

que si les doses de chaux sont suffisantes pour maintenir un pH élevé jusqu'à l'épandage. Les autres modes de conditionnement chimique avant déshydratation mécanique (chlorure ferrique, sulfate de fer ou d'aluminium, etc.) sont en revanche sans effet sur la maîtrise des croissances. De même, certains traitements physiques, qui suppriment l'activité biologique et ne stabilisent pas la matière organique, permettent la multiplication ultérieure de certaines bactéries (exemple : pasteurisation).

Enfin cette efficacité est, bien entendu, fonction de la résistance des organismes considérés. D'une manière générale, les oeufs et les kystes de parasites sont très résistants (*Ascaris spp.*, *Taenia spp.*, *Eimeria spp.*, *Toxoplasma sp.*, etc.), sauf peut-être les oeufs de parasites à coque fine et les kystes de certains protozoaires (*Entamoeba sp.*, etc.).

### 1.3. Devenir des agents pathogènes après épandage

Les organismes pathogènes apportés par épandage de boues se retrouvent à la surface du sol ou du végétal, ou à faible profondeur dans le sol dans le cas d'un enfouissement par labour ou d'une injection. Ils ne pénètrent pas à l'intérieur des végétaux.

Un "bruit de fond" de contamination est souvent observé, provenant sans doute des déjections d'animaux sauvages ou, sur prairie, des déjections des animaux domestiques. Il peut fausser évidemment les résultats expérimentaux en montrant des parcelles témoins en fin d'expérience plus chargées en pathogènes que la parcelle ayant reçu des boues, surtout si les déterminations taxonomiques ne descendent pas au niveau de l'espèce.

La plupart des auteurs s'accordent pour estimer que 90 à 95 % des micro-organismes s'accumulent à la surface du sol (au plus à 5 cm), le reste ne transitant que sur de faibles distances. Par exemple, 99 % des salmonelles et 99,9 % des *Escherichia coli* sont retenus par une colonne de sol de 3 cm (SMITH S.R., 1996). Le sol joue donc le rôle d'un filtre extrêmement efficace. Cette capacité reste toutefois fonction de la profondeur effective du sol, de sa texture (taux d'argile notamment), et de sa richesse en matière organique. La probabilité d'une propagation en profondeur des agents pathogènes relève en conséquence de contextes particuliers tels que la présence de fentes de retraits en cas de sécheresse prolongée, de failles, d'absence de terre végétale, etc. Lors des études agro-pédologiques accompagnant la mise en place du plan d'épandage, il convient d'identifier et de soustraire du périmètre d'épandage les parcelles présen-

tant de telles caractéristiques.

BERRON (1984), dans une synthèse documentaire, a rassemblé des données sur la survie de micro-organismes dans le milieu extérieur et sur différents supports (cf. tabl. 4). Ces données sont collationnées de plusieurs sources documentaires et s'avèrent hétérogènes : seuls les ordres de grandeur sont à considérer. Selon les organismes et les conditions de milieu, la survie varie de quelques jours à plusieurs semaines, voire même quelques mois pour certains d'entre eux. Les oeufs ou kystes de parasites présentent incontestablement les performances de survie les plus longues : une à plusieurs années dans certaines circonstances favorables mais sans doute exceptionnelles. En moyenne, la perte de viabilité, et donc d'infectiosité, est atteinte en quelques semaines.

Les populations d'agents pathogènes décroissent plus rapidement lorsque les boues sont épandues sur les sols ou sur les végétaux, qu'enfouies dans les sols où la survie est plus importante. Le rythme de décroissance dépend des capacités propres des organismes (cf. tabl. 4) mais aussi de nombreuses variables dont la plus importante est le climat (température, insolation et humidité). A titre d'exemple, certains auteurs ont montré qu'en montagne la réduction des pathogènes était plus rapide sur les versants exposés au Sud que sur les versants exposés au Nord (effet de l'insolation). La décroissance peut aussi dépendre, de façon secondaire, de la texture, la structure et des propriétés biologiques et chimiques (CEC, teneur en calcium, pH, etc.) du sol. Enfin, sur les végétaux elle peut dépendre de la hauteur et des fissures du végétal.

A l'inverse, l'enfouissement des boues dans le sol, s'il diminue la probabilité d'un contact direct boue-homme ou boue-animal, atténue l'impact récessif des facteurs climatiques et augmente donc la survie des organismes.

Les risques les plus concrets de contamination des eaux proviennent en définitive du ruissellement de surface en cas de sols nus et pentus et d'épisodes pluvieux. Les eaux de ruissellement transportent des particules de sol auxquels sont associés les micro-organismes. L'état hydrique initial du sol, l'intensité de la pluie et le couvert végétal sont alors des facteurs complémentaires jouant sur l'érosion de surface et le transport des sédiments.

ORGANISME	MILIEU	DUREE DE SURVIE
<b>BACTÉRIES :</b>		
Bactéries du charbon	eaux d'égout	19 jours
<i>Vibrio cholerae</i>	épinards- laitues concombres	22-29 jours 7 jours
Coliformes	herbe feuilles de trèfle à 40-60 % d'humidité luzerne sol (surface)	14 jours 12-14 jours 6 jours 34 jours 38 jours
<i>Salmonella</i>	herbe (eaux brutes) trèfle (eaux décantées) légumes feuilles betteraves herbe surface du sol et pommes de terre carottes choux et groseilles sol sableux et stérilisé sol sableux non stérilisé sol (surface-eaux brutes) sol (couches profondes) boues digérées séchées à l'air	6 semaines 12 jours 7-40 jours 3 semaines tout l'hiver 40 jours 10 jours 5 jours 24 semaines 5-12 semaines 46 jours 70 jours 17 semaines
<i>Shigella</i>	herbe (eaux brutes) légumes	6 semaines 7 jours
<i>Streptococi</i>	sol sol (surface)	35-63 jours 38 jours
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	herbe sol eau	10-14 jours 6 mois 1 à 3 mois
<b>VIRUS :</b>		
Enterovirus	racines de haricots sol tomates et racines de pois	4 jours 12 jours 4-6 jours
Poliovirus	eau polluée 20°C	20 jours
<b>PROTOZOAIRES :</b>		
<i>Entamoeba histolytica</i>	légumes eau	3 jours des mois
<b>HELMINTHES :</b>		
Oeufs d' <i>Ascaris</i>	légumes sols irrigués sol	27-35 jours 2-3 ans 6 ans
Kystes de la douve de foie	foin sec foin mal séché	quelques semaines plus d'un an

Tableau n° 4 : Survie des agents pathogènes dans différents milieux (d'après POUND et CRITES, 1973 ; cité par BERRON, 1984, modifié)

## 1.4. Evaluation des risques sanitaires liés à l'épandage des boues

Une démarche d'évaluation des risques comporte en général quatre étapes :

- l'identification des dangers
- l'estimation des probabilités d'expression des dangers
- l'estimation des expositions aux dangers au sein des populations considérées
- la caractérisation du risque (étape de synthèse)

Il faut souligner la différence que font les épidémiologistes entre les termes « *danger* » et « *risque* ». Le danger est l'expression d'une potentialité, tandis que le risque est la probabilité de réalisation de cette potentialité.

