 millions de têtes. La part de risque due au broutage sur pâture ayant reçu des boues est donc très faible: 0.4 % (1,1/274). Il ne faut cependant pas passer ce risque sous silence. En effet, si toute autre cause de contamination du bétail par le prion se trouvait maîtrisée, **la contamination par l'intermédiaire du pâturage serait à même de faire persister un bruit de fond non négligeable.**

#### SCENARIO 2 : INGESTION DE BOUES AU COURS DE L'EPANDAGE

$$R = 8,6.10^{-11}$$

Dans le cas de l'agriculteur épandant ses boues à trois reprises. L'excès de risque individuel est alors de  $8,6.10^{-11}$ . Ce chiffre doit être rapporté à la population concernée. L'ensemble des exploitants agricoles et coexploitants sont au nombre de environ 763 953 (Recensement général agricole 2000). En admettant que la moitié que ces individus épandent eux mêmes leurs boues (environ 350 000), cela nous amène à un nombre de cas potentiellement observables de  $2,9.10^{-5}$  cas annuel parmi cette population. L'excès de cas observable est donc faible en raison du nombre assez restreint de personnes exposées, toutefois, l'excès de risque individuel est non négligeable et dépasse largement les chiffres observés de prévalence de maladie de Creutzfeld-Jacob observés en France. La pratique de l'épandage doit donc être considérée comme présentant un risque potentiel.

#### SCENARIO 3 : INGESTION DE SOL

$$R = 2,6.10^{-13}$$

En ce qui concerne le scénario 3, l'excès de risque individuel suite à dix expositions à des sols où ont été enfouies des boues contaminées par l'agent de l'ESB est de  $2,6.10^{-13}$ . Or en 2001, on a observé 2 cas certains ou probables de variante de la maladie de Creutzfeld-Jacob dont l'un est décédé. Sur l'ensemble de la population française, cela revient à une prévalence de  $3.3.10^{-8}$ .

**Ainsi, le risque dû à l'épandage lors de l'ingestion accidentelle de sol est extrêmement faible.**

#### SCENARIO 4 : CONSOMMATION DE PLANTES cueillies à proximité d'un champ d'épandage.

$$R = 6,3.10^{-15}$$

L'excès de risque individuel pour contracter la maladie de Creutzfeld-Jacob par ingestion de pissenlits ayant reçu des boues contaminées par l'agent de l'ESB est une fois encore extrêmement faible. En outre, le nombre d'individus étant probablement faible, l'excès de risque collectif sera lui aussi très faible.

### **3.5.2 Risques dus aux autres pathogènes**

#### Tableau 14 : Récapitulatif des étapes du calcul de l'excès de risque

Résultat recherché	Paramètres intervenant dans le calcul
Quantité de fèces infectés	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prévalence de la maladie</li> <li>Quantité de fèces excrétés en un an</li> </ul>
Nombre de microorganismes excrétés	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quantité de fèces infectés</li> <li>Concentration des pathogènes dans les fèces infectés</li> </ul>
Nombre de microorganismes gagnant l'effluent à traiter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estimation de la quantité de fèces gagnant l'effluent</li> </ul>
Nombre de microorganismes gagnant les boues	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abattement des microorganismes lors du traitement de l'effluent</li> </ul>
Nombre de microorganismes restant dans les boues après une durée de stockage donnée	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estimation de la survie d'après des données de la littérature.</li> </ul>
Nombre de microorganismes épandus au m <sup>2</sup> (ou par kg de sol si enfouissement)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentration des pathogènes par tonne de MS dans le silo à boues</li> <li>Quantité de boue épandue au m<sup>2</sup> (ou par kg de sol si enfouissement)</li> </ul>
Risque d'infection pour une personne exposée	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exposition (nombre de microorganismes ingérés...)</li> <li>Courbe dose-réponse et ses paramètres (Béta-Poisson...)</li> </ul>
Nombre de cas attendus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Population exposée</li> </ul>
Comparaison avec la prévalence effective des différentes infections	
Conclusion	

Remarque : tous les champs de ce tableau n'ont pu être renseignés ici.

### 3.5.2.1 Risque *E.Coli* O157:H7

Les jeunes enfants sont davantage sujets aux infections par *E.Coli* O157:H7 que les adultes en outre des études épidémiologiques concernant les infections par cette bactérie on été effectuées sur les enfants de moins de 15 ans. La caractérisation des risques sera donc effectuée dans le cas d'un enfant de moins de 15 ans.

#### SCENARIO 3 : INGESTION DE SOL PAR UN ENFANT

$$R = 2,7.10^{-5}$$

Dans ce cas de figure, l'excès de risque individuel est de  $2,7.10^{-5}$ , soit environ 3 cas d'infection par *E.Coli* O157:H7 pour 100 000 personnes enfants de moins de 15 ans exposés dans ces conditions. Une telle infection implique des conséquences plus ou moins graves selon les cas. De manière générale, ce pathogène entraîne des diarrhées sanglantes accompagnées de douleurs abdominales. Cependant, 2 à 10 % des cas dégénèrent en SHU pouvant entraîner la mort. (25)

Ainsi, si l'on s'intéresse au risque de contracter un SHU, l'excès de risque individuel devient  $2,7.10^{-6}$  soit 0,3 cas pour 100 000 personnes exposées dans ces conditions. Ce chiffre est à rapprocher des chiffres observés et rapportés dans le Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire (25), à savoir que le taux d'incidence national du SHU est inférieur à 1 cas pour 100 000. (environ 0,87 cas pour 100 000 en 1999) Parmi ces cas de SHU observé, 63%, soit environ 0,6 cas pour 100 000 sont à imputer à *E.Coli* O157:H7.

Au vu de ces considérations et bien que le résultat de l'évaluation des risques nous donne un chiffre deux fois inférieur au chiffre observé, on peut retenir que les deux valeurs en question sont du même ordre de

grandeur. L'évaluation du risque effectuée ici repose sur des valeurs moyennes mais il est indispensable de garder à l'esprit les nombreuses hypothèses effectuées. En particulier, le fait de ne pas tenir compte de la mortalité des pathogènes avant comme après l'épandage, conduit de toute évidence à une surestimation du risque. A cette affirmation, il est possible d'opposer le fait que la courbe dose-réponse a été établie grâce à la participation d'hommes adultes et en bonne santé, ceci pouvant introduire un biais contribuant à minimiser le risque dans le cas d'enfants. En outre, cette étude a été réalisée pour *Shigella M31* et non pas *E.Coli O157:H7* lui-même.

**En tout état de cause, les chiffres obtenus doivent être un encouragement à la vigilance à l'égard des jeunes enfants pouvant avoir un accès à des champs d'épandage.**

*Pour comparaison, prenons maintenant le même scénario que précédemment, mais en supposant que les expositions ont lieu deux jours après l'épandage. Les microorganismes ont donc commencé à mourir dans le sol avec une constante de décroissance  $k = 0,68 / \text{jour}$ . (30)*

Dans cette situation, l'excès de risque individuel n'est plus que de  $7.10^7$  en ce qui concerne une infection par *E.Coli O157:H7*. On observe donc une diminution de deux ordres de grandeur du risque deux jours après l'épandage.

Cette précision permet donc de nuancer la conclusion précédente en insistant sur le fait que **si le risque existe immédiatement après que les boues ont été épandues, celui-ci décroît rapidement au cours des jours qui suivent.**

#### SCENARIO 4 : CONSOMMATION DE PLANTES cueillies à proximité d'un champ d'épandage.

$$R = 5.10^{-3}$$

Dans ces conditions, l'excès de risque individuel s'élève à  $5.10^{-3}$ . Il s'agit ici du risque d'infection par *E.Coli O157:H7* se manifestant le plus généralement par des diarrhées sanglantes. Le risque de SHU se monte donc à  $5.10^{-4}$ , soit 50 cas pour 100 000 personnes exposées dans ces conditions. Bien entendu, le risque est largement surestimé ici, en particulier en ne tenant pas compte de la mortalité des microorganismes qui une fois sur la plante, sont exposés à la dessiccation, ainsi qu'au rayonnement ultraviolet, autant de facteurs très défavorables à leur survie.

#### 3.5.2.2 Risque *Salmonelle*

##### SCENARIO 2 : INGESTION DE BOUES

$$R = 1.7.10^{-4}$$

L'excès de risque d'infection par *Salmonelle*, dans ces conditions est de  $1.7.10^{-4}$  soit 17 cas pour 100 000 personnes exposées dans ces conditions. Or en 2001, le taux d'incidence de Salmonelloses tous sérotypes confondus en France était de 13,8 pour 100 000 (tous âges confondus) (7) En revanche, la classe d'âge 15 – 64 ans affiche un taux d'incidence de 7.7 %. (7) Ce chiffre est donc plus représentatif pour étudier le cas d'un agriculteur potentiellement exposé à des boues. D'après le recensement général agricole, on compte en France 763 953 chefs d'exploitations et coexploitants agricoles. (62) S'il l'on considère que la moitié de cet effectif épand des boues, soit environ 350 000 personnes, on attendra 60 cas d'infection par *Salmonelle* sur

l'ensemble de cette population en 1 an. Ce chiffre très important s'explique une fois encore par une surestimation du nombre de pathogènes ingérés, notamment en ne tenant pas compte d'une décroissance au cours du traitement de l'effluent, du stockage des boues ou même de leur épandage. Cependant, il ne faut pas oublier que la concentration en pathogènes dans les fèces choisie pour le calcul est de  $10^4$ . Or, cette concentration peut dans certains cas atteindre  $10^9$  CFU par gramme de fèces. Dans ce cas, le risque augmente de trois ordres de grandeur. Il peut donc paraître raisonnable de considérer que l'erreur effectuée en considérant que tous les microorganismes restent viables, du traitement de l'effluent à leur ingestion est en partie compensée par le choix de la concentration en pathogènes.

**Ainsi, l'épandage des boues ne doit pas être considérée comme étant une pratique anodine vis à vis du risque d'infection par *Salmonelle*. En revanche de bonnes pratiques de travail et de bonnes conditions d'hygiène qui seront discutées plus bas, peuvent permettre d'écarter le risque sans difficulté.**

### SCENARIO 3 : INGESTION D'UN SOL AYANT RECU DES BOUES

$$R = 5.10^{-7}.$$

L'excès de risque individuel est ici de  $5.10^{-7}$ . Soit  $5.10^{-2}$  cas pour 100 000 personnes exposées dans ces conditions. Les personnes atteintes risquent de développer des fièvres, diarrhées et crampes abdominales. Dans la plupart des cas, la maladie disparaît au bout d'une semaine mais certains cas requièrent une hospitalisation. Ce chiffre est à rapprocher des 13,3 cas observés pour 100 000 en 1999 pour la classe d'âge des 6 – 14 ans (7) Le risque est donc faible, sans oublier que le nombre d'individus se trouvant exposés dans de telles conditions est sans doute restreint.

