

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE DE RECHERCHE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
BENJAMIN CAUSSE, Ing. TPE**

**ÉTUDE DE LA CONTAMINATION EN CYANURE DU LIXIVIAT DU LIEU
D'ENFOUISSEMENT SANITAIRE DE SAINT-ÉTIENNE-DES-GRÈS**

MARS 2006

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier le Dr. Jacques BOISVERT, pour sa bonne volonté, sa sympathie, et son soutien tout au long de mon travail de recherche. Il s'est investi dans ce projet et m'a permis de réaliser ma Maîtrise en Sciences de l'Environnement à l'UQTR en collaboration avec mon laboratoire d'attache en France (L.S.E., ENTPE).

La collaboration scientifique avec France/Québec et l'ouverture d'une belle perspective d'échange entre l'UQTR et l'ENTPE, n'aurait pu être possible sans la motivation et le soutien du Dr. Cécile DELOLME, chercheur au L.S.E. (Vaux-en-Velin, France) et co-directrice du présent projet.

Je remercie également M. Robert COMEAU, directeur général de la Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie et gestionnaire du Lieu d'Enfouissement Sanitaire de Saint-Étienne-des-Grès, pour sa disponibilité et le temps consacré à m'aider dans mes recherches documentaires techniques, ainsi que pour son efficacité pour me présenter aux techniciens sur le terrain, lors des analyses réalisées en Juillet 2005.

Merci de tout cœur au Dr. Gervais BÉRUBÉ pour avoir accepté de faire parti de mon comité d'évaluation pour ma maîtrise en Sciences de l'Environnement, et surtout pour m'avoir passionné lors des cours de synthèse organique, en espérant que l'avenir me permettra de renouer avec la recherche en chimie organique pure...

Un grand merci également au Dr. Marco RODRIGUEZ pour m'avoir fait découvrir un domaine des sciences passionnant lors de son cours de dynamiques des populations.

Enfin, je remercie le Dr. Alain MAIRE, directeur du programme à la Maîtrise en Sciences de l'Environnement à l'UQTR, pour les facilités administratives qu'il m'a accordées lors de la validation de mes cours CREPUQ en crédits comptant pour la maîtrise en Sciences de l'Environnement.

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, les sociétés de consommation sont caractérisées par une production importante de déchets. Ces derniers doivent être traités dans un souci de développement durable. Les Lieux d'Enfouissement Sanitaire (LES) sont les outils conçus pour la gestion de ces déchets (centre de tri, cellules d'enfouissement, usine de traitement du lixiviat) et ont pour but de minimiser l'impact des matières résiduelles sur notre environnement. Cependant, dans le cadre du programme de suivi environnemental au LES de Saint-Étienne-des-Grès (Mauricie), la présence de cyanure a été détectée dans les eaux de lixiviation. Durant deux épisodes (été 2003 et hiver 2004), le taux de cyanure dans le lixiviat a été mesuré au dessus de la norme légale maximale (0,1 mg/L). Le présent travail a pour but de définir la source de contamination et de proposer des méthodes de gestion fiables au directeur général du site. Les méthodes d'investigation utilisées (étude du fonctionnement du LES, suivi des analyses physico-chimiques des eaux de lixiviation, recherche bibliographique sur le cyanure dans l'environnement) ont permis de distinguer trois hypothèses : le cyanure est introduit en amont de l'usine de traitement du lixiviat (hypothèse 1), le cyanure est produit sur le site dans le Réacteur Biologique Séquentiel (RBS) (hypothèse 2), le cyanure n'est pas réellement présent dans le lixiviat mais produit en aval du site pendant la distillation préalable au dosage (hypothèse 3). Par des analyses physico-chimiques suivant le parcours du lixiviat au cours de son traitement nous avons mis en évidence que des nitrates/nitrites étaient produits en quantité importante par la microflore du RBS ; puis qu'au cours du dosage, les ions nitrites réagissaient avec la matière organique du milieu (acides gras, acides aminés...) pour former le cyanure *in situ*. Pour neutraliser la réaction susmentionnée, une quantité prédéterminée d'acide sulfamique est ajoutée à l'échantillon avant la distillation. On trouve alors la concentration réelle en cyanure (<1 mg/L). Le lixiviat du LES n'est pas contaminé en cyanure, le faux positif était dû à une méthode d'analyse

inadaptée. Par conséquent, nous proposons au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec de faire appliquer le protocole MA 300 – CN 1.1 de dosage des cyanures dans les eaux usées. Les effluents des LES étant chargés en nitrates/nitrites provenant des RBS, la méthode MA 300 – CN 1.1, stipulant l'ajout d'acide sulfamique dans les échantillons à analyser en cyanure, doit être appliquée par les laboratoires d'analyses accrédités effectuant les analyses chimiques du lixiviat des LES du Québec.

Mots clés : Cyanure, Contamination, Lixiviat, Lieu d'Enfouissement Sanitaire (LES), Réacteur Biologique Séquentiel (RBS), Nitrites, Acide sulfamique

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ANNEXES	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I CONTEXTE GÉNÉRAL.....	4
1.1 Problématique.....	4
1.1.1. Le règlement sur les déchets solides	4
1.1.2 Limites tolérées en polluants	6
1.1.3 Sanctions, amendes et conséquences d'une contamination au cyanure	7
1.2 Présentation du Lieu d'Enfouissement Sanitaire	9
1.2.1 Situation géographique et historique du LES	9
1.2.2 Mission et compétences de la régie	13
1.3 Fonctionnement du LES : traitement des déchets	16
1.3.1 Tri sélectif et matières recyclables.....	16
1.3.2. L'enfouissement des déchets	18
1.3.3 Traitement du lixiviat.....	20
1. 4 Conclusion du Chapitre 1	26

CHAPITRE II CYANURE ET ENVIRONNEMENT	27
2.1 Chimie du cyanure.....	27
2.1.1. Généralités sur la chimie organique et inorganique de CN	27
2.1.1.a) Principales réactions du cyanure en chimie organiques	27
2.1.1.b) Chimie inorganique du cyanure :	29
2.1.2 Méthodes d'analyse du cyanure.....	32
2.1.2.a) Le dosage des cyanures totaux :	33
2.1.2.b) Le dosage de cyanures disponibles à la chloration et les autres analyses du cyanure	36
2.1.3 Production et consommation chimique du cyanure	38
2.1.3.a) Production de CN lors de la distillation.....	38
2.1.3.b) Transformation de SCN^- en CN^- : cas particulier des déchets industriels.....	40
2.1.3.c) Consommation du cyanure par des agents oxydants.....	40
2.2.1 Production du cyanure par les microbes	42
2.2.1.a) production de cyanure par les champignons.....	42
2.2.1.b) Production de cyanure par des bactéries.....	43
2.2.2 Consommation du cyanure par les microorganismes.....	44
2.2.2.a) Assimilation de CN par les microorganismes cyanogéniques...	45
2.2.2.b) Utilisation du cyanure comme nutriment	49
2.2.2.c) Biodégradation et détoxication du cyanure par catalyse enzymatique.....	50
2.2.3 Conclusion : régulation microbienne du taux de cyanure dans l'environnement.....	53

2.3 Toxicité	55
2.3.1 Toxicologie environnementale du cyanure	55
2.3.2 Toxicologie humaine.....	56
2.4 Conclusion du Chapitre 2	57
CHAPITRE III ÉTUDE DE LA CONTAMINATION EN CYANURE DU LIXIVIAT	
DU LES DE SAINT-ÉTIENNE-DES-GRÈS.....	59
3.1 Problématique détaillée	59
3.1.1 Rappel de la problématique telle que définie au CHAPITRE I.....	59
3.1.2 Historique des contaminations en cyanure.....	60
3.1.3 Hypothèses et scénarios	62
3.2 Matériel et méthode	66
3.2.1 Points d'échantillonnage.....	66
3.2.2 Eléments et paramètres à analyser	67
3.2.3 Séries d'analyses mises en œuvre	69
3.3 Résultats.....	71
3.3.1 Remarques préliminaires concernant la précision des mesures effectuées sur le terrain	71
3.3.2 Résultats des séries d'analyses mises en œuvre	72
3.4 Discussion	74
3.5 Perspectives	84
3.5.1 Les transformations de l'azote dans le RBS.....	84
3.5.2 Conséquences sur les méthodes d'analyses des eaux du RBS.....	86
CONCLUSION.....	90
BIBLIOGRAPHIE	93

ANNEXES..... 99

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Concentrations maximales tolérées de contaminants en sortie du lixiviat....	6
3.1	Synthèse des principaux résultats d'analyse du cyanure dans la période juillet 2003/septembre 2004	61
3.2	Les différents éléments présents dans le lixiviat et leurs interférences potentielles avec le cyanure.	68
3.3	Résultats Série 1 (Normal Labo A).....	72
3.4	Résultats Série 1 bis (Normal Labo B).....	73
3.5	Résultats Série 2 (avec acide sulfamique)	73
3.6	Résultats Série 3 (avec ajout de cyanure)	74
3.7	Effet de l'ajout d'acide sulfamique et nitrites sur le recouvrement de la mesure du cyanure (d'après Rapen <i>et al.</i>).	77

LISTE DES FIGURES

1.1 : Situation géographique du LES de Saint-Étienne-des-Grès à l'échelle nationale.....	10
1.2 : Situation géographique du LES à l'échelle locale	11
1.3 : Carte des municipalités membres ou clientes de la RGMRM	15
1.4 : Plan général du LES	17
1.5 : L'enfouissement des déchets.....	20
1.6 : Photo aérienne du LES.....	21
1.7 : Photo prise lors d'une vidange des boues de fosses sceptique dans l'étang d'accumulation	22
1.8 : Photo de l'étang d'accumulation. On observe les aérateurs flottants au dernier plan.	23
1.9 : Photo du Réacteur Biologique Séquentiel (RBS).....	25
1.10 : Photographies de l'étang de polissage (à gauche) et du système de décontamination UV (à droite).....	26
2.1 : Orbitales moléculaires du cyanure	28
2.2 : Addition nucléophile (AN) du cyanure sur une cétone pour former une cyanohydrine	28
2.3 : Substitution nucléophile (SN) avec le cyanure.....	29
2.4 :Schéma de montage pour la distillation des cyanures (d'après le CEAEQ).....	34
2.5 : Equations bilan du dosage des cyanure par colorimétrie.....	35

2.6 :Schéma du montage automatisé pour le dosage des cyanures (selon le CEAEQ).....	36
2.7 : Effet de l'addition de nitrites sur le cyanure dans un effluent de bioréacteur (Rapean <i>et al.</i>).....	39
2.8 : Libération du cyanure dans une plante via l'oxydation d'un cyanogène ...	43
2.9 : Mécanisme probable de la production de HCN à partir de glycine par les bactéries.....	44
2.10 : Mécanisme réactionnel non enzymatique de la décarboxylation de l'acide cyanoformique.....	44
2.11 : Formation d'alanine avec assimilation du cyanure d'hydrogène	45
2.12 : Synthèse d'acide glutamique avec assimilation du cyanure d'hydrogène	46
2.13 : Schéma du mécanisme possible de détoxication du cyanure d'hydrogène par les moisissures de neige de basidiomycètes avec formation d'acide 4-amino-4-cyanobutyrique (selon Strobel).....	47
2.14 : Formation d'acide α -aminobutyrique avec assimilation de cyanure.....	48
2.15 : Formation de β -cyanoalanine avec assimilation de cyanure.....	48
2.16 : Schéma de la synthèse d'un précurseur d'acide aminée (le formamide) à partir du cyanure	49
2.17 : Détoxication du cyanure via les activités enzymatiques nitrilase et déshydrogénase.....	50
2.18 : Biotransformation de l'acetonitrile (A) et de KCN et production d'acide acétique et formique par <i>Pseudomonas</i> sp. (S1). Photo en MEB de colonies de <i>Pseudomonas</i> sp. (S1) isolées (d'après Dhillon <i>et al.</i>)	51

2.19 : Schéma de la détoxification du cyanure dans les mitochondries via l'activité Rhodanese.	52
2.20 : Détoxification du cyanure via l'activité enzymatique de la mercaptopyruvate sulfurtransférase.....	53
2.21 : Les différents moyens de régulation du cyanure dans l'environnement par les microorganismes.....	54
2.22 : Disponibilité des électrons des cyanures simples et complexés	56
3.1 : Schéma du scénario 3	65
3.2 : Points de prélèvement pour les analyses chimiques.....	67
3.3 : Mise en évidence de la production de cyanure en fonction de la concentration en nitrates/nitrites.....	79
3.4 : Rappel de la FIGURE 2.7 : $[CN^-]=f[NO_2^-]$ d'après Rapean <i>et al.</i>	80
3.5 : Concentrations en nitrates/nitrites le long du circuit de traitement du lixiviat (moyenne des 4 Séries)	80
3.6 : Effet d'un ajout d'acide sulfamique sur les concentrations en $[CN^-]$ mesurées dans le lixiviat.	81
3.7 : Schéma du scénario réel	83
3.8 : Cycle de l'azote (d'après Sigg <i>et al.</i>).....	85

LISTE DES ANNEXES

- ANNEXE A** : Extraits du « Règlement sur les déchets solides » (dernière mise à jour du 20 juillet 2005), extrait de la loi sur la protection de l'environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec 100
- ANNEXE B** : Métabolismes microbiens aérobie et anaérobie intervenant dans le RBS, Gilles PERRIN, Mémoire de DESS : Gestion des déchets, p.36-37, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, (1992). 115
- ANNEXE C** : Schéma du métabolisme d'une cellule humaine lors d'un empoisonnement au Cyanure. Extrait de *Cyanide Poisoning*, par Steven I. Baskin et Thomas G. Brewer..... 116

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

[...]	indique une lacune, ou encore un mot ou un groupe de mots qui a/ont été omis dans la phrase
AN	Addition Nucléophile
APHA	American Public Health Association
AWWAWEF	American Water Works Association and Water Environment Federation
CEAEQ	Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec
chap.	chapitre
éd.	Edition
<i>et al.</i>	Utilisé lorsqu'il y a plus de deux auteurs dans un ouvrage
id.	idem
LES	Lieu d'Enfouissement Sanitaire
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.
p.	page, pages
RBS	Réacteur Biologique Séquentiel

RGMRM Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie

SN Substitution Nucléophile

t. tome

vol. volume(s)

INTRODUCTION

Les sociétés de consommation de masse occidentales sont caractérisées par une production importante de déchets. Dans la province canadienne du Québec, c'est 20 tonnes de matières résiduelles¹ non dangereuses qui sont produites chaque minute par les citoyens (source Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs du Québec -MDDEP). En dépit des efforts de sensibilisation et des moyens offerts à la population, aux municipalités, aux institutions, aux commerces et aux industries pour réduire leur production de biens et valoriser leurs résidus, une quantité encore trop importante de produits de consommation finissent leur premier cycle de vie dans les lieux d'élimination. La « Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 » fixe à 65% l'objectif à atteindre annuellement, d'ici l'année 2008, pour la valorisation des matières résiduelles non dangereuses. Cet objectif optimiste² traduit une volonté gouvernementale (1), de mieux en mieux portée par un consensus au sein de la population, de gérer au mieux les déchets en portant le moins d'atteinte possible à notre environnement.

L'évolution de la gestion des déchets au Québec ces vingt-cinq dernières années traduit une prise de conscience des risques environnementaux. C'est pour prévenir des pollutions dues à l'enfouissement des résidus que le système de traitement des déchets a évolué. On a ainsi délaissé la mise en décharge, pour l'enfouissement des matières résiduelles (premières cellules étanches construites en 1993). Les cellules d'enfouissement étaient initialement conçues pour laisser les eaux de lixiviations produites par les déchets solides percoler

¹ Les matières résiduelles sont « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance ou produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon » (gazette officielle du Québec, 2000). Les matières résiduelles non dangereuses sont des déchets comme des pneus, des ordinateurs, de la peinture, de l'huile, du papier, du carton, du verre, des feuilles, des débris de construction, des métaux, du plastique, des résidus industriels, etc.

² L'objectif de 65% de recyclage ne sera probablement pas pleinement atteint sur tout le territoire québécois en 2008. En moyenne le taux de 30% de recyclage en 2008 devrait être atteint (Normand Perigny, Mémoire de Maîtrise Sc. Env., UQTR, 2005)

dans les sols et se dépolluer en se déchargeant de leur contaminant dans les couches superficiels. De telles installations nécessitaient des conditions hydrogéologiques particulières pour ne pas risquer de contaminer les réserves d'eau potables urbaines (nappes phréatiques sous jacentes), et les risques de contaminations paraissaient mal contrôlés. Le souci de préservation de notre environnement a finalement conduit à l'élaboration de cellules d'enfouissement sanitaires sécurisées, possédant une membrane étanche empêchant la pénétration des eaux de lixiviation en sous sol, couplées à des usines de décontamination du lixiviat. Les eaux usées recueillies sont ainsi dépolluées avant d'être relarguées dans le réseau hydrologique naturel.

Dans la région de Trois-Rivières (Québec, Canada), les municipalités voisines se sont associées pour créer et faire fonctionner la Régie de Gestion des Matières résiduelles de la Mauricie (RGMRM). Les municipalités locales sont responsables de la collecte des matières résiduelles et la RGMRM s'occupe du traitement des déchets de plus de 200 000 particuliers ainsi que de nombreuses entreprises et institutions. Pour ce faire, elle utilise le Lieu d'Enfouissement Sanitaire (LES) de Saint-Étienne-des-Grès (situé à 25 km au Nord de Trois-Rivières). Le LES est équipé de plusieurs cellules d'enfouissement des déchets couplées à une usine de traitement du lixiviat. Après traitement, le lixiviat est relargué dans la rivière Saint-Maurice. Un contrôle de la composition des eaux décontaminées est effectué régulièrement, pour vérifier qu'aucune pollution n'est diffusée en sortie du réseau.

Durant l'été 2003, les analyses physico-chimiques du lixiviat en sortie du LES de Saint-Étienne-des-Grès ont révélé la présence de cyanure à une concentration de 0,28 mg/L, ce qui est supérieur aux normes maximales de 0,1 mg/L autorisées par le règlement sur les déchets solides³ (document officiel émis par le MDDEP). Durant l'hiver 2004, du cyanure est à nouveau trouvé dans les eaux de lixiviation en quantités supérieures à celle légalement autorisée. Depuis l'été

³ cf. Annexe A

2004, aucune pollution en cyanure n'a été observée sur le site de Saint-Étienne-des-Grès. Les expertises commandées à deux laboratoires indépendants et accrédités par le MDDEP ne permettent pas de conclure sur les causes de la pollution observée. Face à ces analyses, M. Robert COMEAU, gestionnaire et directeur général de la RGMRM, doit clarifier la situation en informant le Ministère du Développement Durable et de l'Environnement du Québec des causes du disfonctionnement occasionnel observé.

La présente étude aura donc comme objectif de définir clairement les causes des pollutions en cyanure observées lors de l'épisode été 2003/hiver 2004 ; et de proposer des méthodes de gestions efficaces à M. Robert Comeau pour éviter une nouvelle contamination des eaux en cyanure.

Pour mener à bien notre étude, nous diviserons notre travail en trois parties. Tout d'abord, nous présenterons le contexte général de notre étude de cas et nous décrirons le fonctionnement du Lieu d'Enfouissement Sanitaire de Saint-Étienne-des-Grès. Dans un deuxième temps nous ferons une étude bibliographique sur la chimie et la biochimie du cyanure, afin de mieux comprendre quelles sont les causes potentielles de la contamination observée dans les eaux de lixiviation. Enfin, après avoir passé en revue les différents comportement du cyanure dans l'environnement, nous aborderons le problème spécifique du LES de Saint-Étienne-des-Grès, et tenterons d'en définir les causes et de trouver des méthodes de gestion pour s'assurer que les concentrations en cyanure mesurées dans les eaux usées respectent les normes applicables.

CHAPITRE I

CONTEXTE GÉNÉRAL

1.1 PROBLÉMATIQUE

1.1.1. Le règlement sur les déchets solides

Dans la province du Québec, les gestionnaires de Lieux d'Enfouissement Sanitaires sont sous la juridiction du Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs du Québec. Le document officiel établissant les normes de construction, de fonctionnement et de gestion des LES est « Le règlement sur les déchets solides » (joint en Annexe A⁴), extrait de « la loi sur la qualité de l'environnement ». Pour les gestionnaires de LES, il s'agit d'un document de référence.

Le règlement sur les déchets solides est constitué de dix-sept sections :

La section « I) Interprétation » définit les termes spécifiques employés dans le règlement. Entre autre on retiendra les définitions de :

« déchets solides»: les produits résiduels solides à 20°C provenant d'activités industrielles, commerciales ou agricoles, les détritiques, les déchets biomédicaux [...] traités par désinfection, les résidus d'incinération de déchets solides ou biomédicaux, les ordures ménagères, les gravats, les plâtras et les autres rebuts solides à 20°C, à l'exception : (...) des carcasses de véhicules automobiles, des terres et des sables imbibés d'hydrocarbures, les produits

⁴ Le présent travail ayant été réalisé à l'été 2005, la version de référence utilisée est celle du 20 Juillet 2005. Une nouvelle version du règlement sur les déchets solides, datée du 19 Janvier 2006 est depuis rentrée en vigueur, cependant, les modifications ne concernent pas les limites applicables en [CN]

résultant du traitement des sols contaminés par un procédé de stabilisation, de fixation et de solidification, des pesticides, des déchets biomédicaux, des fumiers, des résidus miniers, des déchets radioactifs, des boues, des résidus solides provenant de fabriques de pâtes et papiers ou des scieries, de même que des matières dangereuses au sens du paragraphe 21^e de l'article 1 de la Loi sur la qualité de l'environnement [...] ».

« «eau de lixiviation»: liquide ou filtrat qui percole à travers une couche de déchets solides ».

« «lieu d'élimination»: lieu de dépôt définitif ou de traitement des déchets solides ».

Les sections « II) Certificat » et « III) Garantie » définissent les documents et les garanties à fournir pour toute municipalité ou personne qui sollicite un certificat en vue d'établir ou de modifier un lieu d'élimination.

La section qui nous intéresse le plus dans le cadre de notre travail est la partie « IV) enfouissement sanitaire ». Cette partie définit les normes de constructions d'un LES (cellules d'enfouissement, bassins d'accumulation, d'aération et de polissage) et impose les normes de contaminants à ne pas dépasser après le traitement des eaux de lixiviations.

Les sections suivantes concernent : (V) l'incinération , (VI) la récupération des déchets mélangés, (VII) le compostages des déchets mélangés, (VIII) la pyrolyse, (IX) les dépôts de matériaux secs, (X) les dépôts en tranché de déchets solides, (XI) les postes de transbordement de déchets mélangés, (XII) l'enlèvement et le transport des déchets solides, (XIII) la répartition des coûts entre municipalités, (XIV) la limitation du nombre de lieux d'élimination, (XV) abrogé, (XVI) les dispositions transitoires.

Enfin, la section XVII, aborde les dispositions finales. Elle prévoit une clause pour le non respect des articles précédents, et des amendes le cas échéant.

1.1.2 Limites tolérées en polluants

Le règlement sur les déchets solides définit les éléments toxiques que doit surveiller tout gestionnaire de lieu d'élimination. Les paramètres pris en compte et les concentrations limites acceptées sont présentées dans le TABLEAU 1.1 ci-dessous.

TABLEAU 1.1
Concentrations maximales tolérées de contaminants en sortie du lixiviat
(d'après le règlement sur les déchets solides - Annexe A)

Paramètre	Valeur limite tolérée
Cyanures totaux ([HCN] en mg/L)	0,1
Composés phénoliques (mg/L)	0,02
Sulfures totaux ([H ₂ S] en mg/L)	2
Cadmium ([Cd] en mg/L)	0,1
Chrome ([Cr] en mg/L)	0,5
Cuivre ([Cu] en mg/L)	1
Nickel ([Ni] en mg/L)	1
Zinc ([Zn] mg/L)	1
Plomb ([Pb] mg/L)	0,1
Mercure ([Hg] en mg/L)	0,001
Fer ([Fe] en mg/L)	17
huiles et graisses (en mg/L)	15
bactéries coliformes totales (UFC)	2400/100 mL
bactéries coliformes fécaux (UFC)	200/100 mL
Demande Biochimique en Oxygène 5 jours (DBO 5)	40 mg/L
Demande Chimique en Oxygène (DCO)	100 mg/L

« L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire ne doit pas rejeter dans le réseau hydrographique de surface ou dans un réseau d'égout pluvial, des eaux de lixiviation contenant des contaminants au-delà des normes prescrites » ci-dessus (règlement sur les déchets solides, section IV, article 30).

Pour le LES de Saint-Étienne-des-Grès, les critères de pollutions sont donnés par le « Manuel d'opération de l'usine de traitement du lixiviat » rédigé par la compagnie Pluritec. Concernant les cyanures et les composés soufrés (qui seront étudiés plus en détails dans la suite du document) les normes à respecter sont les mêmes que celles préconisées dans le TABLEAU 1.1 ci-dessus.

1.1.3 Sanctions, amendes et conséquences d'une contamination au cyanure

Dans le cas où l'exploitant du LES ne respecte pas la réglementation sur les déchets solides, des sanctions sont prévus par la loi sur la protection de l'environnement.

En particulier, toute personne morale ne respectant pas les articles de la section IV (concernant l'enfouissement des déchets) « *est passible d'une amende minimale de 500 \$ et d'une amende maximale de 2 000 \$ dans le cas d'une première infraction et d'une amende minimale de 800 \$ et d'une amende maximale de 5 000 \$ en cas de récidive.* »

Notre problème, concernant la contamination en cyanure du lixiviat du LES de Saint-Étienne-des-Grès, apparaît donc comme un non respect du règlement sur les déchets solides, et M. Robert Comeau, directeur général de la RGMRM et gestionnaire du site, doit donc localiser rapidement le problème, afin de ne pas être sanctionné financièrement par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

Une société spécialisée préconise à M. Robert COMEAU l'installation d'un système de traitement à l'ozone sur le site pour détruire les cyanures.

L'estimation du coût de construction d'un tel système s'élève à 1 millions de dollars canadiens aux frais de la RGMRM.

Si le problème de contamination au cyanure devait perdurer, malgré les amendes et l'installation d'un système à l'ozone coûteux, le dysfonctionnement observé pourrait conduire à la fermeture temporaire du LES pour localiser la source de pollution en cyanure. Une telle fermeture, même momentanée, engendrerait des coûts de gestion élevés pour la RGMRM. En effet, une fois l'étang d'accumulation plein, la capacité de stockage serait atteinte et le lixiviat, devrait alors être acheminé vers une autre usine de traitement des eaux de lixiviation (engendrant ainsi des frais très élevés de transports et de services d'une autre usine). Un tel scénario catastrophe est heureusement peu réaliste, mais il faut prendre conscience que le LES de St Etienne des Grès traite les déchets de plus de 200 000 particuliers en Mauricie et que tout doit être mis en œuvre pour faire fonctionner le LES dans le respect de la « loi sur la protection de l'environnement », afin d'éviter d'importants problèmes économique et écologique en Mauricie.

C'est dans ce contexte, que le présent projet se propose de mener une étude sur la contamination en cyanure du lixiviat de Saint-Étienne-des-Grès. Notre objectif est de localiser la pollution observée et de proposer des méthodes de gestion efficaces au directeur du LES pour y remédier.

1.2 PRÉSENTATION DU LIEU D'ENFOUISSEMENT SANITAIRE

Le Lieu d'Enfouissement Sanitaire (LES) de Saint-Étienne-des-Grès permet la gestion des matières résiduelles du sud de la Mauricie (région de Trois-Rivières, Canada). Après avoir abordé les champs de compétence de la Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie (RGMRM), gestionnaire du site, nous présenterons ici son mode de fonctionnement pour le traitement des déchets solides et le traitement du lixiviat.

1.2.1 Situation géographique et historique du LES

Le LES est situé sur la commune de Saint-Étienne-des-Grès, à 25 km au Nord de Trois-Rivières, Québec, Canada (cf. FIGURE 1.1 et 1.2). Trois-Rivières est la principale agglomération située à mi chemin entre Montréal et Québec sur la rive Nord du Saint-Laurent, il s'agit de la capitale de la région de la Mauricie.

