

Conventions 03 75 C 0093 et 06 75 C 0071
ADEME / SYPREA / FP2E / INERIS

Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration

RESUME

ADEME



version 1 du 15 octobre 2007

Version	Date	Avis pris en compte
0	04 novembre 2005	Avis d'un collectif d'experts Avis des professionnels concernés
1	15 octobre 2007	Avis des ministères concernés : ministère en charge de l'agriculture, ministère en charge de la santé, ministère en charge de l'environnement Avis de l'OPERSEI (observatoire des pratiques de l'évaluation des risques sanitaires dans les études d'impact) Avis des professionnels concernés

Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration

En France, les boues urbaines et industrielles issues du traitement des eaux usées sont considérées comme des déchets (loi n°75-633 du 15 juillet 1975). Les propriétés fertilisantes de ces déchets sont depuis longtemps reconnues, et leur épandage sur des terres agricoles est considéré en France depuis plus de 30 ans comme une pratique durable sur le plan environnemental et économique. Du fait de la présence de substances chimiques et d'agents pathogènes dans les boues, des mesures de précaution sont prises lors des opérations d'épandage pour garantir la sécurité des aliments et la préservation des sols et des autres compartiments environnementaux. Ces mesures sont encadrées par les lois n°76-663 du 19 juillet 1976 et n°92-3 du 3 janvier 1992, ainsi que par la directive européenne du Conseil n°86-278 du 12 juin 1986 (en cours de révision). En France, l'épandage de boues urbaines et industrielles, issues d'un traitement soumis au régime de l'autorisation, est soumis à une étude d'impact dont un volet est relatif à l'impact sur la santé humaine. Cependant, aucun cadre méthodologique n'était jusqu'à présent disponible pour réaliser une telle évaluation de risques sanitaires.

L'objectif de la présente étude était de développer des méthodologies pour évaluer les risques pour la santé humaine aussi bien liés aux substances chimiques qu'aux agents pathogènes. Concernant la partie relative aux substances chimiques, la méthodologie a été développée et évaluée sur une étude de cas réelle impliquant un épandage de boues urbaines. Pour la partie relative aux agents pathogènes, en l'absence de valeurs limites pour les concentrations en pathogènes (à l'exception des boues subissant des traitements pour réduire les salmonelles, Entérovirus et les œufs d'helminthes), une étude de faisabilité basée sur une étude bibliographique a été menée.

Evaluation des risques sanitaires liés aux substances chimiques

La méthodologie d'évaluation des risques pour la santé liés aux substances chimiques a été développée dans le respect des principes généraux d'évaluation des risques définis par l'US-EPA et déjà utilisé dans d'autres méthodologies françaises (demande d'autorisation d'exploiter une installation classée...).

Dans ce cas spécifique, l'évaluation des risques doit tenir compte :

- des concentrations de référence dans les sols et dans les aliments pour chaque substance concernée ;
- de la durée d'épandage ;
- de la fréquence d'épandage sur un même plot.

La méthodologie développée comporte une étape de détermination des caractéristiques initiales du site, suivie par quatre autres étapes :

- l'évaluation des effets toxiques des substances choisies ;
- la sélection de valeurs toxicologiques de référence ;
- l'évaluation de l'exposition ;
- la quantification du risque.

Cette méthodologie est fondée sur une approche spécifique à chaque site. L'évaluateur de risque doit d'abord évaluer les propriétés du site et les méthodes d'épandage pour mener une quantification du risque pertinente. Parmi ces caractéristiques, la composition des boues (le type de polluants et les concentrations), les caractéristiques des sols (texture, pH...), les pratiques agricoles (cultures, distribution spatiale et temporelle, application de boues...) doivent être correctement connues pour définir quelles substances seront choisies pendant l'étape de quantification. Il a été décidé qu'à minima toutes les substances mentionnées dans la réglementation devraient être sélectionnées pour évaluer les risques potentiels liés aux épandages de boues. Ces substances sont actuellement dans la législation française les lourds métaux (cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, sélénium, plomb et zinc), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (fluoranthène, benzo[b]fluoranthène, benzo[a]pyrène) et les polychloro-bi-phényles. Cette première étape débouche sur la définition d'un schéma conceptuel décrivant les substances, les voies d'exposition et les récepteurs à considérer pour la quantification des risques.