La courbe dose réponse relative à *Salmonelle* a été établie pour des hommes adultes en bonne santé. Or les enfants sont plus sensibles à une infection par cette bactérie. Ceci est confirmé par les chiffres du BEH No.12/2001 qui détaille par classe d'âge le taux d'incidence des infections à *Salmonelle*. Ainsi, chez les 6 – 14 ans, classe d'âge la plus susceptible d'être exposée dans les conditions décrites ici, le taux d'incidence de *Salmonelle* tous sérotypes confondus est de 13,3 pour 100 000. En revanche, il n'est que de 7,7 chez les 14 – 64 ans. Le résultat obtenu est donc à considérer en gardant à l'esprit qu'il représente un risque moyen qui est probablement plus important pour les individus les plus sensibles.

### SCENARIO 4 : CONSOMMATION DE PLANTES cueillies à proximité d'un champ d'épandage.

$$R = 4,8.10^{-5}$$

L'excès de risque individuel est ici de  $4,8.10^{-5}$ . On attend donc environ 5 cas d'infection par *Salmonelle* pour 100 000. Le chiffre attendu bien qu'élevé, est inférieur au chiffre observé de 13,8 cas pour 100 000. De même que dans le cas d'*E.Coli* pathogène, on peut affirmer que le risque est ici maximisé en raison de la non prise en compte du fort taux de mortalité des bactéries lorsqu'elles sont à l'air libre et exposées aux UV. En outre on considère ici que la consommation a lieu immédiatement après épandage. Enfin, le ramassage des pissenlits dans ces conditions est très probablement marginal. Par conséquent, peu de personnes seront exposées.

Il faut toutefois admettre l'existence d'un risque induit par ce type de comportement et il serait prudent d'éviter cette pratique.

### 3.5.2.3 Risque *Cryptosporidium*

#### SCENARIO 2 : EPANDAGE DE BOUES

$$R = 2,7.10^{-3}$$

Les calculs mènent à la conclusion que ces conditions d'exposition conduisent à un risque relativement élevé d'infection par *Cryptosporidium*. Bien que surestimé au niveau de la survie des microorganismes dans les boues, le risque n'est pas à négliger. En effet, la concentration dans les fèces utilisée pour cette évaluation du risque est de 900 oocystes par gramme de fèces, or elle peut dans certains cas atteindre 18 000 oocystes par gramme de fèces.

**Il n'est donc pas superflu de se protéger lors de l'épandage de ce type de boues.**

#### SCENARIO 3 : INGESTION DE SOL PAR UN ENFANT

$$R = 4,0.10^{-6}$$

L'excès de risque individuel se monte à  $4,0.10^{-6}$  cas de cryptosporidiose, sachant que cette maladie peut très souvent rester asymptomatique mais reste une cause assez fréquente de gastro-entérite, entraînant des diarrhées profuses. (jusqu'à 3L / jour). En outre, les conséquences d'une infection par *Cryptosporidium* peuvent être nettement plus sérieuses chez les individus les plus sensibles tels que les jeunes enfants. La courbe dose réponse de ce protozoaire a été établie en faisant ingérer différentes doses de *Cryptosporidium* à des volontaires. L'exactitude de cette courbe a été vérifiée lors de l'épidémie de cryptosporidiose de Milwaukee en 1993. (7) Ce chiffre est à comparer à la prévalence moyenne de la cryptosporidiose en Europe qui est de 3,5 %. (2) (1 à 3% en Amérique du Nord et Europe d'après HAAS (24)) L'excès de risque calculé pour cette situation est donc faible. Il faut cependant insister sur le fait que *Cryptosporidium* est un organisme très résistant, y compris dans des conditions environnementales hostiles. En effet, des études visant à déterminer la constante d'inactivation de *Cryptosporidium* dans divers types de sol, ont abouti à des chiffres très faibles :  $k = 0,0012 \text{ jour}^{-1}$ , à 4°C dans du limon sableux et  $k = 0,0205 \text{ jour}^{-1}$ , à 30°C dans du limon argilo-sableux. (31) Pour information, on peut préciser que si  $k = 0,0205 \text{ jour}^{-1}$  (mortalité la plus rapide), l'excès de risque individuel n'est réduit d'un ordre de grandeur qu'au bout d'une centaine de jours.

**Les chiffres obtenus sont à prendre avec réserve en raison des nombreuses approximations effectuées. *Cryptosporidium* ne pose a priori pas de problème majeur lors de l'exposition à un sol où auraient été épandues des boues mais il faut rester conscient du danger que pourraient encourir les personnes les plus fragiles.**

#### SCENARIO 4 : CONSOMMATION DE PLANTES cueillies à proximité d'un champ d'épandage.

$$R = 7,4.10^{-4}$$

L'excès de risque est de  $7,4.10^{-4}$ , soit 0,074 %. Ce chiffre paraît faible comparé aux données de prévalence en Europe, à savoir 3,5 %. Cependant, il suffit de 1350 personnes exposées pour observer un cas de

cryptosporidiose. Une fois encore, il émane de cela la recommandation de ne pas cueillir de plante à proximité d'un champ d'épandage.

### 3.6 BILAN

L'état des connaissances sur le sujet étant assez pauvre, l'analyse des risques effectuée ici repose sur un grand nombre d'approximations et d'estimations. Elle demeure néanmoins un outil d'aide à la décision, lorsque les hypothèses sur lesquelles elle repose sont connues. Ainsi, les hypothèses utilisées ici demandent à être affinées (exposition, concentration en pathogènes dans les boues, survie des pathogènes sur les plantes...). Cependant, les calculs d'excès de risques individuels menés ici conduisent à des chiffres laissant penser, dans certains cas, à l'existence d'un risque microbiologique lié à l'épandage des boues.

Les différents risques quantifiés ici mériteraient sans doute d'être réévalués avec des données plus précises, cependant les excès de risque collectifs calculés demeurent généralement limités en raison du faible nombre de personnes susceptibles d'être exposées aux boues de manière générale. En outre, l'excès de risque individuel calculé est quelque fois extrêmement faible, comme par exemple dans le cas du risque de maladie de Creutzfeld-Jacob par ingestion de sol où ont été enfouies des boues de station d'épuration d'abattoirs de ruminants.

Un risque important émane de la pratique de la cueillette. Le calcul mené dans ce cas de figure, met clairement en évidence que les personnes ingérant des plantes cueillies à proximité des champs d'épandage s'exposent à un danger notoire d'infection par *E.Coli* pathogène ou *Salmonelle*. Le risque est d'autant plus grand que les plantes, en l'occurrence les pissenlits, sont consommées crues. D'ailleurs, des études portant sur la décontamination des végétaux montrent que leur stockage ou les opérations de lavage telles qu'elles sont habituellement pratiquées en cuisine, ne sont pas capables de réduire de façon appréciable le niveau de contamination des légumes, même avec addition d'agents détergents. (6) Par conséquent, on ne saurait que trop déconseiller cette pratique.

L'ingestion de sol, semble elle aussi représenter un risque beaucoup moins important mais non négligeable, en particulier pour les individus les plus sensibles. Ceci est vrai en particulier pour le risque *Cryptosporidium* et *E.Coli O157:H7*. En effet, les excès de risque calculés sont relativement importants et on peut en particulier souligner que le risque collectif attendu dans le cas d'infection par *E.Coli* pathogène est du même ordre de grandeur que les chiffres observés en France, toutes cause confondues. En revanche, l'excès de risque de maladie de Creutzfeld-Jacob par cette voie d'exposition reste très faible.

Enfin, l'ingestion au cours de l'épandage, de boues provenant de l'épuration d'effluents d'abattoirs de ruminants, expose la personne en charge de ce travail à un danger relativement important. Ceci est en particulier dû à l'absence de dilution dans le sol comme c'est le cas dans le scénario précédent. On peut modérer cette observation, en soulignant que le risque est ici nettement maximisé, notamment en passant sous silence le phénomène de mortalité des pathogènes au cours du traitement de l'effluent, du stockage des boues ou encore de l'épandage. En outre, les personnes épandant les boues ne sont pas parmi les plus sensibles : environ la moitié des exploitants agricole a entre 30 et 50 ans (Recensement général agricole).

## 4. GESTION DES RISQUES

---

La problématique sanitaire posée par les boues de STEP recevant des effluents d'abattoir semble essentiellement reposer sur *E.Coli O157:H7*, *Salmonella sp.*, ainsi que *Cryptosporidium* et les ATNC. Jusqu'à présent, les boues n'ont jamais été mises en cause concernant des infections par ces pathogènes. Malgré cela, il serait judicieux de mettre en place des mesures préventives afin d'éviter des problèmes sanitaires susceptibles d'émerger dans les années à venir. Il convient alors de clairement distinguer la gestion du risque dû à des germes "classiques", de la gestion du risque "ATNC". Par exemple il serait intéressant de mieux connaître *E.Coli*, *Salmonelle* et *Cryptosporidium*, en entreprenant des recherches propres à la problématique de l'épandage des boues. Des investigations en matière d'épidémiologie et d'écologie microbienne pourraient en particulier être mises en œuvre. En ce qui concerne le risque lié aux ATNC, l'acquisition de davantage de connaissances est bien entendu indispensable mais il serait relativement aisé de mettre en place des mesures simples à l'abattoir pour éviter la dissémination de ce type de pathogènes dans l'environnement.

### 4.1 IDENTIFICATION DES BESOINS EN TERME DE CONNAISSANCE

#### 4.1.1 En terme de prévalence des pathogènes chez le bétail

Les informations disponibles sont très limitées en matière de prévalence et de distribution des pathogènes en question, tant chez l'homme que chez les animaux. Dans un premier temps il semble capital d'avoir une idée de la proportion des porteurs de ces germes, d'autant plus que ceux-ci n'induisent chez les ruminants aucune manifestation clinique. A partir de données précises à ce sujet, il serait plus facile d'apprécier l'importance sanitaire du problème en le cernant davantage dans le temps et l'espace.

Il serait intéressant d'entreprendre des études visant à obtenir plus de détails en cas d'épidémie causée par ces pathogènes chez l'homme, en particulier pour identifier avec précision les facteurs de risques et donc mieux les maîtriser. Une telle démarche nécessite donc des progrès en matière de surveillance des pathologies, d'épidémiologie analytique, de microbiologie et pharmacologie. En effet, une meilleure surveillance devrait permettre de déterminer et de contrôler l'incidence des pathologies à l'échelle nationale ainsi que la prévalence et la distribution des affections sporadiques.

Chez l'animal, ce processus peut consister à déterminer la prévalence et la distribution des infections en fonction des espèces, ou en fonction des périodes de l'année, mais également de développer un système de surveillance épidémiologique. On peut aussi envisager des tests plus poussés sur les carcasses à l'abattoir. L'épidémiologie analytique quant à elle pourrait peut-être contribuer à déterminer les facteurs de risques, les modes de transmission d'homme à homme ou d'animal à homme sans oublier la contribution de différents vecteurs et enfin, de mettre en évidence et d'évaluer l'efficacité de mesures de contrôle.

Enfin, s'il était possible de détecter la déclaration d'une épidémie au sein d'un troupeau, il serait ensuite possible de prendre des précautions particulières par exemple en repoussant la date de l'abattage de manière à limiter la libération de germes dans l'effluent généré à l'abattoir. En effet, le portage des pathogènes est très important au moment de l'épidémie, mais également dans les jours ou même les semaines qui la suivent.