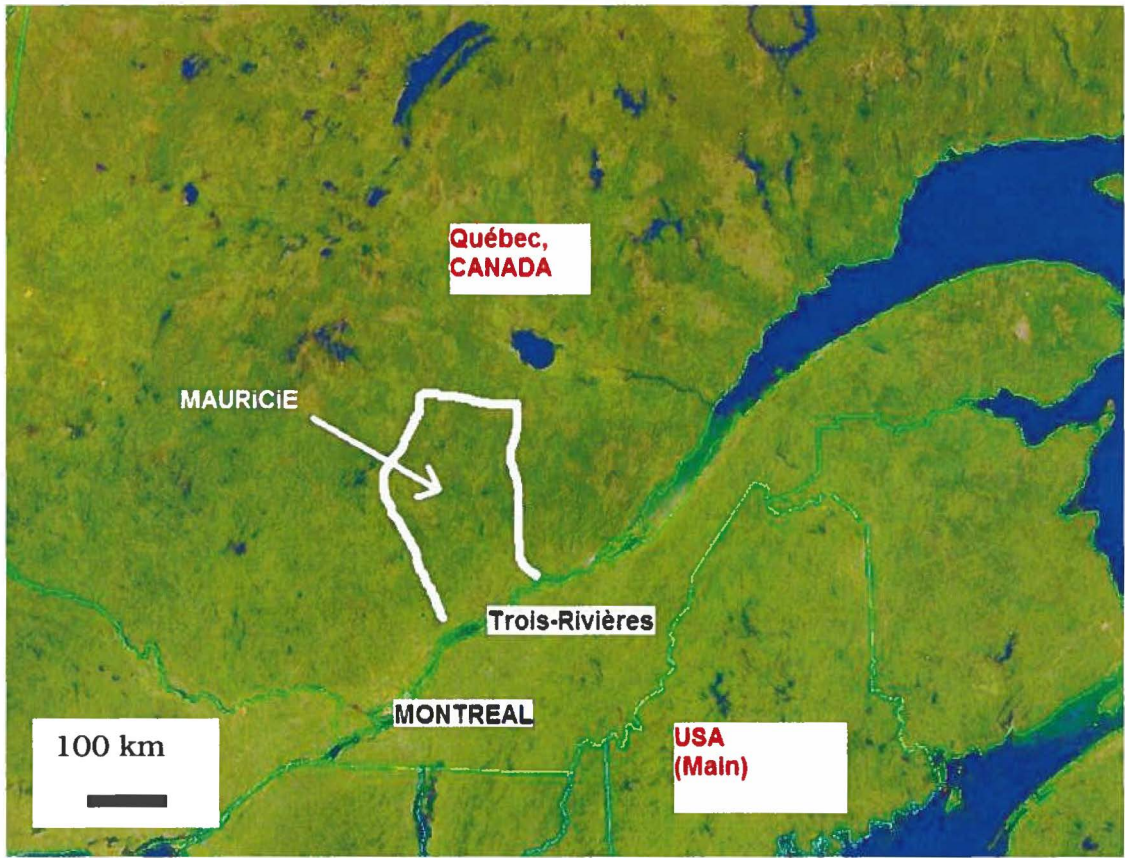


FIGURE 1.1 : Situation géographique du LES de Saint-Étienne-des-Grès à l'échelle nationale.

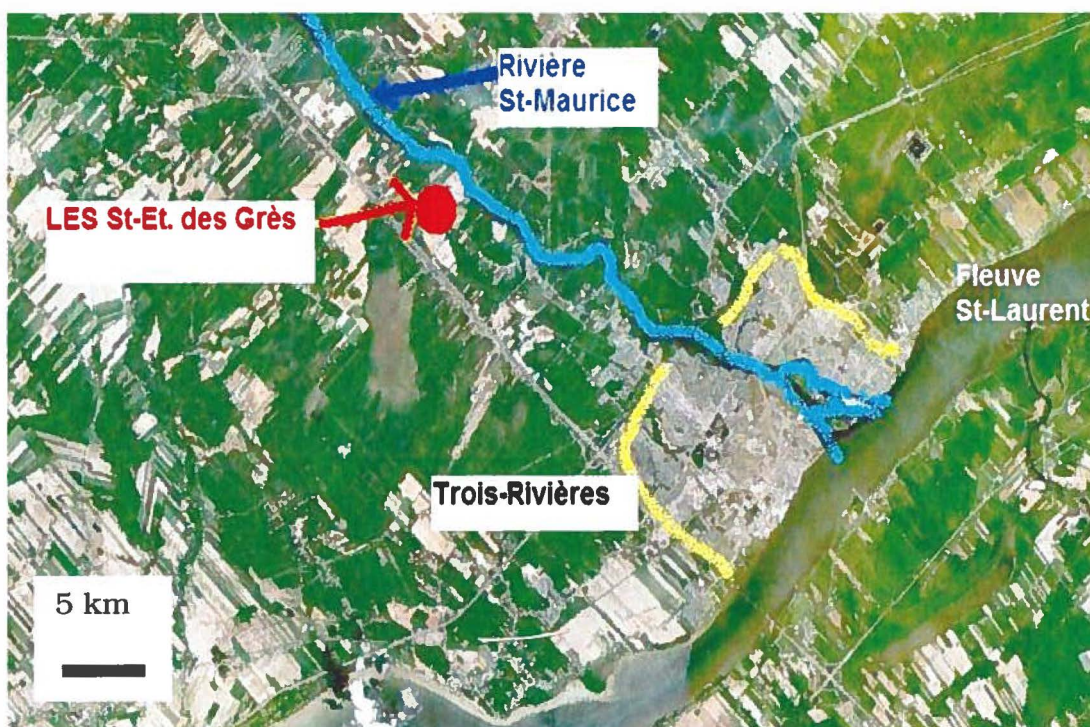


FIGURE 1.2 : Situation géographique du LES à l'échelle locale.

Conformément au « règlement sur les déchets solides » (Annexe A), le LES de Saint-Étienne-des-Grès est situé à plus de 200 m des habitations les plus proches, et à plus de 150 m de tout commerce ou équipement municipal (golf, tennis...).

Bref historique :

Le Lieu d'Enfouissement Sanitaire de Saint-Étienne-des-Grès a été ouvert en 1977 par M. Alfred Piché. En 1984, le LES est racheté par la société de M. Pierre Paré (Gestion des Rebutés DMP Inc.), puis dès 1989, le LES est vendu à Waste Management Inc. (WMI). Suite à une hausse des tarifs d'enfouissement de 300%, émise par WMI, la Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie voit le jour en 1990 (RGMRM). La RGMRM réagit donc, en réponse aux inquiétudes de la population locale, face aux possibles conséquences environnementales d'un enfouissement massif de déchets par un exploitant en situation de monopole, sur lequel les municipalités ne peuvent exercer aucun contrôle. La RGMRM a donc des fins publiques, elle exerce des missions de service public déléguées par l'association des municipalités du grand Trois-Rivières et des environs.

La RGMRM prend possession du LES de Saint-Étienne-des-Grès, et exerce son activité dès le 1^{er} Mai 1995, suite au plan de rachat ayant mené à l'expropriation de WMI. Un vaste programme de gestion des déchets est lancé, suite à une consultation publique (réalisée en 1993) : mise en place de la collecte sélective (1994), début des collectes de résidus domestiques dangereux, récupération des électroménagers (1995), traitement des boues de fosses septiques (compétence nouvelle de 1999), mise en place d'un système de décontamination du lixiviat (2002), nouveau centre de tri des déchets domestique (2005), exploitation des biogaz (projet futur)...

1.2.2 Mission et compétences de la régie

Aujourd'hui, la RGMRM regroupe plusieurs municipalités (cf. FIGURE 1.3, page suivante) : les villes de Trois-Rivières, Shawinigan, et les Municipalités Régionales de Comté (MRC) de Mékinac, de Maskinongé et de Des Cheneaux. Pour mener à bien sa mission⁵, la RGMRM dispose de quatre compétences :

Compétence 1 : Enlèvement et transport des matières résiduelles

La régie peut organiser, opérer et administrer un service intermunicipal d'enlèvement et de transport des matières résiduelles, pour une (ou plusieurs) municipalité(s) membre(s) qui en fait (font) la demande

Compétence 2 : Traitement des matières recyclables

La régie peut organiser, opérer et administrer un service intermunicipal de récupération, de dépôt, d'entreposage, de réduction, de réemploi, de recyclage, d'utilisation et de vente des matières résiduelles pour une (ou plusieurs) municipalité(s) membre(s) qui en fait (font) la demande.

Compétence 3 : Elimination des déchets

La régie peut établir et exploiter un lieu d'élimination des déchets, un système de gestion des déchets ou une usine de traitement des déchets

Compétence 4 : Traitement et gestion des boues

La régie s'est vue déléguer, par ses membres, une quatrième compétence qui prévoit la collecte et le traitement des boues de fosses septiques et d'usine d'épuration.

⁵ Dans les textes fondateurs de la RGMRM la mission est explicitée en ces termes : La Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie vise dans son fonctionnement le respect de l'environnement (physique et humain) en appliquant le principe d'une saine gestion pour assurer à nos populations la gestion global des déchets en respectant la capacité à payer de nos citoyens

L'exploitation du LES (qui s'inscrit dans la compétence 3) permet de traiter chaque année environ 135 000 tonnes métriques de matières résiduelles, dont environ 65% proviennent des déchets domestiques. Les municipalités membres totalisent plus de 200 000 habitants, ce qui correspond à près de 90% de la population du territoire desservi.

La régie prévoit d'atteindre une masse annuelle se situant entre 150 000 et 175 000 tonnes, tout en respectant l'un des objectifs fixés, soit la longévité du LES, estimée à près de 60 ans (les permis d'exploitation étant acquis ne représentent pas de freins à de futurs projets –ex : valorisation des biogaz).

Population : 229 096

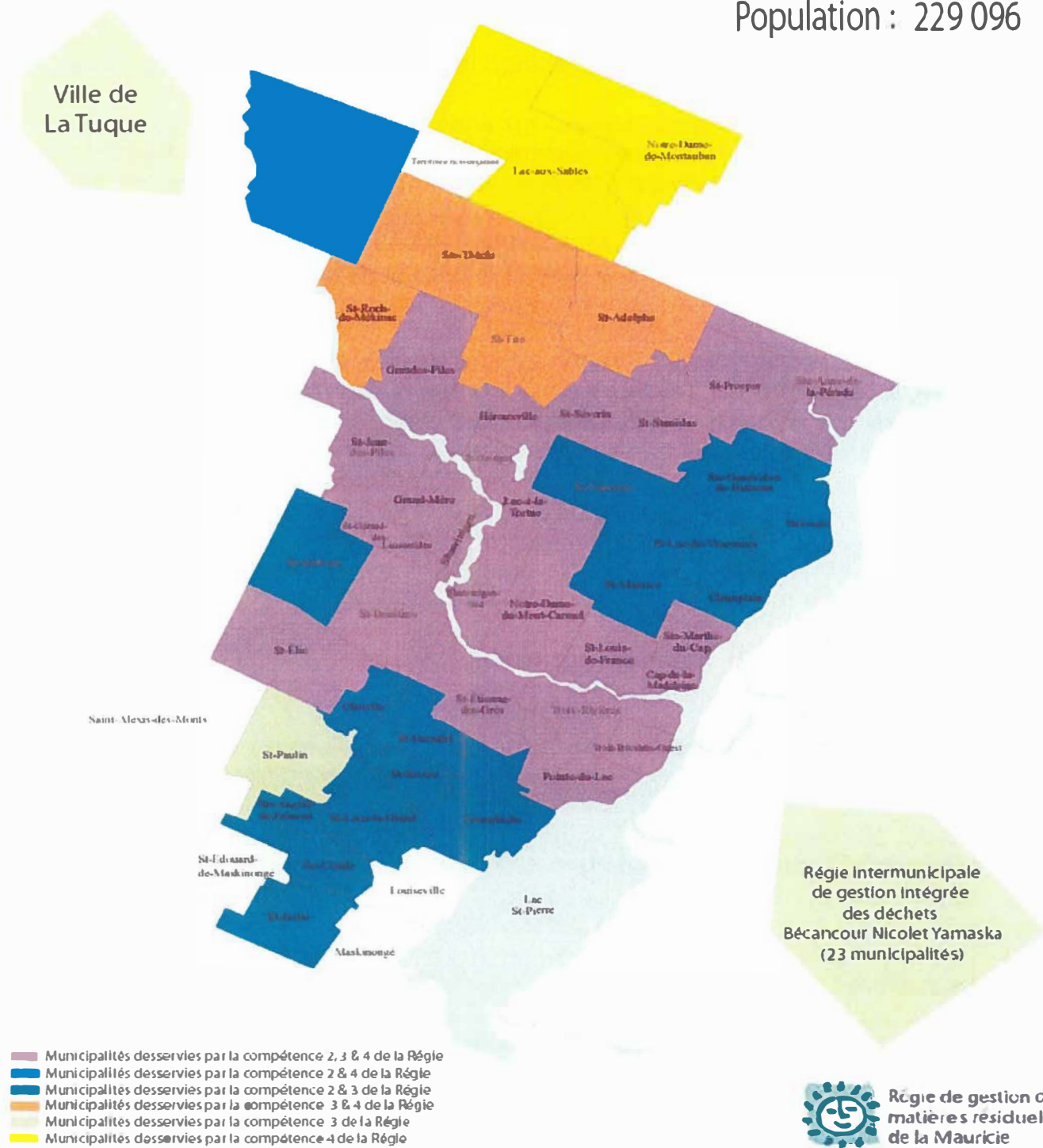


FIGURE 1.3 : Carte des municipalités membres ou clientes de la RGMRM.

1.3 FONCTIONNEMENT DU LES : TRAITEMENT DES DÉCHETS

Le « règlement sur les déchets solides » est le document officiel fixant les règles de construction et de fonctionnement des LES au Québec. Ce dernier est joint en annexe A.

La partie suivante décrira le fonctionnement du LES de Saint-Étienne-des-Grès dans sa globalité, les détails techniques ne seront pas précisés. On se référera à l'Annexe A pour tout complément technique d'information (dimensions des ouvrages etc.).

1.3.1 Tri sélectif et matières recyclables

Le Lieu d'Enfouissement Sanitaire de Saint-Étienne-des-Grès comprend différents organes (localisés sur la FIGURE 1.4), qui jouent des rôles différents dans la réalisation de la compétence 3 (élimination des déchets). On localise sur le site :

- Les locaux administratifs
- Le centre tri
- Les cellules d'enfouissement sanitaire (A, B et C)
- L'usine de traitement du lixiviat

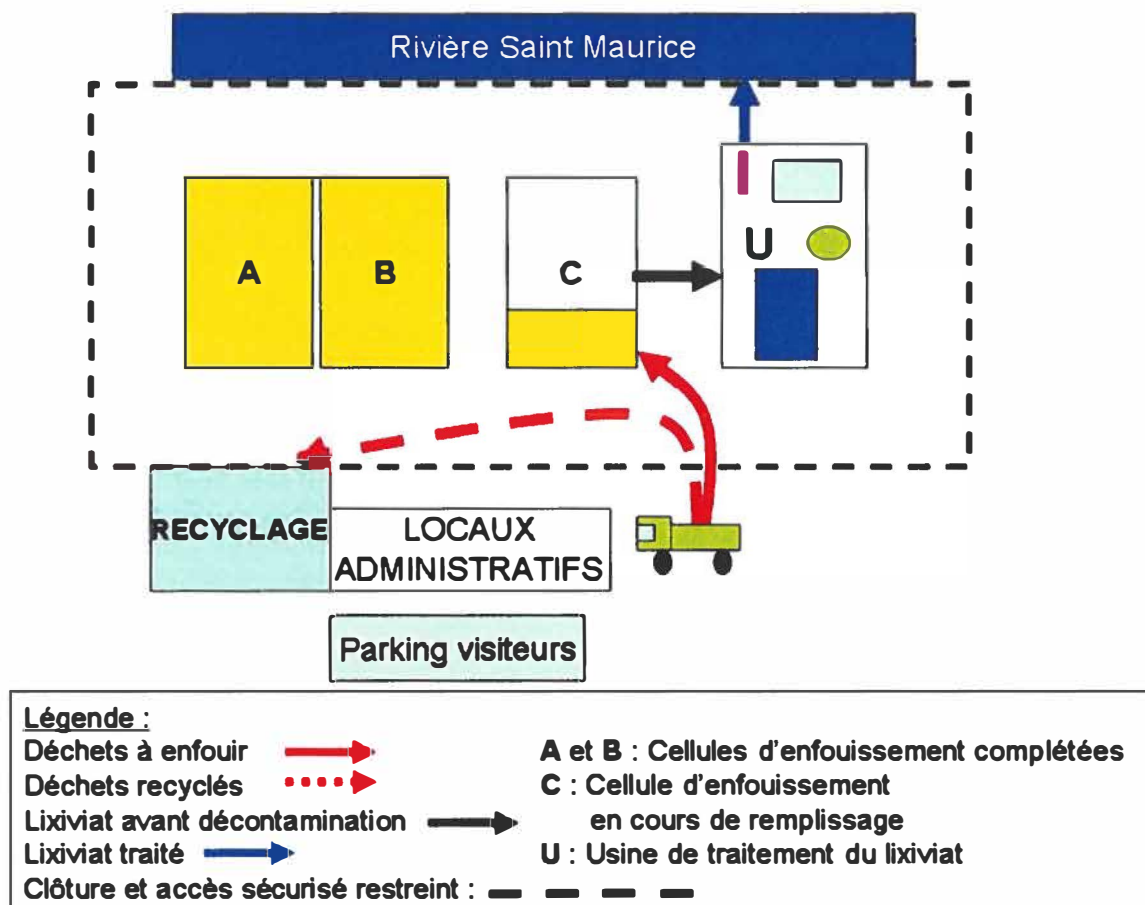


FIGURE 1.4 : Plan général du LES.

Pour comprendre le fonctionnement du LES, nous proposons de suivre le parcours des déchets, depuis leur production jusqu'à leur traitement.

Tri sélectif :

Les déchets domestiques produits tendent à être triés à la source. La mise en place de la « politique québécoise de gestion des matières résiduelles » (1998-2008) a été relayée efficacement au niveau régional par les municipalités. À Trois-Rivières, l'implantation des « bacs bleus » a permis de faire passer le taux de diversion de 3% en 1994 à 13% en 2004. L'objectif à l'horizon 2008 et d'atteindre les 30% de taux de diversion (tri). La collecte des déchets permet

donc d'apporter au LES d'une part les matières recyclables, et d'autre part, les déchets destinés à l'enfouissement. A long terme, l'objectif de la RGMRM est de valoriser le tri sélectif, en diminuant ainsi le taux de matière à enfouir, et donc, de diminuer les coûts de gestions à long terme et de porter le moins d'impact possible sur l'environnement.

Matières recyclables :

Les déchets valorisables sont traités dans le nouveau centre de tri, qui a été mis en fonctionnement en février 2005.

Les déchets valorisés sont le papier, le carton, les plastiques. Les verres sont également recyclés mais leur valeur économique est nulle.

1.3.2. L'enfouissement des déchets

Quant aux déchets à enfouir, ils sont disposés dans des fosses, et compactés par des rouleaux compresseurs. Entre chaque couche de déchets, une couche de sable permet de favoriser l'écoulement du lixiviat, provenant de la décomposition des matières organiques et minérales contenues dans les déchets.

Deux cellules d'enfouissement (ou zones) ont déjà été complétées et fermées : recouvertes d'une géomembrane (membrane géotextile étanche). Pour limiter les risques d'incident (explosion due à une surpression) les biogaz générés par la fermentation des déchets enfouis sont évacués par des événements pour la cellule A (la plus ancienne) ou collectés dans un système de conduites (cellule B, la plus récemment complétée)(cf. FIGURE 1.4 et FIGURE 1.5). Les biogaz sont évacués et actuellement consommés dans des torchères. Un des projet de la RGMRM est de valoriser cette source d'énergie en la commercialisant à un

entrepreneur qui s'installerait à proximité du site. Les biogaz sont constitués de 50% de méthane et 40% de dioxyde de carbone ainsi que de quelques pour cent de dioxygène, dihydrogène, diazote, de sulfure d'hydrogène et d'ammoniac.

Les cellules A et B, exploitées avant 2001 laissaient s'écouler leur lixiviat à travers les couches successives du sol sous jacent. Le principe de base étant que les eaux de lixiviations se déchargent en polluant plus elles s'écoulent sur une longue distance. Pour éviter une contamination des eaux souterraines et une infiltration dans la rivière St Maurice située à proximité, le règlement sur les déchets solides stipule les conditions hydrogéologiques à respecter (section IV, art. 29) :

« L'enfouissement sanitaire des déchets solides doit s'effectuer sur un terrain où les conditions hydrogéologiques sont telles que les eaux de lixiviation s'infiltrent dans le sol et que le temps de migration des eaux y est supérieur à 5 ans avant de parcourir 300 mètres ou avant d'atteindre tout puits ou source servant à l'alimentation en eau potable et situé à une distance inférieure à 300 mètres, à moins que ces eaux n'aient fait résurgence auparavant. Dans ce dernier cas, elles doivent avoir circulé dans le sol pendant plus de 2 ans à une vitesse moyenne inférieure à 150 mètres par an. Dans le cas où on ne retrouve pas les conditions hydrogéologiques décrites au premier alinéa, l'enfouissement sanitaire peut s'effectuer à condition que l'on procède à des aménagements afin d'empêcher l'infiltration dans le sol de toute eau de lixiviation. » (D'après le règlement sur les déchets solides, section IV art.29).

Les cellules dans la nouvelle zone d'enfouissement (zone C) (cf. FIGURE 1.5) sont équipées d'une géomembrane imperméable (géotextile drainant comportant 8 microcouches). Placée sous la masse de déchets, la membrane étanche collecte les eaux de lixiviations et prévient les éventuelles infiltrations

vers la nappe phréatique. Ces eaux de lixiviation sont alors captées par un système de pompage qui les envoie dans le système de traitement du lixiviat.

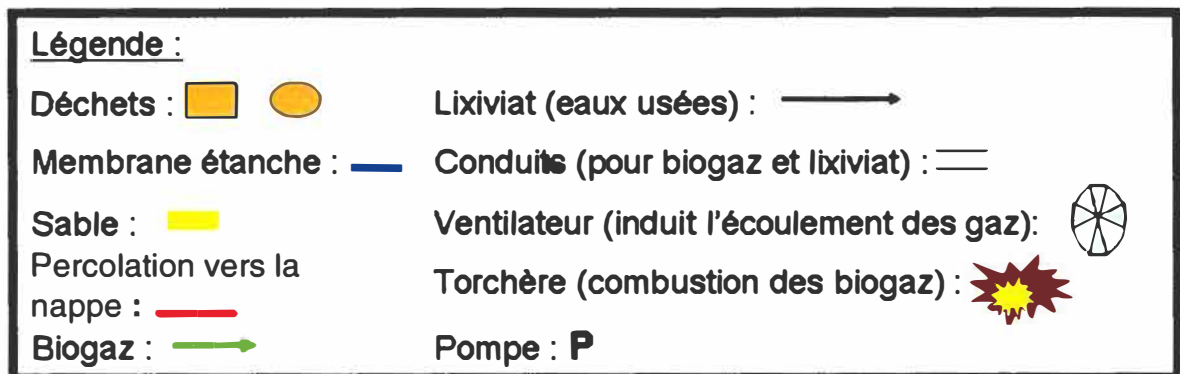
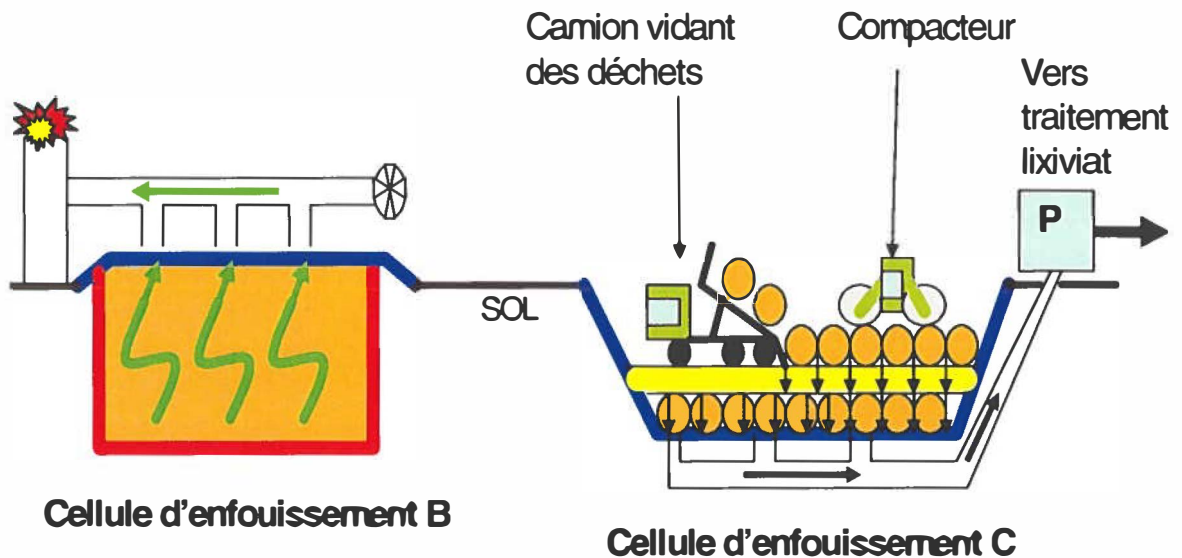


FIGURE 1.5 : L'enfouissement des déchets.

1.3.3 Traitement du lixiviat

Dans la zone d'enfouissement la plus récente (cellule C) (cf. FIGURE 1.5), les eaux de lixiviations sont collectées grâce à une membrane géotextile étanche et à un réseau de pompage. Le lixiviat ainsi recueilli va être décontaminé dans une usine de traitement des eaux usées, avant d'être évacué dans la rivière Saint-Maurice une fois traité. La RGMRM explique le fonctionnement global du

système dans son ouvrage de documentation interne *Système de traitement des eaux de lixiviation* (2). La FIGURE 1.6 retrace le cheminement du lixiviat sur le site de Saint-Étienne-des-Grès. Cette méthode de traitement du lixiviat prévient les pollutions de la nappe phréatique, car les polluants ne peuvent être drainés en profondeur dans les sols. L'usine de traitement du lixiviat, permet également de traiter les boues (liquides) de fosses septiques.

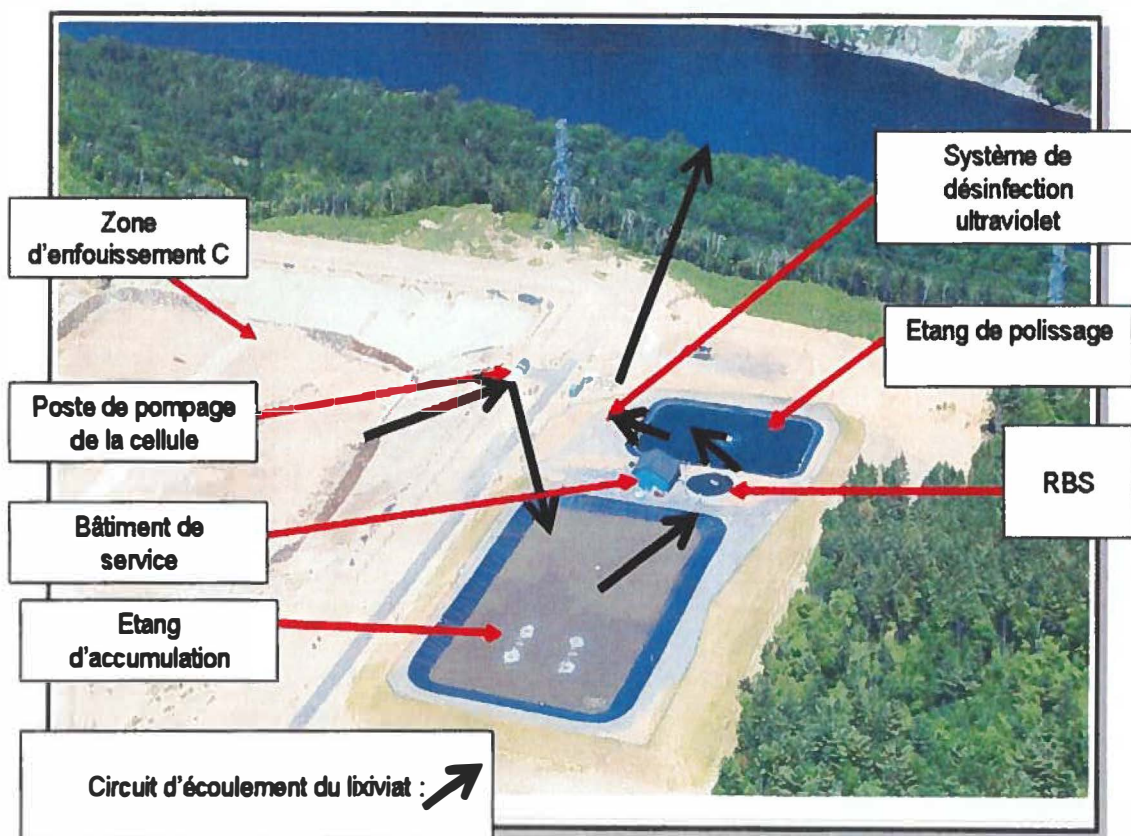


FIGURE 1.6 : Photo aérienne du LES.
Les flèches noires suivent le circuit de décontamination du lixiviat dans l'usine de traitement des eaux usées.