Les impacts toxicologiques doivent être décrits pour chaque effet de la substance étudiée (effets à seuil et sans seuil). Une description complète des différents organes sur lesquels les substances ont un effet doit être proposée. Quand elles sont disponibles, les données quantitatives des effets des substances sur l'être humain seront choisies parmi les valeurs disponibles dans les bases de données toxicologiques internationales. Ces valeurs de référence toxicologiques (VTR) seront utilisées pour la quantification de risque.

L'évaluation de la dose d'exposition (DJE) pour chaque récepteur et chaque voie d'exposition exige l'estimation : de la concentration en substances dans le sol sur lequel la boue est épandue, des valeurs de paramètres intervenant dans le transfert des substances vers l'être humain (par le contact direct ou indirect) et des valeurs de paramètres concernant l'ingestion quotidienne d'aliments et les fréquences d'exposition pour chaque récepteur.

Les récepteurs et les voies d'exposition qui doivent être considérés par l'évaluateur de risques sont décrits ci-dessous.

Substances chimiques : récepteurs et voies d'exposition.

	Agriculteurs	Riverains	Population générale
Contact direct			
ingestion de sol	x	x	
inhalation de poussière	x	x	
Contact indirect			
consommation de produits agricoles	x	x	x

Dans les scénarios prédictifs, la concentration de chaque substance doit être calculée théoriquement en considérant les niveaux de bruit de fond dans les sols et une dilution des boues dans les sols agricoles (fonction de la densité du sol et de la profondeur de labour). L'exposition à l'alimentation générale (non concernée

par l'épandage de boues) est aussi estimée pour comparer ces différents niveaux de risque.

L'étape finale permet de calculer, pour les effets à seuil et sans seuil de chaque substance, le risque pour chaque voie d'exposition identifiée. Concernant les effets à seuil, la valeur de risque pour chaque effet de santé est obtenue selon l'équation : $QD_{\text{effet à seuil}} = DJE / VTR$. Pour les effets sans seuil, la valeur de risque pour chaque cible est obtenue selon l'équation : $ERI_{\text{effet sans seuil}} = DJE \times VTR$.

L'analyse de ces valeurs par les évaluateurs de risque doit être faite conjointement à l'examen des incertitudes inhérentes à la méthodologie et aux modèles de transfert des polluants. Pour les effets à seuil, les risques sont considérés comme acceptables lorsque $QD < 1$. Concernant les effets sans seuil, la valeur acceptable (généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-4}) reste à l'initiative du gestionnaire.

La méthodologie décrite auparavant a été appliquée pour évaluer les risques sur la santé liés aux substances chimiques sur un plan d'épandage de boues urbaines, pour lequel les terrains étaient entièrement consacrés à la culture de céréales. Pour ce site, et indépendamment des cibles, les niveaux de risques spécifiques à l'épandage de boues étaient inférieurs à 1 pour les effets à seuil et inférieurs à 10^{-5} pour les effets sans seuil. Selon notre méthodologie et conformément aux différentes hypothèses de calcul, l'épandage de boues d'épuration sur les terres agricoles de ce site est une pratique acceptable du point de vue sanitaire. En considérant l'exposition cumulée de l'alimentation générale et de l'alimentation impliquée par l'épandage de boues, le quotient de danger pour les effets à seuil sur le rein pour les enfants est légèrement supérieur à 1, mais la consommation de plantes cultivées sur des sols amendés contribue à seulement 0,002% de cette valeur. Dans tous les cas, les risques les plus significatifs sont associés à la consommation de plantes venant des sols non amendés.

Evaluation des risques sanitaires liés aux agents pathogènes

L'objectif de cette étude était d'évaluer les risques biologiques liés à la présence d'agents pathogènes présents dans les boues urbaines ou industrielles épandues sur des terrains agricoles dans le cadre de la réglementation environnementale française.

Depuis le premier rapport français sur le sujet en 1998, des travaux de recherche et des thèses ont été réalisés. Le premier objectif de ce travail était l'analyse des connaissances actuelles sur toutes les étapes de la démarche d'évaluation des risques. Le deuxième objectif était l'évaluation de la faisabilité de mise en œuvre d'une évaluation quantitative des risques sanitaires liés aux agents pathogènes.

Des travaux similaires ont été publiés notamment au Royaume-Uni et aux Etats-Unis. Il est donc apparu intéressant de développer une étude de cas basée sur des données adaptées au contexte français. La réalisation de cet exercice a permis de définir les lignes directrices d'une évaluation qualitative des risques sanitaires liés aux agents pathogènes.