### 1.4.1 L'identification des dangers

Le danger lié à l'épandage des boues est la présence des organismes pathogènes dans celles-ci.

En ce qui concerne les boues urbaines on peut penser que le danger envers l'Homme et les animaux est le plus élevé pour les parasites de la famille des Taeniidés (*Taenia spp.*) qui sont relativement fréquents dans les boues. D'autres parasites peuvent être considérés (*Besnoitia spp.*, *Sarcocystis spp.*, *Toxoplasma sp.*, *Balantidium sp.*, *Entamoeba sp.*, *Strongyloides sp.*, etc.) ou certaines bactéries. *Salmonella spp.*, par exemple, est retrouvé dans les boues, mais pas systématiquement. *Mycobacterium tuberculosis* peut être présent occasionnellement dans les boues mais à des quantités difficilement estimables et vraisemblablement faibles.

Ce sont les boues d'abattoirs de mammifères qui représentent le danger le plus élevé pour les animaux d'élevage, sachant qu'il n'est toutefois pas plus élevé qu'avec les déjections animales (lisier ou purins). Ce risque tient essentiellement aux pathogènes présents de façon inapparente chez les animaux ou responsables d'affection non décelées lors de l'examen *ante mortem* à l'abattoir ou ne justifiant ni de leur hébergement dans un emplacement spécial (avec écoulement distinct), ni leur abattage dans le local sanitaire de l'abattoir. A ce danger permanent, s'ajoute, en principe, un danger occasionnel lors d'abattages sanitaires (dans le cadre des prophylaxies des maladies du bétail ou d'épizooties graves). Mais dans ce cas, les animaux sont soit abattus sur place, soit dans un clos d'équarrissage, soit encore dans un abattoir qui est alors considéré comme périmètre infecté. Dans tous les cas, pour éviter la dissémination,

des dispositions sont prises qui réduisent considérablement le risque de propagation d'une maladie contagieuse grave par l'intermédiaire des effluents d'abattoir et donc des boues.

Les boues d'abattoir de volailles induisent des dangers très faibles pour l'Homme et les animaux d'élevage (bovins, ovins, porcs, chevaux et caprins à cause de la spécificité de la plupart des organismes, et volailles domestiques parce qu'elles n'ont généralement pas accès aux terres ayant reçu des boues). De même, les dangers induits par les boues de laiterie sont sans doute faibles en raison de leur contamination très limitée.

En final, il faut souligner que la simple détection d'un agent pathogène ne renseigne en rien sur son état de virulence. Par exemple, la bactérie détectée peut être viable mais non cultivable; elle peut être non viable et non cultivable. De la même façon, la présence d'un oeuf de parasite ne préjuge pas de sa viabilité, encore moins de son infectiosité.

### 1.4.2 Estimation des probabilités d'expression des dangers

La probabilité d'expression des dangers dépendent de trois paramètres :

- la résistance dans le milieu extérieur de l'organisme pathogène, avant de pouvoir atteindre l'espèce cible (voir plus haut) ;
- la dose minimale infectante (DMI) qui représente une évaluation de l'effectif d'un pathogène qui doit être absorbé pour que les symptômes de la maladie se manifestent chez quelques sujets au moins (de l'ordre de l'unité pour les oeufs de parasites intestinaux, de la centaine pour les virus et protozoaires et du million ou plus pour les bactéries) ;
- la spécificité d'espèce cible de l'organisme pathogène qui est variable.

### 1.4.3 Estimation des expositions aux dangers au sein des populations considérées

L'examen des différentes voies de contamination imaginables (cf. fig. 1), et leur confrontation aux pratiques normales d'épandage (où notamment les recommandations sont respectées), permet de conclure que seules trois modalités de contamination peuvent avoir lieu de façon probable : la transmission aux animaux domestiques (au pâturage ou à l'étable), aux populations animales sauvages, et à l'Homme (personnel directement en contact avec les boues au cours du stockage, de la reprise ou de l'épandage).

### • Animaux domestiques

La transmission aux animaux domestiques survient par ingestion de végétaux et de terre souillée, au pâturage ou à l'étable (herbe fanée, fourrages ensilés, etc.). Les délais de mise à l'herbe à respecter sont souvent longs (trois semaines à 6 semaines, selon que les boues sont ou non hygiénisées, ainsi que le stipule la réglementation du 8 janvier 1998) et seuls les pathogènes résistants dans le milieu extérieur sont concernés. Les espèces les plus exposées sont les bovins, les ovins, les caprins, et les chevaux.

Les animaux d'élevage au pâturage peuvent aussi se contaminer par des écoulements de jus sur les prairies provenant de stockage de boues en tête de parcelle. Cette dernière éventualité n'intervient toutefois que dans des conditions particulières (topographique, climatique et de stockage). La réalisation de stockages aménagés doit interdire une telle situation.

### • Animaux sauvages

Les animaux sauvages, en se contaminant par un contact direct avec la boue, peuvent jouer un rôle de "vecteur" des agents pathogènes. Soit ils permettent la dissémination dans l'environnement par simple transport passif des pathogènes (cas des vers de terre qui peuvent héberger des bactéries et des oeufs de parasite); Soit ils entretiennent la contamination dans leur population et jouent ensuite le rôle de réservoir (cas des rats d'égout, des ragondins, des lapins de garenne, des lièvres, etc.); Soit enfin, ils sont des points de passage obligés dans le cycle évolutif de certains parasites et hébergent donc un stade de développement particulier du parasite (par exemple: le Renard est l'hôte définitif principal de *Echinococcus multilocularis*, microparasite se localisant dans le foie et dont l'issue pour l'Homme est fatal, tandis que l'hôte intermédiaire est le Campagnol terrestre). Les oiseaux et les insectes peuvent également jouer le rôle de vecteurs.