Le lixiviat est collecté par le poste de pompage puis envoyé dans le premier étang : l'étang d'accumulation. Les camions de vidange des fosses septiques déversent les boues à traiter directement dans l'étang d'accumulation (cf. FIGURE 1.7).



FIGURE 1.7 : Photo prise lors d'une vidange des boues de fosses septique dans l'étang d'accumulation.

L'étang d'accumulation (présenté à la FIGURE 1.8) permet tout d'abord de stocker les eaux de lixiviation en vue de leur traitement biologique par le RBS (réacteur biologique séquentiel). Les eaux de lixiviation proviennent de trois sources différentes : le lixiviat du LES, les boues de fosses septiques, l'eau de pluie apportée directement dans le bassin. Le surnageant de l'étang d'accumulation connaît une amorce de traitement biologique, via l'activation de quatre aérateurs de surface. L'activité aérobie de la microfaune bactérienne est alors stimulée et la dégradation des résidus organiques débute. L'aération permet également d'oxyder le fer présent dans les eaux de lixiviation (provenant du sable ferreux utilisé pour drainer le lixiviat entre les couches de déchets) afin que celui-ci précipite dans les boues de l'étang.



FIGURE 1.8 : Photo de l'étang d'accumulation. On observe les aérateurs flottants au dernier plan.

Le surnageant est ensuite pompé dans le RBS pour poursuivre le traitement. Les bactéries présentes dans le RBS métabolisent les matières organiques et minérales contenues dans le lixiviat.

Le fonctionnement du RBS est cyclique : il alterne des phases de digestions anaérobies et aérobies (1,3). La séquence du cycle type de traitement dans un RBS est la suivante :

- 1) Alimentation de la cuvée, semi-continu, continu.
- 2) Anoxie/anaérobie: Dénitrification ($\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$).
- 3) Solubilisation du phosphore.
- 4) Aérobie: Assimilation du C,N,P par la biomasse.
- 5) Nitrification ($\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$).
- 6) Déphosphatation biologique.

- 7) Anoxie: Dénitrification ($\text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2$).
- 8) Solubilisation du phosphore.
- 9) Aérobie: Assimilation du C,N,P par la biomasse.
- 10) Nitrification ($\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_3$).
- 11) Décantation: Séparation de la biomasse de l'eau traitée.
- 12) Purge de la biomasse (contrôle de l'âge des boues).

La fréquence de traitement biologique est de 1 à 3 cycle par jour.

Les métabolismes anaérobies et aérobies régissant le fonctionnement du RBS sont détaillés dans l'Annexe B.

Pour les métabolismes anaérobies et aérobies, on retiendra les points saillants suivants (3):

- La fermentation produit différents biogaz⁶ :
 - CH_4 (60-70%)
 - CO_2 (30-40%)
 - H_2 (1-5%)
 - N_2 (2-7%)
 - H_2S et NH_3 (quelques pourcents responsables des odeurs désagréables caractéristiques)

- La phase aérobie permet l'assimilation de différents éléments :
 - Le carbone organique (production de CO_2)
 - L'azote (formation de nitrites et nitrates lors de la nitrification)
 - Le phosphore (énergie : ATP)

⁶ Les biogaz produits par le RBS lors de la fermentation (processus anaérobie) ont la même composition que ceux produits dans les cellules d'enfouissement complétées (A et B) recouvertes d'une membrane étanche empêchant l'air d'être en contact avec les déchets solides.

En fonction du pH du lixiviat (mesuré en continu) des neutralisants (chaux ou acide) peuvent être injectés par le bâtiment de service dans les eaux de lixiviation du RBS. Pour stimuler l'activité bactérienne, des nutriments (phosphore) peuvent également être apportés. Une photographie du RBS est présentée en FIGURE 1.9.



FIGURE 1.9 : Photo du Réacteur Biologique Séquentiel (RBS).

Après le traitement biologique dans le RBS, l'eau traitée est rejetée dans l'étang de polissage (cf. FIGURE 1.10), dans lequel on retrouve un aérateur pour finaliser le traitement. Une section décantation constituée par un rideau flottant forme le dernier quart de l'étang. Un système de régulation de débit est mis en place à la sortie de l'étang de polissage suivi par une désinfection aux ultraviolets (cf. FIGURE 1.10). L'eau traitée est rejetée à la rivière Saint-Maurice, à un débit constant afin de réduire l'impact sur le cours d'eau.

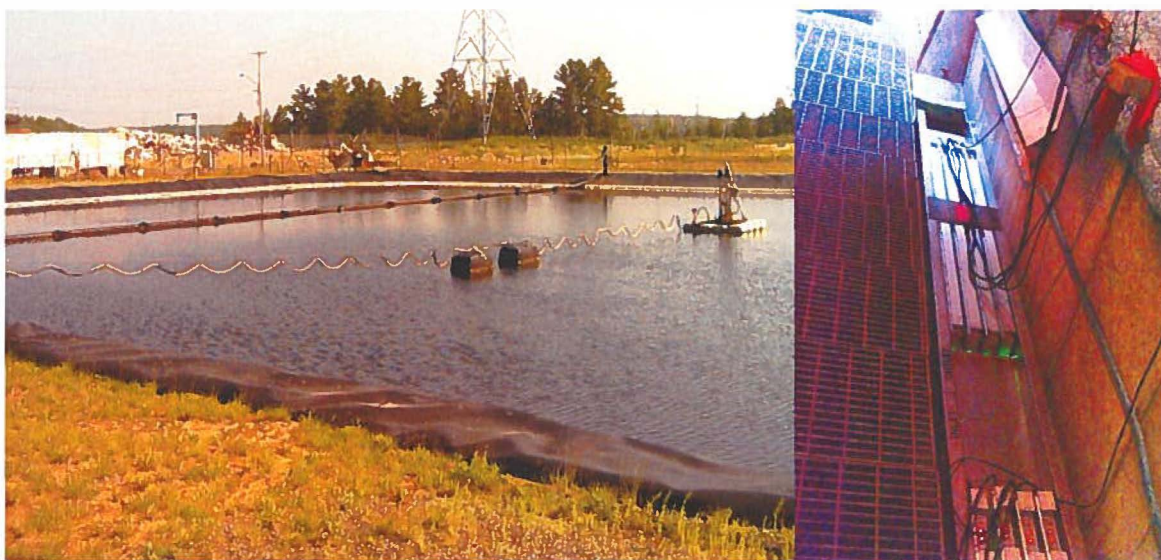


FIGURE 1.10 : Photographies de l'étang de polissage (à gauche) et du système de décontamination UV (à droite).

Enfin, les boues du RBS sont retournées à l'étang d'accumulation (solides qui se déposent au fond) et sont pompées périodiquement, puis épandues sur les déchets de la cellule d'enfouissement C. Il en va de même pour les boues qui s'accumulent dans l'étang de polissage ; celles-ci sont pompées une fois par an dans l'étang d'accumulation, puis sont disposées de la même façon.

1. 4 CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Au cours de cette première section, nous avons défini clairement la problématique motivant notre projet de recherche et présenter le cadre général de notre étude (présentation et fonctionnement du LES).

Nous allons nous intéresser au comportement du cyanure dans l'environnement dans la partie suivante, avant de pouvoir aborder dans la dernière partie notre étude le cas particulier de la pollution en cyanure du lixiviat du LES de Saint-Étienne-des-Grès.

CHAPITRE II

CYANURE ET ENVIRONNEMENT

La présente section du mémoire s'attachera à faire un tour d'horizon de la littérature scientifique concernant la chimie et la biochimie du cyanure, afin d'être en mesure de comprendre le comportement du cyanure dans l'environnement. Ainsi, le problème spécifique du LES de Saint-Étienne-des-Grès (contamination en cyanure du lixiviat) sera abordé dans la troisième partie avec les éléments de connaissances théoriques nécessaires.

2.1 CHIMIE DU CYANURE

2.1.1. Généralités sur la chimie organique et inorganique de CN

Le cyanure renvoie à tous les groupes « CN ». On le trouve sous forme d'anion : CN^- . Plusieurs composés sont susceptibles de produire du cyanure. Les composés organiques (glucosides et nitriles) et les composés inorganiques.

2.1.1.a) Principales réactions du cyanure en chimie organiques

La molécule de cyanure est composée d'un atome de carbone C et d'un atome d'azote N. Dans la formule de Lewis, les deux atomes sont reliés par une triple liaison, ce qui justifie la stabilité de ce composé.

La triple liaison, représentée sur la FIGURE 2.1, est constituée d'un lien σ et de deux liaisons π qui confèrent une grande réactivité à la molécule, puisque le

nuage électronique π , formant un cylindre autour de l'axe C-N est facilement polarisable, la molécule peut connaître différents modes de réaction (4).

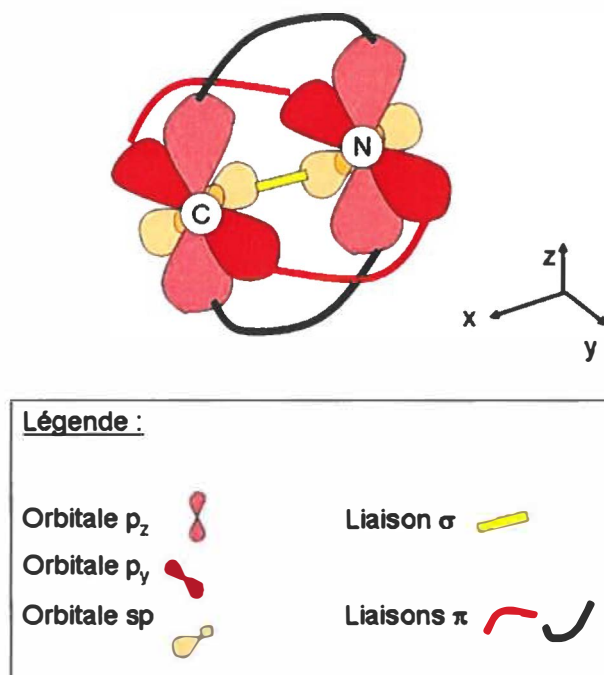


FIGURE 2.1 : Orbitales moléculaires du cyanure.

Principalement, le cyanure peut agir comme nucléophile grâce au doublet non liant porté par le carbone, lors d'additions nucléophiles (AN) (cf. FIGURE 2.2) ou de substitutions nucléophiles (SN) (cf. FIGURE 2.3).

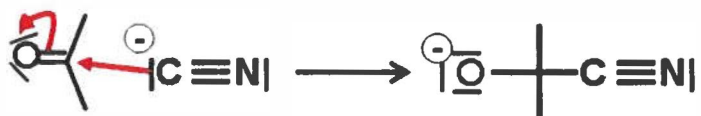


FIGURE 2.2 : Addition nucléophile (AN) du cyanure sur une cétone pour former une cyanohydrine.

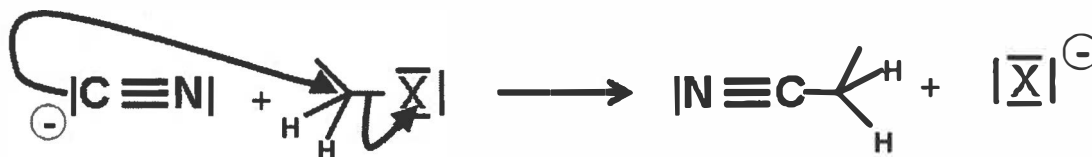
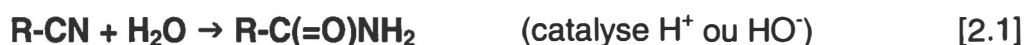


FIGURE 2.3 : Substitution nucléophile (SN) avec le cyanure (X peut être un halogène).

Mais le groupe CN peut aussi subir des AN, dans des conditions particulières : catalyse enzymatique (cf. formamide hydrolase inverse), hydrolyse (acide ou basique) des composés nitriles (réaction [2.1]):



La diversité réactionnelle du cyanure s'observe à travers l'inversion de la réactivité naturelle qui se produit parfois : l'atome d'azote peut jouer le rôle du nucléophile.

Enfin, en synthèse organique, le cyanure peut être utilisé lors de réaction électrocyliques (thermiques et photoniques).

2.1.1.b) Chimie inorganique du cyanure :

Pour les composés inorganiques, on distingue deux classes de composés cyanurés : les composés simples et les complexes métalliques du cyanure (5-7).

➤ Les composés cyanurés simples : $\text{A}(\text{CN})_x$

Les composés simples du cyanures sont de la forme $\text{A}(\text{CN})_x$ où A est un alcalin (ou un métal lourd) et x est la valence de A.

Exemples : NaCN, KCN, NH₄CN, AgCN, CuCN, Zn(CN)₂.

En solution aqueuse, l'ion cyanure se protone selon [2.2] :



L'équilibre thermodynamique peut s'écrire sous la forme classique [2.3] :

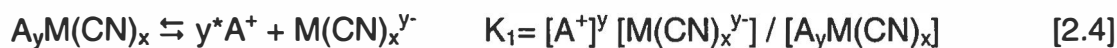


En général, dans l'environnement, les eaux ont un pH inférieur à 9.2, donc la forme HCN prédomine. Dans le système de traitement du lixiviat du LES de Saint-Étienne-des-Grès le pH est entre 7 et 8, donc HCN prédomine.

➤ Les complexes métalliques du cyanures : $\text{A}_y\text{M}(\text{CN})_x$

Dans les complexes métalliques du type $\text{A}_y\text{M}(\text{CN})_x$, A est un alcalin présent y fois dans la molécule, M est le centre métallique lourd du complexe et $x=[y^*(\text{valence de A}) + \text{valence de M}]$.

Dans l'eau, pour un alcalin A monovalent, ces complexes peuvent se dissocier selon les réactions générales [2.4] et [2.5]:



Avec x, y et $z > 0$ et $z = x - y$ (et $x > y$)

Enfin, les ions cyanures libres CN^- produits sont susceptibles de réagir sur l'eau et de former de l'acide cyanhydrique (HCN) comme vu précédemment ([2.2]).

D'une manière générale (cf. section 2.3 sur la toxicité du cyanure) les complexes métalliques du cyanures $A_yM(CN)_x$ sont moins toxiques que les composés simples conduisant à la formation de HCN/CN^- . Ainsi, on voit combien la constante de dissociation d'un complexe métallique du cyanure est reliée à sa toxicité potentielle. Plus les constantes K_1 et K_d sont importantes, plus le complexe sera potentiellement toxique, puisqu'il libérera plus facilement des CN^- libres.

Les complexes métalliques du cyanure se dissocient mieux à faible concentration et bas pH.

Exemple :

A dilution équivalente, les complexes cyanurés de Zn et Cd sont plus dissociés que ceux de Ni, Ag et Cu(I). Par conséquent, les complexes de Zn et Cd relarguent plus de CN^- libre que les autres et sont donc plus toxiques à la vie aquatique. La toxicité des complexes de Ni, Ag et Cu(I) est principalement due à l'espèce $A_yM(CN)_x$; or $A_yM(CN)_x$ est moins toxique que CN^- , les complexes du nickel, cuivre (I) et de l'argent sont donc peu toxiques (5).

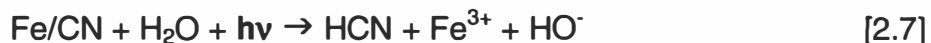
En définitive, on peut rapidement évaluer qualitativement la toxicité d'un complexe cyanuré en comparant les valeurs des K_d . Dans l'exemple précédent nous avons $K_d (Cd \text{ et } Zn) > K_d (Ni, Ag \text{ et } Cu)$

➤ Le cas des complexes du fer :

De manière générale, les complexes Fe/CN sont très stables, et donc pas matériellement toxiques. Cela se traduit par une constante de dissociation très faible (<1). Par exemple la constante de dissociation $K_{d(fer)}$ du complexe hexacoordonné du fer III qui se dissocie selon la réaction [2.6] vaut $10^{-31} \lll 1$.



Cependant la photolyse de ces complexes produit du CN^- libre et donc du HCN en milieu aqueux selon la réaction [2.7] :



Ainsi les solutions diluées exposées au soleil seront plus toxiques que les solutions en eaux profondes, turbides et sombres. (Dans l'obscurité, des niveaux toxiques de HCN ne sont atteints que si les solutions $\text{A}_y\text{Fe(CN)}_x$ sont extrêmement diluées et vieilles) (6).

2.1.2 Méthodes d'analyse du cyanure

Analytiquement, il apparaît intéressant de pouvoir distinguer HCN moléculaire des complexes métalliques moins toxiques. Historiquement, la réaction retenue pour séparer les cyanures libres des cyanures complexés est la chloration alcaline.

Une analyse des cyanures d'un lixiviat permettra donc de déterminer :

- les cyanures totaux (A(CN)_x et $\text{A}_y\text{M(CN)}_x$): formes simples (HCN, CN^- , A(CN)_x) et complexes ($\text{A}_y\text{M(CN)}_x$).
- les cyanures disponibles à la chloration (A(CN)_x seulement), correspondant aux formes simples, les plus réactives.

Avant toute analyse, les échantillons subissent un traitement préliminaire, visant à neutraliser les réactifs présents pouvant provoquer des réactions secondaires

indésirables. Cette décontamination permet d'éliminer : les agents oxydants, les acides gras, les carbonates, les aldéhydes, le glucose, les nitrites et nitrates, composés sulfurés susceptibles d'interférer pendant le dosage des cyanures.

2.1.2.a) Le dosage des cyanures totaux :

➤ Principe :

L'échantillon à analyser est distillé en milieu acide (sulfurique) selon la réaction générale [2.8], ce qui permet de transformer tous les cyanures en cyanures libres.



Par la suite, nous ferons référence à la réaction [2.8] comme étant « la distillation préalable au dosage » (5-7).

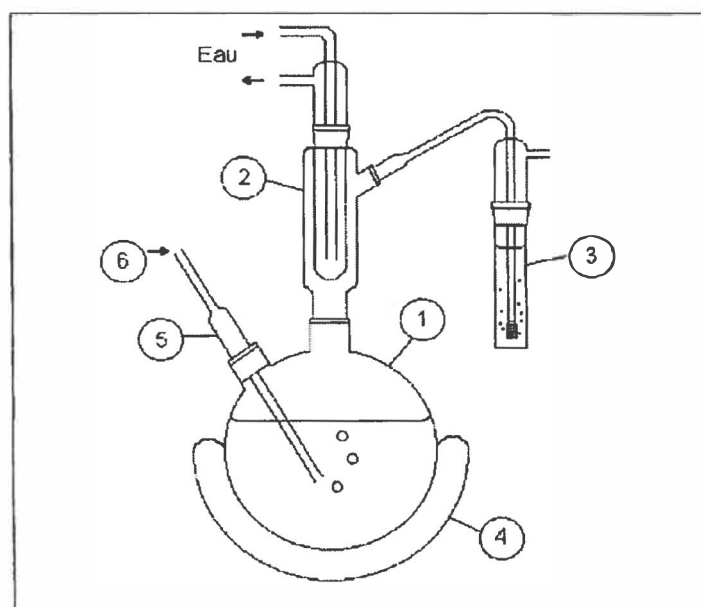
Les cyanures totaux (w+x) sont dosés par différentes méthodes (colorimétrie, titrimétrie et électrochimie).

➤ Détail :

Les contraintes environnementales obligent les gestionnaires de LES à mesurer les cyanures totaux dans leurs eaux de lixiviation. Les deux laboratoires (non nommés : « Labo A » et « Labo B »), accrédités par le MDDEP, procédant aux analyses du cyanure pour la RGMRM, utilisent la méthode présentée ci après : distillation suivie d'un dosage colorimétrique.

Distillation :

Comme évoqué précédemment, le but de la distillation est de transformer tous les cyanures présents dans le milieu (simples et complexes) en cyanures libres (CN^-), en cassant les liaisons de coordination (de faible énergie) liant les ligands cyanures aux centres métalliques des complexes. La distillation se fait en milieu acide avec de l'ajout de quelques gouttes d'acide sulfurique à l'échantillon à doser (5,8).



(1) Ballon de distillation (1 000 ml): (2) Réfrigérant type « FRIEDRICHS »: (3) Barboteur: (4) Mante chauffante: (5) Tube d'admission: (6) Azote

FIGURE 2.4 : Schéma de montage pour la distillation des cyanures (d'après le CEAEQ).

Réaction de dosage :

Les cyanures collectés (après distillation) sont libérés sous forme d'acide cyanhydrique et réagissent avec une solution de chloramine-T en milieu tamponné pour former du chlorure de cyanogène (α) (FIGURE 2.5). Le chlorure de cyanogène formé réagit avec la pyridine et l'acide barbiturique (β) (FIGURE

2.5) pour former un complexe rouge dont l'absorbance à 570 nm est proportionnelle à la concentration des cyanures.

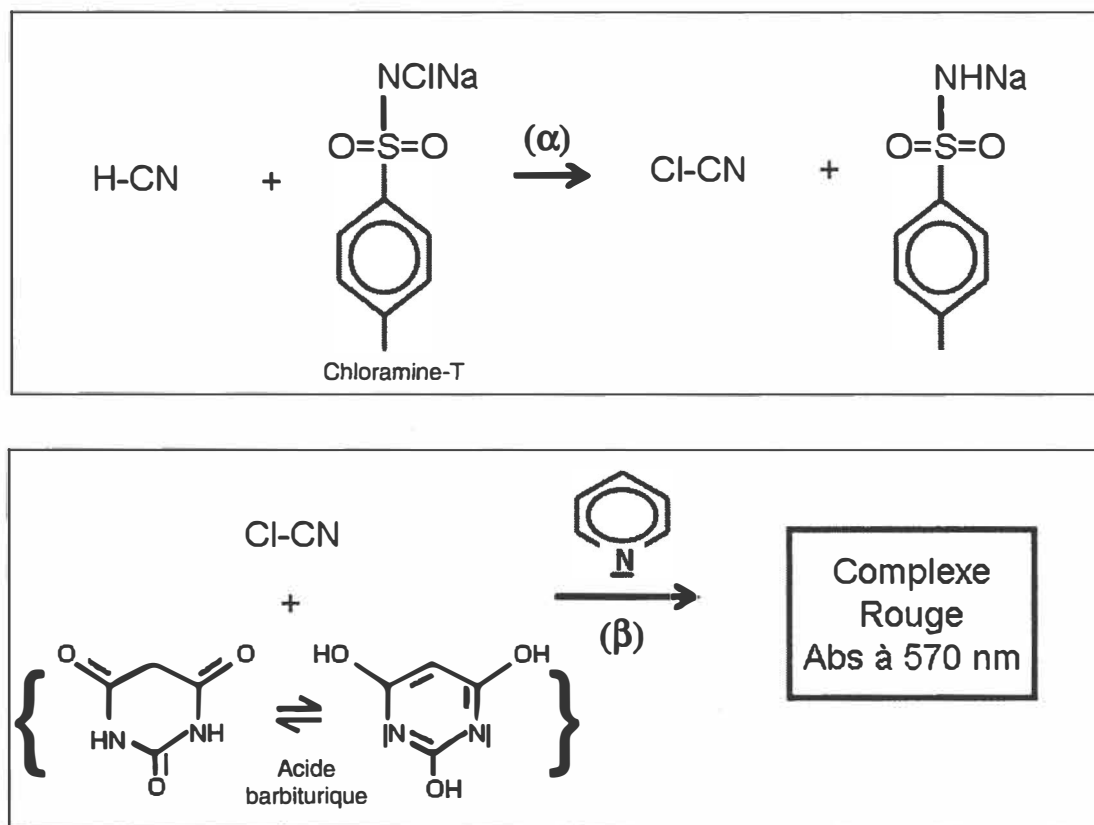


FIGURE 2.5 : Equations bilan du dosage des cyanure par colorimétrie.

Procédure automatisée :

Cette méthode a été automatisée (8), et certains laboratoires d'analyse (cf. Labo A) utilisent la méthode TechniconTM. Le flux de cyanure à doser suit exactement les mêmes étapes (distillation, dosage colorimétrique) mais, l'appareil permet des mesures plus rapides et aussi fiables qu'une procédure manuelle.

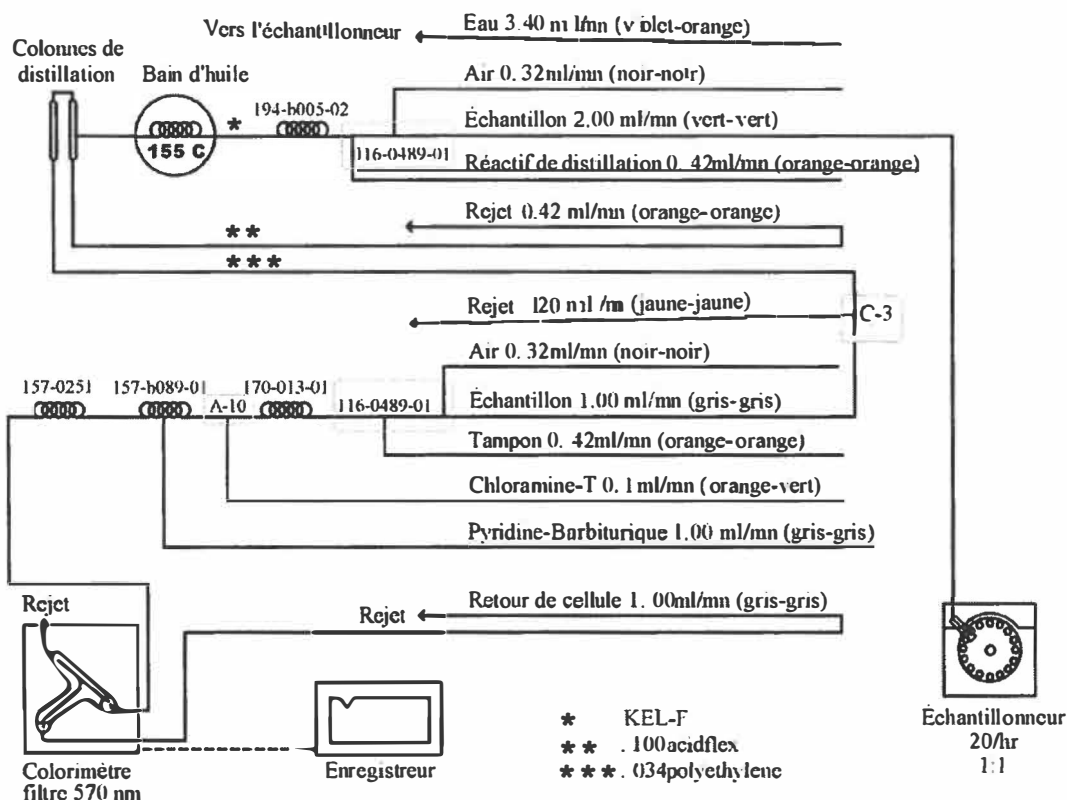


FIGURE 2.6 : Schéma du montage automatisé pour le dosage des cyanures (selon le CEAEQ).

2.1.2.b) Le dosage de cyanures disponibles à la chloration et les autres analyses du cyanure

Le dosage des cyanures disponibles à la chloration n'est pas nécessaire au gestionnaires des LES au Québec. Nous ne nous attarderons donc pas sur cette partie.