#### **4.1.2 Quantification des pathogènes dans les boues**

Une fois connue la prévalence des pathogènes chez le bétail, il serait intéressant de rechercher ces microorganismes dans les boues pour essayer d'établir une corrélation entre les deux paramètres. L'idée est de savoir si une forte prévalence d'un pathogène donné chez le bétail est systématiquement associée à des concentrations dans les boues susceptibles de poser un problème sanitaire. Il s'agit également de relier ces études à l'efficacité des traitements à l'encontre des pathogènes d'intérêt. L'efficacité de traitement d'un effluent est toujours caractérisée par un abattement de microorganismes indicateurs. Or on a tendance à se désintéresser de ce que deviennent les germes passés de l'effluent aux boues. On a supposé ici que lors du traitement des eaux usées, tous les pathogènes se retrouvant dans les boues restaient viables. Cette hypothèse fort peu probable mérite donc d'être affinée en connaissant au moins approximativement, le taux de microorganismes restant viables dans les boues après le traitement de l'effluent.

#### **4.1.3 En terme de persistance dans l'environnement**

La résistance des pathogènes dans les boues et l'environnement en général, nécessite également d'être mieux connue. Les études sur la survie des microorganismes sont le plus souvent menées dans des conditions extrêmes de température ou de pH, difficilement extrapolables aux conditions environnementales. En outre la résistance des microorganismes dans les boues est peu connue et les taux d'inactivation indéterminés. En connaissant plus précisément les taux d'inactivation des germes dont il est question ici après un épandage de boues, les délais à respecter en matière d'épandage pourraient être déterminés de manière plus judicieuse. Ceci est particulièrement recommandé pour l'épandage sur les pâturages. Il faudrait tout particulièrement connaître la capacité de survie des microorganismes dans l'herbe et sur les plantes après un épandage. Bien que la réglementation requiert un délai minimum de trois semaines avant de faire paître des bêtes sur une prairie où a eu lieu un épandage, rien ne prouve que les germes en question sont inactifs à l'issue de cette période. Si les germes sont toujours infectieux au moment où des animaux paissent sur ces prairies, ils risquent de se contaminer. Un certain nombre de ces animaux pourront alors devenir porteurs sains et risquent d'être à l'origine d'effluents contaminés à l'abattoir. Les boues issues du traitement de ces effluents pourront alors contaminer d'autres bêtes. L'entretien du portage chez les populations animales favorise la dissémination des pathogènes par l'intermédiaire de l'épandage et rend plus probable la contamination humaine.

Afin de mieux connaître le comportement des microorganismes dans les sols, il serait intéressant, à partir d'un *inoculum* de départ, de connaître l'évolution de la population au cours du temps, de manière à en déterminer la loi de décroissance dans les boues ainsi que dans les sols. De telles études ont été effectuées mais dans des conditions très particulières qui rendent difficile voire impossible, une extrapolation au cas qui nous intéresse ici, à savoir la survie dans les boues ou les sols.

#### **4.1.4 Connaissance du bruit de fond du sol**

Le sol est un milieu dont la flore bactériologique très abondante, peut être considérée comme un "bruit de fond" lors de l'épandage des boues. Il est donc légitime de s'interroger sur la dangerosité de l'épandage de boues. Cependant, cette question n'a plus lieu d'être lorsque l'incorporation de boues et donc l'apport de microorganismes à un sol, n'a pas pour conséquence de dépasser le bruit de fond constitué par les bactéries qui y préexistent. En effet, une compétition naturelle tend à s'instaurer entre les microorganismes. Les germes les mieux adaptés sont également les plus résistants. Or, lors d'un épandage, la flore bactérienne des boues, stressée



par le changement d'environnement, doit pour survivre, s'adapter rapidement au milieu. On comprend alors aisément que dans le cas où la flore bactérienne des boues est très minoritaire par rapport à celle du sol, sa survie est limitée.

#### **4.2 PRECONISATIONS EN MATIERE D'ELEVAGE**

La réduction de l'exposition humaine aux différents pathogènes passe nécessairement par une réduction voire une élimination du portage chez les animaux.

Il est reconnu que la prévalence de certains pathogènes est nettement plus élevée chez les jeunes ruminants que chez les adultes. En effet, des changements de régime alimentaire brutaux favorisent le portage d'*E.Coli O157:H7* (28). Ainsi les jeunes animaux, lorsqu'ils passent d'une alimentation exclusivement constituée de lait à la consommation d'herbe et autres plantes sont prédisposés à une infection par cette bactérie. (BROWNLIE L. E. 1967, GRAU F.1968, GRAU F. 1969, RASMUSSEN M.A. 1993) En outre, certaines études précisent que la prévalence d'*E.Coli O157:H7* est plus importante chez le bétail mis à la diète que chez les animaux normalement nourris. Cette observation a d'ailleurs été faite sur du bétail sur le point d'être abattu. Ainsi, une prise de nourriture adaptée avant l'abattage des animaux pourrait permettre d'abaisser le portage et donc de réduire le nombre de pathogènes pouvant gagner les boues. (8). Ces observations sont également vraies dans le cas de *Salmonelle* (11).

Il faut également préciser que le portage chez le bétail peut être dû au pâturage sur des prairies où ont été épandues des boues.(cf. risque prion) Le délai de 6 semaines préconisé par la réglementation (cf.annexe 3) avant de faire paître des animaux sur des prairies où ont été épandues des boues, peut dans certains cas être trop court pour assurer qu'aucun risque de contamination du bétail n'existe. La concentration en prion dans le sol, par exemple, ne diminuerait que de moitié après un an. (16) En outre, le bétail jeune semblant plus sensibles, il serait peut-être souhaitable que les plus jeunes ruminants puissent paître sur les prairies où ont été épandues des boues.

La contamination peut également se faire par l'intermédiaire d'eau contaminée par des excréments (<http://fsis.usda.gov>). Il est donc important de nettoyer régulièrement les abreuvoirs des animaux mais également d'améliorer leur conception afin d'éviter leur souillure par des matières fécales.

De manière générale, une bonne hygiène dans l'environnement des animaux peut limiter la contamination des troupeaux.

#### **4.3 PRECONISATIONS EN MATIERE D'EPANDAGE**

Dans un premier temps, il faut insister sur le rôle déterminant de la compétition qui existe entre les divers microorganismes du sol quant à leur survie. Une espèce de microorganisme aura des difficultés à survivre dans un environnement colonisé par d'autres espèces. Ainsi, il serait pertinent de ne pas continuellement épandre le même type de boues sur les mêmes parcelles afin de favoriser la compétition entre les différents germes et éviter qu'une espèce particulière devienne dominante. Si les boues d'un abattoir donné, particulièrement riches en microorganismes pathogènes, sont toujours épandues sur la même parcelle, on peut envisager une colonisation progressive du milieu par ces germes pathogènes, qui en devenant prépondérants sur les autres microorganismes peuvent présenter un problème sanitaire.

La réglementation préconise un délai de trois semaines avant de faire pâturer des bêtes sur une prairie où ont été épandues des boues. Ce délai semble insuffisant lorsque l'on connaît la grande capacité de survie de

*Cryptosporidium* ou de *Salmonelle*. *Salmonelle* affiche en effet une résistance pouvant aller bien au delà de ce délai. Après un épandage de boues sur prairie, 303 échantillons d'herbe ont été prélevés dont 26 % étaient toujours contaminés par *Salmonelle*, 5 semaines après l'épandage. Ce n'est qu'après la sixième semaine que *Salmonelle* ne put être détectée. (41) On peut donc soupçonner la pratique de l'épandage sur prairie d'entretenir le portage de ce type de pathogènes par le bétail. Par exemple, l'évaluation des risques prion nous montre que l'épandage sur des pâturages, bien qu'impliquant un risque faible, peut être suffisant pour entretenir un bruit de fond de la maladie de la vache folle. Il conviendrait donc d'allonger les délais d'attente ou même de cesser d'épandre sur des pâtures, au moins lorsque les surfaces d'épandage sont suffisantes. Ou si cela n'est pas envisageable, on peut limiter la contamination d'une espèce en épandant les boues d'abattoirs de ruminants sur des prairies ou paissent des non ruminants. On peut ainsi espérer faire jouer la barrière d'espèce. Cependant cette solution demeure limitée car très peu d'animaux d'élevage vivent en prairie.

#### **4.3.1 Mesures d'hygiène et bonnes pratiques de travail**

L'évaluation des risques réalisée plus haut montre qu'on ne peut négliger les risques induits par l'ingestion de sol ou de plantes ayant reçu des boues d'épuration d'effluent d'abattoir, en particulier dans des délais courts après l'épandage. Par conséquent, l'absorption de boues brutes lors de l'épandage constitue un risque important pour les agriculteurs ou les ouvriers chargés de l'épandage des boues. L'évaluation précise des risques exigerait bien entendu que des études soient effectuées sur des périmètres d'épandage lors de l'opération. Cependant, dans l'immédiat, il est plus que recommandé de limiter le risque par des mesures préventives efficaces telles que :

- une hygiène personnelle stricte, afin d'éviter toute ingestion accidentelle de boue,
- Une surveillance médicale,
- Le port de vêtements de travail spéciaux à ôter en dehors du lieu d'épandage, pour éviter tout transfert de contamination.
- Le lavage sélectif de ces vêtements.

Il est également recommandé de porter des gants lors de la manipulation et de l'épandage des boues. Un outre, dans les cas de boues liquides ou de boues très sèches, le port d'un masque pourrait éviter l'inhalation de particules et d'aérosols.

#### **4.3.2 Information du public**

Un risque existe pour les individus se livrant à la cueillette de plantes à proximité des champs d'épandage. Nous avons cependant pu constater qu'hormis dans le cas de *Cryptosporidium*, le risque tendait à s'atténuer rapidement avec le temps. La population exposée à ce type de risque, bien que très difficile à évaluer, est sans doute très limitée. La prévention à mettre en place doit donc rester à la mesure du risque. Il serait par exemple possible après un épandage, de mettre en place une campagne d'affichage en mairie et à proximité des parcelles épandues, préconisant de ne pas ramasser de plantes sauvages autour des épandages. Des recommandations doivent également être émises pour inciter le public à laver soigneusement les plantes ramassées dans les endroits exposés. L'accent doit aussi être porté sur un lavage soigneux des mains et une vigilance vis à vis des enfants qui éventuellement pourraient aller jouer dans ces champs.

#### **4.4 PRECONISATIONS A L'ABATTOIR**

Un certain nombre de mesures peuvent être mises en place dès l'abattoir, afin de remédier à la contamination des boues par des pathogènes, en amont de leur production. Le risque prion doit être traité séparément des problèmes sanitaires induits par les autres pathogènes.