### • Hommes : personnel d'exploitation, agriculteurs et grand public

La dispersion aérienne lors de l'épandage ne se produit que si les boues sont liquides (aérospersion et donc formation d'aérosols) ou très sèches (émission de poussières : ceci suppose que la boue a été séchée thermiquement et donc hygiénisée, ce qui supprime le danger). Elle ne concerne que les bactéries et les virus car les oeufs et kystes de parasites, lourds, retombent très vite. D'autres facteurs influent sur la dispersion : le réglage de la buse d'épandage, la vitesse du vent, l'existence d'obstacles (arbres, ...), la conformation du site, etc. Dans ces configurations, le climat est déterminant sur la

survie des pathogènes : un temps chaud et ensoleillé la rendra plus difficile qu'un temps frais et nuageux (les U.V. ont une action stérilisante et la chaleur favorisera une dessiccation brutale des petites particules).

Outre l'inhalation accidentelle de poussières ou d'aérosols, la transmission aux agriculteurs et ouvriers des chantiers d'épandage peut survenir par contact direct ou indirect avec la boue. Les enquêtes épidémiologiques menées à ce jour n'ont toutefois jamais permis de mettre en évidence un risque mesurable pour les agriculteurs utilisant des boues. Celles menées sur les ouvriers des stations d'épuration, pourtant plus exposés, montrent que le risque est faible, voire nul. De plus, le respect de règles d'hygiène simples permet de réduire encore l'occurrence du risque.

L'Homme (au sens "grand public") peut être touché par la consommation de végétaux contaminés ou par celle de produits carnés provenant d'animaux ayant ingéré des végétaux ou des sols contaminés. L'organisme pathogène doit résister aux opérations de récolte, de stockage et surtout de transformation de l'aliment (dans laquelle, l'épluchage et le lavage pour les végétaux, et surtout la cuisson sont importants). En définitive, cette voie ne concerne que les aliments destinés à être mangés crus ou peu cuits. Ainsi qu'il sera vu plus loin, l'interdiction d'épandre sur des cultures destinées à être consommées crues par l'Homme, les contrôles sanitaires des viandes et les délais à respecter entre l'épandage et la l'utilisation de l'herbe (pâturage, fauchage) rendent très peu probables ces voies de contamination.

On peut aussi envisager le cas de boues épandues sur des terrains de sport (risques de pénétration par écorchures), sur des jardins publics (accessibles aux enfants) ou en forêt. Ces pratiques sont peu répandues en France, mais il convient d'en tenir compte dans l'analyse des risques.

#### 1.4.4 La caractérisation du risque (étape de synthèse)

L'évaluation finale du risque doit tenir compte de :

- l'importance médicale de l'organisme qui peut provoquer des maladies très graves ou au contraire bénignes, ou encore une maladie que dans des circonstances exceptionnelles (cas des pathogènes opportunistes) ;
- l'incidence économique (coût des soins, des baisses de production, des saisies de carcasses à l'abattoir) ;
- l'existence d'autres sources de contamination (qui peut dans certains cas révéler que la boue participe pour une part négligeable à la contamination de l'espèce cible).

Depuis le début des opérations d'épandage des boues aucune corrélation univoque entre épandage et événements pathologiques n'a pu être mise en évidence. Toutefois, ceci ne signifie pas une absence de risque, mais indique plutôt un "excès de risque" très faible, au sens des épidémiologistes. L'expression "excès de risque" désigne en effet le supplément de mortalité ou de morbidité dans une population déterminée que l'on peut relier à la présence d'un agent dangereux particulier.

Les rares études épidémiologiques, en conditions réelles ou expérimentales, qui ont réussi à mettre en évidence un excès de risque avec des degrés de certitude variables (forte présomption ou quasi-certitude) concernent *Taenia spp.* et *Sarcocystis spp.* L'infestation par *Taenia saginata* (uniquement possible à partir de boues urbaines) a peu d'impact sur la santé des animaux (porteurs des kystes larvaires) et de l'Homme (porteur des parasites adultes) mais présente une réelle importance économique pour les éleveurs en raison des saisies de carcasses infestées à l'abattoir. De même, les études concernant *Salmonella spp.* tendent à prouver qu'il y a peu de risques lorsque les recommandations d'épandage sont respectées.

L'absence de problème notable (sauf les cas cités ci-dessus) depuis que la valorisation agronomique est pratiquée avec les règles actuelles est satisfaisante. En outre, l'amélioration progressive des règles sanitaires (lutte contre les maladies, système de surveillance sanitaire, surveillance des installations classées, inspection sanitaire des abattoirs, ...), des conditions d'assainissement (augmentation du niveau global d'épuration, traitements des boues, mise en place de stations propres aux abattoirs, ...) et des épandages (organisation de plus en plus rigoureuse de la valorisation agronomique des boues) contribuent à une consolidation sans cesse accrue du niveau d'exigence et de sécurité.

## 1.5. Gestion du risque sanitaire lié à l'épandage des boues

Face à la contamination des boues et aux différentes voies possibles d'exposition aux risques, on distingue grosso modo deux approches :

- celle préconisant des exigences de traitement des boues pour supprimer leur contamination, ou la réduire à un niveau jugé acceptable : c'est la notion d'"hygiénisation" et de traitements hygiénisants. La suppression de la contamination élimine donc le danger (étape 1 de la démarche d'évaluation des risques exposée au § 1.4.1 ci-dessus);
- celle n'imposant pas ce type de traitement, mais

édicte un ensemble de règles relativement précises sur l'utilisation des boues (actions relevant de l'étape 3 de la démarche d'évaluation des risques exposée au § 1.4.3 ci-dessus). Cette approche considère en conséquence que la simple mise en œuvre de "bonnes pratiques" suffit à gérer le risque sanitaire. C'est l'approche la plus communément répandue, tant en France qu'en Union européenne (Directive du Conseil de 1986).

Certains pays ont prévu une combinaison de ces deux approches (Suisse, Danemark), mais l'intégration la plus complète a incontestablement été réalisée par les USA (1993). Avec la nouvelle réglementation française sur l'épandage des boues, on peut considérer que le dispositif français prévoyant des procédures, soit pour l'épandage, soit pour l'homologation de matières fertilisantes à base de boues, devient finalement assez proche conceptuellement du dispositif américain.