Rappelons cependant que l'intérêt du dosage des cyanures disponibles à la chloration est d'évaluer la part des cyanures libres dans les cyanures totaux, et ainsi de prédire la plus ou moins grande toxicité des cyanures présents dans le milieu (les cyanures libres étant plus toxiques que les complexes).

➤ Principe :

Dans un premier temps, la chloration détruit les cyanures libres (5) :

Il y a d'abord formation de chlorure de cyanogène (gaz hautement toxique) par addition de chlore (formé *in situ* par décomposition de $\text{Ca}(\text{OCl})_{2(\text{liquide})}$) selon [2.9] :



Puis, à pH alcalin, CNCl s'hydrolyse en cyanate (CNO^-) :



Enfin l'oxydation se poursuit à pH neutre [2.11] ou acide [2.12] :



Au terme de la chloration, il ne reste dans l'échantillon plus que les cyanures complexés ($\text{A}_y\text{M}(\text{CN})_x$), les cyanures libres ont été détruits. L'échantillon est alors dosé de la même manière que pour les cyanures totaux (distillation puis dosage colorimétrique, titrimétrique ou électrochimique). On en déduit la concentration de l'échantillon en cyanures complexés, puis, par soustraction au résultat des cyanures totaux, on obtient la concentration en cyanure disponible à la chloration.

$$[\text{CN}]_{\text{disponible chloration}} = [\text{CN}]_{\text{libres}} = [\text{CN}]_{\text{tot}} - [\text{CN}]_{\text{complexés}}$$

➤ Autres analyses concernant le cyanure :

D'autres méthodes concernant l'analyse du cyanure sont envisageables (5-7) : « Short cut method » (ne pouvant pas être utilisée si [SCN⁻] est trop élevée), méthode de l'acide faible dissociable (une distillation directe en présence d'acide faible ne libérant que les cyanures libres, pas les complexes)...

Les dérivés du cyanures : chlorure de cyanogène (CICN), cyanates (CNO⁻), thiocyanates (SCN⁻) peuvent également être dosés.

Mais le problème de pollution en cyanure observé à la RGMRM ne concerne pas directement ces méthodes d'analyses, que nous n'aborderons pas ici.

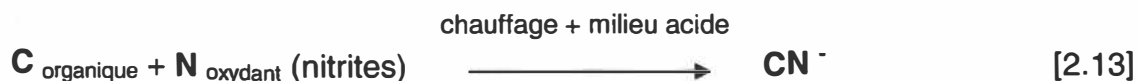
2.1.3 Production et consommation chimique du cyanure

2.1.3.a) Production de CN lors de la distillation

Notre revue de littérature nous a permis de mettre en évidence la possibilité de formation de cyanure lors de la distillation effectuée pour le dosage des cyanures totaux via une réaction chimique mettant en jeu les nitrites comme source d'azote.

La formation de HCN par réaction de la glycine avec les ions nitrites en solution acide (9) incite à réexaminer la méthode d'analyse standard pour les cyanures totaux. En effet, dans cette méthode, HCN est libéré des deux espèces cyanurées (simples et complexes) lors de la distillation en milieu acide puis entraîné avec le mélange de l'échantillon. Si une quantité significative de nitrite est présente dans le lixiviat à analyser, la formation de cyanure peut alors survenir *in situ* en présence de composés organiques (glycine ou autres acides aminés...) selon la réaction [2.13].

Schéma de principe de la formation de cyanure lors de la distillation :



Rapean *et al.* (10) ont montré la formation de cyanure *in situ* dans des boues d'usines chargées en nitrites. La FIGURE 2.7 montre une corrélation positive entre cyanure et nitrite.

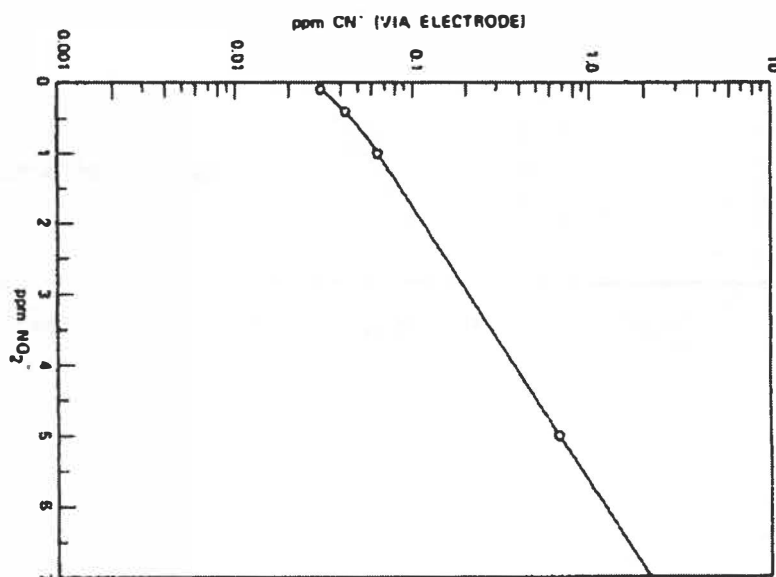


FIGURE 2.7 : Effet de l'addition de nitrites sur le cyanure dans un effluent de bioréacteur (Rapean *et al.*).

Casey *et al.* (11) et Koshimizu *et al.* (12) proposent l'ajout d'acide sulfamique préalablement à la distillation pour neutraliser les nitrites. Rapean *et al.* (10) confirment expérimentalement la neutralisation du phénomène de production de cyanure avec les nitrites comme source d'azote par addition de 1 à 3 mole d'acide sulfamique (NH₂SO₃H) par mole de nitrite. Les nitrites sont alors neutralisés pour former du diazote et de l'acide sulfurique selon la réaction [2.13b] (10b):



2.1.3.b) Transformation de SCN^- en CN^- : cas particulier des déchets industriels

Dans certains déchets industriels (riches en complexes métalliques du cyanure), une interférence notable est susceptible de se produire : la conversion de thiocyanate en cyanure (cf. [2.14]) en présence d'un oxydant fort comme le nitrate (5,4).



Si de telles interférences sont présentes, il convient d'utiliser une méthode par remplacement de ligand avec un milieu acide doux et l'ion EDTA pour dissocier les complexes cyano-métalliques. Sous de telles conditions, les ions thiocyanate sont relativement stables et de nombreux oxydants (comme le nitrate) deviennent plus faibles (APHA and AWWAWEF, 1995).

2.1.3.c) Consommation du cyanure par des agents oxydants

De nombreux agents oxydants peuvent détruire le cyanure pendant le stockage ou les manipulations. En particulier, les composés soufrés (sulfures S_2^- , dioxyde de soufre SO_2 , sulfites SO_3^- et sulfates SO_4^{2-}) qui peuvent détoxiquer directement le cyanure en thiocyanate (SCN^-).

Le "*standard methods for the examination of water and wastewater*" (APHA and AWWAWEF, 1995) préconise un ajout d'arsenic (NaAsO_2) pour neutraliser les agents oxydants.

2.2 Régulation biochimique et microbienne : Microorganismes et cyanure

Dans l'environnement, le cyanure est présent dans les plantes et les microorganismes qui colonisent les sols et les eaux. On peut le trouver sous forme libre (CN^-) ou sous forme de cyanogène : composé susceptible de libérer du cyanure libre (ex : CICN , cyanohydrine...). Au moins 800 espèces de plantes sont reconnues pour être cyanogéniques (manioc, sorgo, lin, flageolets, amandes, pêches, luzerne)(13). En Afrique de l'ouest, dans les populations où le régime alimentaire est principalement constitué de manioc, la moitié de la dose létale en cyanure peut être libérée dans l'organisme, ce qui est vraisemblablement la cause de maladies neurologiques chroniques propres à cette région (14,15). Cet exemple permet de réaliser que les cyanogènes sont potentiellement aussi toxiques pour l'homme que le cyanure libre (CN^-). Pourtant, de nombreux microorganismes ont développé des moyens de résistance face au cyanure, et d'autres même l'utilisent dans leur processus de colonisation ou y puisent leur source primaire de carbone et d'azote lors de leur croissance.

Pour faire un tour d'horizon de la littérature scientifique concernant cyanure et microorganismes, nous verrons dans un premier temps les différents modes de production du cyanure par les champignons et les bactéries, puis nous discuterons des capacités d'assimilation du cyanure par les microorganismes cyanogéniques, et enfin nous évoquerons la biodégradation et la détoxification du cyanure par certaines enzymes. L'important travail de Knowles sur le sujet nous guidera (16).

2.2.1 Production du cyanure par les microbes

2.2.1.a) production de cyanure par les champignons

La production de cyanure par des microorganismes a d'abord été mise en évidence par Von Lösecke en 1871, sur le champignon *Marasmius oreades*. Depuis, la formation de cyanure d'hydrogène a été observée dans près de 300 espèces (17,18,19) : *Basidiomycètes*, *Clitocybe*, *Pholiota*, *Polyporus*, *Tricholoma*, *Rhizoctonia solani*... Chez les eucaryotes non fongiques, très peu de cellules sont capables de produire du cyanure (l'algue *Chlorella vulgaris* peut produire du cyanure en faible concentrations (16)).

L'activité antibiotique de certains champignons cyanogéniques contre d'autres microorganismes (ou plantes) est reliée à leur production d'acide cyanhydrique qui inhibe les fonctions de défense de l'hôte. C'est sur ce mode d'action que le champignon *Fomes scutellatus* inhibe la germination et le développement des graines de laitue.

Les parasites utilisent également les cyanogènes pour affaiblir leurs hôtes. Différents scénarii (cyanide-linked disease, fairy ring disease, copperspot disease...) suivent globalement le même principe : inoculation chez la plante hôte de cyanogènes (diffusion intracellulaire) puis activité enzymatique β -glucosidase et oxynitrilase (production par le parasite ou l'hôte lui-même) libérant du cyanure libre (cf. FIGURE 2.8) qui affaiblit les réponses immunitaires de l'hôte, alors prêt à être colonisé (16).

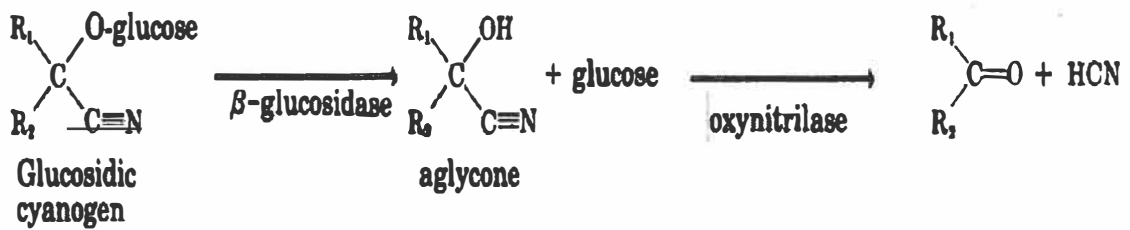


FIGURE 2.8 : Libération du cyanure dans une plante via l'oxydation d'un cyanogène.

2.2.1.b) Production de cyanure par des bactéries

Bien que la production de cyanure soit très répandue et qu'il s'agisse d'un métabolisme normal chez les champignons, peu d'espèces bactériennes sont connues pour produire du HCN. Les seuls procaryotes connus sont certaines souches de *Pseudomonas (aeruginosa)* et *Chromobacterium violaceum* (16).

Les différents résultats expérimentaux (20-25) s'accordent à dire que la production de cyanure par les bactéries dépend de la présence de glycine dans les nutriments. D'autres précurseurs du cyanure ont été mis à jour (glycine méthylée, L-histidine, DL-alanine...)(24) mais la glycine reste un précurseur simple et efficace.

Plusieurs mécanismes ont été postulés pour expliquer la production de cyanure par ces souches bactériennes (14,26,27). Le plus réaliste propose une réaction en trois étapes, représentées à la FIGURE 2.9, faisant intervenir une catalyse enzymatique lors des oxydations successives. Les protéines mises en jeu sont des flavo-enzymes de la famille des déshydrogénases.

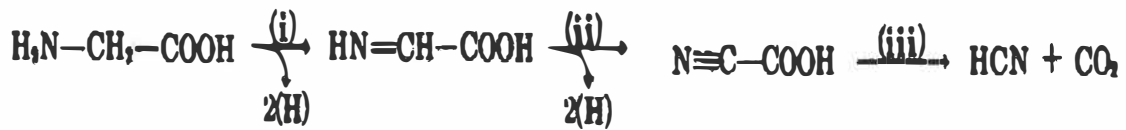


FIGURE 2.9 : Mécanisme probable de la production de HCN à partir de glycine par les bactéries.

L'étape (iii) est peut être non enzymatique, puisque l'acide cyanoformique NC-COOH est très instable et se décompose sans doute spontanément (avec un léger chauffage) (cf. FIGURE 2.10) :

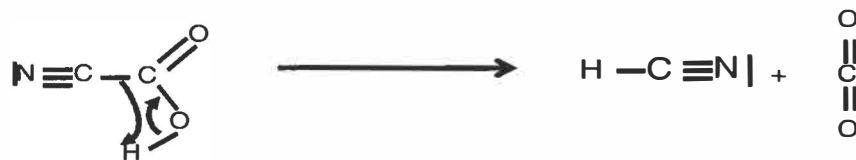


FIGURE 2.10 : Mécanisme réactionnel non enzymatique de la décarboxylation de l'acide cyanoformique.

2.2.2 Consommation du cyanure par les microorganismes

Remarque préliminaire : la consommation du cyanure par les microbes peut se voire de différentes manières :

- Le microorganismes utilise HCN pour son métabolisme (formation d'acides aminés avec HCN pour substrat) : on parlera alors d'**assimilation du cyanure**.
- Dans le cas où le microorganisme assimile le cyanure, il se peut que cette assimilation soit la source primaire de carbone et/ou d'azote : **le cyanure est alors un nutriment**.
- Enfin, le microbe peut permettre une réaction sur le cyanure, sans assimiler dans son organisme ni le carbone ni l'azote de HCN. La réaction a alors pour but d'éliminer le cyanure du milieux de croissance : il s'agit d'**une biodégradation ou d'une détoxification du cyanure**.

2.2.2.a) Assimilation de CN par les microorganismes cyanogéniques

L'assimilation du cyanure par des organites également capables de produire du cyanure a beaucoup été étudiée. Cependant, le cyanure n'est pas une source primaire de carbone ou d'azote pour ces microorganismes, mais simplement un métabolite intracellulaire normal, présent dans différents cyanogènes (cyanohydrine, acide glycoxylique).

L'assimilation du cyanure d'hydrogène par les microorganismes cyanogéniques (28-31) peut conduire à la formation d'alanine, d'acide glutamique, d'acide α -aminobutyrique, et de β -cyanoalanine en faisant intervenir différentes activités enzymatiques. Une compilation des différentes études menées permet de proposer les schémas réactionnels suivants :

- Formation d'alanine (FIGURE 2.11) par les champignons *M. oreades*, *Pholiota adiposa*, *Pholiota aurivella*, *Pholiota praecox* et les moisissures de neige de la famille des basidiomycètes.

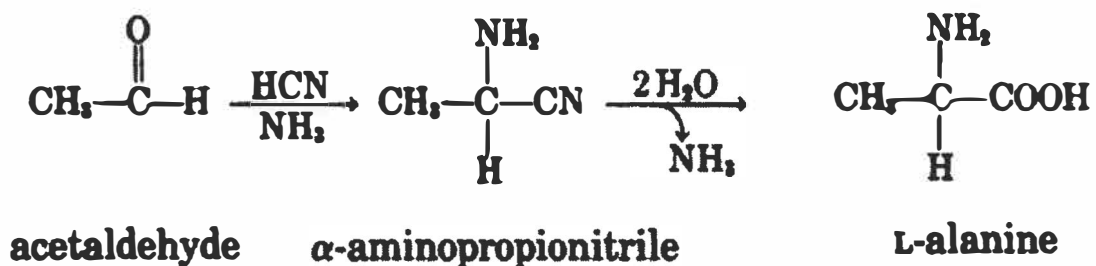


FIGURE 2.11 : Formation d'alanine avec assimilation du cyanure d'hydrogène.

La première étape semble être catalysée par une déshydrogénase tandis que le nitrile est hydrolysé en acide carboxylique grâce à une nitrilase.

- Synthèse d'acide glutamique (FIGURE 2.12) par des champignons de moisissure de neige :

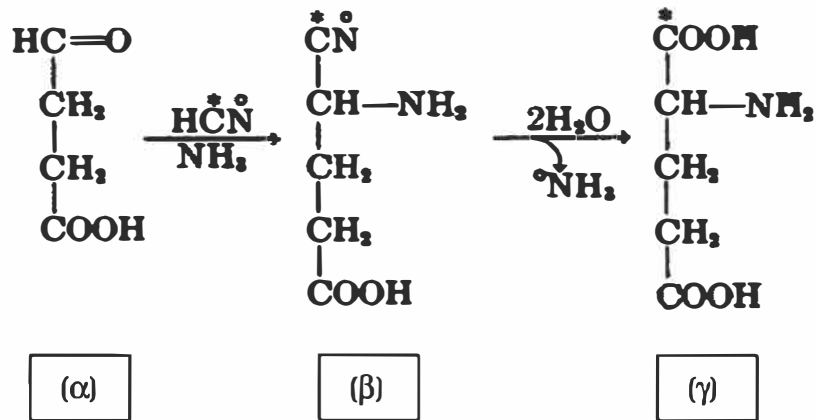


FIGURE 2.12 : Synthèse d'acide glutamique avec assimilation du cyanure d'hydrogène.

Le glutamate (γ) –sous forme d'acide glutamique- est dérivé de la semialdéhyde succinique (α) et du cyanure d'hydrogène via l'acide 4-amino-4-cyanobutyrique (β). Le carbone et l'azote du cyanure d'hydrogène sont marqués (C 14 et N 15) (Strobel (29,32)), ce qui permet de contrôler que l'atome de carbone du cyanure est incorporé à l'acide aminé, tandis que l'azote de HCN est libéré sous forme de NH_3 . Les enzymes mises en jeu sont l'aminocyanobutyrate nitrilase, la glutamate décarboxylase, la semialdéhyde déshydrogénase et la 3-aminobutyrate-glutamate transaminase.

Une conversion cyclique du cyanure d'hydrogène en CO_2 a été proposée par Strobel (32)(FIGURE 2.13), ce qui signifierait qu'il n'y a pas d'assimilation du carbone de HCN par l'organisme. La réaction aurait alors pour but de détoxiquer le cyanure d'hydrogène, avec une assimilation possible de l'azote de HCN (cf. FIGURE 2.13).

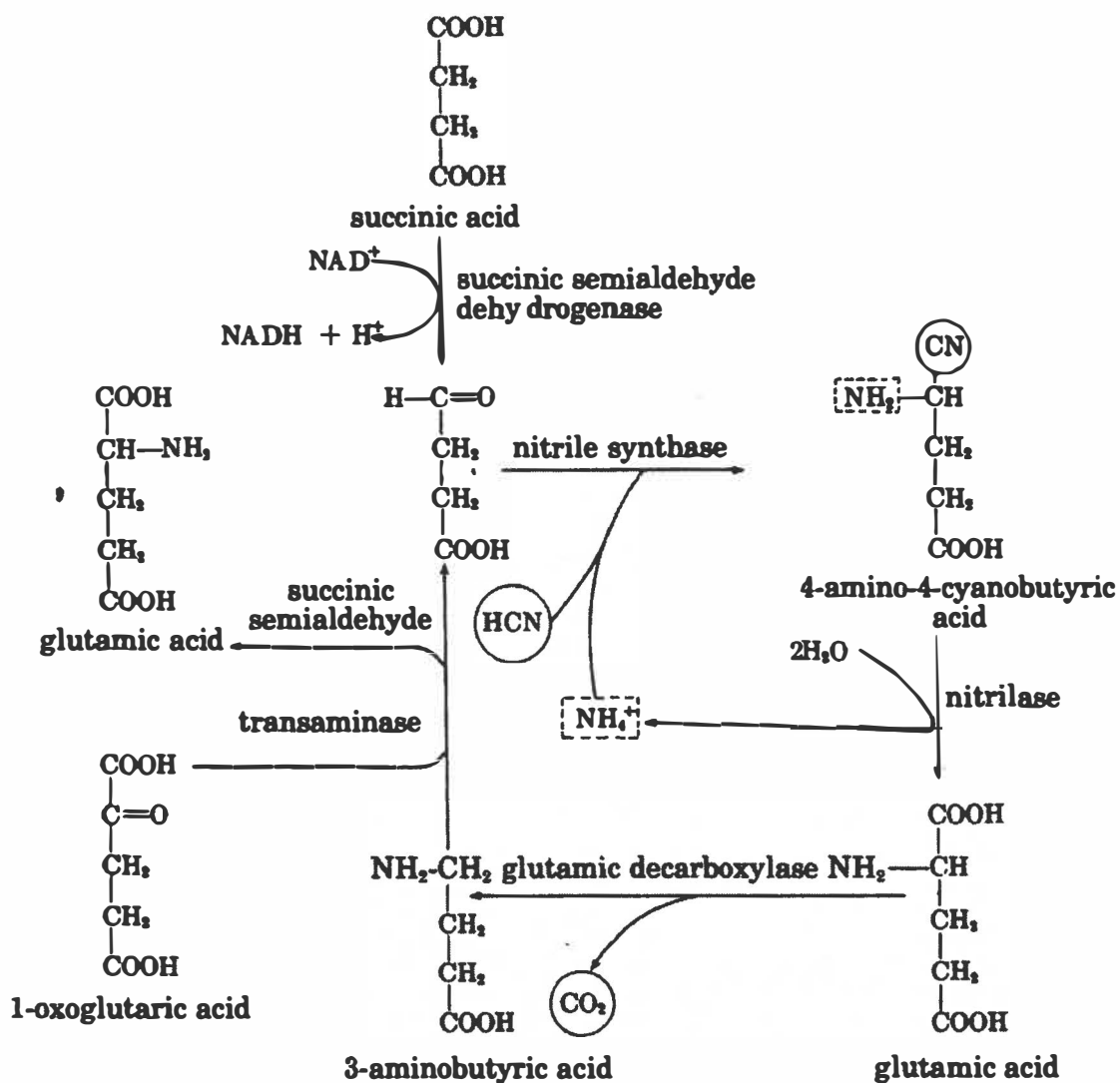


FIGURE 2.13 : Schéma du mécanisme possible de détoxication du cyanure par les moisissures de neige de basidiomycètes avec formation d'acide 4-amino-4-cyanobutyrique (selon Strobel)

- Formation d'acide α -aminobutyrique (FIGURE 2.14) par le champignon *Rhizoctonia solani*

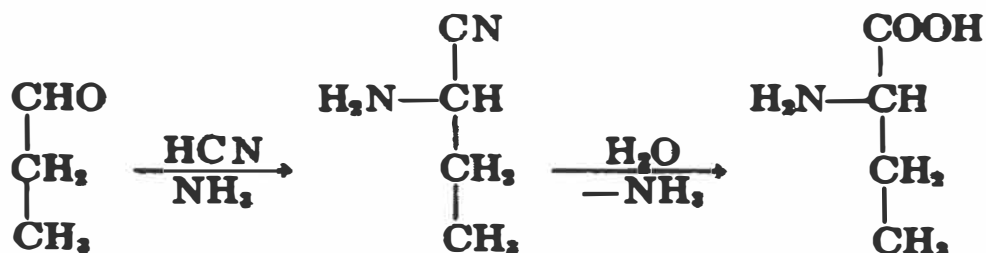


FIGURE 2.14 : Formation d'acide α -aminobutyrique avec assimilation de cyanure

Le champignon *R. solani* peut produire du cyanure (cf. section 2.2.1.a)) mais il peut également l'assimiler au propanal pour donner l' α -aminobutyronitrile puis l'acide par hydrolyse. Les enzymes mises en jeu sont les mêmes que pour la formation de glutamate (16).

- Formation de β -cyanoalanine

Les bactéries *Escherichia coli*, *Chlorella purenoidosa*, *C. violaceum* peuvent métaboliser le cyanure en β -cyanoalanine (cf. FIGURE 2.15) en présence de sérine sulfidrase (16):

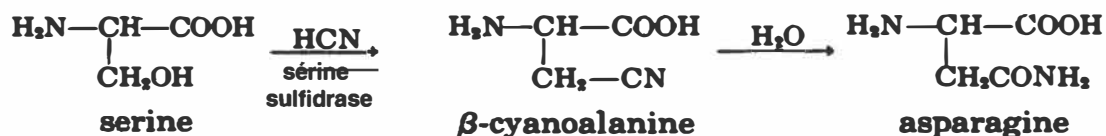


FIGURE 2.15 : Formation de β -cyanoalanine avec assimilation de cyanure.

2.2.2.b) Utilisation du cyanure comme nutriment

Les bactéries sont capables d'utiliser des composés en C1 (ne possédant qu'un seul atome de carbone) comme seule source de carbone. Le métabolisme de ces microorganismes est élevé, puisque la synthèse des acides aminés nécessite plus d'étapes que lorsque la source de carbone est une chaîne en C5 ou C6. Cependant, peu d'études concernent le cyanure comme nutriment ont été faites. Toutefois, la littérature scientifique permet d'affirmer que plusieurs souches bactériennes sont capables d'utiliser le cyanure comme source de carbone mais aussi comme source d'azote.

Nous citerons pour mémoire, que la formamide hydrolase du champignon *S. loti* dégrade le cyanure en formamide (33) (cf. FIGURE 2.16), or de nombreuses bactéries peuvent utiliser le formamide comme source de carbone et d'azote (34). Entres autres, *Pseudomonas nonliquefaciens* peut utiliser le cyanure comme nutriment en carbone et en azote, *Aspergillus niger* l'utilise comme source d'azote seulement.

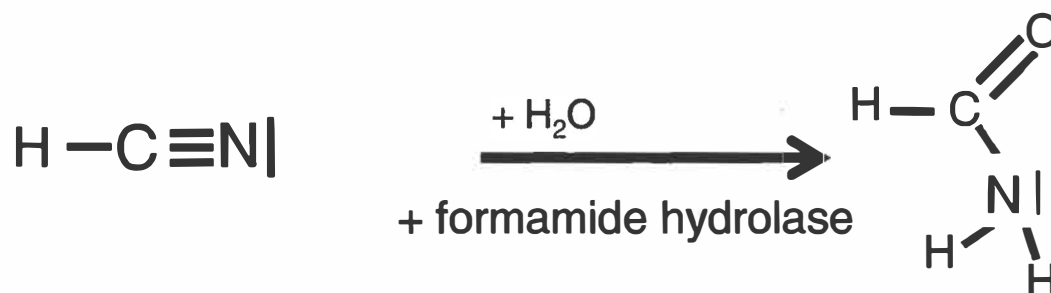


FIGURE 2.16 : Schéma de la synthèse d'un précurseur d'acide aminée (le formamide) à partir du cyanure.

Différents champignons peuvent suivre ce schéma réactionnel (*S. loti*, *Fusarium Solani*), et c'est aussi vraisemblablement le mode d'action d'une variété de bactérie : *Pseudomonas* sp. (S1), (35).

Le graphique de la FIGURE 2.18 traduit bien le métabolisme du cyanure en acide formique, le mécanisme enzymatique mettant en jeu le chemin proposé ci avant.

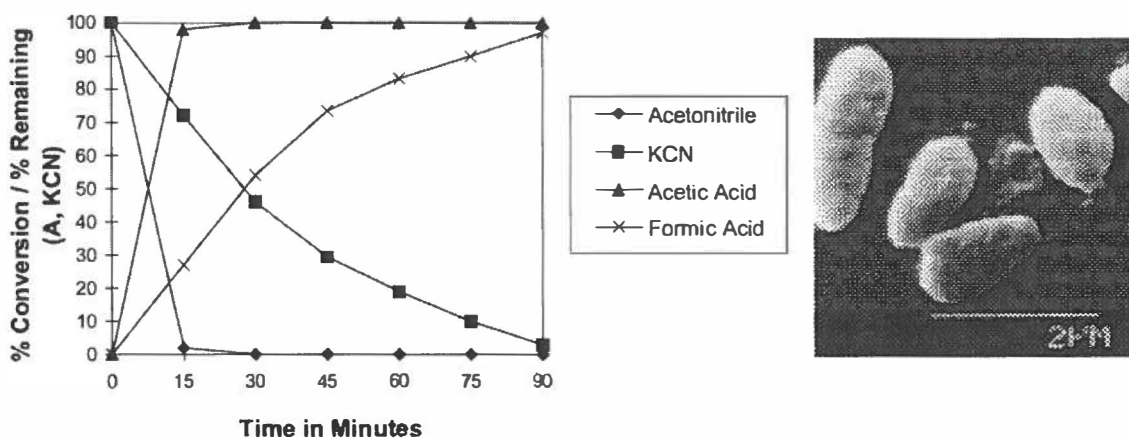
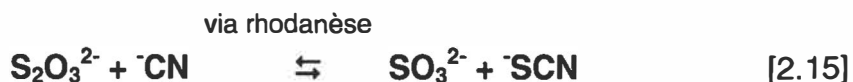


FIGURE 2.18 : Biotransformation de l'acetonitrile (A) et de KCN et production d'acide acétique et formique par *Pseudomonas* sp. (S1). Photo en MEB de colonies de *Pseudomonas* sp. (S1) isolées (d'après Dhillon *et al.*).