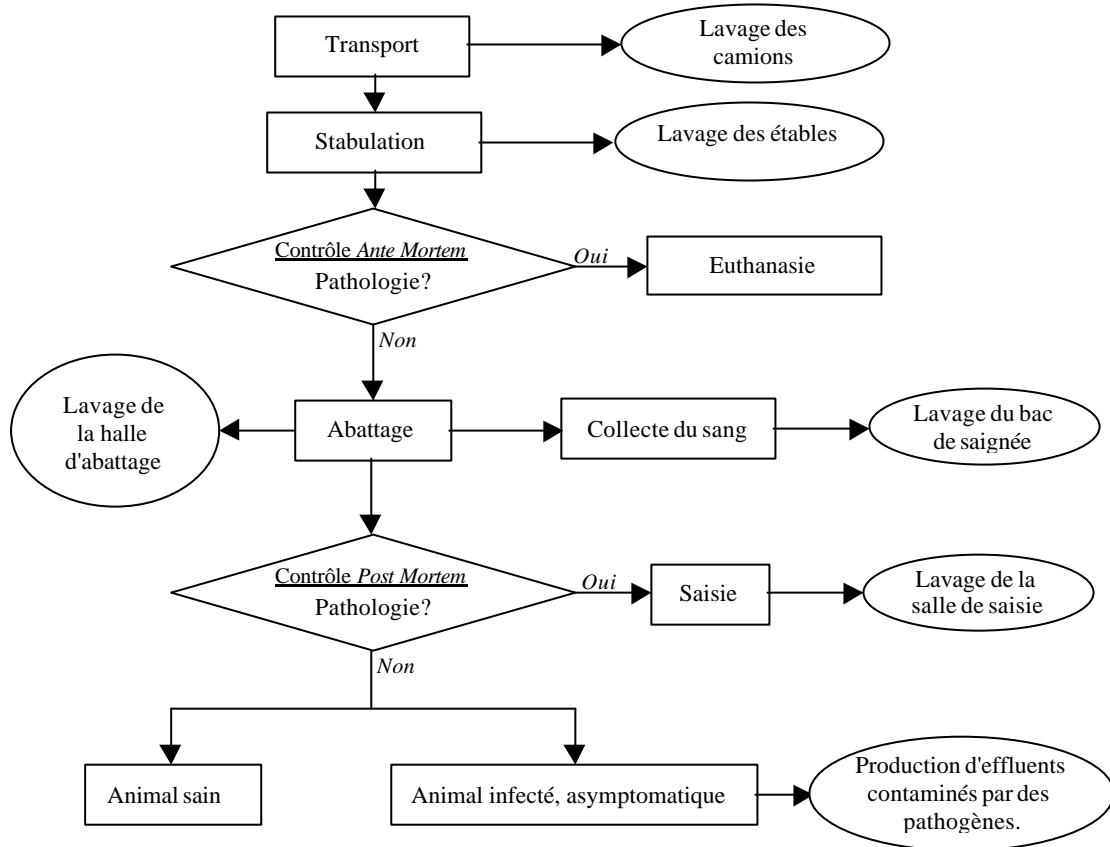
##### **4.4.1 Germes autres que le prion**

Nous avons évoqué précédemment le fait que ces germes sont principalement apportés à l'effluent par les excréments et matières stercoraires.

Les eaux de lavage susceptibles d'être contaminées et produites à différents stades du cheminement des animaux sur la chaîne d'abattage sont recensées sur la figure 2. Il serait donc possible d'éviter la contamination des boues par une charge trop importante en pathogènes, en mettant en place un système de rétention de l'effluent produit à ces différents stades. Les eaux usées retenues pourraient alors subir un traitement particulier de désinfection ou de lagunage, afin d'abattre la plus grande partie des pathogènes, avant d'être soumises aux traitements habituels. Peut-être n'est-il pas utile d'isoler tous les effluents évoqués ici. Il serait plus judicieux d'établir des priorités en identifiant les effluents les plus contaminés et d'y concentrer les efforts. Les eaux de lavage des camions et des étables par exemple, risquent d'être les plus chargées. Le volume des effluents produits aux différentes étapes doit aussi entrer en ligne de compte. En effet, la salle de saisie n'est lavée qu'une fois par semaine tandis que la halle d'abattage l'est tous les jours. On comprend alors aisément où se situe la priorité en matière de prévention.

**Figure 2 : « POINTS CRITIQUES » A L'ABATTOIR**

**PRODUCTION D'EFFLUENTS CONTAMINES PAR DES GERMES AUTRES QUE LE PRION.**

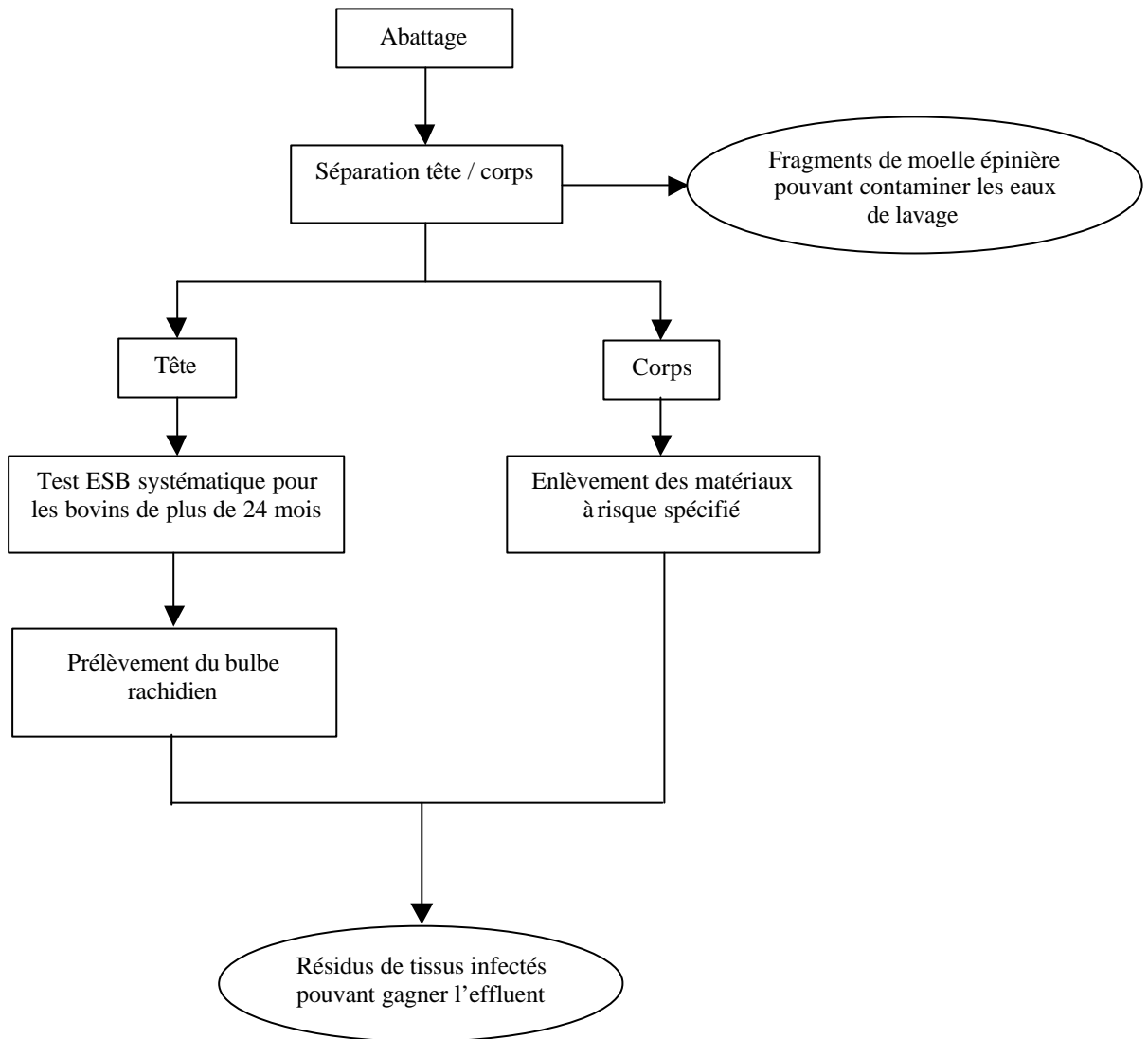


**4.4.2 Risque prion**

Le risque prion est à gérer différemment. Cette fois le réservoir des pathogènes n'a rien à voir avec les excréments et les matières stercoraires. Le risque émane de matériaux à risques spécifiés amenés à partir en équarrissage. Lorsque la tête est séparée du corps de l'animal, des fragments de moelle épinière peuvent tomber au sol. Ils sont en suite lavés et partent avec l'effluent sur les structures de traitement. Les bovins de plus de 24 mois subissent le test ESB pour lequel le bulbe rachidien est enlevé au moyen d'une technique précise. Au cours de cette manipulation, on peut craindre que de petits fragments de cerveau ou de moelle épinière tombent au sol et partent avec les eaux de lavage.

La moelle épinière quant à elle, est retirée par aspiration et les autres organes à risque sont coupés et stockés dans une benne. Une fois encore, on peut supposer la contamination de l'effluent par des fragments de tissus suite à ces manipulations. La figure 3 résume ces différentes hypothèses.

Figure 3 : « **POINTS CRITIQUES** » PROPRES AU RISQUE PRION.



Ici encore, le concept de prévention repose sur la rétention des effluents potentiellement contaminés. Le point le plus critique est sans doute le local où est pratiqué le prélèvement du bulbe rachidien, où il existe un risque de contamination de l'effluent par des fragments de tissus cérébraux. La maîtrise de ce risque pourrait passer par la pose de tamis suffisamment fins sur les bouches de collecte des eaux usées, dans le local où est pratiqué les test ESB.

#### 4.5 POSSIBILITE DE TRAITEMENT DES BOUES

En aval de l'abattoir et même du traitement des effluents, la gestion du risque peut bien évidemment s'appuyer sur le traitement plus ou moins poussé des boues. Les différents traitements possibles pour les boues sont décrits en *annexe 4*. Ainsi, si l'on veut éradiquer les pathogènes susceptibles de se trouver dans ces boues, il faut employer des traitements drastiques d'hygiénisation. (La définition réglementaire d'une boue hygiénisée est consultable à l'*annexe 3*.)

Les traitements susceptibles d'assurer une bonne hygiénisation des boues (réduction d'au moins 4 log des populations d'organismes pathogènes) sont recensés dans le tableau suivant:

Tableau : Traitements d'hygiénisation efficaces (3)

Traitement	Conditions
Digestion thermophile	55°C, 10 jours
Stabilisation thermophile	55°C, 10 jours
Compostage bien conduit	50 à 60°C, 15 à 30 jours
Chaulage fort (chaux vive ou éteinte)	pH 12, 10 jours
Pasteurisation	70°C, 3 heures

Le problème de l'hygiénisation des boues est son coût énergétique. Il convient donc de bien évaluer sa nécessité en fonction du risque effectif induit par les boues non hygiénisées.