Une revue de la littérature a fourni les données actuellement disponibles sur les charges en pathogènes dans les boues, leur sensibilité aux traitements des boues et au stockage, leur survie dans le sol et leur transport dans les compartiments environnementaux (sol, eau et air) après épandage, des données sur les autres sources de pathogènes dans l'environnement agricole, des données

épidémiologiques (en lien avec une exposition directe aux boues, aux eaux usées et aux composts), leurs effets sur la santé, et une synthèse sur des épidémies hydriques d'origine environnementale en France. Cette revue a aussi permis de mettre en évidence les principales lacunes scientifiques.

Pendant plus de 30 années de pratique d'épandage de boues en France, aucune épidémie hydrique d'origine environnementale liée à l'épandage de boues n'a été détectée. La revue bibliographique a permis de mettre en évidence quelques études épidémiologiques conduites spécifiquement pour l'exposition aux boues. L'examen de toutes les données épidémiologiques disponibles en France a montré que l'ingestion d'eau potable contaminée, sans aucune liaison prouvée avec l'épandage de boues, est actuellement la seule voie d'exposition impliquée dans les épidémies hydriques d'origine environnementale.

Pendant dix ans, des études françaises ont collecté des données sur la détection et la quantification de certains agents pathogènes (œufs d'helminthes, kystes de *Giardia spp.*, salmonelles, Enterovirus, VHA, *E. coli* vérotoxiques, *Listeria spp.*) dans les boues d'épuration. L'helminthe *Ascaris sp.* a pratiquement disparu en France métropolitaine chez les êtres humains et les porcs grâce aux règles d'hygiène et aux conditions d'élevage industriel. *Taenia saginata* représente probablement la dernière principale menace parasitaire pour la santé humaine et animale puisqu'il est pratiquement retrouvé dans toutes les boues analysées sous des climats modérés. La revue bibliographique montre aussi que la contamination des boues urbaines brutes est quasi systématique. Certains pathogènes sont peu étudiés (*Cryptosporidium sp.*, autres protozoaires comme *Balantidium sp.*, *Campylobacter sp.*, *Yersinia spp.*, *Vibrio spp.*, *E. coli* producteurs de shiga-toxines...) ou ne sont pas du tout étudiés dans des boues (Adenovirus, Calicivirus, Astrovirus, mycobactéries, microsporidies...). Seules deux études sur la contamination de boues brutes d'abattoirs français ont été trouvées.

En France, il y existe quelques données sur la contamination de boues urbaines traitées (Enterovirus, *Listeria sp.*, kystes de *Giardia spp.*, œufs d'helminthes) mais pas sur celles d'abattoirs ou celles issues du traitement d'eaux usées de laiteries. Au final, les traitements avancés pour la réduction des pathogènes recommandés par la Communauté européenne en 2001 sont : le compostage, le séchage thermique, la digestion thermophile, traitement thermique suivi d'une digestion et le chaulage.

Les méthodes françaises standardisées pour l'analyse des pathogènes dans les boues sont uniquement disponibles pour les œufs d'helminthes, les salmonelles et bientôt pour l'Enterovirus. Le projet européen Horizontal a pour objectif de compléter les outils actuellement disponibles pour l'échantillonnage et l'analyse de la matrice boue.

Beaucoup de facteurs influencent la survie des pathogènes dans l'environnement. La plupart du temps, la survie diminue en 2 mois à cause des conditions défavorables (dessiccation, température, compétition naturelle) dans les milieux environnementaux.

Les agents pathogènes de petite taille (virus, bactéries et certains protozoaires) peuvent être trouvés dans les bioaérosols formés lors de l'épandage de boues liquides avec certaines équipements dans des conditions venteuses.

L'eau constitue la principale voie de dissémination des pathogènes dans l'environnement. Cependant, la contamination d'eau en France est réduite par le respect de la réglementation instaurant des distances d'isolement entre les zones d'épandage et les usages sensibles. De plus, du fait des périodes d'épandage autorisées, il est peu probable de trouver des pathogènes sur des plantes cultivées sur des sols agricoles amendés. Le rôle des animaux qui pâturent sur ces sites dans la transmission de pathogènes à l'homme est réduit.