### 1.5.1 Notion de filières hygiénisantes. Intérêt. Transcription dans la réglementation.

Selon la définition proposée par le Conseil Supérieur d'Hygiène Public de France (CSHPF), dans un rapport publié en 1997, l'hygiénisation "vise à réduire à des niveaux acceptables les concentrations d'agents pathogènes présents dans les boues". L'analyse de tous les micro-organismes étant impossible, des "organismes témoins d'efficacité de traitement (OTET)" sont choisis sur la base de leur résistance. Usuellement sont considérés les helminthes (surtout les nématodes), les salmonelles, et les virus entériques. En ce qui concerne les helminthes, l'analyse de viabilité est recommandée car ces organismes possèdent une coque particulièrement résistante et que l'on retrouve après traitement, même après perte de viabilité.

Ces propositions ont été retenues par la nouvelle réglementation française sur l'épandage des boues d'épuration urbaines (décret du 8 décembre 1997 et arrêté du 8 janvier 1998). Selon les articles 12 et 16 de cet arrêté, les boues hygiénisées présentent en sortie de traitement les concentrations ci-dessous qui correspondent en fait à des niveaux non détectables :

- *Salmonella* < 8 NPP / 10 g MS (NPP = nombre le plus probable)
- entérovirus < 3 NPPUC / 10 g MS (NPPUC = nombre le plus probable d'unités cytopathiques)
- oeufs d'helminthes pathogènes viables < 3 / 10 g MS (MS = matière sèche)

Cette caractérisation doit être faite lors de la mise en service de l'unité de traitement, puis être accompagnée

en routine d'un suivi des coliformes thermotolérants. Le suivi de ces organismes, dont les concentrations mesurées sont interprétées en référence à celles obtenues lors de la caractérisation du traitement, doit démontrer le bon fonctionnement de l'installation et l'absence de recontamination.

Plus que le choix d'un traitement particulier pour l'hygiénisation des boues, c'est le choix d'une filière hygiénisante qu'il faut encourager, ce choix s'appuyant sur les capacités hygiénisantes des différents traitements et leur éventuelle combinaison dans une séquence judi-



Le compostage des boues est un procédé reconnu comme hygiénisant. La bonne conduite du procédé est toutefois déterminante pour assurer une température au moins égale à 55° C, pendant cinq jours consécutifs, en tout point de la masse. La vapeur qui se dégage lors des retournements témoigne d'une intense activité thermique. Dans le cas des boues d'épuration, le compostage par ventilation forcée garantit une meilleure maîtrise des odeurs.

A titre d'exemple, citons 5 filières hygiénisantes :

- pasteurisation \* digestion mésophile \* déshydratation
- stabilisation aérobie thermophile \* digestion mésophile \* déshydratation
- irradiation \* digestion mésophile \* déshydratation
- digestion mésophile \* déshydratation \* compostage
- digestion mésophile \* déshydratation \* chaulage

D'autres solutions sont possibles du moment qu'elles satisfassent à l'objectif d'hygiénisation, ce qui suppose que celui-ci soit clairement énoncé et reconnu. En conséquence, le choix judicieux et validé de ces organismes-témoins et les valeurs-seuils à retenir sont de la plus haute importance pour juger, de façon impartiale, du caractère hygiénisant d'une filière. Ces critères doivent s'accompagner de la définition de méthodes d'échantillonnage et d'analyse.

La réglementation américaine de 1993 US EPA, (40 CFR Part 503) a ainsi défini des paramètres microbiologiques et reconnu un certain nombre de procédés hygiénisants, mais en gardant une ouverture possible sur tout procédé nouveau. En résumé, car l'énoncé exhaustif de cette réglementation serait trop long, l'articulation de cette réglementation est la suivante :

- au minimum : coliformes fécaux : < 1 000 NPP / g MS
- ou salmonelles : nombre < 3 pour 4 g MS
- et en outre :

ciuse tenant compte des compatibilités techniques entre les différents traitements (la stabilisation aérobie et la pasteurisation ont, par exemple, un effet bénéfique sur la digestion s'ils lui sont antérieurs), de la prévention des recroissances de bactéries pathogènes et des contraintes ne concernant pas l'hygiénisation (telles que l'obligation réglementaire de stabilisation des boues, les objectifs sur la valeur agronomique du produit final, volumes à stocker et transporter, le matériel d'épandage qui nécessitera une boue liquide ou au contraire solide, etc.).



Boues chaulées déposées en tête de parcelle, peu de temps avant l'épandage. Le maintien d'un pH supérieur à 12, pendant trois mois consécutifs, permet l'éradication des germes les plus résistants dans l'environnement tels les oeufs de parasites (Ascaris ou ténias).

- soit densité virus entériques < 1 PFU pour 4 g MS
- et nombre d'oeufs d'helminthes viables < 1 pour 4 g MS
- soit mise en oeuvre d'un traitement reconnu comme efficace..

La Suisse considère dans l' "Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'Environnement" de 1992 que les "boues sont hygiénisées lorsqu'au moment de quitter la station centrale d'épuration, elles ne contiennent pas plus de 100 entérobactéries par gramme, ni d'oeufs d'helminthes susceptibles d'être contagieux". Cette ordonnance précise aussi que l'épandage des boues ou de compost mélangé à des boues n'est autorisé sur les surfaces fourragères ou maraîchères que s'il s'agit de boues hygiénisées. L'Italie, quant à elle, n'a considéré que les salmonelles, dont la charge doit être inférieure à 1 000 NPP / g MS.

L'intérêt évident de l'hygiénisation est de permettre une utilisation plus large des boues :

- dans des contextes sensibles ou particuliers (terrains de sport ou de loisir, forêts fréquentées par le public, etc.) ;
- pour la fabrication de matières fertilisantes, sous réserve de la prise en compte d'autres critères (éléments-traces métalliques ou organiques) ;
- pour des usages spécifiques (horticulture, maraîchage, etc.).

Au bénéfice strictement technique sur le plan de la santé publique, peut se rajouter un bénéfice d'ordre psycho-social non négligeable pour l'acceptation de la filière de valorisation. L'inconvénient est de nature économique : les traitements hygiénisants induisent forcément un surcoût par rapport à une installation épuratoire classique, sauf si la filière a déjà été mise en place pour d'autres raisons et qu'il s'agit d'une simple optimisation de la conduite des procédés (chaulage, compostage, séchage ou conditionnement thermique, etc.).

### 1.5.2 Gestion du risque sanitaire par encadrement des épandages

Pour définir les règles d'épandage, il convient de lister toutes les voies possibles d'exposition aux risques (figure n° 1), ainsi que cela a été défini au § 1.4.2.