## 5. DISCUSSION ET CONCLUSION

---

### LES APPORTS DE L'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES

Cette étude vise à une évaluation des risques microbiologiques inhérents à l'épandage des boues de STEP d'épuration d'abattoirs de ruminants. La caractérisation des risques sera qualifiée ici de "semi-quantitative", en raison des nombreuses approximations utilisées pour combler les manques dans l'état des connaissances sur le sujet. En effet, différentes étapes de la démarche classique d'évaluation des risques se sont heurtées à des difficultés :

- Une imprécision des connaissances concernant l'épidémiologie chez les ruminants des pathogènes choisis,
- Trop peu d'information sur la résistance de ces pathogènes dans les boues, les sols, ainsi que sur les plantes,
- Pas de renseignement sur les expositions, en particulier professionnelles.

Au vu de ces considérations, les résultats de cette étude permettent-ils d'affirmer de grands principes en matière de gestion des risques liés aux boues ?

Il faudrait pour l'affirmer avec certitude, que l'analyse repose sur des données plus solides. Cependant, cette évaluation de risques peut permettre d'éviter deux écueils :

- Un laxisme abusif quant à l'épandage de ce type de boues. Une telle attitude pourrait mener sinon à des accidents, au moins à l'entretien d'une contamination faible mais "chronique" des hommes comme du bétail. En effet, les chiffres obtenus, bien que surestimés, mettent tout de même en évidence des excès de risque individuels non négligeables, inhérents aux pathogènes étudiés ici.
- Une méfiance excessive émanant davantage de considérations de prudence *a priori* que d'appréciations objectives.

En outre, grâce à sa transparence, la démarche d'évaluation des risques permet de concentrer les efforts sur ses points faibles, pour affiner les résultats obtenus. Ainsi, on peut espérer que des études futures permettront de remédier aux lacunes mises en évidence. Les chiffres présentés ici pourront alors gagner en précision et permettre au décideur une gestion des risques plus "affûtée".

En attendant, cette étude, met en évidence un risque inhérent à ce type de boues à travers des pathogènes tels que *Cryptosporidium*, *E.Coli* O157:H7, *Salmonelle* ou encore l'agent responsable de l'E.S.B. Les excès de risque individuels calculés sont relativement importants. Il sont toutefois contrebalancés par de faibles expositions, permettant de ramener le risque collectif à des niveaux raisonnables.

Parmi les mesures de prévention qu'il est possible de mettre en œuvre, il s'agit de trouver un juste milieu. Le spectre des solutions possibles s'étale de la plus onéreuse à la plus simple. Il est bien entendu possible d'opter pour la solution abaissant le risque à son plus bas niveau, ce qui en raison du risque prion, ne laisse pour alternative que l'incinération. On peut également choisir de mettre en œuvre des mesures très simples destinées par exemple à limiter l'exposition aux boues (hygiènes, bonnes pratiques de travail).

## CONSIDERATIONS REGLEMENTAIRES ET ECONOMIQUES

La loi du 13 juillet 1992 interdit à compter de juillet 2002, la mise en décharge de déchets non ultimes. "Est un déchet ultime, un déchet résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. " Ce texte, encore très loin d'être appliqué, interdit cependant la mise en décharge des boues, qui ne répondent pas à la définition d'un déchet ultime. Ainsi, la seule alternative à l'épandage, serait l'incinération.

L'épandage revient à 18 Euros la tonne tandis que l'incinération coûte 110 Euros la tonne et la mise en décharge 40 Euros (données Agence de l'Eau Rhin Meuse). Il ne semble donc pas justifié dépenser jusqu'à 6 fois plus d'argent en incinérant des boues sachant que l'incinération a elle aussi des inconvénients qu'il serait judicieux de mettre en balance avec ceux de l'épandage.

On compte en France environ 300 abattoirs. Les effluents des plus petites structures (les plus nombreuses) sont traités en station d'épuration urbaine. L'impossibilité d'épandre des boues provenant de STEP recevant des effluents d'abattoirs entraînerait la nécessité de "dé-raccorder" ces petits abattoirs du réseau d'eaux résiduaires urbaines. Une telle entreprise impliquerait des coûts d'investissement que ne pourraient probablement pas supporter les petits abattoirs. Ajoutons à cela que la fermeture des usines les plus fragiles aurait pour conséquence de centraliser l'abattage sur quelques grands pôles, allongeant ainsi les durées de transport du bétail et rendant celui-ci plus coûteux.

L'évaluation des risques effectuée plus haut montre que si un risque inhérent à l'épandage de boues provenant de l'épuration des effluents d'abattoirs existe, celui-ci peut être endigué par des mesures simples mises en place à l'abattoir, ou même en aval de celui-ci. Ainsi, l'épandage apparaît comme une mesure pratique, peu coûteuse et dont les risques sanitaires demeurent très limités. Les mesures de prévention doivent donc rester à la mesure des risques calculés.

## EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE BOUES

Il est également important de noter que la production de boue bien que déjà très importante, ne cesse d'augmenter. Ce phénomène est dû :

- A l'augmentation des populations raccordées aux réseaux. En effet, la directive européenne sur les eaux usées urbaines du 21 mai 1991, transcrite par l'article 35 de la loi sur l'eau et de ses décrets d'application, impose le raccordement à une station d'épuration pour les villes de plus de 2000 habitants.
- A l'augmentation de la qualité et de la fiabilité de l'épuration
- A l'augmentation des capacités de traitement des eaux d'orages.

Ainsi, on assiste à la situation paradoxale d'un gonflement de la production de boues, accompagné d'un durcissement de la réglementation contribuant à restreindre leurs débouchés. Car il faut insister sur le fait que les boues provenant de station d'épuration urbaines recevant des effluents d'abattoirs, pourront être frappées des mêmes interdictions que les boues provenant de station traitant exclusivement les eaux provenant des abattoirs. Le devenir des boues ressemble donc fortement à une impasse si l'on supprime la solution de l'épandage.



## LE ROLE DE LA COMMUNICATION

A l'heure actuelle, les boues soulèvent bien des débats. Le premier frein à l'épandage est sans aucun doute dû au statut réglementaire des boues qui les définit comme des déchets. L'utilisation en agriculture des boues assimile davantage l'activité agricole à une filière d'élimination, qu'à une filière de valorisation tirant parti de leurs vertus fertilisantes. En outre, les boues faisant l'objet de cette étude sont issues d'abattoirs de ruminants. Or, des crises comme celles de la vache folle ou de la fièvre aphteuse, toujours très présentes dans les esprits, contribuent sans doute à la crispation du public quant à la valorisation de ce type de produits par épandage. Il convient cependant de ne pas céder à ce rejet systématiques des boues. La communication est peut-être un point clé pour améliorer "l'acceptabilité" de celles-ci, mais également pour faire jouer la corde de la prévention. En effet, l'information du public quant à la réalité des risques propres à ces boues, pourrait lui permettre de mieux comprendre le problème et également de s'approprier la maîtrise du risque.

Cette première évaluation des risques débouche donc sur des recommandations simples visant à limiter l'impact sanitaire des boues de station d'épuration d'abattoirs de ruminants. Des mesures peuvent être mises en œuvre en amont comme en aval de l'abattage, soit pour limiter la contamination des boues, ou encore pour réduire l'exposition du public ou du bétail. Considérer ces résultats comme étant des chiffres figés constituerait une grossière erreur. Il est désormais important de préciser les paramètres de l'étude pour affiner l'évaluation des risques et prendre les décisions les plus justes qui soient en matière de prévention.

## **ANNEXES**

# ANNEXE 1

---

Ci-après, se trouve la liste des maladies à déclaration obligatoire auprès de l'OIE, groupées selon la classification de l'OIE.

## Maladies communes à plusieurs espèces

- Fièvre charbonneuse
- Maladie d'Aujeszky
- Echinococcose/hydatidose
- Cowdriose
- Leptospirose
- Fièvre Q
- Rage
- Paratuberculose
- Myiase à *Cochliomyia hominivorax*
- Myiase à *Chrysomya bezziana*
- Trichinellose

## Maladies des ovins et des caprins

- Epididymite ovine (*Brucella ovis*)
- Brucellose caprine et ovine (non due à *B. ovis*)
- Arthrite/encéphalite caprine
- Agalaxie contagieuse
- Pleuropneumonie contagieuse caprine
- Avortement enzootique des brebis (chlamydiose ovine)
- Adénomatosose pulmonaire ovine
- Maladie de Nairobi
- Salmonellose (*S. abortusovis*)
- Tremblante
- Maedi-visna

## Maladies des bovins

- Fièvre charbonneuse
- Maladie d'Aujeszky
- Echinococcose/hydatidose
- Cowdriose
- Leptospirose
- Fièvre Q
- Rage
- Paratuberculose
- Myiase à *Cochliomyia hominivorax*
- Myiase à *Chrysomya bezziana*
- Trichinellose
- Anaplasmose bovine
- Babésiose bovine
- Brucellose bovine
- Campylobactériose génitale bovine
- Tuberculose bovine
- Cysticercose bovine
- Dermatophilose
- Leucose bovine enzootique
- Septicémie hémorragique
- Rhinotrachéite infectieuse bovine/vulvovaginite pustuleuse infectieuse
- Theilériose
- Trichomonose
- Trypanosomose (transmise par tsé-tsé)
- Coryza gangreneux
- Encéphalopathie spongiforme bovine

## ANNEXE 3

DECRET DU 8/12/97 et ARRETE DU 8/01/98

### RELATIFS A

### L'EPANDAGE DES BOUES ISSUES DU TRAITEMENT DES EAUX USEES.

Ces textes définissent les conditions dans lesquelles sont épandues les boues sur les sols agricoles, forestiers ou en voie de revégétalisation. Il confère aux boues le caractère de déchets et fixe en matière d'épandage, les règles générales d'hygiène et autres mesures propres à préserver la santé humaine.

**Les conditions générales d'épandage** des boues sont également définies dans ces textes. Il est spécifié que les boues ne peuvent être épandues que dans le cas où "elles présentent un intérêt pour les sols ou pour la nutrition des cultures et des plantations". En outre, leur utilisation ne doit en aucun cas porter atteinte à la santé de l'homme ou des animaux. Ainsi, l'épandage ne peut avoir lieu si les boues n'ont pas fait l'objet d'un traitement pour réduire de façon significative leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires qu'elles peuvent induire. Le mot "traitement" couvre ici un éventail de solutions allant du simple entreposage des boues à des traitements physiques, biologiques ou thermiques. Enfin, tout épandage doit être précédé d'une étude préalable réalisée aux frais du producteur, pour définir l'aptitude du sol à recevoir les boues, le périmètre de l'opération et les modalités de l'opération.

L'arrêté du 8 janvier 1998 donne également une définition des différents types de boues :

- **Boues traitées** : boues ayant fait l'objet d'un traitement physique, biologique, chimique ou thermique, par entreposage à long terme ou par tout autre procédé approprié de manière à réduire, de façon significative, leur pouvoir fermentescible et les risques sanitaires liés à leur utilisation. Le traitement des boues avant épandage est obligatoire. Toutefois, il peut être dérogé à l'obligation de traitement lorsque les deux conditions suivantes sont simultanément remplies :
  - matières de vidange ou boues de petites stations (< 120 kg DBO5/j),
  - boues enfouies immédiatement après épandage.