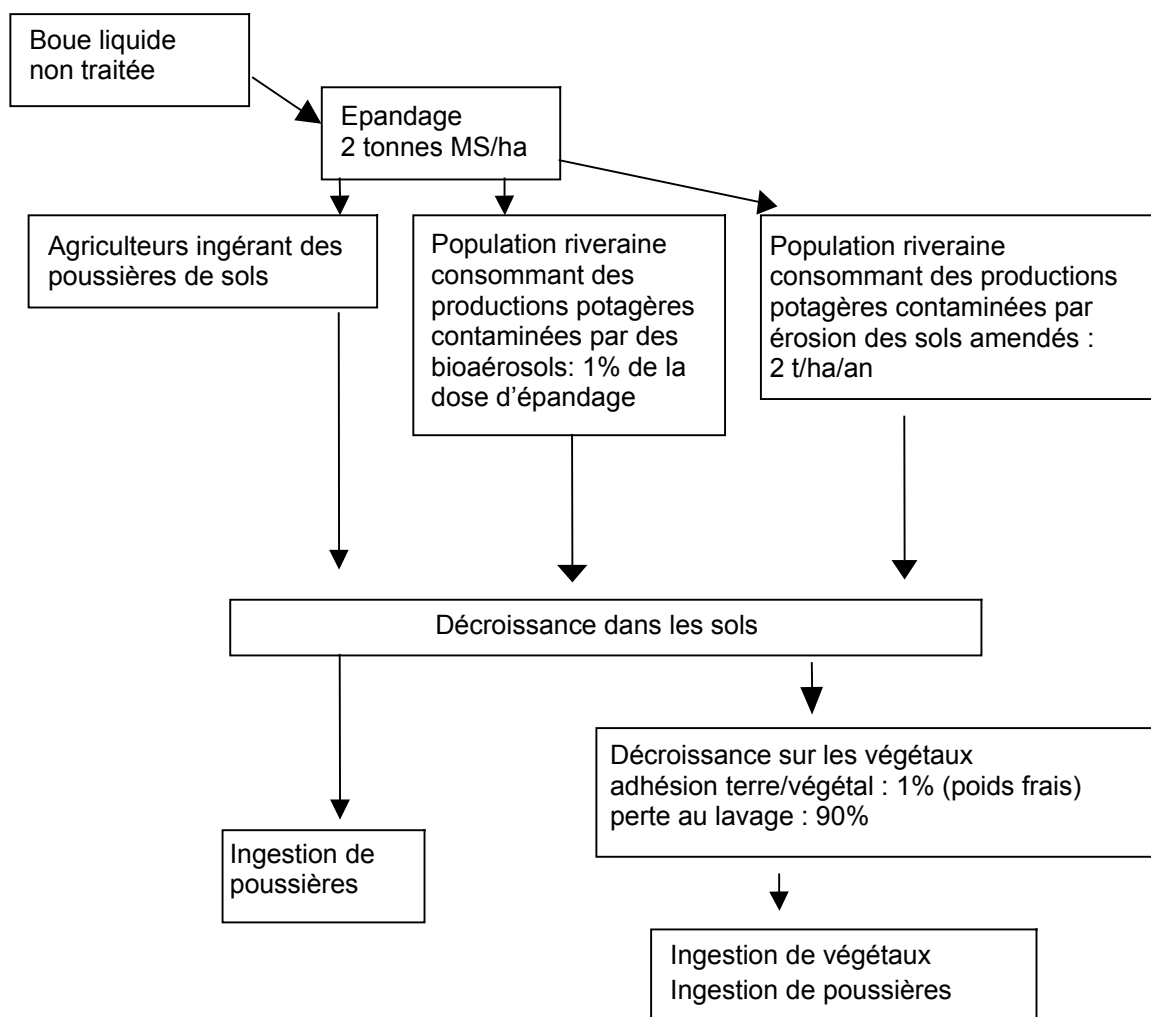
Selon cette étude, les principaux besoins de données concernent :

- la détermination des espèces des agents biologiques contenus dans les boues (salmonelle, *Campylobacter spp.*, *Cryptosporidium sp.* ...), ce qui permettrait d'identifier l'origine humaine, animale ou environnementale des pathogènes ;
- la présence, la quantification et la virulence des pathogènes dans les boues d'origine urbaine brutes et traitées (endotoxines, *Staphylococcus aureus*, *Vibrio spp.*, virus (rotavirus, calicivirus, adenovirus...), *E. coli* pathogènes, *Pseudomonas aeruginosa* *Cryptosporidium spp.*, mycobactéries, microsporidies ...) et dans les boues d'origine industrielle (*Pseudomonas spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter spp.*, Salmonelle) ;
- la détermination de la présence et de l'écologie des légionelles et les méthodes de détection dans les boues ;
- la construction d'une base de données sur la survie et le transport des pathogènes (et en particulier des virus) dans l'environnement (sol et plantes) ;
- l'exposition humaine aux bioaérosols et aux composts de boues au moment de l'épandage.