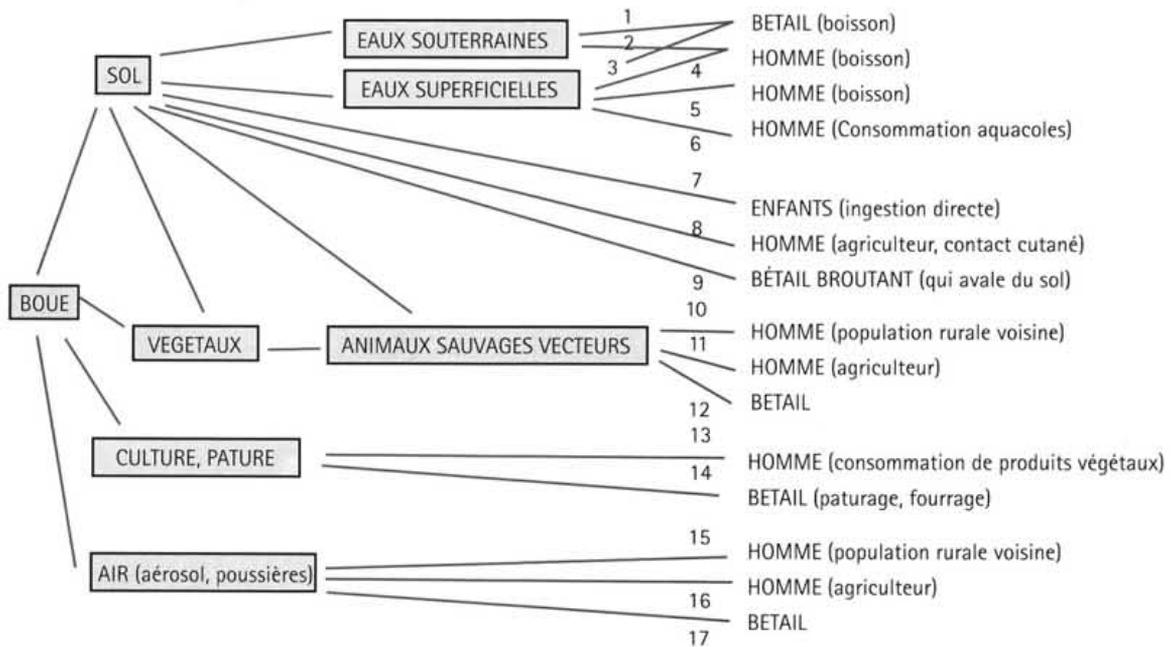


Figure n° 1: les différentes voies d'exposition menant des organismes pathogènes présents dans les boues aux cibles

Les recommandations ou obligations se traduisent par des précautions ou restrictions d'usage :

- restriction ou interdiction d'épandre sur des cultures particulières (telles que fruits et légumes en contact avec le sol et consommables crus, pâturages ou cultures fourragères) ou sur des secteurs particuliers (zone inondée ou inondable, zone à nappe aquifère affleurante, zones protégées, périmètre de protection des captages d'eau, etc.) ;
- délais à respecter entre l'épandage et l'implantation ou l'utilisation de ces cultures ;
- contraintes sur les techniques d'épandage (aéroaspersion des boues liquides interdite; injection, enfouissement dans le sol ou incorporation immédiate sous la surface du sol pour les boues non traitées; etc.), l'époque d'épandage (interdiction en période de fortes

pluies ou de gel, etc.) et enfin, sur les traitements des boues.

Cette approche justifie les dispositions de la nouvelle réglementation et du règlement sanitaire départemental-type (cf. tabl. 6), qui peuvent être adaptées selon le contexte local et le type de boues produit par la station d'épuration. Dans les grandes lignes, des dispositions du même ordre ont été reprises dans les diverses réglementations européennes.

n° voie (cf. fig. 1)	règle à respecter	réglementation concernée
1, 2, 3, 4, 5, et 6	<p>"toutes dispositions doivent être prises pour que le ruissellement en dehors du champ ou une percolation vers les nappes souterraines ne soient cause d'inconvénients pour la santé publique", ainsi l'épandage est interdit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• à moins de 35 m des puits, forages, sources, réseaux d'eaux potables, rivages, cours d'eau, ... La distance minimale par rapport aux cours d'eau est portée à 200 m si des boues liquides sont épandues sur un terrain de pente &gt; 7 %,</li> <li>• dans des zones d'infiltration en communication reconnue avec des ressources en eau utilisées pour l'alimentation en eau potable</li> <li>• en périodes de fortes pluies</li> <li>• sur sol gelé ou enneigé</li> </ul> <p>"l'épandage doit également satisfaire aux prescriptions générales ou particulières relatives aux périmètres de protection des sources, puits, captages ou prises d'eau"</p>	Décret du 8/12/1997, arrêté du 8/01/1998 et RSD
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• afin de protéger les riverains, il est interdit d'épandre à moins de 100 m d'habitations, de zones de loisirs, sauf si les boues sont hygiénisées.</li> <li>• stockage localisé à plus de 200 m des habitations, zones de loisir, ...</li> <li>• interdiction d'épandre sur des terrains autres que régulièrement exploités</li> </ul>	Décret du 8/12/1997, arrêté du 8/01/1998 et RSD
8	pas de prescription réglementaire : recommandations CSHPF, reprises dans ce document.	
10, 11 et 12	pas de prescription réglementaire explicite, sauf obligation d'enfouir immédiatement dans le sol des boues non traitées (matières de vidange), ou en moins de 48 heures si les boues sont non stabilisées, ce qui réduit l'attraction des vecteurs vis à vis de la boue	Décret du 8/12/1997, arrêté du 8/01/1998
9 et 14	délai de 3 semaines après l'épandage avant l'utilisation de l'herbe (pâturage, fauchage) si les boues sont hygiénisées, ou 6 semaines si les boues ne sont pas hygiénisées.	Arrêté du 8/01/1998
13	interdiction d'épandre pendant la période de végétation + délai de 10 mois (cas des boues hygiénisées) avant la récolte et pendant la récolte elle-même pour les cultures dont les produits sont en contact avec le sol et susceptibles d'être consommés à l'état cru. Délai porté à 18 mois si les boues ne sont pas hygiénisées.	Arrêté du 8/01/1998
15, 16 et 17	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aéroaspersion des boues liquides interdite si production de brouillards fins</li> <li>• il est interdit d'épandre à moins de 100 m d'habitations, de zones de loisirs, etc, si les boues ne sont pas hygiénisées</li> <li>• si les boues sont hygiénisées la distance de 100 m devient sans objet, mais les boues doivent cependant être stabilisées et enfouies immédiatement après épandage.</li> </ul>	Décret du 8/12/1997, arrêté du 8/01/1998

Tableau n° 5 : les différentes voies de contamination et règles à respecter pour maîtriser les risques

En complément des prescriptions de type réglementaire que tout opérateur se doit de respecter, un ensemble de "bonnes pratiques" peuvent être recommandées et intégrées dans les dispositions organisationnelles du plan d'épandage. Une grande partie de ces recommandations, proposées par le CSHPF, sont désormais reprises dans la nouvelle réglementation :

a) Manipulation des boues : précautions d'hygiène du personnel d'exploitation ou de l'agriculteur utilisateur.  
- Il est recommandé de porter des vêtements spécifiques lors de l'épandage. Ces vêtements ne doivent entrer ni dans les bâtiments d'habitation, ni dans les locaux d'élevage. Ils doivent être laissés dans un vestiaire, et régulièrement lavés.