**Boues solides** : boues déshydratées qui, entreposées sur une hauteur de 1 mètre, forment une pente égale au moins à 30°.

**Boues stabilisées** : boues qui ont subi un traitement de stabilisation.

**Stabilisation** : traitement qui conduit à une production de boues dont la fermentation est soit achevée, soit bloquée entre la sortie du traitement et la réalisation de l'épandage. La notion de stabilisation renseigne sur le niveau d'odeur de la boue (absence d'odeur, ou odeur faible, moyenne, forte). A noter qu'une boue peut être traitée, tout en n'étant pas stabilisée au sens défini ci-dessus (circulaire du ministère de l'environnement du 16 mars 1999).

**Boues hygiénisées** : boues qui ont subi un traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes dans les boues. Une boue est considérée comme hygiénisée quand les concentrations suivantes sont respectées :

Salmonelles	Entérovirus	Oufs d'helminthes pathogènes viables
< 8NPP / 10 g MS	< 3 NPPUC / 10 g MS	< 3 / 10 g MS

(NPP : nombre le plus probable - NPPUC : nombre le plus probable d'unités cytopathiques)

Les analyses de boues et de sol doivent être réalisées systématiquement avant l'épandage. Leur nombre est fonction de la quantité de boues à épandre, donc de la taille de la station : plus elle est grande, plus le nombre d'analyses doit être élevé.

**Des dispositions techniques relatives aux épandages** quant à elles, préconisent que l'épandage et les quantités épandues ne dépassent pas la capacité d'absorption des sols, le but étant d'éviter toute percolation rapide, stagnation ou ruissellement.

Les autres modalités techniques sont recensées dans le tableau suivant (source ADEME):

Sandrine DEGLIN – Mémoire de l'Ecole Nationale de la Santé Publique – 2002

Modalité techniques à respecter lors de l'épandage des boues.

MODALITES	MESURES A APPLIQUER
<b>Zones particulières</b>	<p><u>Interdiction d'épandage :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- dans les zones d'infiltration en communication reconnue avec des ressources en eau utilisées pour l'alimentation en eau potable,</li> <li>- sur des terrains autres que régulièrement exploités.</li> </ul>
<b>Contraintes météorologiques</b>	<p><u>Interdiction d'épandre :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en période de forte pluie,</li> <li>- sur sol gelé ou enneigé, sauf pour les boues solides.</li> </ul>
<b>Délais à respecter</b>	<p><u>Délai minimum de réalisation des épandages :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 18 mois avant la récolte, et pendant la récolte elle-même, de produits en contact avec le sol et susceptibles d'être consommés crus, après épandage de boues non hygiénisées,</li> <li>- - 10 mois avant la récolte, et pendant la récolte elle-même, de produits en contact avec le sol et susceptibles d'être consommés crus, après épandage de boues hygiénisées,</li> <li>- 6 semaines pour le pâturage ou la récolte de fourrages après épandage de boues non hygiénisées,</li> <li>- - 3 semaines pour le pâturage ou la récolte de fourrages après épandage de boues hygiénisée</li> </ul>
<b>Distances à respecter</b>	<p><u>Épandage interdit :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- &lt; 35 m pour les points de prélèvement d'eau, les systèmes de conduction d'eau et les berges d'un plan/cours d'eau, si le terrain a une pente &lt; 7 %,</li> <li>- &lt; 100 m pour les points de prélèvement d'eau, les systèmes de conduction d'eau et les berges d'un plan/cours d'eau, si le terrain a une pente &gt; 7 % en cas de boues solides et stabilisées,</li> <li>- &lt; 100 m pour les habitations et zones de loisir, en cas de boues non hygiénisées,</li> <li>- &lt; 200 m pour les points de prélèvement d'eau, les systèmes de conduction ou les berges d'un plan/cours d'eau, si le terrain a une pente &gt; 7 %, en cas de boues non solides ou non stabilisées.</li> <li>- &lt; 500 m si zones conchylicoles, sauf si boues hygiénisées et dérogation liée à la topographie.</li> </ul>
<b>Exécution de l'épandage</b>	<p><u>Aérodispersion interdite</u> pour les boues liquides si risque de brouillards fins.</p> <p><u>Enfouissement :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- immédiat après épandage de boues non traitées,</li> <li>- avant 48 heures après épandage de boues non stabilisées.</li> </ul>

## ANNEXE 4

### DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT DES BOUES

(Source : <http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/Pages/f15.htm>)

Les boues se présentent au départ sous forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes quelle que soit la destination des boues et imposent la mise en place d'une filière de traitement, c'est-à-dire une suite organisée de procédés qui agissent de façon complémentaire.

On distingue trois grands types de traitement :

- des traitements de stabilisation, dont l'objectif est de réduire la fermentescibilité des boues pour atténuer ou supprimer les mauvaises odeurs ;
- des traitements de réduction de la teneur en eau des boues, visant à diminuer la quantité de boues à stocker et à épandre, ou améliorer leurs caractéristiques physiques (tenue en tas notamment)
- des traitements d'hygiénisation qui visent à éradiquer la charge en micro-organismes pathogènes . Ils ne sont mis en œuvre que dans des contextes particuliers.

#### • LA STABILISATION DES BOUES

Les traitements de stabilisation utilisés sont de type biologique, chimique ou thermique. Ils s'appliquent aux boues mixtes fraîches, aux boues secondaires ou à l'ensemble des boues.

**La stabilisation biologique** réduit la teneur des boues en matières fermentescibles. Elle se fait soit par voie aérobie (en présence d'oxygène) dans les bassins d'aération ou dans des bassins de stabilisation aérobie, soit par voie anaérobie (absence d'oxygène) dans des digesteurs avec production d'un biogaz riche en méthane. Dans le premier cas, on obtient des boues « aérobies » ou « stabilisées aérobies », dans le second cas des boues « digérées », encore appelées « anaérobies » ou « stabilisées anaérobies ». La digestion anaérobie se pratique dans environ 200 stations d'épuration en France. Il s'agit d'installations de taille souvent supérieure à 50 000 EH et totalisant 21 millions d'EH.

La stabilisation biologique est de loin le procédé le plus employé en France (plusieurs milliers de stations d'épuration), parfois en combinaison avec des procédés chimiques ou thermiques.

**Le compostage** constitue un procédé particulier de stabilisation biologique aérobie. Il se réalise de préférence sur des boues déjà déshydratées de façon à économiser l'approvisionnement en support de compostage, les boues n'étant pas auto-compostables. Les boues compostées ont un aspect de « terreau » et présentent une structure solide ; elles sont stables. On constate actuellement un fort regain d'intérêt pour cette technique en raison des nouvelles données réglementaires et économiques concernant la gestion des déchets.

**La stabilisation chimique** bloque simplement l'activité biologique, et donc l'évolution de la boue, par adjonction d'une quantité importante de chaux (10 à 50 % de la matière sèche, en général 30 %) élevant le pH au delà de 12. Le chaulage suppose généralement une déshydratation préalable des boues , sauf dans le cas du filtre-pressé où un lait de chaux est mélangé aux boues liquides. Les boues chaulées obtenues sont de structure pâteuse ou solide.

La stabilisation par chaulage connaît un développement soutenu depuis plusieurs années en raison de son efficacité vis à vis de la maîtrise des nuisances olfactives et de l'intérêt des boues pour le chaulage des sols acides. Environ 200 stations d'épuration pratiquent le chaulage en France, ce qui représente 2 % du parc français (exprimé en nombre de stations, soit 25 % de la capacité de traitement installée). Il s'agit généralement de stations de taille supérieure à 15 000 équivalent-habitants, avec une moyenne voisine de 40 000 équivalent-habitants.

Pour être précis, il est utile de souligner que souvent chaulage et compostage se pratiquent sur des boues déjà stabilisées biologiquement en station d'épuration. Ils constituent en quelque sorte un traitement complémentaire de stabilisation. Toutefois, pour des boues primaires ou physico-chimiques, ce sont les uniques modes de stabilisation. D'autres techniques chimiques, basées sur le blocage de l'activité biologique, commencent à être proposées (exemple : procédé de traitement aux nitrites à pH acide).

**Le séchage thermique** des boues revêt un effet temporaire de stabilisation (par absence d'eau), persistant aussi longtemps que les boues ne sont pas réhumectées. Pour des raisons de coût, le séchage se pratique sur des boues déjà déshydratées mécaniquement.

## • REDUCTION DE LA TENEUR EN EAU DES BOUES

Pour réduire les volumes à manipuler, différents procédés sont mis en œuvre comprenant, par ordre croissant d'efficacité et de coût, l'épaississement, la déshydratation et le séchage.

En amont de ces procédés, des **traitements dits de conditionnement** sont souvent utilisés pour favoriser la séparation liquide-solide. Ils utilisent des flocculants organiques de synthèse (appelés polyélectrolytes) ou minéraux (chaux, sels de fer ou d'aluminium).

Le conditionnement peut aussi se faire par voie thermique (autoclavage) et consiste en une cuisson des boues à 180 - 220 °C pendant une demi-heure à deux heures pour casser les liaisons colloïdales propres à la rétention d'eau. Ce procédé est toutefois rarement utilisé en France en raison des difficultés d'emploi et d'un coût prohibitif.

**L'épaississement** vise à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation). La siccité des boues épaissies ne dépasse pas usuellement 7 % en moyenne et se situe plutôt vers 5 à 6 %. Généralement, les boues épaissies gravitairement ne sont pas conditionnées et leur siccité plafonne à 3 ou 3,5 %. Ce procédé est fréquent en zone rurale et concerne les petites stations d'épuration, de taille inférieure à 2 000 équivalent-habitants. L'épaississement dynamique (ou mécanique) devient plus fréquent pour les stations de taille comprise entre 2 000 et 5 000 équivalent-habitants. Ces valeurs sont simplement indicatives car les situations observées sur le terrain restent fort diverses.

**La déshydratation**, qui correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide. Les filtres à bandes et les centrifugeuses (à noter que les centrifugeuses donnent selon leur réglage des boues liquides ou pâteuses) donnent des boues plutôt pâteuses en raison de performances de déshydratation qui plafonnent à 18-20 % de siccité pour la première famille de matériels, et 20-25 % de siccité pour la seconde. Les filtres-presses produisent par contre des boues de structure solide (30 à 35 % de siccité) car conjuguant un conditionnement au lait de chaux et des pressions élevées. Ces matériels sont réservés aux installations les plus importantes, car plus coûteux et contraignants d'emploi que les filtres à bande et les centrifugeuses. Des perfectionnements technologiques sont régulièrement enregistrés.

**Le séchage** élimine en grande partie ou en totalité l'eau par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique. La technique des lits de séchage se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation naturelle et drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable et de graviers. L'emprise au sol est de 1 m<sup>2</sup> pour 4 à 5 habitants raccordés. Ce système extensif donne des boues solides à 35 - 40 % de siccité mais reste fort dépendant des conditions météorologiques.

**Le séchage thermique** permet une élimination quasi-totale de l'eau (siccité d'environ 95 %). Les boues obtenues sont pulvérulentes ou en granulés.