➤ D'autre part, une autre enzyme, rhodanèse (ou thiosulfate sulfure transférase), peut détoxiquer le cyanure (16,36), via un processus complètement différent. La réaction mise en jeu ([2.15]) s'écrit :



Cette enzyme a comme particularité d'utiliser le cyanure comme substrat et de le métaboliser en présence de thiosulfate en un anion atoxique pour les microbes (et même pour l'homme) : le thiocyanate. (L'activité de cette enzyme peut se faire en présence de quelques autres donneurs de soufre).

Chez les eucaryotes, rhodanèse est localisée dans les cellules de tissus mammaires, et dans les cellules bovines. L'enzyme est également souvent observée chez les procaryotes : *E. coli*, *Thiobacillus*, *Desulfphomaculatum*, *B. subtilis*, *B. stearothermophilus*, *Rhodopseudomonas palustris*...

Chez les eucaryotes, l'empoisonnement au cyanure provoque, outre les attaques sur le système nerveux, un arrêt de la respiration par réaction parasite dans les chaînes mitochondriales (cf. Annexe C). Or, une localisation plus poussée de la rhodanèse montre qu'elle est présente dans les mitochondries des cellules mammaires. Le schéma de la FIGURE 2.19 montre que la localisation mitochondriale de la rhodanèse concorde avec sa fonction de détoxication.

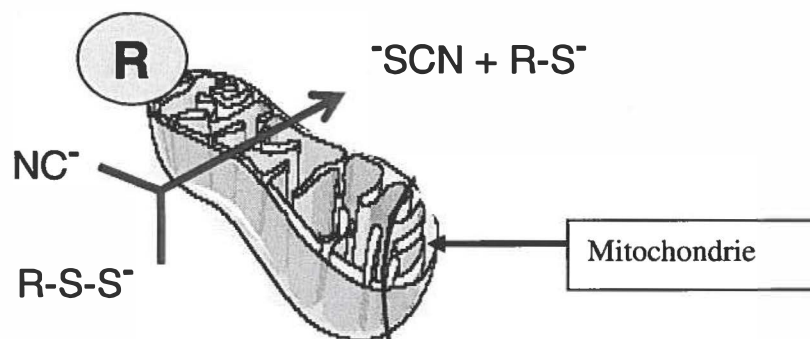


FIGURE 2.19 : Schéma de la détoxication du cyanure dans les mitochondries via l'activité rhodanèse.

L'activité rhodanèse (cercle jaune, lettre R) localisée dans les mitochondries permet la détoxication du cyanure en thiocyanate, par réaction avec un donneur de soufre (RSS^-), généralement le thiosulfate. Les mitochondries peuvent reprendre une activité aérobie (respiration) car le site primaire de fixation du cyanure (cytochrome oxydase, impliqué dans les réactions d'oxydoréduction d'assimilation de l' O_2 par l'organisme) est libéré.

En définitive, rhodanèse a un rôle important dans la détoxification du cyanure par certains microorganismes. Toutefois, il ne faut pas surestimer ce rôle, qui s'ajoute à d'autres métabolismes.

➤ Enfin la mercaptopyruvate sulfurtransférase métabolise le cyanure (16,36)(cf. FIGURE 2.20), mais sa fonction principale reste de permettre la synthèse du thiocyanate, et non de détoxifier le cyanure (qui peut d'ailleurs être remplacé par un autre accepteur de soufre tel que le sulfite) :



FIGURE 2.20 : Détoxification du cyanure via l'activité enzymatique de la mercaptopyruvate sulfurtransférase.

2.2.3 Conclusion : régulation microbienne du taux de cyanure dans l'environnement

En définitive, les microorganismes présents dans l'environnement sont capables de produire et de dégrader le cyanure. Certains champignons utilisent la synthèse de cyanure par décomposition de cyanogènes pour affaiblir les plantes hôtes qu'ils vont coloniser, tandis que des bactéries sont capables de décomposer la glycine et de l'oxyder en cyanure. D'autre part, de nombreux microorganismes sont capables d'assimiler le cyanure pour former des acides aminés (comme l'alanine), et quelques souches ont même la capacité d'utiliser CN comme source de carbone et/ou d'azote primaire. Enfin, quelques mécanismes enzymatiques permettent à certaines bactéries de biodégrader le cyanure (formamidase, nitrilase) ou de le détoxifier (rhodanèse).

Un véritable cycle de régulation microbienne du taux de cyanure dans l'environnement permet de prévenir les concentrations trop élevées dans les eaux ou les sols. Cette régulation biochimique vient s'ajouter à d'autre

phénomènes physiques et chimiques de régulation permettant de prévenir des quantités nocives de cyanure libre dans les sols et les eaux : équilibre liquide vapeur ($\text{HCN}_{(l)} \rightleftharpoons \text{HCN}_{(g)}$), formation de complexes à centre métallique...

Le schéma suivant permet de résumer les différents moyens de régulations qu'ont les microorganismes sur le cyanure dans l'environnement :

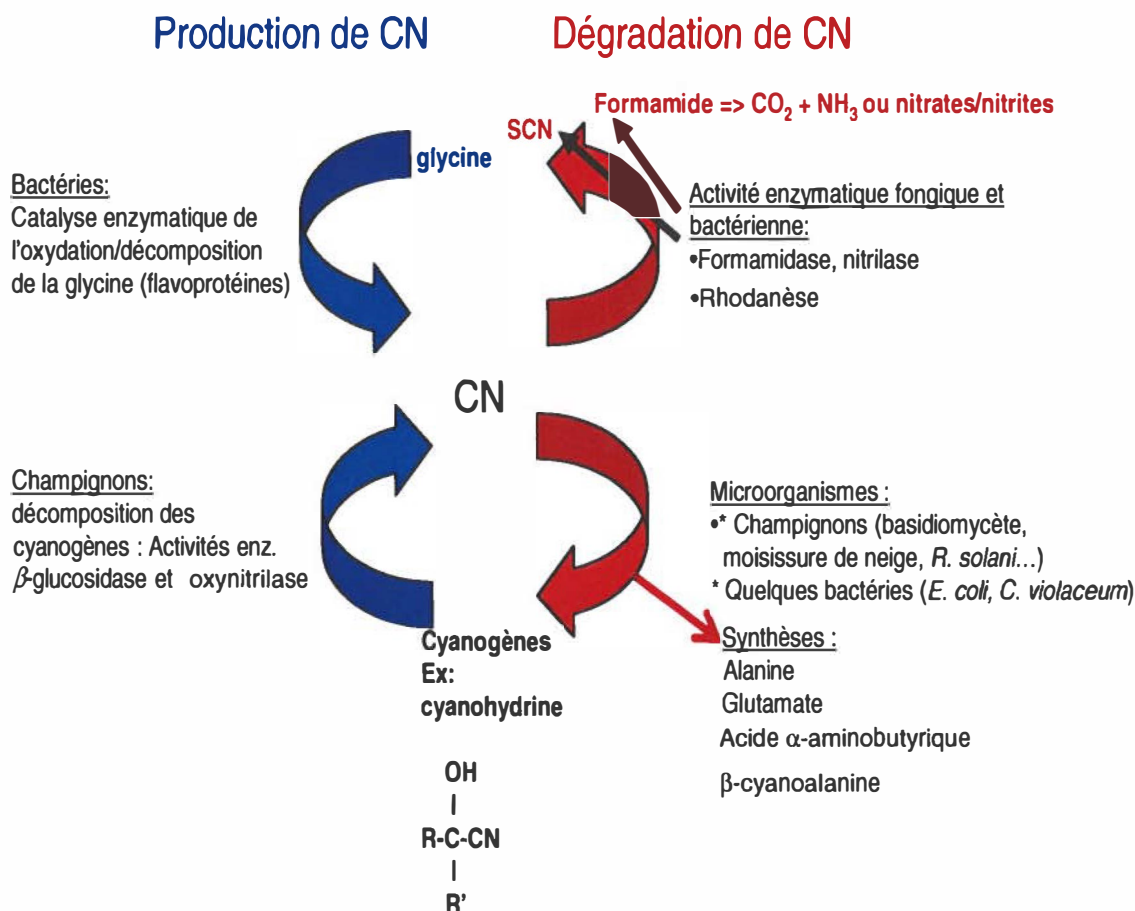


FIGURE 2.21 : Les différents moyens de régulation du cyanure dans l'environnement par les microorganismes.

2.3 TOXICITÉ

2.3.1 Toxicologie environnementale du cyanure

La toxicité du HCN moléculaire sur la vie aquatique est bien connue. Certaines études (37-39) ont montré que chez les poissons CN^- est moins toxique que HCN, ce qui en pratique ne se voit pas dans des eaux à $\text{pH} < 9.2$ où la forme moléculaire HCN prédomine.

La toxicité des complexes métalliques cyanurés sur les poissons est principalement attribuée au cyanure libre et moléculaire résultant de leur dissociation.

La toxicité supérieure des formes simples du cyanure face aux formes complexées s'explique bien. En effet, les cyanures simples permettent une solvataion rapide des CN^- libres, possédant un fort caractère nucléophile du fait de leur doublet libre d'électron. Ces anions sont très disponibles pour réagir avec des protéines. Les réactions d'additions nucléophiles (AN) sur des acides aminés présents dans les cellules vivantes vont conduire à une dégradation rapide de l'information protéique, conduisant à des dysfonctionnements majeurs.

A contrario, le doublet non liant nucléophile de CN^- va être utilisé pour la formation de liaisons de coordination dans les complexes métalliques. C'est pourquoi les formes complexées du cyanures sont moins toxique, le ligand CN^- est neutralisé par le centre métallique.

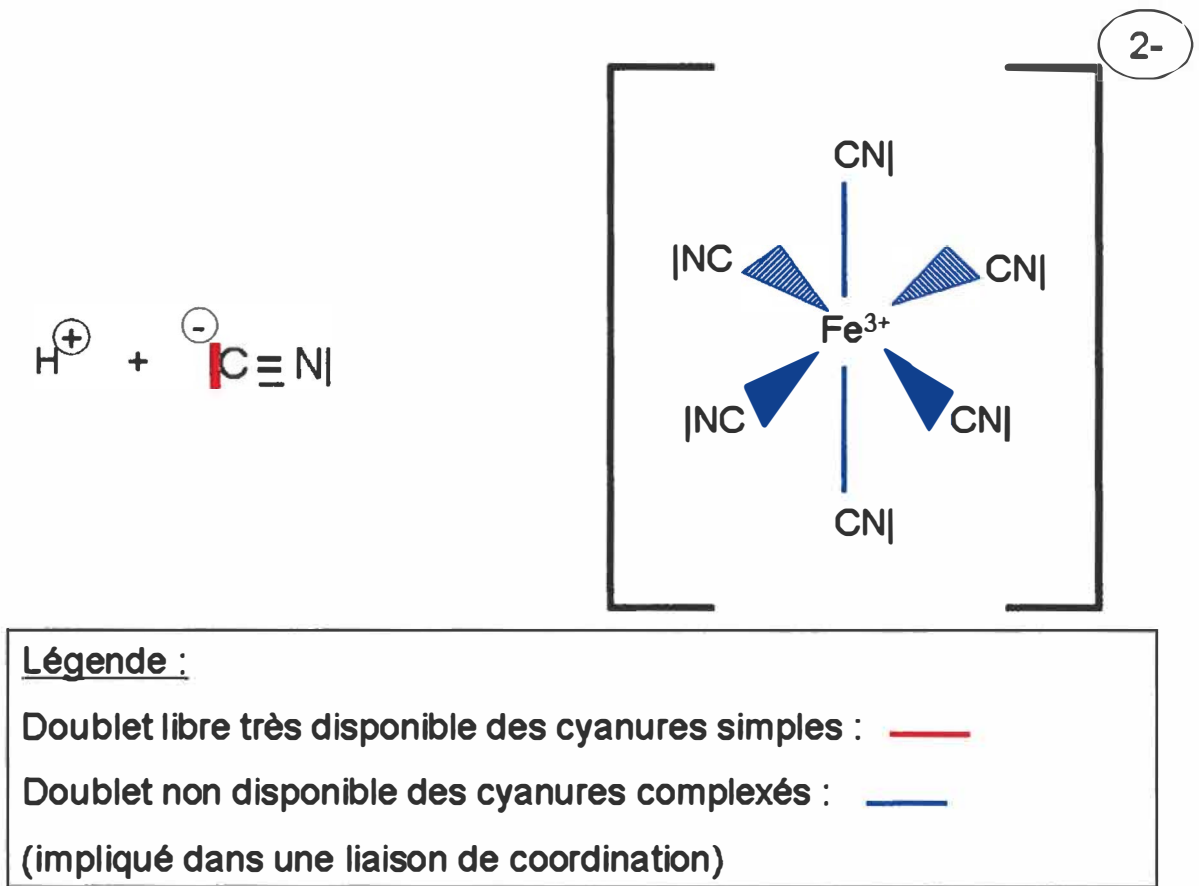


FIGURE 2.22 : Disponibilité des électrons des cyanures simples et complexés.

2.3.2 Toxicologie humaine

Le cyanure peut être létal à l'homme, par ingestion, inhalation ou absorption cutanée. Le contact avec des acides provoque le dégagement gazeux de HCN qui est un gaz très toxique. Le cyanure provoque des brûlures de la peau, des yeux et du système respiratoire. Il affecte également le sang, le système cardiovasculaire, le système nerveux central et la thyroïde.

En cas d'empoisonnement au cyanure, il convient d'administrer immédiatement les premiers soins (trousse antidote) et de contacter un médecin. Une trousse

antidote contient du nitrite d'amyle, du nitrite de sodium et du thiosulfate de sodium (donneur de soufre dans la détoxification via rhodanèse).

Pour avoir une vue globale de l'empoisonnement au cyanure et des métabolismes développés par l'homme pour lutter contre ses effets toxiques, on se référera à l'Annexe C. Ce document propose une synthèse des différents mécanismes enzymatiques participant à la détoxification du cyanure dans l'organisme.

2.4 CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Avant de s'intéresser de plus près au problème de contamination du site d'enfouissement de la RGMRM, il était nécessaire de rappeler des connaissances fondamentales sur le cyanure.

Ainsi, après avoir abordé la chimie de la molécule de cyanure, exposé les méthodes d'analyse utilisées pour son dosage et avoir approfondi la biochimie du cyanure dans l'environnement, nous pouvons aborder le problème spécifique du LES de Saint-Étienne-des-Grès avec une vue d'ensemble.

Déjà, il est clair que les causes du dysfonctionnement observé peuvent être nombreuses et très diverses. Grâce à notre état des connaissances, nous allons pouvoir définir différentes hypothèses qui nous guideront dans la troisième partie du rapport.

La contamination en cyanure du lixiviat du site d'enfouissement provient-elle d'une production interne par les microorganismes du réacteur biologique séquentiel ? S'agit-il d'une production purement chimique due à la décomposition de complexes cyanurés stables dans les bassins de décantation ? Ou bien la source de cyanure est-elle externe au LES : décharge

illicite de cyanure dans les déchets, à la source du cycle d'enfouissement ? Ou encore, dysfonctionnement provenant des méthodes d'analyses employées sur le site, mise en cause des laboratoires, formation chimique de cyanure due aux nitrites ?

Ce sont autant de questions qui vont nous guider lors de la partie suivante, où nous tâcherons de déterminer la source de contamination au cyanure avec certitude.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE LA CONTAMINATION EN CYANURE DU LIXIVIAT DU LES DE SAINT-ÉTIENNE-DES-GRÈS

3.1 PROBLÉMATIQUE DÉTAILLÉE

3.1.1 Rappel de la problématique telle que définie au CHAPITRE I

Nous avons déjà défini notre problématique à la section **1.1.3** du présent rapport :

La législation environnementale appliquée au Québec impose un suivi physico-chimique et biologique du lixiviat tout au long de son traitement. Les eaux de lixiviation en sortie des LES doivent être entièrement décontaminées. Le règlement sur les déchets solides impose une concentration maximale en cyanure dans le lixiviat de **0,1 mg/L**.

La contamination en cyanure du lixiviat du LES de Saint-Étienne-des-Grès, apparaît donc comme un non respect du règlement sur les déchets solides. Le taux des cyanures totaux a été mesuré à plusieurs reprises durant la période été 2003/hiver 2004 et s'est avéré supérieur à la norme légale de 0,1 mg/L. M. Robert Comeau, directeur général de la RGMRM et gestionnaire du site, doit donc localiser rapidement le problème, afin de ne pas être sanctionné par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec et de permettre le fonctionnement du LES le moins à risques pour l'environnement.

3.1.2 Historique des contaminations en cyanure

Au cours de l'été 2003, un premier épisode de pollution en cyanure est détecté. Les mesures de l'automne 2003 confirment ce dysfonctionnement, puisqu'au 27 Octobre 2003 le cyanure mesuré en sortie de l'usine d'épuration du lixiviat est encore de 0,28 mg/L ce qui est près de trois fois la norme tolérée.

Le 2 février 2004, durant la cessation d'activité annuelle hivernale (due au gel), des mesures sont faites en sorti de l'usine de traitement du lixiviat : le taux de cyanure (<0,01 mg/L) est de nouveau sous la limite légale. Par contre, dans le RBS, le cyanure mesuré (0,28 mg/L) est encore supérieur à 0,1 mg/L le 20 février 2004.

Toutes les mesures postérieures à cette date montrent des concentrations acceptables en cyanures (<0,1 mg/L), quelque soit le point de prélèvement et indépendamment du laboratoire d'analyse ayant effectué les dosages de CN.

Depuis l'été 2004, aucun dysfonctionnement concernant une pollution au cyanure n'a été observé.

Le TABLEAU 3.1 présente l'historique des contaminations en cyanure survenues sur le site de Saint-Étienne-des-Grès.

TABLEAU 3.1
Synthèse des principaux résultats d'analyse du cyanure dans la période
juillet 2003/septembre 2004

Date de prélèvement	Lieux de prélèvement (les valeurs moyennes de $[CN]_{tot}$ sont données en mg/L)		
	PP1	RBS et polissage	UV
25/07/2003	0,02	Non mesuré	0,18
20/08/2003	0,01	Non mesuré	0,26
27/08/2003	Non mesuré	0,93	0,26
18/09/2003	Non mesuré	0,96	Non mesuré
26/09/2003	0,01	0,31	0,25
23/10/2003	Non mesuré	Non mesuré	0,28
27/10/2003	Non mesuré	Non mesuré	0,28
19/11/2003	Non mesuré	0,21	Non mesuré
12/02/2004	Non mesuré	Non mesuré	<0,01
20/02/2004	0,03	0,28	Non mesuré
07/06/2004	0,04	Non mesuré	Non mesuré
13/07/2004	0,04	0,03	0,3
11/09/2004	<0,02	<0,02	<0,02
14/09/2004	<0,006	0,02	0,05
14/09/2004	<0,02	<0,02	<0,02

Légende:

Valeurs moyennes de $[CN]_{tot}$ en mg/L

$[CN]_{tot} > 0,1$ mg/L

Laboratoire d'analyse :

Labo A

Labo B

Points d'échantillonnage : PP1 : Sortie de l'étang d'accumulation

RBS : Sortie du RBS

UV : Sortie du système de désinfection UV

Ce TABLEAU 3.1 synoptique permet de noter une tendance importante : toutes les contaminations en cyanures sont observées en aval du RBS.

3.1.3 Hypothèses et scénarios

Pour cerner le problème de pollution au cyanure survenu sur le site de Saint-Étienne-des-Grès, il convient de travailler avec méthode. En effet, la contamination observée peut être d'origines très diverses. La partie précédente de notre travail montre bien les nombreuses possibilités de formation du cyanure, tant au niveau chimique que biologique. Pour avancer dans notre travail d'investigation, nous allons prendre en compte tous les scénarios envisageables et évaluer la pertinence de chaque hypothèse. Ensuite, nous proposerons des analyses chimiques et/ou biologiques permettant de confirmer ou d'infirmer nos hypothèses.

Hypothèse 1 : **Source de contamination en amont du LES**

Scénario 1 :

La pollution observée en cyanure est réelle, elle provient d'un apport extérieur, le cyanure n'est pas produit dans le LES. Une telle pollution serait donc apportée par une décharge illicite de cyanure.

Vérification 1 :

Les principales sources de contamination en cyanure se trouvent dans les effluents provenant d'installations d'extractions des métaux, des procédés d'électrodéposition, du lessivage des résidus miniers, des coqueries et fabriques de gaz ainsi que des différentes usines de produits chimiques.

La RGMRM ne gérant pas de déchets de telles industries, toutes les sources de cyanures mentionnées ci-dessus sont écartées, et le scénario 1 est donc de prime abord très peu probable (même une décharge illicite provenant des

déchets domestiques ne suffirait pas à maintenir des taux élevés en cyanure dans le lixiviat pendant une longue période).

En définitive nous pouvons éliminer l'hypothèse 1 par l'analyse rapide du TABLEAU 3.1 de la section précédente : nous avons vu que toutes les contaminations sont observées en aval du RBS : le cyanure n'est donc pas introduit comme polluant à la source dans le lieu d'enfouissement sanitaire.

Dès lors, il convient de vérifier deux hypothèses : le cyanure est produit par la microflore du RBS ou le cyanure n'est pas présent dans le milieu et, conséquemment, les mesures d'analyses des laboratoires doivent être remises en cause.

Hypothèse 2 : Le cyanure est produit par le LES (dans le RBS)

Scénario 2 :

Comme nous l'avons vu dans la partie 2 du présent rapport, de nombreux microorganismes sont capables de produire du cyanure à partir de diverses sources de carbone et d'azote. Le RBS est un milieu extrêmement diversifié en terme de souches bactériennes, et certaines espèces communes telles *Pseudomonas Species (S1)* y sont fort probablement présentes, et peuvent potentiellement produire du cyanure, si les substrats adéquats sont présents dans leurs nutriments.

Vérification 2 :

En s'inspirant des méthodes de recherche de Rapean *et al.* (10) nous pouvons proposer une méthode visant à déterminer la présence de bactéries cyanogéniques dans les boues actives du RBS.

Principe de la méthode :

Isoler puis cultiver et incuber des boues du RBS avec des nutriments (plusieurs séries : milieux de culture complet et/ou minimum, milieux de cultures avec ajout de glycine). Doser le cyanure (via électrode).

Répéter l'expérience sur des souches bactériennes cyanogéniques connues (ex : *Pseudomonas species* (S1)) et doser le cyanure.

Comparer les résultats et en déduire si la proportion de bactéries cyanogéniques présentes dans le RBS est significative ou non.

Hypothèse 3 : La contamination en cyanure survient en aval du LES, lors des analyses

Scénario 3 :

Nous avons également mentionné que le cyanure pouvait se former lors de la distillation en présence de nitrites (cf. section 2.1.3.a). Or les boues de lixiviations contiennent des quantités significatives de nitrates et nitrites ($\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$), de l'ordre de 100 mg/L. Le cyanure mesuré (en aval du RBS) pourrait être produit lors du protocole d'analyse, durant la distillation en milieu acide, par réaction des nitrites sur les composés organiques présents dans le lixiviat (acides gras, acides aminés, composés carbonylés...). La FIGURE 3.1 ci-après résume le scénario 3.

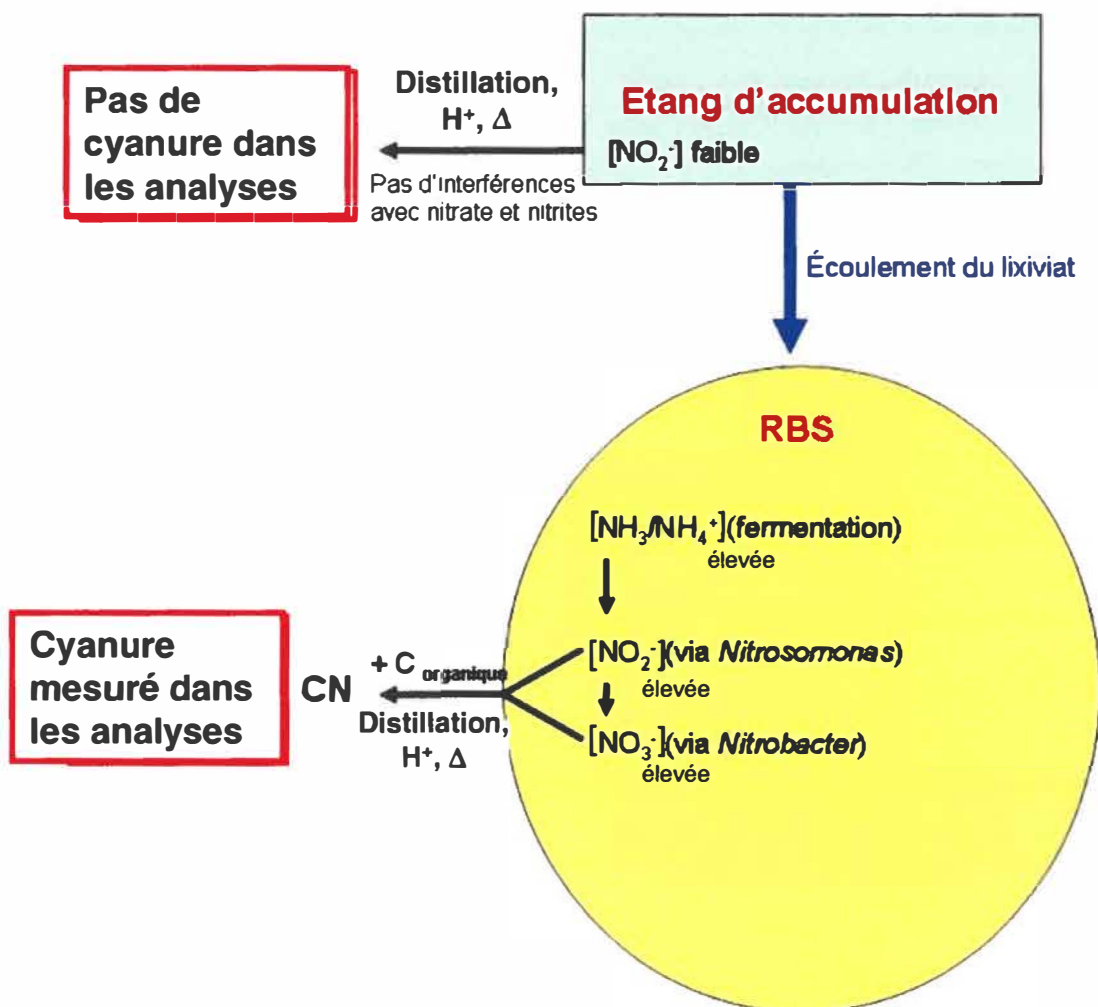


FIGURE 3.1 : Schéma du scénario 3.

Vérification 3 :

Pour vérifier le scénario 3, le principe est simple : il suffit de faire plusieurs séries d'analyses chimiques de CN sur des échantillons prélevés dans le RBS et d'ajouter une quantité déterminée d'acide sulfamique à une série. Si la série avec acide sulfamique donne moins de cyanure que la série sans ajout d'acide sulfamique, alors une partie du cyanure mesuré provient de la réaction des nitrites sur les composés organiques présents dans le lixiviat lors de la distillation.

Étant donnée la longue durée et la difficulté de caractériser la microflore bactérienne présente dans le RBS exhaustivement, nous avons vérifié en premier lieu l'hypothèse selon laquelle le cyanure serait formé lors des analyses en laboratoire et non présent dans le lixiviat. La section suivante propose une méthode simple pour déterminer si le cyanure est réellement présent dans le milieu ou si il est formé lors de la distillation. La partie suivante s'attache donc à vérifier l'hypothèse et le scénario 3.