- Lors du soutirage de boues liquides, il est recommandé d'utiliser des gants de travail si la connexion entre la tonne à lisier et les tuyauteries de soutirage se fait manuellement. Pour éviter cette connexion manuelle et le contact direct avec la boue, l'équipement des tonnes à lisier avec un bras de pompage à branchement automatique est fortement conseillé.
- Le port d'un masque est recommandé, si les conditions de l'épandage sont susceptibles de créer des aérosols. Toute dispositions doivent être prises par ailleurs pour éviter la formation d'aérosols.
- En fin de journée, ou en cours de journée si nécessaire, le lavage du matériel d'épandage est recommandé.

b) Stockage des boues :

- Le stockage des boues, entre chaque campagne d'épandage et sur une longue période, doit être réalisé dans des dispositifs étanches, interdisant tout rejet dans le milieu naturel (arrêté du 8/01/1998, article 5). Il peut être couvert pour limiter la production d'eaux de ruissellement, voire fermé pour maîtriser s'il y a lieu les nuisances

olfactives et collecter les odeurs en vue de leur traitement.

- Les zones de reprise des boues stockées (aire de soutirage ou aire de chargement) doivent être conçues de façon à permettre un nettoyage aisé. Une prise d'eau et une évacuation des eaux de nettoyage sont à prévoir.
- Le dépôt temporaire des boues à même le sol, en tête de parcelle, n'est possible que si les boues sont solides et stabilisées (arrêté du 8/01/1998, article 5), et que toutes dispositions soient prises pour prévenir des écoulements de boues ou de lixiviats dans le milieu naturel.
- A défaut d'être solides ou stabilisées, les boues ne peuvent être déposées à même le sol plus de 48 heures.
- La localisation de ces dépôts temporaires doit respecter les distances légales d'implantation prévues par l'arrêté du 8/01/1998 et le RSD, et plus généralement être judicieusement choisie pour éviter toute gêne, quelle qu'elle soit, vis à vis du voisinage. La configuration physique du site de stockage (pente), la nature des sols, l'impact paysager et le respect du RSD constituent des éléments de la prise de décision.



*Bras de pompage latéral sur tonne à lisier, avec entonnoir récepteur. Ce dispositif évite le contact manuel avec la boue. L'hygiène du travail s'en trouve fortement améliorée.*

c) Transport

- Les matériels de transport doivent être parfaitement étanches pour éviter les pertes sur la voirie. Les dispositifs de fermeture et d'ouverture doivent garantir toute sécurité.
- En cas de salissement accidentel, le matériel de transport doit être lavé avant d'accéder à la voirie commune.
- Le cas échéant le matériel de transport peut être fermé pour limiter les nuisances olfactives tout au long du transport, notamment lors de la traversée d'agglomérations.
- Les déversements accidentels de boues sur la voirie doivent être nettoyés dans les plus brefs délais.

d) Epandage

- Les matériels d'épandage utilisés doivent être rigoureusement étanches, et régulièrement entretenus et lavés.

- Les dispositifs suivants permettent de réduire la production d'odeurs et d'aérosols, tout en améliorant la précision des épandages :

- . pour les boues liquides : tonnes à lisier ou appareils automoteurs équipés de dispositifs d'épandage localisés au ras du sol (rampe d'épandage classique; ou rampe équipée d'un dispositif basse pression avec pendillards) ou avec enfouissement direct (socs enfouisseurs) ;

- . pour les boues pâteuses : appareils de dispositifs d'épandage à plateaux surbaissés limitant les projections de boue en hauteur ;

- . pour les boues solides : épandeurs équipés de dispositifs d'émiettement et de tables d'épandage assurant un bon fractionnement des gâteaux de boue et une dispersion régulière sur une grande largeur.

- En cas d'épandage sur cultures en place (cultures pérennes ou annuelles), toutes dispositions doivent être prises pour éviter d'épandre de la boue sur la végétation. Le recours à des dispositifs d'épandage localisé, amenant la boue directement au pied des végétaux ou au ras du sol, est à préconiser.

- L'épandage par aspersion avec des canons haute pression est interdit en raison des risques de production d'aérosols (brouillards fins) et de leur transport possible sur une longue distance.

- Un enfouissement rapide des boues après épandage, même superficiel, est à préconiser (sauf si épandage sur prairies) pour limiter notamment la possibilité d'un contact direct des boues avec l'Homme ou l'animal, et réduire les éventuelles nuisances olfactives. Cet enfouissement intervient le jour même ou le lendemain de l'épandage.

#### e) Cas d'utilisation sur prairie permanente ou temporaire

- Le circuit de manutention des boues doit toujours se faire hors de l'enceinte d'élevage (respect de la distinction circuits propres/circuits sales).

- Les épandages sont à pratiquer sur herbe rase, immédiatement après un ensilage, une coupe ou un pâturage. L'épandage sur herbe haute est déconseillé dans toutes les situations, pour conserver l'appétence de l'herbe ou pour prévenir un transfert d'éléments-traces métalliques ou organiques par ingestion directe de boues.

- Dans le cas d'épandage de boues liquides, la remise à l'herbe des animaux se fera au plus tôt trois semaines après l'épandage si les boues sont hygiénisées, ou six semaines si les boues ne sont pas hygiénisées. Des dispositifs particuliers d'enfouissement adaptés aux prairies (coutres incisant le tapis prairial) peuvent être préconisés pour réduire encore davantage la probabilité de risques d'un contact boues-animal.

- Dans le cas de boues solides ou pâteuses, en raison de leur plus lente vitesse de dégradation à la surface du sol, l'épandage sur prairie est conseillé uniquement en fin de saison de végétation ou après le départ des animaux.