En raison des coûts énergétiques, ce procédé reste peu utilisé en France, malgré son intérêt manifeste sur la réduction des volumes à manipuler. Le séchage thermique devrait connaître un nouveau développement dans les années à venir car les autres filières de traitement des boues, dont l'incinération, se renchérissent sous l'effet des nouvelles conditions réglementaires et économiques.

## LES TRAITEMENTS D'HYGIENISATION

L'arrêté du 8 janvier 1998 sur l'épandage des boues d'épuration définit l'hygiénisation comme un « traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue ». Une boue est considérée comme hygiénisée quand, à la suite d'un traitement, elle satisfait aux exigences définies dans le tableau ci-dessous. L'hygiénisation des boues ne s'impose que dans certains contextes d'utilisation agronomique : la plupart des boues épandues en France ne sont pas hygiénisées, la maîtrise du risque sanitaire reposant de façon satisfaisante sur l'application de règles de bonnes pratiques.

Seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiénisées (suivant l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles) :

Salmonelles	Entérovirus	Oufs d'helminthes pathogènes viables
< 8NPP / 10 g MS	< 3 NPPUC / 10 g MS	< 3 / 10 g MS

(NPP : nombre le plus probable - NPPUC : nombre le plus probable d'unités cytopathiques)

## ANNEXE 5

---

### **Principales sources :**

Les germes pathogènes dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines. Guides et Cahiers Techniques, ADEME

[http://www.hc-sc.gc.ca/pphb-dgspssp/msds-ftss/index\\_f.html#menu](http://www.hc-sc.gc.ca/pphb-dgspssp/msds-ftss/index_f.html#menu)

### **VIRUS :**

Corona virus bovin

Herpes virus

Parvovirus bovin

Rotavirus bovin

Poxvirus de la clavelée

Poxvirus de l'ecthyma

Togavirus de la maladie des muqueuses

Togavirus de la Border Disease

### **NEMATODES :**

*Ascaris suum*

*Bunostomum sp.*

*Chabertia ovina*

Metastrongylidés des petis ruminants

*Oesophagostomum radiatum* Oxyures des ruminants

Spirures des ruminants

*Strongyloides stercoralis*

*Toxacara vitulorum*

*Trichinella spiralis*

### **TREMATODES :**

*Dicrocoelium lanceolatum*

### **PROTOZOAIRES :**

*Besnoitia besnoitii*

Coccidies

*Cryptosporidium parvum*

*Toxoplasma gondii*

C.D.C. : Center for Disease Control

G = Gram négatif

V = vaccin



## BACTERIES :

Pathogène	Pathologie	Présence dans les boves	Gravité	DMI	Résistance du germe	Transmission	Contamin. inter humaine	Vaccin ou traitement (V/T)	Commentaires
<i>Brucella spp.</i>	Brucellose	Possible	Taux de mortalité < 12 % pour les cas non traités.	Inconnue	Survie de 125 jours dans le sol et 180 jours dans le sang à 4°C	Contact de matière infectée avec des plaies ou les muqueuses + inhalation	Non	Pas de V / possibilité d'antibiothérapie	
<i>Campylobacter fetus spp jejuns</i>	Campylobactériose (diarrhée)	+	Grave pour les hôtes immunodéprimés	Inconnue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 jours dans le sol</li> <li>• 3 heures sur le linge</li> <li>• 24 h dans le fumier liquide</li> </ul>	Ingestion d'aliments contenant le microorganisme ou contact avec des animaux infectés.	Pendant toute la durée de l'infection (plusieurs jours à plusieurs semaines)	Pas de V / traitement par antibiothérapie	
<i>Campylobacter jejuni</i>	Campylobactériose Affection entérique	+	Gravité variable 5 à 14 % des affections diarrhéiques dans le monde	500 germes au moins	Ne tolère pas la dessiccation. Survie : <ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 jours dans les selles</li> <li>• 2 à 5 jours dans l'eau.</li> </ul>	Ingestion d'aliments insuffisamment cuits ou d'eau contenant le microorganisme	Pendant toute la durée de l'infection	Pas de V / réhydratation et antibiothérapie dans les cas graves ou prolongés.	Les porteurs sains sont rares.
<i>Erysipeloperitrix rhusiopathiae</i>	Rouget	+							
<i>Escherichia coli entéro-hémorragique (ex. O157:H7)</i>	Colite hémorragique et affection intestinale		8 à 5% des sujets développent un SHU Mortalité plus élevée chez les jeunes enfants et les personnes âgées	Ingestion de moins de 100 germes	Survit facilement dans les matières fécales et le sol contaminé (faible réduction du nombre de microorganismes après 2 mois)	Ingestion d'aliments contaminés + voie oro-fécale	Très élevée (voie oro-fécale)	Pas de V / réhydratation et antibiothérapie dans les cas graves ou prolongés.	
<i>Escherichia coli entéro-pathogène</i>	Diarrhée aiguë Sporadique. N'est plus une cause importante de diarrhée infantile en Europe et Amérique du nord		Grave chez les nourrissons	Très infectieux pour les nourrissons 10 <sup>8</sup> à 10 <sup>10</sup> pour les adultes	Jusqu'à 84 jours dans le sol	Contact des aliments des l'eau ou des vecteurs passifs avec les matières fécales ou contact avec des déchets infectés	Pendant la période ou l'organisme est excrété (durée non précisément connue)	Pas de V / réhydratation et antibiothérapie dans les cas graves ou prolongés	Animaux infectés souvent asymptomatiques

Pathogène	Pathologie	Présence dans les boves	Gravité	DMI	Résistance du germe	Transmission	Contamin. inter humaine	Vaccin ou traitement (V/T)	Commentaires
<i>Leptospira interrogans</i>	Leptospirose	+	Taux de mortalité faible mais augmentant avec l'âge du sujet.	Inconnue	<ul style="list-style-type: none"> <li>Survit de nombreuses semaines dans les sols contaminés par des urines infectées.</li> <li>19 jours dans de l'eau traversant un sol infecté</li> <li>5 jours dans les boves</li> </ul>	Contact de la peau ou des muqueuses avec de l'eau, du sol ou des végétaux contaminés. Ingestion d'aliments contaminés	Rare	Dans certains pays, vaccination des humains contre certains sérovars, en prévention d'une exposition professionnelle.	Les animaux porteurs sont asymptomatiques
<i>Listeria monocytogenes</i>	Listériose Méningo encéphalite ou septicémie	++	Rarement diagnostiqué, se manifeste chez les vieillards, les nouveaux nés et les personnes immunodéprimées	Inconnue	Survit facilement dans l'eau, les sols et les fèces	Contact avec du sol contaminé par des matières fécales (lésions papuleuses sur les mains et les bras)	Materno-foetale	Pas de V / traitement par antibiothérapie	
<i>Mycobacterium bovis</i>									
<i>Mycobacterium paratuberculosis</i>									
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> ???		Monde entier	La primo infection passe généralement inaperçue. L'évolution vers une forme grave est plus fréquente chez les nourrissons.	Inhalation de 10 bacilles	<ul style="list-style-type: none"> <li>90 à 120 ours dans les poussières</li> <li>40 jours dans les blattes</li> <li>45 jours dans le fumier</li> <li>45 jours sur des vêtements</li> </ul>	Inhalation de gouttelettes infectieuses, contact avec des animaux ou tissus d'animaux infectés	Aussi longtemps que le bacille est éliminé dans les crachats	V autorisé (BCG) mais employé de façon limitée	Infection par le bacille bovin est rare, mais peut se produire là où la maladie n'est pas encore maîtrisée chez le bétail

Pathogène	Pathologie	Présence dans les boves	Gravité	DMI	Résistance du germe	Transmission	Contamin. inter humaine	Vaccin ou traitement (V/T)	Commentaires
<i>Salmonella spp.</i> Sauf <i>typhi</i> , <i>choleraesuis</i> et <i>paratyphi</i>	Salmonellose  Gastro entérite aiguë	Monde entier, mais surtout en Amérique du Nord et en Europe  Incidence élevée chez les nourrissons et les jeunes enfants	Déshydratation pouvant être grave chez les nourrissons et les personnes âgées.  Les décès sont rares sauf chez les sujets très jeunes ou très âgés	Ingestion de 100 à 1000 organismes	Survit pendant de longues périodes dans l'environnement	Ingestion d'aliments contaminés directement ou indirectement	Oui  Pendant l'infection et longtemps après	Pas de V  Traitement par réhydratation ou antibiothérapie selon les cas.	Réservoir essentiellement aviaire

## ANNEXE 6

### DEFINITION DES LOIS BETA-POISSON ET EXPONENTIELLE

Les relations dose-réponse permettent de calculer une probabilité d'infection par un microorganisme donné. On peut alors analyser les risques microbiologiques faisant suite à diverses expositions par l'intermédiaire de l'eau, de la nourriture ou autres voies, comme ici dans le cas des boues.

Très souvent, on utilise les lois exponentielle (1) ou Béta-Poisson (2):

$$P = 1 - \exp(-rd) \quad (1)$$

$$P = 1 - (1 + d/\beta)^{-\alpha} \quad (2)$$

Dans cette équation, P est la fraction de la population qui risque d'être infectée par une exposition unique à un nombre moyen "d" (la dose) de microorganismes.

L'utilisation de ces équations repose sur les supposition suivantes :

1. Seul un microorganisme viable est nécessaire pour initier le processus d'infection *in vivo*.
2. Les individus ingèrent un nombre de microorganismes représentant un échantillon pris au hasard dans une distribution de Poisson ayant "d" pour moyenne.
3. La survie d'un microorganisme au sein d'un hôte donné est indépendante de la survie des autres microorganismes au sein de ce même hôte.
4. Dans le cas du modèle exponentiel, la probabilité de survie de chacun des microorganismes dans n'importe quel hôte est représentée par "r"
5. Dans le cas de la loi Béta-Poisson, la distribution des probabilités de survie du microorganisme est donnée par une distribution beta de paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ .
6. Les paramètres r,  $\alpha$  et  $\beta$  sont propres à chaque microorganisme. Il sont déterminés expérimentalement.

On peut également donner les relations suivantes:

$$r = -0,69 / D.I._{50}$$

$$\beta = D.I._{50} / (2^{1/\alpha} - 1)$$

Ici, D.I.<sub>50</sub> est la dose Infectieuse 50, soit la dose de microorganisme susceptible d'infecter 50% de la population exposée.