Malgré de nombreuses incertitudes liées à l'état des connaissances, une étude de cas exploratoire d'évaluation quantitative des risques a été développée pour la boue brute liquide pour identifier les points critiques de la démarche et évaluer sa pertinence dans le contexte réglementaire national de réalisation d'études d'impact sanitaire.

Entérovirus, Salmonella, *E coli* O157:H7 et *Cryptosporidium parvum* ont été sélectionnés à partir des listes des principaux pathogènes d'intérêt présents dans des boues d'épuration établies par l'ADEME et par l'agence de l'environnement américaine en 1999 sur deux critères : données existantes sur la charge de pathogènes dans les boues ou les eaux usées en France, et existence de relations dose-réponse par ingestion.

Le modèle conceptuel a été basé sur une approche par arbre d'événements simplifié source-vecteur-cible. Deux récepteurs et trois voies d'exposition ont été pris en compte : agriculteurs travaillant les sols et ingérant des poussières de sol ayant reçu des boues, et les populations riveraines consommant leurs propres produits végétaux contaminés soit par les bioaérosols issus des sols recevant les boues soit par érosion des sols amendés. Plusieurs hypothèses « pire-cas » ont été considérées sur la base de jugements d'experts. Les principales hypothèses sont présentées ci-après.



Arbre d'évènements

Sous les hypothèses « pire-cas » et dans l'état actuel des connaissances, les résultats préliminaires pour l'épandage de boues brutes liquides ont montré que : les niveaux d'exposition estimés pour les deux récepteurs humains sont très faibles; quel que soit le pathogène considéré, les risques d'avoir au moins une infection sur la durée d'exposition considérée sont par ordre décroissant :

Population riveraine/bioaérosol > agriculteur > population riveraine /érosion.

Quel que soit le récepteur humain considéré, les risques d'avoir au moins une infection sur la durée d'exposition considérée sont liés, par ordre décroissant, aux pathogènes :

Enterovirus > *Salmonella* > *Cryptosporidium parvum* > *E coli* O157:H7.

Cette première évaluation quantitative des risques pathogènes a été développée à partir d'un grand nombre d'hypothèses de travail entourées d'incertitude. En effet, en l'absence de données suffisantes, des valeurs considérées comme réalistes ou « pire-cas » ont été utilisées en suivant un consensus d'experts.

Les principales sources d'incertitude du modèle sont :

- l'évaluation de la charge en pathogènes dans la boue qui est directement liée à son hétérogénéité naturelle et aux incertitudes découlant des méthodes d'analyse microbiologiques ;

- les relations dose-réponses qui sont rares dans la littérature, surtout disponibles pour l'ingestion et non construites pour la matrice boue ; de plus l'existence d'une immunité acquise ou la spécificité génétique de certains individus ne sont pas actuellement prises en compte ;
- la modélisation de la décroissance des pathogènes dans le sol et les végétaux est très simplifiée et il n'y a actuellement aucune donnée expérimentale pour soutenir les estimations ;
- les scénarios d'exposition utilisés pour les deux récepteurs correspondent aux situations « pire-cas » (par exemple l'utilisation d'un tracteur ouvert augmente significativement la quantité de poussières ingérées pour les agriculteurs et la modélisation de la dispersion des bioaérosols pour les riverains est rendue incertaine à cause du manque de données expérimentales) qui ne sont pas représentatives des conditions « normales » d'épandage en France ;
- un phénomène environnemental important (les pertes résultant du lessivage par les pluies) n'a pas été pris en compte.

Cette étude de faisabilité a permis de proposer des lignes-directrices pour une évaluation qualitative des risques sanitaires liés aux agents pathogènes et des mesures de contrôle. L'analyse peut être effectuée selon un arbre décisionnel qui inclut les données nécessaires pour décrire l'épandage des boues, les populations exposées et les mesures préventives envisagées. Les mesures de réduction des risques sont basées sur les solutions proposées par la réglementation française : la réduction de la charge en pathogènes des boues (boues hygiénisées) ou la réduction des expositions humaines (pour les autres boues).