### 1.5.3 Synthèse entre les deux approches

Les deux approches, présentant mutuellement avantages et inconvénients, peuvent avantageusement se combiner dans un dispositif réglementaire donné. Ainsi la réglementation américaine a retenu ces deux approches en classant dans les boues du type "A" celles ayant subi un traitement d'hygiénisation, et dans les boues du type "B" celles épandues dans le cadre d'une organisation d'épandage soumise à des règles précises. Les boues de type A peuvent être utilisées sans contrainte aucune, à la façon de n'importe quelle matière fertilisante commerciale. Il s'agit en quelque sorte d'un

encouragement, ou "prime à la qualité", pour la station d'épuration réalisant un effort particulier de traitement. Sans avoir perfectionné aussi loin sa réglementation, le même esprit a été repris par les textes danois (Statutory order n° 736 du 26 octobre 1989) : certains usages ne sont autorisés qu'après certains traitements nettement spécifiés (pasteurisation, compostage, etc.).

Au delà d'une stricte exigence réglementaire, un traitement d'hygiénisation peut être mis en oeuvre sur une seule base volontaire par le maître d'ouvrage de la station d'épuration, en vue de créer un climat de confiance propice à la sérénité de l'opération d'épandage envisagée, tant vis à vis des agriculteurs, que des entreprises de transformation des produits agricoles ou des populations locales.

Toutefois, il faut souligner que dans la plupart des opérations d'épandage, très généralement sur terres labourées et en grande culture, le simple respect des règles d'épandage offre une maîtrise tout à fait suffisante des risques sanitaires. La mise en oeuvre d'un traitement hygiénisant constitue presque toujours un surcoût qu'il convient en conséquence de justifier à chaque fois dans le contexte précis de l'opération envisagée.

### 1.5.4 Intérêt de la cellule de veille sanitaire vétérinaire des épandages de boues d'épuration

Ce cadre sanitaire étant fixé, il demeure important de maintenir une veille nationale pour évaluer la pertinence des mesures de précaution édictées : il s'agit également d'une des conclusions fortes des travaux européens, réaffirmée par le CSHPF en 1997. Dans le domaine vétérinaire, le Centre d'informations toxicologiques vétérinaires (CNITV) et l'ADEME ont décidé de relancer la cellule de veille sanitaire qui avait fonctionné de 1986 à 1990 et n'avait recensé qu'un seul cas d'accident. Sa relance apparaît nécessaire pour maintenir la vigilance dans les opérations d'épandage.

L'objectif de cette cellule est de recenser les accidents pouvant être reliés à une mauvaise utilisation des boues d'épuration épandues sur prairies ou sur cultures fourragères en général. L'autre intérêt de cette cellule est d'aider au diagnostic des vraies causes sanitaires lorsqu'il s'avère que la responsabilité de l'utilisation des boues peut être écartée. A défaut de réaliser une telle enquête, l'erreur subsisterait sur l'origine véritable de l'accident, ce qui continuerait à être dommageable sur le plan sanitaire, car on attribuerait à tort aux boues les problèmes observés. Cette cellule doit donc jouer un rôle "d'objectivation" dans la surveillance sanitaire vétérinaire des épandages.

Enfin, cette cellule peut remplir un rôle précieux pour le « retour d'expériences » en capitalisant les enseignements liés à la pratique de terrain. Conseils ou prescriptions d'épandage peuvent alors être modulés selon la diversité des contextes d'application.

La cellule de veille sanitaire est installée à Lyon mais fonctionne en réseau avec les autres CNITV des écoles vétérinaires de Toulouse, Nantes et Maisons-Alfort. Ces quatre Centres, en raison de leur localisation dans les Ecoles Nationales Vétérinaires, sont fréquemment consultés par les vétérinaires ou par des particuliers, en tant que Centres Antipoison Vétérinaires.

Les CNITV sont en relation avec les Laboratoires Vétérinaires Départementaux, les Directions des Services Vétérinaires, et avec des laboratoires d'analyses toxico-

logiques, microbiologiques, ou parasitologiques. Chaque cas fait l'objet d'un dialogue avec le vétérinaire ou la personne contactée, généralement par téléphone, plus rarement par courrier, ce qui permet d'évaluer la possibilité de la suspicion, et d'apporter des informations sur la conduite à tenir (fiche-type avec renseignements complémentaires, prélèvements, etc.). Après validation, chaque cas est transcrit sur une fiche, puis transféré dans une base de données informatique.

La cellule de veille sanitaire effectue régulièrement, une fois par an, une synthèse des cas recensés, notamment pour mettre en évidence certains facteurs de risques, et proposer des mesures préventives nouvelles, plus précises ou mieux adaptées. Dans tous les cas, même en l'absence d'accident sanitaire au cours de l'année écoulée, un compte-rendu annuel est publié.



## Chapitre 2 : Les éléments-traces métalliques

### 2.1. Définition. Cycle biogéochimique

On appelle micro-éléments métalliques, ou éléments-traces métalliques, les métaux et métalloïdes que l'on retrouve à l'état de traces dans les organismes biologiques (concentration < 100 mg/kg MS). Ceux-ci peuvent avoir un rôle indispensable, néfaste ou nul sur les processus vitaux. Les éléments indispensables sont les oligo-éléments (B, Cl, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Na, Ni et Zn pour les végétaux; As, Cl, Cu, Co, Cr, F, Fe, I, Mn, Mo, Ni, Se, Sn, V et Zn pour les animaux). Ceux-ci deviennent toutefois toxiques dès que leur concentration dans l'organisme dépasse un seuil, variable en fonction de la nature de l'élément et du tissu de l'organisme considérés. D'autres éléments, dont la caractéristique indispensable n'a jamais été démontrée, deviennent aussi toxiques au-delà d'un certain seuil (Pb, Cd, Hg, ...).

Le terme « métaux lourds » est volontairement banni de ce document car il s'agit d'une expression chimiquement impropre, sans véritable définition officielle, et possédant une évidente connotation dramatique. De plus, l'usage courant nomme « métaux lourds » indistinctement tous les métaux et métalloïdes présents dans les boues, les sols, les déjections animales, etc. La nécessité d'objectiver les débats sur ces questions et de recadrer les faits avec sérénité et précision oblige à cette rigueur terminologique. Si l'expression « éléments-traces métalliques » apparaît trop longue à écrire ou à dire, on peut lui substituer l'acronyme ETM.