# ANNEXE 7

## CONCENTRATION EN PATHOGENES DANS LES SOLS APRES EPANDAGE

Codage des différents paramètres :

- Nombre d'animaux abattus par an : N
- Prévalence de la maladie chez les animaux (%) : P
- Concentration en pathogènes  $\lambda$  dans les fèces (CFU / g) :  $C_f$
- Quantité de fèces produite par animal à l'abattoir (g) : Q
- Quantité de fèces gagnant l'effluent : f
- Abattement des pathogènes lors du traitement de l'effluent (% ou unités log) : A
- Quantité de boues produite à l'année (t) :  $B_p$
- Quantité de boue épandue à l'hectare (t/ha) :  $B_e$
- Masse d'un hectare de sol (t) :  $M_{ha}$
- 1 hectare ( $m^2$ ) = S
- Profondeur d'enfouissement (cm) : H
- Densité du sol ( $t / m^3$ ) :  $\rho$

1) Nombre de pathogènes  $\lambda$  libérés en un an dans les fèces :  $n_\lambda$

$$n_\lambda = N \times P \times Q \times C$$

2) Quantité de pathogènes gagnant l'effluent au cours d'une année :  $n_e$

On considère que lors du traitement de l'effluent, tous les pathogènes dont est débarrassé l'effluent passent dans les boues sans que leur viabilité soit altérée.

$$n_e = n_\lambda \times A$$

3) Concentration des pathogènes dans les boues en ignorant toute phénomène de mortalité :  $C_b$

$$C_b = n_e / B_p$$

4) Concentration des pathogènes dans le sols après épandage : (Nombre de germes par unité de masse de sol) :  $C_s$

$$C_s = C_b \times B_e / M_{ha}$$

$$\text{Avec } M_{ha} = S \times H \times \rho$$

Dans le cas où on tient compte d'un phénomène de décroissance dans les sols au cours du temps, la mortalité des microorganismes suit une loi exponentielle décroissante d'ordre 1:  $C_t = C_0 e^{-kt}$

Avec

- Concentration initiale :  $C_0$
- Concentration à t :  $C_t$
- Constante de décroissance : k

## BIBLIOGRAPHIE

- 1] ABOUZEED Y. M. et al., Characterization of Salmonella isolates from beef cattle, broiler chickens and human sources on Prince Edward Island. Comparative Immunology, Microbiology & Infectious diseases, No.23, p253-266, 2000
- 2] ADEME, Les agents biologiques d'intérêt sanitaire des boues d'épuration urbaines., ADEME, p43-48, p115-119, p155-158,
- 3] ADEME Les germes pathogènes dans les boues résiduares des stations d'épuration urbaines. Guides et Cahiers Techniques
- 4] Association Française des professeurs de parasitologie, Parasitologie. Mycologie. Maladies Parasitaires et fongiques. Edition C. et R. 5<sup>ème</sup> édition, p163-168, 1992
- 5] BENARDE M., Land disposal and sewage effluent: appraisal of health effects of pathogenic organisms. Journal AWWA Water Technology / Quality. P.432-440, juin 1973
- 6] BOUTIN P., Risque sanitaire provenant de l'utilisation d'eaux polluées ou de boues de stations d'épuration en agriculture. T.S.M. – L'eau, Décembre 1982
- 7] BOUVET P. et al, Données de surveillance 1999 du centre national de référence des Salmonella et Shigella. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire, No. 12, 2001
- 8] BROWN C.A., Experimental E. Coli O157:H7 Carriage in Calves, App. Environ. Microbiol., Vol. 63, No1, 27-32, 1997
- 9] BUCHANAN Robert L., SMITH James L. et al. Microbial risk assessment : dose response relation and risk characterisation. International Journal of Food Microbiology 58, pp159-172, 2000
- 10] BURGE W. et al. Infectious disease hazard, Journ. Of. Env. Qual. Vol. 7, No 1, Janv. Fev. 1978
- 11] CRAY W. et al, Effect of dietary stress on fecal shedding of E.Coli O157:H7 in Calves. App. Environ. Microbiol., Vol64, No. 5, p. 1975-1979, 1998
- 12] CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE, Section eaux. Risque Sanitaire liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Tec & Doc, pp2-19, 1998
- 13] CONSEIL SUPERIEUR D'HYGIENE PUBLIQUE DE FRANCE. Recommandations pour le personnel des abattoirs. ateliers de découpe et boucherie. Edition de mai 2001
- 14] CRAY W. et al. Effect of dietary stress on fecal shedding of E.Coli O157:H7 in calves. App. and Env. Microbiol. Vol. 64, No. 5, p. 1975-1979, mai 1998

- 15] CRITES R. W. et al., Relative health risks of activated sludge treatment and slow-rate treatment. Journal WPCF, Vol. 52, No. 12, décembre 1980, p.2865-2874
- 16] DNV Technica. Overview of risks from BSE via environmental pathways for the Environment Agency. June 1997
- 17] Ecoles Nationales Vétérinaires françaises, Maladies réputées contagieuses et maladies à déclaration obligatoire des ruminants, (Document à l'usage des étudiants vétérinaires), Mise à jour au 31 juillet 2001
- 18] EUROPEAN COMMISSION, Evaluation of sludge treatments for pathogens reduction. Study contract N° B4-3040/2001/322179/MAR/A2, septembre 2001
- 19] FAYER R., Epidemiology of Cryptosporidium : transmission, detection and identification. International Journal for Parasitology. Vol. 30, p. 1305-1322, 2000
- 20] GALE P., Quantitative BSE risk assessment: relating exposure to risk. Letters in Applied Microbiology, No.27, 239-242, 1998
- 21] GALE P., Towards a quantitative risk assessment for BSE in sewage sludge. Journal of Applied Microbiology, No.91, 563-569, 2001
- 22] HARRY M. et al., Topics in microbial risk assessment: Dynamic flow tree process. Risk Analysis. Vol. 18, No. 3, 309-326, 1998
- 23] HAAS C. et al., Reconciliation of microbial risk model and outbreak epidemiology : The case of the Milwaukee outbreak. Proc. Ann. Conf. AWWA. p517-523, 1994
- 24] HAAS C., Quantitative microbial risk assessment, John Wiley & Sons, Inc. p. 284-285, p296-298, p398-411, p426-429, , 1999
- 25] HAEGHEBAERT S. et al. Surveillance du syndrome hémolytique et urémique chez les enfants de moins de 15 ans en France en 1999. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire. N°37, 2001
- 26] HAEGHEBAERT S. et al. Les toxi-infections alimentaires en France en 1997. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire. N°41, 1998
- 27] HANCOCK D. et al., Epidemiology of Escherichia Coli O157:H7 in feedlot cattle., Journal of Food Protection, Vol. 60, No. 5, 1997
- 28] INDIRA T., Evaluation of dietary influences on Escherichia Coli O157:H7 shedding by cheep, Appl. Environ. Microbiol. Vol. 63, No. 10, 3878-3886, Oct. 1997

- 29] INDIRA T., Analysis of E. Coli O157:H7 Survival in ovine or bovine manure and manure slurry, Appl. Environ. Microbiol. Vol. 64, No. 9, 3166-3174, Sept. 1998
- 30] JAMIESON R.C. et al., Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water : A review. Canadian Biosystem engineering, Vol. 44, p1.1 à 1.9, 2002
- 31] NKINS M., Cryptosporidium parvum oocyst inactivation in three soil types at various temperatures and water potentials, Soil Biology and Biochemistry No. 34 p1101-1109, 2002
- 32] KUCZYNSKA E. et al., Method for detection and enumeration of Cryptosporidium parvum Oocysts in Feces, Manures and Soils, Appl. Environ. Microbiol. Vol. 65, No. 7, 2820-2826, July. 1999
- 33] LEFAY D. et al., Prevalence of Cryptosporidium infection in calves in France, Veterinary Parasitology, N°89, p 1-9, 2000
- 34] MAYLAND H.F., SHEWMAKER G.E. and BULL R.C. Soil ingestion by cattle grazing crested wheatgrass, Journal of range management 30 (4), pp264-265, July 1977
- 35] MINISTERE DE L'AGRICULTURE, Centre National du Machinisme Agricole de Génie Rural, des Eaux et Forêts, Groupement de Bordeaux, Problèmes sanitaires résultant de l'utilisation agricole des eaux et des boues résiduaires, juin 1981
- 36] MOLETA R., Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires, Tec et Doc, p17 et 95-99, 2002
- 37] NACIRI M. et al., Role of Cryptosporidium parvum as a pathogen in neonatal diarrhoea complex in suckling and dairy calves in France, Veterinary Parasitology, Vol. 85, p245-257, 1999
- 38] OLSON Merle E., Human and animal pathogens in manure, Microbiology and Infectious diseases, University of Calgary.
- 39] ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE. L'épandage des boues d'épuration et ses dangers pour la santé publique, Trib.Cebedeau, No. 40, 37, p. 511-525
- 40] STADTERMAN K.L., Removal and inactivation of Cryptosporidium oocysts by activated sludge treatment and anaerobic digestion, Water Science and Technology, Vol. 31, No.5-6, p.97-104, 1995
- 41] STRAUCH D., Survival of pathogenic microorganisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge, Rev. Sci. Tech. Office International des Epizooties, 10 (3) , 813 - 846, 1991
- 42] STRAUCH D., Pathogenic microorganisms in sludge. Anaerobic digestion and disinfection methods to make sludge usable as fertilizer, European Water Management 2, No. 2, 12 - 26, 1998
- 43] USEPA, Exposure factor handbook, p4.16 -4.17, Feb 1999



- 44] WANG G., Fate of Enterohemorrhagic *E.Coli O157:H7* in bovine feces, Appl. Environ. Microbiol. Vol. 62, No. 7, 2567-2570, July. 1996
- 45] WOLFRAM Martens et al. Public health aspects connected to the use of sludge on land. Universität Hohenheim.
- 46] WRAY C. et al. Survival and spread of pathogenic bacteria of veterinary importance within the environment. Commonwealth Bureau of Animal Health. The veterinary bulletin. August, Vol.45 N°8, pp543-550, 1975
- 47] ZHAO T. et al, Prevalence of Enterohemorrhagic. *Escherichia Coli O157:H7* in a survey of Dairy Herds, Appl. Environ. Microbiol, Vol.61, No4, 1290-1293, 1995
- 48] SOLOMON E.B., Transmission of *Escherichia Coli O157:H7* from contaminated manure and irrigationwater to lettuce plant tissue and its subsequent internalization. Appl. Environ. Microbiol, Vol.68, No1, 397-400, jan 2002
- 49] SPOUGE John. Overview of risks from BSE via environmental pathways for the environmental agency. DNV Technica, june 1997
- 50] [http://cal.nbc.upenn.edu/merial/Strongls/strong\\_5.htm](http://cal.nbc.upenn.edu/merial/Strongls/strong_5.htm)
- 51] <http://cvm.msu.edu/courses/mic569/docs/parasite/n/trich.htm>
- 52] **Erreur! Signet non défini.**
- 53] **Erreur! Signet non défini.**
- 54] **Erreur! Signet non défini.**
- 55] **Erreur! Signet non défini.**
- 56] <http://www.fsis.usda.gov/OPHS/stdt104.htm>
- 57] <http://www.nal.usda.gov/wqic/cryptfac.html>
- 58] <http://www.who.int/emc/diseases/zoo/SALM-SURV/>
- 59] [http://www.invs.sante.fr/bea/1996/do\\_p19.html](http://www.invs.sante.fr/bea/1996/do_p19.html)
- 60] <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr>
- 61] [http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=FR&numdoc=52000PC0574&model=guichett](http://europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=FR&numdoc=52000PC0574&model=guichett)
- 62] <http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/default.htm>
- 63] <http://www.hc-sc.gc.ca/pphb-dgsp/psp/msds-ftss/msds48f.html>