3.2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.2.1 Points d'échantillonnage

Les mesures seront effectuées à des points d'échantillonnages stratégiques : en amont du RBS (PP1), en sortie du RBS, et avant le rejet final dans la rivière Saint-Maurice (en sortie du traitement UV). Ce choix est justifié car il permet de suivre l'évolution de la composition du lixiviat depuis son pompage dans la cellule 1 de la zone C à son rejet dans la rivière. La stratégie d'échantillonnage est résumée dans la FIGURE 3.2. Le point d'échantillonnage PP1 donne la composition initiale du lixiviat dans l'étant d'accumulation, le point d'échantillonnage RBS donne la composition des eaux après traitement bactériologique, et le point d'échantillonnage UV donne l'état final du lixiviat.

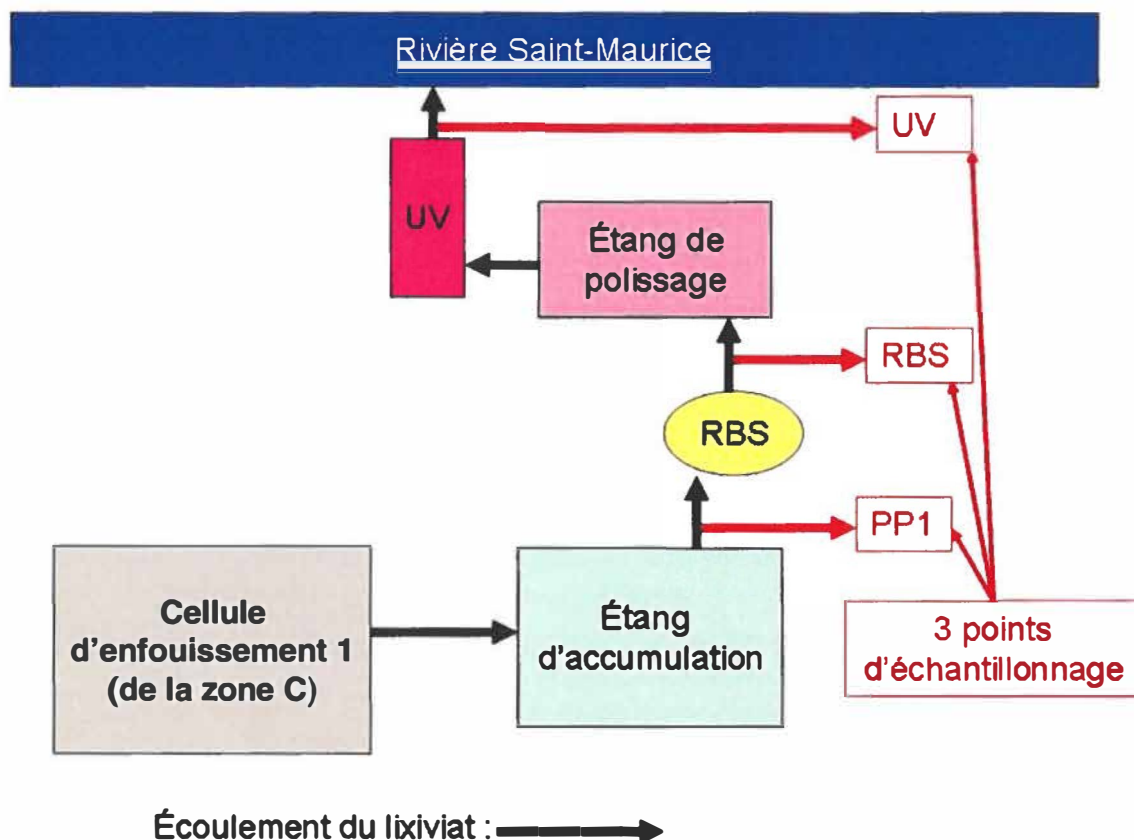


FIGURE 3.2 : Points de prélèvement pour les analyses chimiques.

3.2.2 Eléments et paramètres à analyser

Pour valider ou infirmer notre hypothèse 3 selon laquelle la contamination en cyanure serait due à un faux positif, nous proposons une série d'analyses chimiques permettant d'une part d'estimer la part de transformation des nitrites en cyanures lors de la distillation et d'autre part de vérifier que d'autres interférences chimiques n'ont pas lieu lors des analyses. Le TABLEAU 3.2 présente la stratégie des analyses chimiques qu'il apparaissait opportun ou non de réaliser.

Conformément à l'article 30.4 section IV du règlement sur les déchets solides, les analyses seront confiées à 2 laboratoires indépendants, accrédités par le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Par soucis de confidentialité, les deux laboratoires d'étude ne seront pas nommés. Nous les désignerons par les pseudonymes Labo A et Labo B.

TABLEAU 3.2

Les différents éléments présents dans le lixiviat et leurs interférences potentielles avec le cyanure.

Composé pouvant être présent dans le lixiviat	Effet potentiel sur CN	Analyse demandée
CN		OUI
Agents oxydants (ex: Cl ₂)	[CN] _{tot} diminue	NON (car peu présent dans le lixiviat a priori)
Composés soufrés (H ₂ S, "S ²⁻ ", "S", SO ₂ , sulfites SO ₃ ⁻ , sulfates SO ₄ ²⁻)	Sources potentielles de composés oxydants du soufre, pouvant transformer les cyanures en thiocyanate: CN → SCN	OUI
Thiocyanates (⁻ SCN)	Equilibre potentiel entre cyanure et thiocyanate avec nitrates : SCN ⁻ + NO ₃ ⁻ ⇌ CN ⁻ + ...	OUI
Aldéhydes (plus glucose et sucres)	Perte non réversible de CN : AN puis Elimination possible lors de la distillation R ₁ R ₂ C=O + HCN ⇌ R ₁ R ₂ C(OH)CN	NON
Acides gras	Point d'équivalence indétectable	NON (car peu présents dans le lixiviat a priori)
Carbonates (CO ₃ ²⁻)	Si CO ₃ ²⁻ en forte concentration, la distillation peut être affectée (rejet violent de CO ₂ (g))	NON (car peu présents dans le lixiviat a priori)
Nitrites (NO ₂ ⁻)	Peuvent former HCN durant la distillation	OUI
Nitrates (NO ₃ ⁻)	Précurseur de NO ₂ ⁻ et possibilité de réaction sur ⁻ SCN → CN ⁻	OUI
Ammonium (NH ₄ ⁺)	Aucun effet direct sur HCN	NON

En plus des paramètres susmentionnés, le pH sera mesuré (pour avoir une idée du domaine de prédominance des formes HCN/CN^- et éventuellement des réactions permises ou non).

Les analyses habituelles demandées par le LES aux laboratoires telles que les mesures de DBO, DCO, phosphore, azote total, carbone total, matières en suspensions, indice phénolique, coliformes, coliformes fécaux ou arsenic n'étant pas utile à la détermination des concentrations en cyanures, elles ne seront pas effectuées.

En définitive les paramètres retenus pour les analyses sont : les cyanures totaux, le pH, les nitrates et nitrites, les ions thiocyanate, ainsi que les sulfures, sulfates et sulfites.

3.2.3 Séries d'analyses mises en œuvre

Nous proposons de faire 4 séries d'échantillonnage avec 3 points de prélèvement par série (PP1, RBS et sortie UV).

Série 1 : échantillonnage simple, analysé par Labo A. Le lixiviat est prélevé en PP1, RBS et sortie UV. Les analyses demandées sont les cyanures totaux, le pH, les nitrates et nitrites, les ions thiocyanate, ainsi que les sulfures, sulfates et sulfites.

Série 1 bis : duplicata de la Série 1, analysé par Labo B. Mêmes points d'échantillonnage et mêmes analyses réalisées sur le lixiviat.

Série 2 : échantillons + Ajout d'acide sulfamique, analysé par Labo A. Mêmes points d'échantillonnage et mêmes analyses réalisées sur le lixiviat.

Série 3 : Témoin : échantillon + cyanure de sodium en quantité connue, analysé par Labo A. Mêmes points d'échantillonnage et mêmes analyses réalisées sur le lixiviat.

Le principe de ces analyses est de mettre en évidence une différence entre les concentrations en cyanure mesurées dans les séries 1 et 1 bis et celles mesurées dans la série 2, lorsque l'ajout d'acide sulfamique est supposé bloquer la formation de cyanure durant la distillation. La série 3 servira de contrôle, pour vérifier et étalonner la capacité de mesure du cyanure du laboratoire d'analyses.

Transport et stockage :

Suite à l'échantillonnage effectué le 11 Juillet 2005 sur le LES de Saint-Étienne des-Grès, avec l'ajout sur place dans les locaux du laboratoire de la RGMRM de l'acide sulfamique dans la série 2 et du cyanure de sodium dans la série 3, les séries 1,2 et 3 sont expédiées à Labo A, la série 1 bis à Labo B. Le stockage lors du transport se fait à l'obscurité, au frais (4 à 10°C) dans des contenants isothermes (recommandations de stockage préconisées dans le « *Standard method for the examination of water and wastewater* » (5)). Les échantillons sont réceptionnés par les laboratoires le lendemain.

3.3 RÉSULTATS

3.3.1 Remarques préliminaires concernant la précision des mesures effectuées sur le terrain

- Le matériel disponible sur le terrain pour la pesée des réactifs à la RGMRM est une balance de précision sensible au 1/100^{ème} de gramme (affichage : 0,00 g). L'erreur relative pour la pesée des réactifs est donc de 0,005 g soit 5 milligrammes. Dans les tableaux de résultats, cette incertitude de mesure sera rappelée par le signe : **+/- 5 mg**.
- Lors d'essai, l'erreur relative a été de 7,6% à une concentration en cyanure de 0,08 mg/L (méthode d'analyse MA 300 – CN 1.1, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec).
- Lors d'essai, la méthode de dosage des nitrates/nitrites donne une erreur relative maximale de 10% pour une concentration en nitrate nitrite de 0,15 mg/L et 11% pour une concentration en nitrates/nitrites de 26,54 mg/kg de déchet solide (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, méthodes MA. 303 - NO3 1.0 et MA. 205 - NO3 1.0).
- L'ajout d'acide sulfamique par LABO B dans la Série 2 n'avait pas été spécifié lors de l'envoi des échantillons au laboratoire. Cette initiative nous empêchera de réaliser des comparaisons initialement souhaitées, mais sera en accord *in fine* avec nos conclusions.

3.3.2 Résultats des séries d'analyses mises en oeuvre

Les résultats officiels sont émis le 8 Août 2005 pour Labo A et le 10 Août 2005 pour Labo B. Ils sont reçus à la RGMRM le 12 Août 2005 avant d'être transmis à l'UQTR le 16 et le 18 Août 2005.

Les quatre tableaux suivants (TABLEAUX 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) présentent une synthèse des résultats d'analyses chimiques obtenus par série.

TABLEAU 3.3
Résultats Série 1 (Normal Labo A)

Série 1			
Point d'échantillonnage			
Paramètres	PP1	RBS	Sortie UV
Cyanures totaux ([CN ⁻] en mg/L)	0,04	0,86	0,46
Nitrates et Nitrites ([NO ₂ ⁻] et [NO ₃ ⁻] en mg/L)	0,21	150	39
Thiocyanates ([SCN ⁻] en mg/L)	1,2	1,2	0,08
Sulfates ([SO ₄ ²⁻] en mg/L)	<0,5	90	97
Sulfites ([SO ₃ ⁻] mg/L)	25	<2	<2
Sulfures ([H ₂ S] en mg/L)	0,95	<0,02	<0,02
pH du lixiviat	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Date de prélèvement : 11 Juillet 2005, analysé par Labo A			

TABLEAU 3.4
Résultats Série 1 bis (Normal Labo B)

Série 1 bis			
Point d'échantillonnage			
Paramètres	PP1	RBS	Sortie UV
Cyanures totaux ([CN ⁻] en mg/L)	<0,02*	<0,02*	<0,02*
Nitrates et Nitrites ([NO ₂ ⁻] et [NO ₃ ⁻] en mg/L)	0,11	148	40,3
Thiocyanates ([SCN ⁻] en mg/L)	1	0,89	1,1
Sulfates ([SO ₄ ²⁻] en mg/L)	<20	69	88
Sulfites ([SO ₃ ⁻] mg/L)	15	<2	<2
Sulfures ([H ₂ S] en mg/L)	4	0,1	<0,02
pH du lixiviat	7,7	8	8,1
* Ajout d'acide sulfamique (NH ₂ SO ₃ H) lors de la distillation (par Labo B)			
Date de prélèvement : 11 Juillet 2005, analysé par Labo B			

TABLEAU 3.5
Résultats Série 2 (avec acide sulfamique)

Série 2			
Point d'échantillonnage			
Paramètres	PP1	RBS	Sortie UV
Cyanures totaux ([CN ⁻] en mg/L)	0,03*	0,02*	<0,006*
Nitrates et Nitrites ([NO ₂ ⁻] et [NO ₃ ⁻] en mg/L)	0,21	150	46
Thiocyanates ([SCN ⁻] en mg/L)	1,9	1,7	1,1
Sulfates ([SO ₄ ²⁻] en mg/L)	<0,5	73	81
Sulfites ([SO ₃ ⁻] mg/L)	13	<2	<2
Sulfures ([H ₂ S] en mg/L)	1	<0,02	<0,02
pH du lixiviat	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Ajout d'acide sulfamique (NH ₂ SO ₃ H) avant la distillation dans tous les échantillons par B. Cause: 440 mg/L (i.e. 2 moles NH ₂ SO ₃ H/mole de NO ₂ ⁻ -NO ₃ ⁻ avec hypothèse de calcul [nitrates-nitrites] = 100 mg/L) (+/- 5 mg/L)			
* Ajout d'acide sulfamique (NH ₂ SO ₃ H) avant la distillation par B. Cause : 900 mg/L (+/- 5 mg/L)			
Date de prélèvement : 11 Juillet 2005, analysé par Labo A			

TABLEAU 3.6
Résultats Série 3 (avec ajout de cyanure)

Série 3			
Point d'échantillonnage			
Paramètres	PP1	RBS	Sortie UV
Cyanures totaux ($[\text{CN}^-]$ en mg/L)	50*	66**	130****
Nitrates et Nitrites ($[\text{NO}_2^-]$ et $[\text{NO}_3^-]$ en mg/L)	0,13***	150***	37****
Thiocyanates ($[\text{SCN}^-]$ en mg/L)	1,3	1,9	0,88
Sulfates ($[\text{SO}_4^{2-}]$ en mg/L)	<0,5	71	100
Sulfites ($[\text{SO}_3^-]$ mg/L)	13	<2	<2
Sulfures ($[\text{H}_2\text{S}]$ en mg/L)	0,98	<0,02	<0,02
pH du lixiviat	non mesuré	non mesuré	non mesuré
* Ajout de cyanure (de sodium) avant la distillation par B. Cause : 55 mg/L de CN (+/- 5 mg/L)			
** Ajout de cyanure (de sodium) avant la distillation par B. Cause : 60 mg/L de CN (+/- 5 mg/L)			
*** Ajout de cyanure (de sodium) avant la distillation par B. Cause : 75 mg/L de CN (+/- 5 mg/L)			
**** Ajout de cyanure (de sodium) avant la distillation par B. Cause : 134 mg/L de CN (+/- 5 mg/L)			
Date de prélèvement : 11 Juillet 2005, analysé par Labo A			

3.4 DISCUSSION

Les résultats présentés à la section précédente (TABLEAUX 3.3, 3.4, 3.5, et 3.6) prouvent que les eaux de lixiviations du LES de Saint-Étienne-des-Grès ne contiennent pas de quantité significative de cyanure. Nous montrerons dans la présente section en quoi ces résultats démontrent que les alertes signalées en cyanure étaient en réalité des faux positifs dus à des réactions survenues lors du dosage de CN, en aval du circuit hydraulique du LES.

Les points importants du raisonnement sont les suivants :

- Étalonnage des mesures de cyanure avec les échantillons témoins de la Série 3 :

Les premiers résultats à vérifier sont ceux de la Série 3. En effet, cette série d'analyses est un témoin permettant de mettre en évidence la fiabilité des laboratoires d'analyse quant aux mesures des cyanures totaux.

Les résultats d'analyse pour les cyanures totaux de la Série 3 (première ligne de chiffre du TABLEAU 3.6) sont comparables aux cyanures initialement introduits dans l'échantillon, en prenant en compte l'incertitude de mesure (+/- 5 mg) :

En PP1, RBS et UV, on mesure respectivement 50, 66 et 130 mg[CN]/L lorsque l'on a introduit 55, 60 et 134 mg[CN]/L. L'erreur relative de mesure étant elle de 7,6%, on peut affirmer que les mesures de cyanure de Labo A pour la Série 3, correspondent au cyanure initialement ajouté dans les échantillons.

Les méthodes de dosage du cyanure semblent donc fiables, puisque **lorsque nous ajoutons du cyanure dans les échantillons, il est effectivement mesuré lors des analyses.**

- L'ajout de cyanure ou d'acide sulfamique ne modifie pas les concentrations en nitrates/nitrites :

Rappelons les résultats suivants :

	PP1	RBS	UV
Nitrates/Nitrites Série 1 (en mg/L)	0,21	150	39
Nitrates/Nitrites Série 1 bis (en mg/L)	0,11	148	40,3
Nitrates/Nitrites Série 2 (en mg/L)	0,21	150	46
Nitrates/Nitrites Série 3 (en mg/L)	0,13	150	37
Valeur moyenne	0,165	149,5	40,575
Ecart relatif moyen à la moyenne en %	24	1	2

La variation de mesure de $[\text{NO}_3/\text{NO}_2]$ entre les différentes séries pour des concentrations de l'ordre de 40 à 150 mg/L est très faible : moins de 2%. Exceptées les valeurs inférieures à 0,21 mg/L, les valeurs en nitrates/nitrites restent les mêmes dans toutes les séries ; or nous avons ajouté de l'acide sulfamique dans les échantillons de la Série 2 et du cyanure dans ceux de la Série 3. Nous pouvons donc conclure que **les ajouts de cyanure et d'acide sulfamique ne modifient pas la concentration en nitrates/nitrites.**

Pour les valeurs de $[\text{NO}_3/\text{NO}_2]$ faibles ($<0,21$ mg/L), les résultats sont moins probants, puisqu'à l'approche de la limite de détection (0,006 mg de CN/L pour Labo A) des nitrates/nitrites, les variations relatives sont plus grandes (de 0,11 mg/L à 0,21 mg/L). Toutefois, l'ordre de grandeur des concentrations en nitrates/nitrites ne varie pas : dans les quatre séries nous restons dans la gamme de 0,1 à 0,2 mg/L et c'est ce qu'il importait de vérifier.

➤ L'ajout d'acide sulfamique ne détruit pas le cyanure :

Pour valider totalement la méthode avec ajout d'acide sulfamique, il convient d'établir avec certitude que l'acide sulfamique ne détruit pas le cyanure. Pour s'affranchir des interactions impliquant les nitrites, il faut étudier un échantillon ne contenant aucun nitrates/nitrites. Sur le terrain, nous ne pouvons qu'approcher cette situation puisque les nitrates/nitrites sont toujours présents dans tous les échantillons.

La méthode a été validée en laboratoire sur des échantillons ne contenant pas de nitrates/nitrites. Cette validation a été faite par Rapean *et al.*(10). La méthode est d'ailleurs largement reconnue par la communauté scientifique, puisqu'elle est suggérée dans le « *Standard methods for the examination of water and wastewater* » (5,6) depuis plus de vingt-cinq ans.

TABLEAU 3.7

Effet de l'ajout d'acide sulfamique et nitrites sur le recouvrement de la mesure du cyanure (d'après Rapean *et al.*).

	[CN] _{initiale}	[CN] _{mesurée} (mg/L)	
		Echantillon	Echantillon + 100 mg(NH ₂ SO ₃ H/L) + 20 mg(NO ₂ /L)
Série 1	0,08	0,078	0,083
Série 2	0,08	0,081	0,079

Le TABLEAU 3.7 montre les résultats importants obtenus par Rapean *et al.* Après injection d'une quantité connue de cyanure dans des échantillons, on mesure le cyanure expérimentalement. Les résultats obtenus sont comparés

avec la mesure de cyanure dans l'échantillon supplémenté d'acide sulfamique et de nitrites. Les résultats sont très proches (coefficient de variation de 3%). Les mesures de cyanures ne sont donc pas perturbées par les ajouts d'acide sulfamique et de nitrites.

L'ajout d'acide sulfamique ne détruit pas les cyanures. De plus, l'acide sulfamique ne détruit pas les cyanures en présences de nitrites.

➤ Le taux constant de thiocyanate indique que les réactions secondaires parasites suivantes n'ont pas eu lieu : $\text{CN}^- \rightarrow \text{SCN}^-$ via rhodanèse et $\text{SCN}^- + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{CN}^-$ via distillation. Les composés soufrés ne changeant donc pas le bilan de matière en cyanure puisqu'il n'y a pas consommation ni production de thiocyanate. Ainsi, **les seules transformations du cyanure connues possibles chimiquement ne peuvent faire intervenir que les nitrates/nitrites.**

➤ La transformation des nitrates/nitrites en cyanure se produit lors de la distillation :

Les données de la Série 1 sont retranscrites dans la FIGURE 3.3. Elles mettent en évidence une **corrélation positive entre les concentrations en nitrites et en cyanure :**

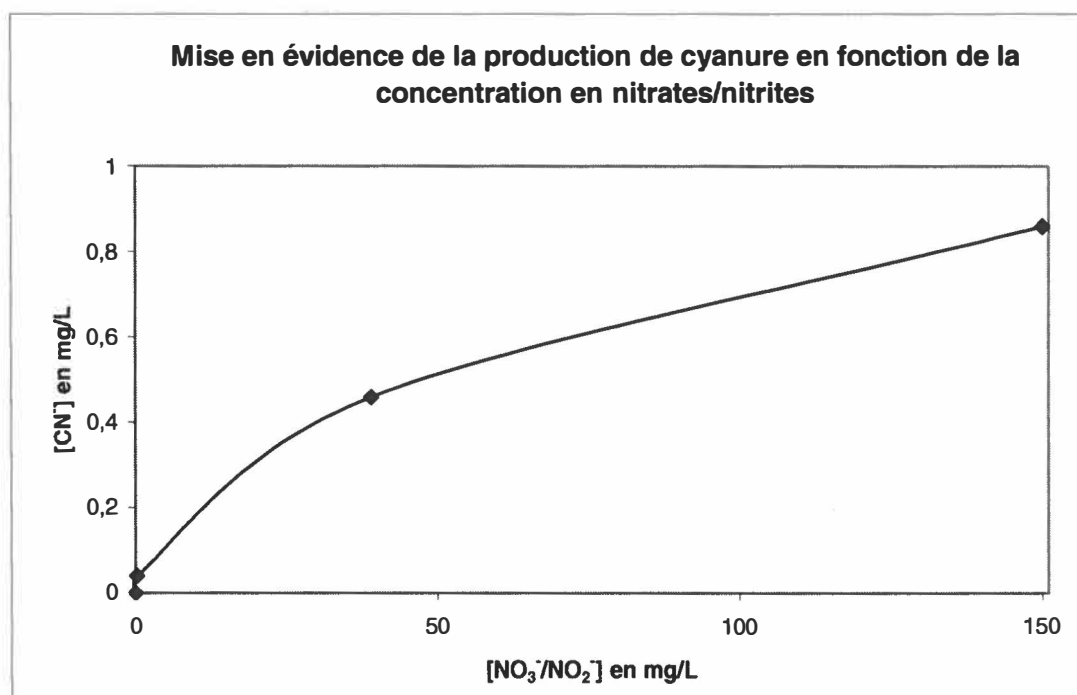


FIGURE 3.3 : Mise en évidence de la production de cyanure en fonction de la concentration en nitrates/nitrites.

Ces résultats nous montrent que les nitrates/nitrites sont impliqués comme source d'azote dans la formation du cyanure pendant la distillation préalable au dosage. Notons que la formation d'une mole de cyanure nécessite environ 80 moles de nitrites.

Ce graphique de la FIGURE 3.3, effectué avec les échantillons de terrain, est en parfaite concordance avec les résultats de laboratoire de Rapean *et al.* (10) déjà mentionnés dans la partie 2 du présent document (cf. FIGURE 2.7 p.39).

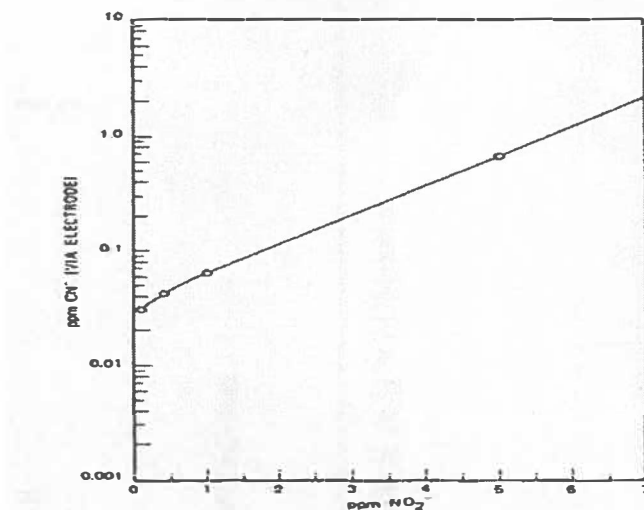


FIGURE 3.4 : Rappel de la FIGURE 2.7 : $[CN]=f[NO_2]$ d'après Rapean *et al.*

D'autre part, rappelons les variations de concentrations en nitrates/nitrites survenant dans le lixiviat tout au long de son parcours dans l'usine de traitement des eaux usées :

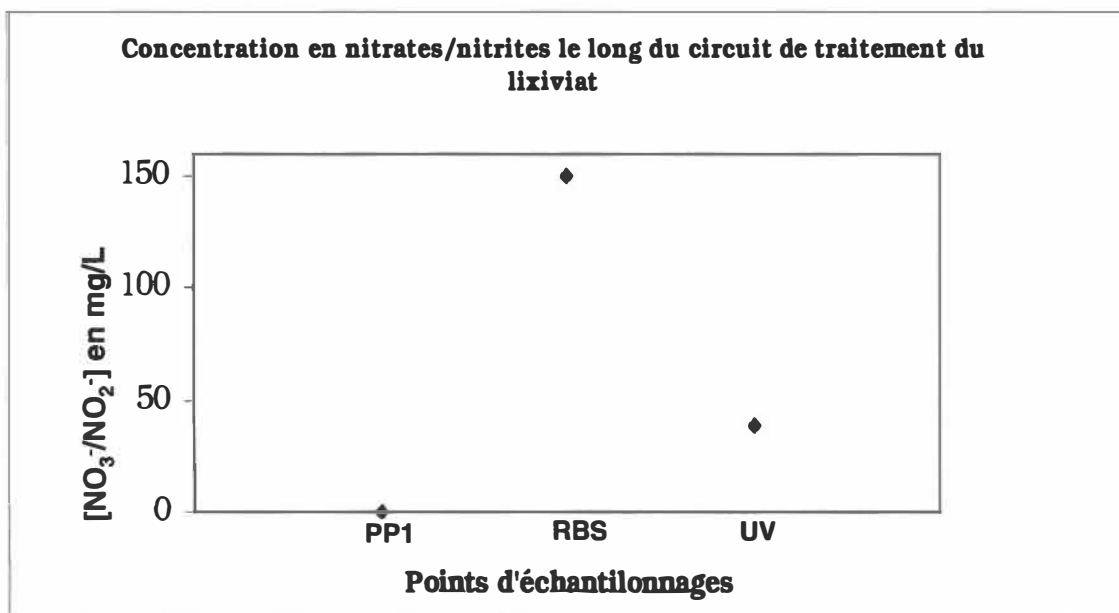


FIGURE 3.5 : Concentrations en nitrates/nitrites le long du circuit de traitement du lixiviat (moyenne des 4 Séries).