À l'état naturel, les roches contiennent des micro-éléments métalliques à des concentrations variables en fonction de la nature de la roche, de son âge, de son origine, de sa localisation et, bien sûr, de la nature de l'élément. Les sols formés aux dépens des roches de surface hériteront d'une partie des micro-éléments initialement disséminés dans les roches. D'autres phénomènes naturels permettent une redistribution des micro-éléments métalliques dans l'environnement (lixiviation et lessivage vers les eaux souterraines, ruissellement et érosion vers les eaux superficielles, volcanisme capable de rejeter dans l'atmosphère des éléments métalliques sous forme de poussières qui iront se déposer à la surface des eaux et des sols, hydrothermalisme sous-marin ou terrestre, érosion éolienne, ...etc.). Enfin les organismes vivants participent aussi à ces grands cycles biogéochimiques en puisant dans les sols, les eaux et l'air les éléments métalliques et en les restituant en partie ou en totalité (déjections animales et organismes morts).

L'Homme, depuis l'antiquité, perturbe ces cycles biogéochimiques en intensifiant les processus de redistribution à partir des roches. En effet, l'exploitation des gisements miniers où sont concentrés les métaux permet la redistribution sous forme de produits finis, de déchets, de rejets atmosphériques et d'effluents. La contribution de l'Homme à la mise en circulation et à la dissémination des éléments métalliques varie d'environ 35 % pour le zinc à 85 % pour le cadmium.

### 2.2. Les éléments-traces métalliques dans les boues résiduaires

#### 2.2.1 Origine dans les eaux usées

Les eaux usées qui parviennent en tête des stations d'épuration ont une teneur en éléments-traces métalliques très supérieure à celle qui caractérise les eaux de rivière ou de mer. Cette surcharge est due au déversement dans le réseau de collecte des eaux usées urbaines de toute une série de produits issus d'activités diverses (cf. tabl. 6) :

- activités domestiques (fèces, produits cosmétiques, médicaux et de nettoyage, auxquels s'ajoutent tous les déchets plus ou moins liquides déversés dans l'évier) ;
- activités urbaines (corrosion des conduites d'eau individuelles et collectives, responsable d'une part importante de la charge en Cu et Pb, et ruissellement des eaux pluviales sur les toitures, les chaussées et d'une manière générale sur l'ensemble des surfaces imperméabilisées de la cité, responsable d'une part importante de la charge en Pb, Zn et Ni) ;
- activités commerciales (déversement de rejets liquides en provenance de centres commerciaux, de garages, de blanchisseries et teintureries, de restaurants, de laboratoires médicaux, d'ateliers de développement de photos, d'hôpitaux, etc.) ;
- activités industrielles (déversement d'effluents liquides, non ou partiellement traités par des entreprises industrielles; dans les centres urbains importants et pour certains éléments, ce type d'activité joue un rôle essentiel dans la contamination des eaux usées; on notera cependant que dans le cas de petites agglomérations, une seule activité à caractère industriel peut contribuer à accroître brutalement la concentration en métaux des effluents de la cité si le volume de ces derniers est modeste; enfin on notera aussi que l'activité industrielle a surtout un impact sur la contamination en Cd, Hg, Cr et Ni).

Origine de la pollution (en % du total mesuré dans l'effluent)				
Élément	Domestique	Pluviale	Industrielle	Non identifiée
Cadmium	20	3	61	16
Cuivre	62	6	3	29
Zinc	28	10	5	57
Nickel	17	9	27	47
Mercurure	4	1	58	37
Chrome	2	2	35	61
Plomb	26	29	2	43

Tableau n°6 : Contribution moyenne des différentes activités urbaines à l'enrichissement en éléments-traces métalliques des eaux usées

### 2.2.2 Concentration dans les eaux usées

La concentration en éléments-traces métalliques des eaux usées urbaines est en partie fonction de l'importance de la population raccordée au réseau d'assainissement. Elle est plus faible dans les effluents d'origine uniquement domestique que dans les effluents mixtes (domestiques et industriels). Dans les grandes agglomérations, les rejets des activités artisanales et industrielles finissent par masquer l'influence de l'activité domestique. Toutefois, sous l'effet de la réglementation "installations classées" et d'une police des réseaux plus sévère, la différence entre grandes et petites ou moyennes stations d'épuration tend à s'estomper. Les éléments-traces les plus abondants, en terme de concentration, dans une eau usée "moyenne" se situent dans l'ordre décroissant suivant : Fer > Zinc > Manganèse > Cuivre.

Les autres micro-éléments existent à l'état de traces, ou

à la limite du seuil de détection de la technique analytique la plus fine dans le cas du mercure.

Les éléments-traces évoluent sous trois états physiques dans les eaux usées :

- état dissous ,
- état colloïdal (matière solide non décantable),
- état particulaire (matière solide décantable).

45 à 70 % du plomb, du nickel, du cobalt, du zinc, du cuivre, du cadmium, du manganèse et du chrome se trouvent à l'état dissous dans les eaux usées ; toutefois une fraction non négligeable du chrome et du cuivre mais surtout du zinc (40 %) et du fer (34 %) est également présente dans la matière solide décantable.

La destinée des éléments-traces métalliques dans la station d'épuration est étroitement liée à celle des eaux usées qui y parviennent et qui y subissent toute une série de traitements (cf. fig. 2).

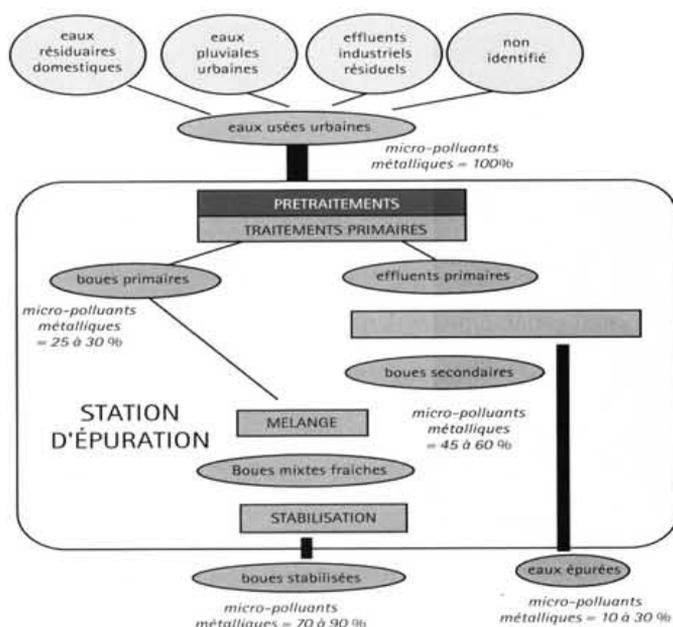


Figure n°2 : origine et devenir des éléments-traces métalliques au cours des traitements des eaux usées dans la station d'épuration