Initialement, le lixiviat est très pauvre en nitrates/nitrites ($<0,21$ mg/L), puis il se charge en $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$ dans le RBS pour atteindre un taux de 150 mg/L. Cette production importante est due à l'activité bactérienne aérobie qui termine chaque cycle du RBS. Les ammoniums (NH_4^+) produits lors de la fermentation anaérobie sont oxydés successivement en nitrite (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) par des souches bactérienne du type *Nitrosomonas* puis *Nitrobacter*. Enfin, la concentration en nitrates/nitrites diminue dans l'étang de polissage et n'est plus qu'à 50 mg/L en sortie du système de désinfection UV car il n'y a plus de production de nitrates/nitrites à ce niveau.

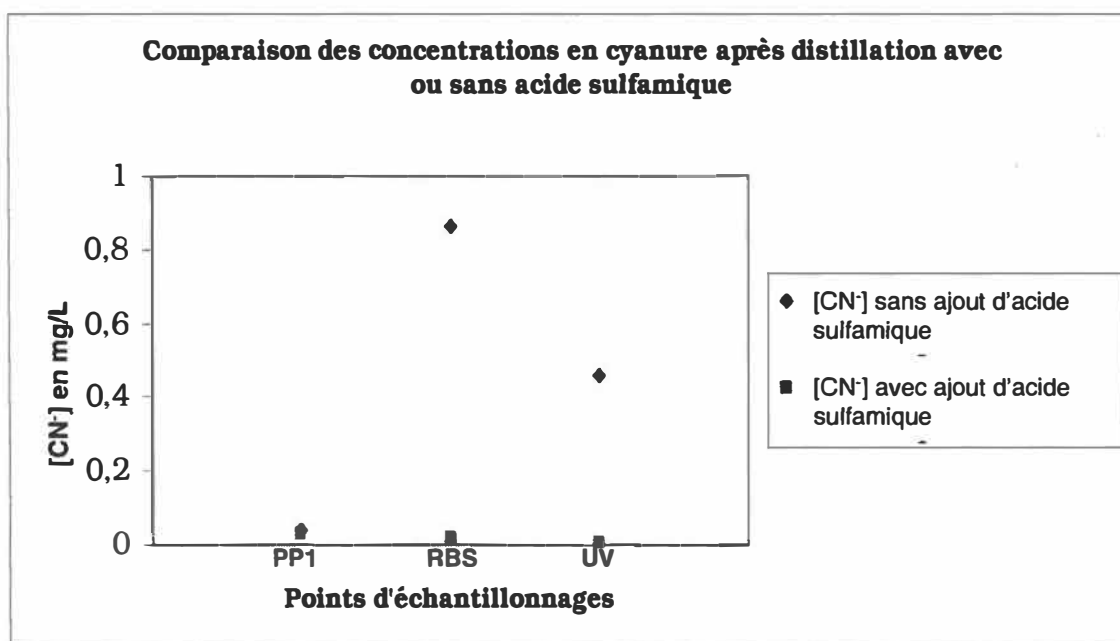


FIGURE 3.6 : Effet d'un ajout d'acide sulfamique sur les concentrations en $[\text{CN}^-]$ mesurées dans le lixiviat.

La première série de mesures (losanges bleus) donne la concentration en cyanure dans le circuit de traitement du lixiviat pour les échantillons sans ajout d'acide sulfamique ou de NaCN (Série 1). **Les concentrations en cyanure (FIGURE 3.6 losanges bleus) suivent le même type de comportement que les concentrations en nitrates/nitrites (FIGURE 3.5 losanges bleus) :** le long du circuit de traitement du lixiviat on trouve une faible concentration initiale (0,04

mg de CN^- /L dans le PP1), un pic de concentration dans le RBS (0,86 mg de CN^- /L), puis une diminution de la concentration en cyanure en sortie UV (0,46 CN^- mg/L).

La deuxième série de mesures (FIGURE 3.6 carrés roses) donne la concentration cyanure dans le milieu lorsqu'on ajoute de l'acide sulfamique dans les échantillons. Pour le premier point de mesure (PP1) la différence observée entre les deux séries est minime. Par contre, en RBS et sortie UV, la concentration en cyanure mesurée reste pratiquement nulle.

➤ Interprétation

Comme mentionné à la section 2.1.3.a : **les nitrates/nitrites réagissent avec les composés organiques présents de le lixiviat pour former des cyanures lors de la distillation précédant le dosage des CN**. C'est ce que nous avons mis en évidence (FIGURE 3.3) avec la corrélation positive entre $[\text{CN}^-]$ et $[\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-]$ ainsi qu'avec la comparaison des FIGURE 3.5 et 3.6 (allure semblable des pics de concentration pour le cyanure et les nitrates/nitrites). Les cyanures mesurés dans la Série 1 en RBS et en sortie UV sont donc de « faux positifs ».

L'acide sulfamique ajouté dans la Série 2 (FIGURE 3.6 carrés roses) a permis de neutraliser les quantités importantes de nitrates/nitrites présentes dans le RBS et la sortie UV (selon la réaction [2.13b] cf. p. 40). Par conséquent, les concentrations en cyanure mesurées en RBS et sortie UV diminuent fortement pour être pratiquement nulles ($<0,02$ mg/L). **Ces résultats (Série 2, cf. TABLEAU 3.5) donnent donc les valeurs réelles des cyanures dans le lixiviat. Ces valeurs sont inférieures à la limite légale tolérée de 0,1 mg/L : il n'y a donc pas de contamination en cyanure du lixiviat.**

La comparaison des concentrations en cyanure de la Série 1 (Labo A) (cf. TABLEAU 3.3) et de la Série 1 bis (Labo B avec ajout d'acide sulfamique) (cf. TABLEAU 3.4) confirme une nouvelle fois cette interprétation.

En définitive, nous avons donc montré que notre Hypothèse 3 (cf. section 3.1.3) était valable. La FIGURE 3.7 résume donc bien le scénario réel qui s'est déroulé sur le site et a conduit à de fausses mesures indiquant un taux en cyanures trop élevé.

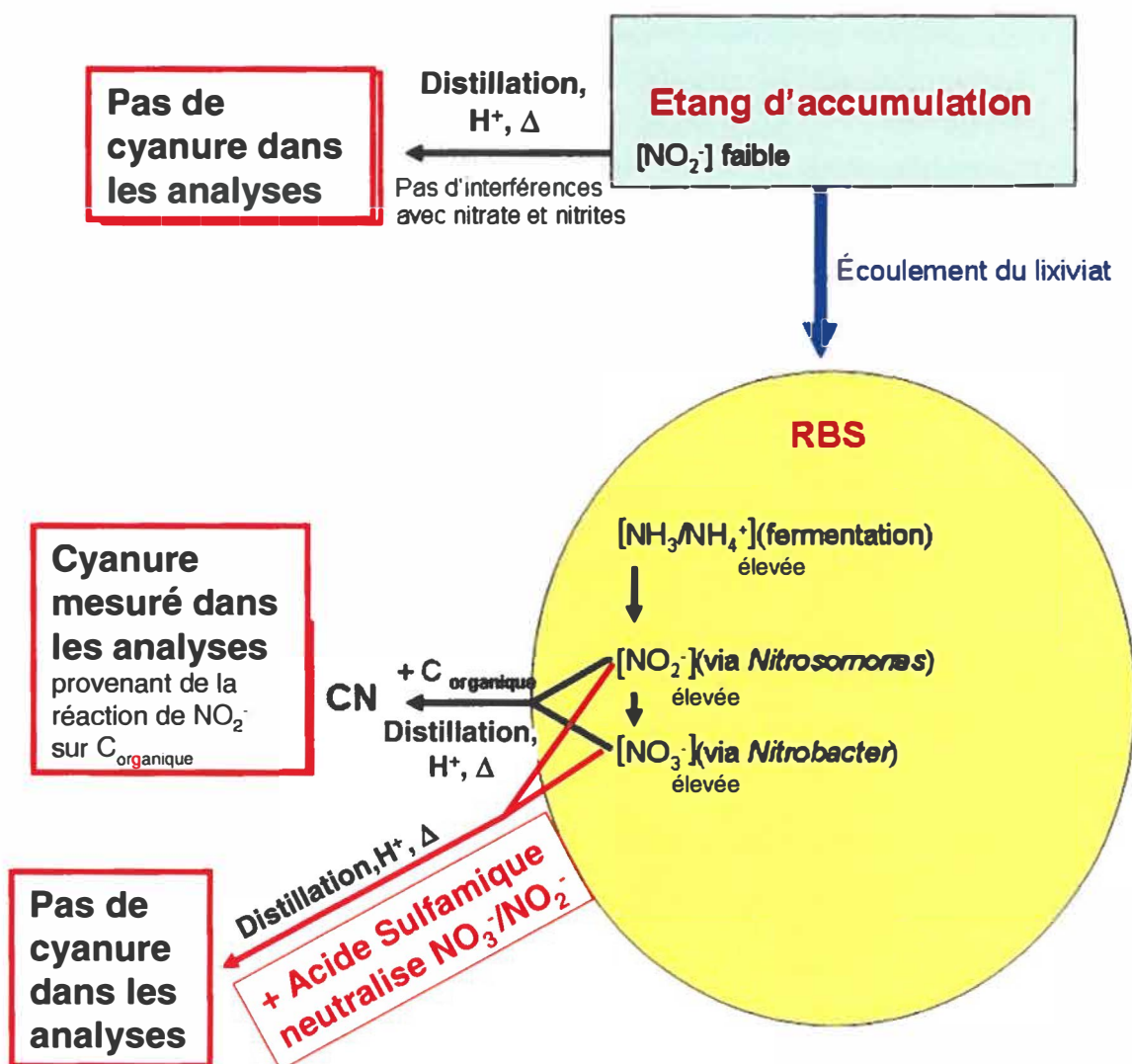


FIGURE 3.7 : Schéma du scénario réel.

➤ Résumé

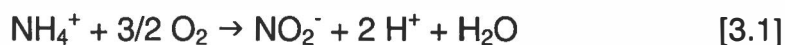
Pour le PP1, le taux de nitrates et nitrites est faible, les analyses ne révèlent pas de contamination en cyanure. Pour le RBS et la sortie UV, le taux de cyanure mesuré est très élevé : le cyanure est produit par réaction des nitrates et nitrites sur les composés organiques du lixiviat lors des analyses chimiques (pendant la distillation). Les nitrates et nitrites sont produits dans le RBS lors de la nitrification aérobie de l'ammoniac. Un ajout de 2 à 4 moles d'acide sulfurique avant la distillation permet de neutraliser les nitrates/nitrites et d'éviter la réaction parasite lors de la distillation. La valeur réelle du taux de cyanure dans le lixiviat peut alors être déterminée. Cette valeur est inférieure à la norme légale (0,1 mg/L) stipulée dans le règlement sur les déchets solides.

3.5 PERSPECTIVES

3.5.1 Les transformations de l'azote dans le RBS

La composition des eaux en sortie du RBS montre une forte concentration en ions nitrates et nitrites (de l'ordre de 150 mg/L, cf. TABLEAUX 3.3, 3.4, 3.5 et 3.6). La dernière séquence du RBS (cf. section 1.3.3) est une phase aérobie. Les formes oxydées de l'azote sont alors obtenues par nitrification des ammoniums. Cette nitrification se déroule en deux étapes par des microorganismes spécialisés:

- La nitrosation (réaction [3.1]): réalisée par des bactéries nitreuses ou nitrosantes (*Nitrosomonas*, *Nitrospira*)



- La nitratisation (réaction [3.2]): réalisée par les bactéries nitriques ou nitratantes (*Nitrobacter*)



Les RBS ont pour but de dégrader la matière organique des eaux de lixiviation. L'alternance de phase aérobie et anaérobie permet de jouer sur le cycle de l'azote (40) et d'éliminer une partie de la matière organique azotée via la dénitrification: étape de relargage de l'azote nitreux liquides en diazote atmosphérique gazeux (cf. FIGURE 3.8).

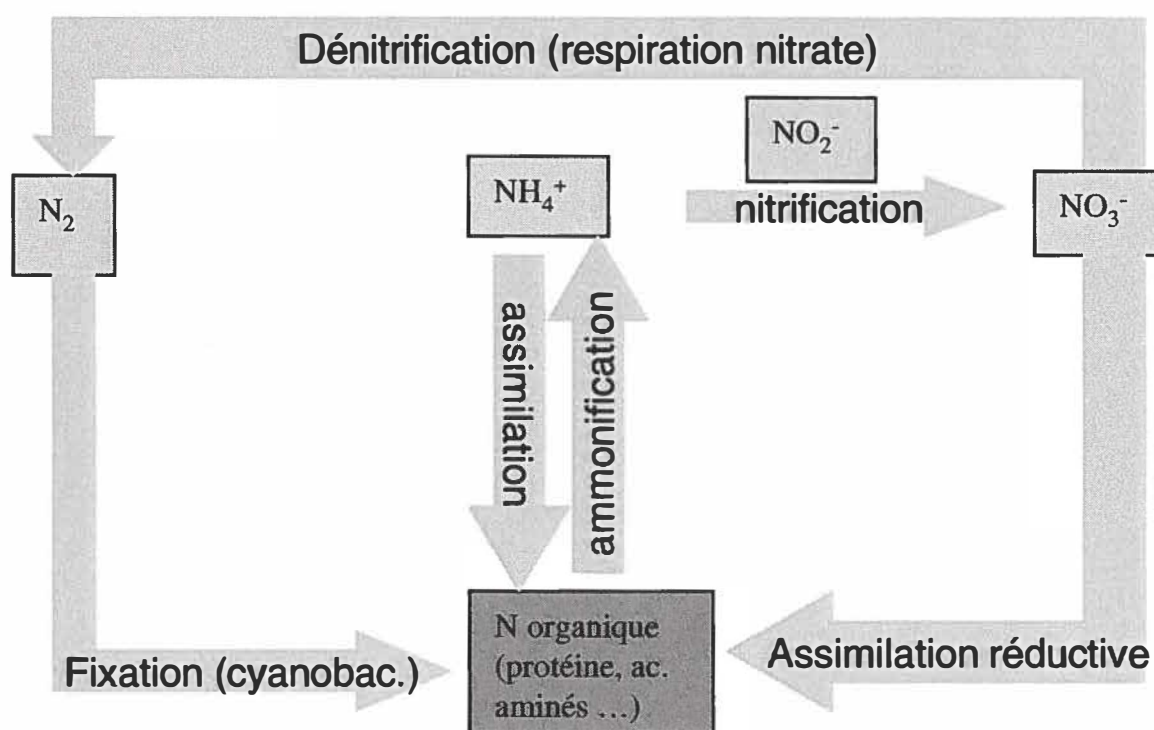
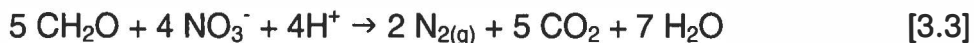


FIGURE 3.8 : Cycle de l'azote (d'après Sigg *et al.*).

L'étape de dénitrification (ou « respiration nitrate ») est assurée par des microorganismes non spécifiques (*Bacillus*, *Pseudomonas*...) qui utilisent l'oxygène des nitrates pour métaboliser les sucres en dioxyde de carbone selon le bilan [3.3] :



Puisque l'objectif d'un RBS est de stimuler la décomposition de l'azote organique, on convient qu'à la fin d'un cycle on veuille obtenir le plus possible de N_2 , NH_4^+ et NO_3^- qui sont des formes inorganiques de l'azote. La pression partielle atmosphérique en N_2 étant élevée ($P_{\text{N}_2} = x_{\text{N}_2} * P_{\text{tot}} = 0,78 \text{ atm}$), la réaction de dénitrification reste limitée. Reste à choisir entre NH_4^+ et NO_3^- comme forme d'azote à relarguer dans les eaux environnementales. L'ammoniac (NH_3) étant plus toxique que les nitrates, on privilégie la séquence de nitrification comme séquence finale du RBS et donc, on produit des nitrates en sortie du RBS.

Remarque : En larguant des nitrates en sortie du RBS plutôt que des ammoniums on maximise au passage la dénitrification. En effet, la respiration nitrate ne peut se faire qu'à partir des nitrates en milieu strictement aérobie, et non directement à partir des ammoniums.

Nous venons ici de justifier le fonctionnement séquentiel des RBS. Nous avons montré qu'il convient de finir un cycle de traitement biologique des eaux usées par une nitrification. Par conséquent, la composition standard des eaux en sortie des RBS sera toujours riche en formes oxydées de l'azote, c'est-à-dire riche en nitrates et nitrites.

3.5.2 Conséquences sur les méthodes d'analyses des eaux du RBS

Nous avons vu qu'en sortie du RBS, les effluents ont une concentration élevée en nitrates et nitrites. Or le lixiviat du RBS est riche en matière organiques (acides gras, acides aminés, acides nucléiques, sucres). Les réactifs réunis (carbone organique et nitrites) sont générateurs de cyanures à haute

température et pH acide, selon la réaction [2.13] déjà mentionnée à la section 2.1.3.a :



Lors du dosage des cyanures, on cherchera à éviter que cette réaction ait lieu, puisqu'elle va engendrer une surestimation des cyanures réellement présents dans l'échantillon à doser. C'est pourquoi il convient de neutraliser les nitrites par un ajout d'acide sulfamique avant ou pendant la distillation préalable au dosage des cyanures totaux.

Par une lettre officielle à l'attention du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, nous invitons le gouvernement à faire clairement appliquer au laboratoire le protocole d'analyse MA 300 – CN 1.1 (8) éditée par le centre en analyse environnementale du Québec ainsi que d'y apporter une amélioration dans la section concernant les interférences (section 3.1. *INTERFÉRENCE de la MA 300 – CN 1.1*). Cette méthode, indiquant l'ajout d'acide sulfamique dans les échantillons avant la mesure des cyanures totaux permet d'éviter les interférences avec les nitrites. Les extraits de la norme MA 300 – CN 1.1 suivant montre que le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec impose une méthode d'analyse adéquate, avec ajout d'acide sulfamique (terme en gras et italique ci-après) lors de la distillation :

« 6. RÉACTIFS ET ÉTALONS

Tous les réactifs commerciaux utilisés sont de qualité A.C.S., à moins d'avis contraire. L'eau utilisée pour la préparation des réactifs et des étalons est de l'eau distillée ou déminéralisée.

[...]

Réactifs pour distillation

6.1. Acide chlorhydrique, HCl (CAS no 7647-01-0)

6.2. *Acide sulfurique, H₂SO₄ (pour la détermination des cyanures totaux seulement)*

(CAS no 7664-93-9)

[...]

6.11. Acide sulfamique (pour la détermination des cyanures totaux dans les liquides)

(CAS no 5329-14-6)

[...]

7. PROTOCOLE D'ANALYSE

[...]

7.2.4. *Détermination des cyanures totaux (autres que ceux provenant d'effluents miniers)*

[...]

– Pour les échantillons liquides, ajouter 0,4 g d'acide sulfamique (cf. 6.11) dans le ballon de distillation, verser 50 ml d'échantillon liquide et ajouter de l'eau pour obtenir un volume de 200 ml dans le ballon et ouvrir la bombonne d'azote.»

Bien que la méthode officielle impose l'ajout d'acide sulfamique avant la distillation, le présent travail effectué sur le LES de Saint-Étienne-des-Grès a montré que la méthode MA 300 – CN 1.1 (8) n'est pas toujours utilisée par les laboratoires d'analyse accrédités par le MDDEP. Il existe donc un décalage entre la norme officielle MA 300 – CN 1.1 et le protocole de distillation employé par certains laboratoires d'analyse (Labo A, Labo B avant 2005). Le MDDEP doit se poser la question de savoir pourquoi la méthode à l'acide sulfamique n'a pas toujours été employée ? Une première réponse est à apporter en améliorant la norme MA 300 – CN 1.1, qui, bien qu'évoquant l'utilisation d'acide sulfamique, n'évoque aucunement les interférences dues aux nitrites. C'est au MDDEP de prendre les mesures nécessaires à l'application de la méthode MA 300 – CN 1.1, notamment en mettant en garde les laboratoires d'analyse sur le risque élevé d'interférences dues aux nitrites dans les eaux de lixiviations des LES. Pour éveiller l'attention des laboratoires à ce problème, je propose de réactualiser la norme MA 300 – CN 1.1 en y ajoutant un cours paragraphe relatif

aux interférences dues aux nitrites lors du dosage des cyanures totaux. Alors que la composition standard des eaux de lixiviation en sortie des RBS, riche en nitrites, justifie l'ajout d'acide sulfamique lors de la distillation préalable au dosage, il apparaît opportun de rappeler ces risques de réactions parasites dues aux nitrites à la section *3.1 Interférences* du document MA 300 –CN 1.1. Je propose donc l'amélioration suivante (en caractère gras italique ci-après) :

« 3.1. INTERFÉRENCE La plupart des interférences sont éliminées lors de la distillation et l'interférence causée par les sulfures est éliminée par l'ajout de CdCl₂ dans la fiole contenant le distillat. Toutefois, une interférence majeure avec les nitrites peut se produire pendant la distillation pour des concentrations en [NO₂⁻] > 1 mg/L. En particulier, le lixiviat des Réacteurs Biologiques Séquentiels relargue des eaux riches en nitrites. Il y a risque de formation de cyanure in situ lors de la distillation via réaction des nitrites sur la matière organique de l'échantillon. Pour neutraliser l'interférence Il convient d'utiliser la méthode à l'acide sulfamique mentionnée ci-après à la section 7.2.4.. ».

Outre l'intérêt de rappeler les interférences causées par les nitrites lors du dosage des cyanures, la révision de la méthode MA 300 – CN 1.1 permettra d'obliger les laboratoires d'analyse accrédités par le MDDEP à prendre connaissance de la nouvelle version de la méthode. Ils s'y verront rappeler en termes clairs le risque d'interférences du aux nitrites, en particuliers dans les effluents des RBS provenant des LES.

Nous avons rédigé une lettre adressée au MDDEP, destinée à alerter le ministère sur ce problème et à prendre les mesures (information, révision de la méthode, sanctions aux laboratoires n'appliquant pas les nouvelles recommandations...) nécessaires à la mise en place d'un suivi efficace de la qualité des eaux usées dans les LES du Québec.

CONCLUSION

Le problème posé était a priori complexe : nous devions localiser la source de contamination en cyanure dans le lixiviat du Lieu d'Enfouissement Sanitaire de St-Étienne-des-Grès. Les possibilités étaient multiples, et c'est une approche par investigations systématiques et rigoureuses qui nous a permis de cibler notre problème et d'en localiser la source.

Dans un premier temps, nous avons décrit le fonctionnement du LES pour localiser les différents organes du site et comprendre leurs rôles. Nous avons ensuite fait une étude exhaustive de la littérature scientifique concernant le comportement du cyanure dans l'environnement. Ce tour d'horizon chimique et biochimique sur les transformations du cyanure nous a amenés à proposer différentes hypothèses définissant la cause de la contamination observée. Un raisonnement rigoureux et méthodique nous a permis de localiser avec certitude la cause du dysfonctionnement observé en éliminant des méthodes extrêmement coûteuses (cf. proposition d'installation du système à l'ozone : 1 000 000 \$CA).

Nos conclusions montrent que le cyanure ne contamine pas réellement le lixiviat du LES. Le cyanure est formé lors des analyses en laboratoire par réactions des azotes oxydants (nitrites) sur les composés organiques présents dans le lixiviat (acides aminés, acides gras...). Un ajout d'acide sulfamique préalable à la distillation neutralise les nitrites et la réaction parasite précédente n'a donc pas lieu. Les cyanures alors mesurés sont les cyanures réellement présents dans les eaux de lixiviation. Les valeurs numériques donnent des résultats maximums de 0,03 mg/L, ce qui est bien inférieur à la limite légale tolérée de 0,1 mg/L (règlement sur les déchets solides).

En définitive, le cyanure ne contamine pas le lixiviat du LES de Saint-Étienne-des-Grès.

Suite à ces résultats, il convient de proposer des méthodes de gestion efficaces à M. Robert Comeau, directeur générale de la RGMRM, gestionnaire du LES.

Puisque le RBS est un générateur de nitrates/nitrites, la méthode à l'acide sulfamique se justifie pour les échantillonnages dans le RBS ou en aval du RBS. Il convient de toujours ajouter 2 à 3 moles d'acide sulfamique par mole de nitrite pour neutraliser la formation de cyanures supplémentaires lors de la distillation. Cet ajout peut se faire manuellement par un technicien en chimie, mais nécessite des calculs préalables fastidieux et variables en fonction du volume des pots fournis par chaque laboratoire d'analyse. Tout laboratoire d'analyse pourra plus simplement effectuer cette tâche. Dans une correspondance privée à l'attention de M. Comeau, le directeur du laboratoire Labo A évoquait la possibilité d'une distillation manuelle à l'acide sulfamique. Une telle demande spécifique doit être mentionnée lors de la remise des échantillons au laboratoire d'analyse. Cependant, j'incite M. Comeau à confier ses analyses futures au laboratoire Labo B qui avait pris l'initiative spontanée d'utiliser la méthode à l'acide sulfamique préconisée dans le « *Standard Methods for the examination of Water and Wasterwater* » (5) pour la mesure des cyanures totaux en cas de fortes concentrations en nitrites.

Plus loin, en réponse au Ministère de l'Environnement et du Développement Durable du Québec (MDDEP), concernant le faux positif au cyanure observé sur le site de Saint-Étienne-des-Grès, il convient de faire prendre connaissance des présentes conclusions au Centre d'Expertise en Analyse Environnementales du Québec (organisme spécifiant les méthodes d'analyses accréditées par le MDDEP). En effet, le cas de la RGMRM n'est pas le premier à avoir mis en évidence une fausse contamination en cyanure due à une méthode d'analyse inadaptée à la qualité des eaux. Le LES d'Argentièrre les Deux Montagnes

(Québec, Canada) a été victime du même problème, finalement résolu par l'utilisation d'une méthode à l'acide sulfamique. La génération de nouvelles usines de traitements du lixiviat, utilisant un bioréacteur (du type RBS) pour décontaminer les eaux de lixiviations, fixent une nouvelle composition standard des eaux de lixiviations. Ces eaux sont particulièrement riches en nitrates/nitrites pendant et après leur passage dans le bioréacteur. Il convient donc de systématiser la méthode à l'acide sulfamique pour l'analyse du cyanure dans le lixiviat des usines de traitement des eaux usées.

La méthode « MA 300 – CN 1.1 » éditée par le CEAEQ stipule pourtant l'ajout d'acide sulfamique avant la distillation. Notre étude a donc mis en évidence un disfonctionnement, puisque certains laboratoires accrédités par le ministère ne respectent pas cette méthode d'analyse. Le MDDEP doit donc réagir en invitant les laboratoires à suivre correctement le protocole d'analyse, avec ajout d'acide sulfamique, mentionné à la section 7.2.4 de la MA 300 – CN 1.1. Pour ce faire, je propose au Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec de modifier la méthode MA 300 – CN 1.1 en améliorant la partie sur les interférences. Jusqu'à présent, cette section (3. INTERFERENCE) ne mentionnait pas les problèmes dus aux nitrites. Il convient donc d'actualiser la norme MA 300 – CN 1.1 selon les modalités proposées à la section 3.5.2. En apportant l'amélioration proposée, le MDDEP imposera une nouvelle version de la norme MA 300 – CN 1.1 et imposera alors aux laboratoires accrédités d'en prendre connaissance. Dès lors, un suivi de l'application de la nouvelle norme (informations, sanctions à mettre en place envers les laboratoires ne l'appliquant pas) devrait donner une meilleure transparence et une meilleure lisibilité des résultats d'analyse en cyanure dans les eaux de lixiviation. Ainsi, le MDDEP évitera qu'une série de cas similaires à celui du LES de Saint-Étienne-des-Grès ne vienne perturber le fonctionnement normal du suivi des eaux usées dans les usines de traitement du lixiviat au Québec.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages de références, articles scientifiques, ressource de l'internet répertoriés par ordre d'apparition dans le corps de texte :

1. Périgny, N. (2004) *Evaluation de la Politique de Gestion des Matières Résiduelles 1998-2008*, Séminaire I : Présentation du projet de recherche, Maîtrise en Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Trois-Rivières.
2. Régie de Gestion des Matières Résiduelles de la Mauricie (2002) *Système de traitement des eaux de lixiviation*, LES Saint-Étienne-des-Grès, document interne : Manuel d'opération N. Réf. : 98650-07.
3. Perrin, G. (1992) *Enfouissement sanitaire, traitement du lixiviat, compostage*, Mémoire de DESS, Université Paul Sabatier, Toulouse 3.
4. Carey, F. A., Sundberg R. J. Advanced (1990) Organic Chemistry. Part B : Reactions and Synthesis, 3rd ed. Plenum Press, New-York, U.S.A.
5. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (1995) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th éd., CRC Press LLC, U.S.A., chap. 4, p. 18-35.
6. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (1985) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 16th éd., CRC Press LLC, U.S.A. p. 327-352.

7. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (1975) *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 14th éd., p. 361-887.
8. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2005) *Détermination des cyanures : méthode colorimétrique automatisée avec la pyridine et l'acide barbiturique – distillation manuelle*, Méthode d'analyse MA. 300 – CN 1.1
<http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA300CN11.pdf>
9. Koshimizu, Toshiko, *et al.* (1975) *Formation of cyanide ion by the reaction of amines with nitrite ion. III Reaction of Glycine with Nitrite ion at various pH levels at room temperature*, *Eisei Kagaku*, 21(6), p. 326-329. CA 85:82891h.
10. Rapean J.C., Johnson R.A., Hanson. T.P. (1980) *Biodegradation of cyanide : nitrate interference in the standard test for total cyanide*, *proceedings of industrial waste conference*, vol. 35.
- 10b. Williams, D. L. H. (1978) *Comparison of the efficiencies of ascorbic acid and sulfamic acid as nitrite traps*, *Food and Cosmetics Toxicology*, 16(4), p. 365-367.
11. Casey, J.P. ; J.W. Bright ; B.D. Helms. (1980) *Nitrosation Interference in Distillation Tests for Cyanide*, submitted to publication in *Analytical Chemistry*.
12. Koshimizu, Toshiko (1974) *Formation of cyanide ion by the reaction of amines with nitrite ion. I Formation of Cyanide ion during distillation of the reaction mixture*, *Eisei Kagaku*, 20(6), p. 332-336. CA 83:47802s.

13. Eyjolfsson, R. (1970). *Recent advances in the chemistry of cyanogenic glycosides*. Fortschr. Chem. Org. Naturst. 28, p. 74-108.
14. Conn, E. E. (1973) *Biosynthesis of cyanogenic glycosides*, p. 277-302. In T. W. Goodwin and R. M. S. Smellie (ed.), Nitrogen metabolism in plants, Biochemical Society Symposium, vol. 38. The Biochemical Society, London.
15. Montgomery, R. D. (1969). *Cyanogens*, p. 143-157. In I. E. Liener (ed.), Toxic constituents of plant foodstuffs. Academic Press, Inc., New York.
16. Knowles, C.J. (1976). *Microorganisms and cyanide*, Bacteriological reviews, vol. 40(3), p. 652-680.
17. Bach, E. (1956) *The agaric Pholiota aurea: physiology and ecology*. Dan. Bot. Ark. 16, p. 1-220.
18. von Lsecke, A. (1871) *Zur Chemie und Physiologie des Agaricus oreades*. Bolt. Arch. Pharm. Berlin Ser. 147(2), p.36-39.
19. Locquin, M. (1944) *Dégagement et localisation de l'acide cyanhydrique chez les basidiomycetes et les ascomycetes*. Bull Soc. Linn. Lyon 13, p. 151-157.
20. Lorck, H. (1948) *Production of hydrocyanic acid by bacteria*. Physiol. Plant. 1, p. 142-146.
21. Brysk, M. M., W. A. Corpe, and L. V. Hankes. (1969) *P-Cyanoalanine formation by Chromobacterium violaceum*. J. Bacteriol. 97, p. 322-327.

22. Brysk, M. M., C. Lauinger, and C. Ressler. (1969) *Biosynthesis of cyanide from {2-¹⁴C¹⁵N} glycine in Chromobacterium violaceum*. Biochim. Biophys. Acta 184, p. 583-588.
23. Castric, P. A. (1975) *Hydrogen cyanide, a secondary metabolite of Pseudomonas aeruginosa*. Can. J. Microbiol. 21, p. 613-618.
24. Michaels, R., and W. A. Corpe. (1965) *Cyanide formation by Chromobacterium violaceum*. J. Bacteriol. 89, p. 106-112.
25. Wissing, F. (1975) *Cyanide production from glycine by a homogenate from a Pseudomonas species*. J. Bacteriol. 121, p. 695-699.
26. Michaels, R., L. V. Hankes, and W. A. Corpe. (1965) *Cyanide formation by nonproliferating cells of Chromobacterium violaceum*. Arch. Biochem. Biophys. 111, p. 121-125.
27. Wissing, F. (1974) *Cyanide formation from oxidation of glycine by a Pseudomonas species*. J. Bacteriol. 117, p. 1289-1294.
28. Allen, J., and Strobel, G.A. (1966) *The assimilation of H⁴CN by a variety of fungi*. Can J. of Microbiol. 12, p. 414-416.
29. Strobel, G. A. (1964) *Hydrocyanic acid assimilation by a psychrophilic basidiomycete*. Can. J. Biochem. 42, p. 1637-1639.
30. Blumenthal-Goldschmidt, S., G. W. Butler, and E. E. Conn. (1963) *Incorporation of hydrocyanic acid labeled with carbon-14 into asparagine in seedlings*. Nature (London) 197, p. 718-719.

31. Fowden, L., and E. A. Bell. (1965) *Cyanide metabolism by seedlings*. Nature (London) 206, p. 110-112.
32. Strobel, G. A. (1967) *4-Amino-4-cyanobutyric acid as an intermediate in glutamate biosynthesis*. J. Biol. Chem. 242, p. 3265-3269.
33. Fry, W. E., and R. L. Millar. (1972) *Cyanide degradation by an enzyme from Stemphylium loti*. Arch. Biochem. Biophys. 151, p. 468-474.
34. Quayle, J. R. (1972) *The metabolism of onecarbon compounds by microorganisms*, p. 119-202. In A. H. Rose and D. W. Tempest (ed.), Advances in Microbial Physiology, vol. 7.
35. Dhillon, J.K. and Shivaraman. N. (1999) *Biodegradation of cyanide compounds by a Pseudomonas species (S1)*, Can. J. Microbiol., 45, p. 201-208.
36. Yon-Kahn, J. et Hervé, G. (2005) Enzymologie moléculaire et cellulaire Tome I, éd. EDP France.
37. Doudoroff, P. (1976) *Toxicity to fish of cyanides and related compounds*. A review. EPA 600/3-76038, U.S. Environmental Protection Agency, Duluth, Minnesota, 1976.
38. Doudoroff, P. (1956) *Some experiment on the toxicity of complex cyanides to fish*. Sewage Ind. Wastes 28, p. 1020.
39. Doudorof, P., G. Leduc, C.R. Schneider. (1966) *Acute toxicity to fish of solutions containing metal complex cyanides, in relation to concentrations of molecular hydrocyanic acid*. Trans. Amer. Fish. Soc. 95, p. 6.

40. Sigg, L. , Behra, P. , Stumm, W. (2000) *Chimie des milieux aquatiques*, 3^{ème} éd., Dunod, Paris, France, p. 507.

ANNEXES

Annexe A : Extraits du « Règlement sur les déchets solides » (dernière mise à jour du 20 juillet 2005), extrait de la loi sur la protection de l'environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

Annexe B : Métabolismes aérobie et anaérobie intervenant dans le RBS, Gilles PERRIN, Mémoire de DESS : Gestion des déchets, p.36-37, Université Paul Sabatier, Toulouse 3, (1992).

Annexe C : Schéma du métabolisme d'une cellule humaine lors d'un empoisonnement au Cyanure. Extrait de *Cyanide Poisoning* chap. 10, par Steven I. Baskin et Thomas G. Brewer.

ANNEXE A

Extraits du « Règlement sur les déchets solides »⁷ (dernière mise à jour du 20 juillet 2005), extrait de la loi sur la protection de l'environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

⁷ Disponible sur l'Internet à l'url :

http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R3_2.htm

c. Q-2, r.3.2

Règlement sur les déchets solides

Loi sur la qualité de l'environnement

(L.R.Q., c. Q-2, a. 20, 31, 46, 53, 53.30, 55, 61, 66, 70, 71, 72, 74, 87, 88, 109.1 et 124.1;
1999, c. 75, a. 13, 14 et 29)

D. 492-2000, a. 5.

SECTION I INTERPRÉTATION

1. Définitions: Dans le présent règlement, à moins que le contexte n'indique un sens différent, on entend par:

a) «aire d'exploitation»: la partie d'un lieu d'élimination où l'on mène les opérations de dépôt, de traitement ou d'entreposage des déchets solides, y compris les surfaces prévues pour le déchargement et le stationnement des véhicules et autres équipements mobiles;

b) *abrogé*;

c) «compostage»: méthode de traitement des déchets solides par la décomposition biochimique de ceux-ci;

d) «comté»: toute municipalité de comté désignée dans la Loi sur la division territoriale (L.R.Q., c. D-11), y compris le territoire des municipalités de cité et ville englobées dans chacun des comtés;

e) «déchets solides»: les produits résiduels solides à 20°C provenant d'activités industrielles, commerciales ou agricoles, les débris, les déchets biomédicaux visés à l'article 1 du Règlement sur les déchets biomédicaux (D. 583-92 [Q.2, r. 3.001]), et traités par désinfection, les résidus d'incinération de déchets solides ou biomédicaux, les ordures ménagères, les gravats, les plâtras et les autres rebuts solides à 20°C, à l'exception:

1° des carcasses de véhicules automobiles, des terres et des sables imbibés d'hydrocarbures, les produits résultant du traitement des sols contaminés par un procédé de stabilisation, de fixation et de solidification,

des pesticides, des déchets biomédicaux, des fumiers, des résidus miniers, des déchets radioactifs, des boues, des résidus solides provenant de fabriques de pâtes et papiers ou des scieries, de même que des matières dangereuses au sens du paragraphe 21^o de l'article 1 de la Loi sur la qualité de l'environnement;

2° des déchets qui ne sont pas des matières dangereuses susmentionnées, qui résultent de procédés industriels des secteurs d'activités de la tannerie, du raffinage de pétrole, de la métallurgie, de la chimie minérale, de la chimie organique et du traitement et revêtement de surface et dont la concentration de contaminants en composés phénoliques, en cadmium, en chrome, en cuivre, en nickel, en zinc, en plomb, en mercure, en huile ou en graisse dans le lixiviat du déchet est supérieure aux normes prévues à l'article 30; le lixiviat est obtenu et analysé conformément aux méthodes et conditions prescrites en vertu de l'article 30.4.

f) «dépotoir»: tout lieu d'élimination où l'on déposait des déchets à ciel ouvert sur le sol au 10 mai 1978 et qui n'est pas conforme aux normes prévues aux sections IV, IX et X;

g) «eau de lixiviation»: liquide ou filtrat qui percole à travers une couche de déchets solides;

h) «expérimental»: qui fait partie d'une expérience menée par un organisme ou un laboratoire de recherche scientifique ou technique;

i) «exploitant»: toute personne ou municipalité qui exploite un lieu d'entreposage ou d'élimination des déchets solides;

j) «habitation»: tout bâtiment destiné à loger des êtres humains et pourvu de systèmes d'alimentation en eau ou d'évacuation des eaux usées reliés au sol;

k) «incinération»: méthode de traitement des déchets solides par le brûlage contrôlé de ceux-ci dans un bâtiment conçu à cette fin;

l) «lieu d'élimination»: lieu de dépôt définitif ou de traitement des déchets solides;

m) «Loi»: la Loi sur la qualité de l'environnement (L.R.Q., c. Q-2);

n) «matériaux secs»: les résidus broyés ou déchiquetés qui ne sont pas fermentescibles et qui ne contiennent pas des matières dangereuses mentionnées dans le paragraphe e, le bois tronçonné, les gravats et plâtras, les pièces de béton et de maçonnerie et les morceaux de pavage;

o) *abrogé*;

p) «poste de transbordement»: lieu d'entreposage des déchets solides avec ou sans réduction de volume, où l'on transborde les déchets solides du camion qui en a effectué l'enlèvement dans un autre transporteur qui les porte dans un lieu d'élimination;

q) «récupération»: méthode de traitement des déchets solides qui consiste à récupérer, par voie de collecte, de tri, d'entreposage ou de conditionnement, des matières rebutées en vue de leur valorisation;

r) «volumineux»: qui excède 1 mètre de longueur ou qui pèse plus de 25 kilogrammes;

s) «sous-ministre»: le sous-ministre de l'Environnement et de la Faune.

Le présent article s'applique notamment aux immeubles compris dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établie suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1).

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 1; D. 1003-85, a. 1 et 5; L.Q., 1988, c. 49, a. 54; D. 585-92, a. 1; L.Q., 1994, c. 17, a. 77; D. 1310-97, a. 153; D. 1036-98, a. 1; D. 492-2000, a. 5; D. 843-2001, a. 68.

1.1. Installations de récupération ou de compostage exclues: Ne constitue pas un lieu d'élimination ou d'entreposage de déchets solides au sens du présent règlement:

1° tout système ou installation de récupération où sont reçues soit uniquement des matières infermentescibles, soit, de façon séparée, des matières infermentescibles et des matières fermentescibles;

2° tout système ou installation de compostage où sont reçues soit uniquement des matières fermentescibles, soit, de façon séparée, des matières fermentescibles et des matières infermentescibles.

Pour l'application du présent article, le papier, le carton et le bois sont assimilés à des matières infermentescibles, sauf lorsqu'ils sont utilisés pour la fabrication de compost.

D. 1036-98, a. 2.

2. Population: Dans le présent règlement, la population de toute municipalité est celle inscrite au dernier dénombrement reconnu valide par un décret du gouvernement publié à la *Gazette officielle du Québec* conformément à l'article 29 de la Loi sur l'organisation territoriale municipale (L.R.Q., c. O-9) et aux dispositions de la charte de toute municipalité de cité ou de ville.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 2; L.Q., 1988, c. 19, a. 274.

SECTION II CERTIFICAT

3. Demande de certificat: Sous réserve des cas prévus aux articles 6, 7 et 7.1, une municipalité ou personne qui sollicite un certificat pour établir ou modifier un lieu d'élimination ou d'entreposage de déchets solides doit en faire la demande par écrit et soumettre, outre ceux exigés en vertu d'autres dispositions de la Loi ou de ses règlements, les renseignements et documents suivants:

a) le nom, l'adresse et le numéro de téléphone du requérant;

b) dans le cas où le requérant est une corporation ou une association coopérative, une résolution de son conseil d'administration autorisant la présentation de la demande;

c) une copie de tout document, titre, contrat, entente ou avis d'expropriation qui accorde au requérant des droits de propriété ou des droits d'usage sur le fonds de terre où il projette établir le lieu d'entreposage ou d'élimination;

d) un exposé général du projet d'entreposage ou d'élimination des déchets solides, y compris des données relatives à l'étendue de la région qui sera desservie, à

l'importance de la population de cette région et à la nature et la quantité des déchets solides que l'on prévoit entreposer ou éliminer;

e) un plan d'ensemble constitué d'une carte géographique ou d'une photographie aérienne indiquant:

i. les limites des lots visés par la demande de certificat, le numéro de ces lots, le rang et la désignation officielle du cadastre auquel ils appartiennent;

ii. l'utilisation actuelle et le zonage du territoire avoisinant dans un rayon de 2 kilomètres de l'endroit où l'on envisage implanter le lieu d'entreposage ou d'élimination;

iii. le tracé des voies publiques, des voies d'accès, des cours d'eau, des lacs, des marécages et des plaines de débordement ainsi que l'emplacement des secteurs boisés, des habitations et de toute autre construction située dans un rayon visé au sous-paragraphe ii;

iv. la configuration actuelle du drainage et la topographie générale du terrain dans le rayon visé au sous-paragraphe ii;

f) un rapport technique préparé par un ingénieur au sens de la Loi sur les ingénieurs (L.R.Q., c. I-9) et contenant les renseignements et documents techniques prévus aux articles 4 et 5, selon la nature de la demande de certificat;

g) un exposé décrivant le mode d'administration et d'exploitation du lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides, notamment en ce qui concerne les personnes qui seront chargées d'en assurer l'exploitation quotidienne;

h) lorsqu'il s'agit d'une demande de certificat faite par une personne, la garantie prescrite par l'article 17.

Dans le cas où un système de récupération visé à la section VI est établi sur le terrain d'un autre lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides, le certificat doit être demandé par le propriétaire de ce lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 3; D. 195-82, a. 1; D. 1075-84, a. 1; D. 1036-98, a. 3; D. 492-2000, a. 5.

4. Rapport technique pour l'enfouissement sanitaire: Toute demande de certificat soumise selon l'article 3 en vue d'établir ou de modifier un lieu d'enfouissement sanitaire des déchets solides doit être accompagnée d'un rapport technique comportant les renseignements et documents énumérés ci-dessous:

a) un plan de localisation indiquant l'emplacement et les dimensions précises du lieu d'enfouissement sanitaire projeté, l'emplacement de tous les puits dans un rayon d'un kilomètre du lieu d'enfouissement sanitaire ainsi que l'emplacement des points d'observation géologique utilisés aux fins du sous-paragraphe i du paragraphe c;

b) une carte géologique illustrant les principaux affleurements rocheux et les principales unités de dépôts meubles dans le rayon mentionné au paragraphe a;

c) une carte piézométrique de la nappe phréatique du terrain d'enfouissement sanitaire projeté et un calcul du temps de migration dans le sol des eaux de lixiviation jusqu'au point de résurgence ou pour parcourir une distance de 300 mètres établis à partir:

i. d'un relevé géologique réalisé par des observations effectuées au moins en 3 points appropriés jusqu'au roc ou à une couche imperméable de dépôts meubles et comprenant une description des différentes couches de dépôts meubles, la proportion d'argile, de silt, de sable, de gravier et de blocs dans chacune de ces couches et l'analyse granulométrique d'un échantillon de la couche la plus perméable; et

ii. de l'élévation du sol et de la nappe phréatique aux points d'observation utilisés aux fins du sous-paragraphe i;

d) un avis technique relativement aux risques de contamination des nappes d'eau souterraines et superficielles dans le voisinage du lieu d'enfouissement sanitaire projeté;

e) les plans et devis du projet d'enfouissement sanitaire, y compris notamment:

i. un relevé topographique du terrain établissant les lignes de niveau à intervalle maximal de 1 mètre;

ii. un relevé des servitudes réelles et personnelles qui grèvent le terrain ainsi que des équipements de surface et des équipements souterrains qui s'y trouvent;

iii. un plan d'aménagement du terrain à échelle comprise entre 1/1 000 et 1/1 500 indiquant, entre autres, les écrans naturels, les secteurs prévus pour le creusage des tranchées ou le prélèvement des matériaux de recouvrement, les zones de déboisement, l'emplacement prévu pour les bâtiments destinés au personnel et au remisage de l'équipement, les aires de circulation des véhicules, de stockage des matériaux de recouvrement et d'entreposage des objets récupérés et l'emplacement des équipements de pesée, des clôtures, des barrières, des puits-témoins et de tout équipement de détection ou de brûlage des gaz requis ou prévu, le cas échéant;

iv. des coupes longitudinales et transversales du terrain montrant le profil initial et final de celui-ci ainsi que l'évolution du plan d'aménagement au fur et à mesure de l'avancement des opérations;

v. une coupe-type du terrain illustrant la superposition des couches de déchets solides compactés et recouverts;

vi. les plans et profils du système de drainage;

vii. les plans et devis des équipements et ouvrages destinés à recueillir et traiter les eaux de lixiviation, s'il y a lieu;

viii. les plans et devis des équipements et ouvrages destinés à prévenir ou contrôler la migration dans le sol ou l'émission dans l'atmosphère des gaz produits par la décomposition des déchets solides qui seront enfouis, dans le cas où de tels équipements ou ouvrages sont prévus; et

ix. un devis descriptif de l'exploitation du terrain ainsi que de l'affectation de la main d'oeuvre prévue et des dispositions qui seront prises pour l'entretien et la réparation de la machinerie et pour son remplacement en cas de bris de plus de 48 heures.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 4.

5. Rapport technique pour autres lieux d'élimination ou d'entreposage des déchets solides: Toute demande de certificat soumise selon l'article 3 en vue d'établir ou de modifier un lieu d'entreposage des déchets solides ou un lieu d'élimination visé aux sections V à IX doit être accompagnée d'un rapport technique comportant les renseignements et documents énumérés ci-dessous:

a) un plan de localisation indiquant l'emplacement précis du lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides;

b) les plans et devis de tous les équipements fixes qui seront utilisés pour entreposer ou traiter les déchets solides, y compris tout appareil ou ouvrage destiné à réduire, contrôler, contenir ou prévenir le dépôt, le dégagement, l'émission ou le rejet de contaminants dans l'environnement, toute aire d'entreposage et tout quai de chargement et de déchargement;

c) un devis descriptif de l'exploitation décrivant notamment les opérations, l'affectation de la main-d'oeuvre et les dispositions prises pour l'entretien, la réparation de l'équipement mécanique et son remplacement en cas de bris de plus de 48 heures;

d) dans le cas d'un lieu de traitement de déchets solides, la mention du lieu de dépôt définitif des résidus de traitement et des déchets solides qui n'y sont pas acceptés;

e) dans le cas d'une usine de compostage visée à la section VII, le document requis par le paragraphe b de l'article 4, un avis technique relativement aux risques de contamination des nappes d'eau souterraines et de surface, un plan d'aménagement du terrain et les plans et profils du système de drainage;

f) dans le cas d'un dépôt de matériaux secs, l'objectif et la justification du projet de remplissage, le plan d'aménagement final et l'affectation prévue du terrain restauré.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 5; D. 1036-98, a. 4.

6. Modification: Dans le cas d'une demande de certificat en vue de modifier un lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides pour lequel un certificat a déjà été délivré antérieurement, il n'est pas nécessaire de soumettre à nouveau les renseignements et documents visés aux articles 3 à 5 dans la mesure où ils sont identiques à ceux déjà fournis en vue d'obtenir le certificat délivré précédemment. Il suffit alors que le requérant indique que ces données sont inchangées.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 6.

7. Dépôt en tranchée: Toute demande de certificat en vue d'établir un dépôt en tranchée visé à la section X doit être présentée sur la formule qui se trouve à l'annexe A. Dans ce cas, il suffit de fournir les renseignements exigés par cette formule.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 7.

7.1. Milieu nordique: Toute demande de certificat en vue d'établir un dépôt de déchets en milieu nordique visé à la section X.1 doit être présentée sur la formule conforme à l'annexe C.

D. 1075-84, a. 2.

8. Abrogé.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 8; D. 195-82, a. 2; L.Q., 1997, c. 43, a. 875; D. 492-2000, a. 5.

9. Exploitation: Tout lieu d'élimination doit être exploité conformément aux plans et devis soumis en vue de l'obtention du certificat.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 9.

10. Modes d'élimination permis: Les seuls lieux d'élimination ou d'entreposage de déchets solides qui peuvent être établis sont ceux régis par les sections IV à XI ou mentionnés au troisième alinéa de l'article 127 ou à l'article 133.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 10.

SECTION III GARANTIE

[...]

17. Garantie: L'exploitation par une personne d'un lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides est subordonnée à la constitution d'une garantie dont le montant est déterminé selon le tableau ci-dessous et qui est constituée d'un chèque visé, d'obligations payables au porteur émises par le Gouvernement du Québec ou du Canada ou par une municipalité québécoise, de toute autre obligation négociable garantie par le Gouvernement du Québec, d'un cautionnement ou lettre de crédit irrévocable délivrée par un assureur dûment autorisé à faire des opérations au Québec selon la Loi sur les assurances (L.R.Q., c. A-32), par une banque, par une banque d'épargne, par une caisse d'épargne et de crédit ou par une société de fiducie:

[Q-2R3.2#01, 1982 G.O. 2, 838 ET 1998 G.O. 2, 4948]

catégorie de lieu d'élimination ou d'entreposage des déchets solides
montant de la garantie
enfouissement sanitaire destiné à desservir moins de 20 000 habitants 25 000 \$
enfouissement sanitaire destiné à

desservir entre 20 000 et 80 000 habitants

50 000 \$

enfouissement sanitaire destiné à

desservir plus de 80 000 habitants

100 000 \$

incinérateur, pyrolyseur, usine de 1 % du coût

compostage, poste de transbordement d'immobilisation

ou système de récupération minimum 25 000 et

maximum 1 000 000 \$

dépôt de matériaux secs 25 000 \$

Le présent article s'applique également à l'égard de l'incinérateur de déchets solides qui y accepte aussi des déchets biomédicaux.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 17; D. 195-82, a. 4; L.Q., 1987, c. 95, a. 402; D. 585-92, a. 2; D. 1036-98, a. 6; D. 492-2000, a. 5.

18. Police de garantie: Toute personne qui a fourni une police de garantie doit la renouveler et s'assurer qu'elle demeure en vigueur pendant toute la durée de l'exploitation et pendant une période de 60 jours après la cessation définitive de l'exploitation. Toute personne visée par le présent article doit transmettre au ministre une preuve de tout renouvellement d'une police de garantie.

Toute police de garantie doit comporter une disposition en vertu de laquelle l'assureur doit prévenir le ministre en cas d'annulation de la police.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 18; L.Q., 1988, c. 49, a. 54; D. 492-2000, a. 5.

19. Utilisation de la garantie: Le ministre de l'Environnement et de la Faune peut utiliser la garantie visée à l'article 17 pour exécuter ces travaux aux frais de l'exploitant dans tous les cas prévus aux articles 81, 82, 84, 113, 114 et 115 de la Loi.

En cas d'utilisation de la garantie pendant la période de validité du permis, l'exploitant doit, dans un délai de 15 jours, remplacer la garantie utilisée.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 19; L.Q., 1988, c. 49, a. 54; L.Q., 1994, c. 17, a. 77; D. 492-2000, a. 5.

20. Préavis: Avant d'utiliser la garantie, le ministre doit donner un avis préalable de 30 jours à l'exploitant. À l'expiration de ce délai, le ministre peut employer la garantie pour les fins énumérées à l'article 19 à moins que l'exploitant n'ait, dans les entrefaites, effectué les travaux pour lesquels le ministre veut utiliser la garantie.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 20; L.Q., 1988, c. 49, a. 54; L.Q., 1997, c. 43, a. 875; D. 492-2000, a. 5.

21. Remise de la garantie: La garantie est remise à l'exploitant après la cessation définitive de l'exploitation, sauf si elle a été utilisée par le ministre tel que prévu aux articles 19 et 20.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 21; L.Q., 1988, c. 49, a. 54; D. 492-2000, a. 5.

22. Abrogé.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 22; D. 492-2000, a. 5.

SECTION IV ENFOUISSEMENT SANITAIRE

23. Zonage et plaines de débordement: Il est interdit d'établir un lieu d'enfouissement sanitaire dans une plaine de débordement ou dans tout territoire zoné par l'autorité municipale pour fins résidentielles, commerciales ou mixtes (résidentielles-commerciales) et à moins de 150 mètres d'un tel territoire.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 23.

24. Aéroport: Il est interdit d'établir un lieu d'enfouissement sanitaire à moins de 3 kilomètres d'un aéroport.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 24.

25. Voie publique: Aucun lieu d'enfouissement sanitaire ne peut être établi à moins de 152,40 mètres de tout chemin entretenu par le ministre des Transports et à moins de 50 mètres de toute autre voie publique.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 25.

26. Distance de certains lieux: L'aire d'exploitation d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit être située à plus de 150 mètres de tout parc municipal, terrain de golf, piste de ski alpin, base de plein air, plage publique, réserve écologique créée en vertu de la Loi sur les réserves écologiques (L.R.Q., c. R-26.1), parc au sens de la Loi sur les parcs (L.R.Q., c. P-9), parc au sens de la Loi sur les parcs nationaux (Lois révisées

du Canada (1985), chapitre N-14), mer, fleuve, rivière, ruisseau, étang, marécage ou batture.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 26; L.Q., 1993, c. 32, a. 22.

27. Distance de certains immeubles: L'aire d'exploitation d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit être située à plus de 200 mètres de toute habitation, établissement d'enseignement, temple religieux, établissement de transformation de produits alimentaires, terrain de camping, restaurant ou établissement hôtelier titulaire d'un permis délivré en vertu de la Loi sur l'hôtellerie (L.R.Q., c. H-3), colonie de vacances et établissement au sens de la Loi sur les services de santé et les services sociaux (L.R.Q., c. S-5).

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 27; L.Q., 1992, c. 68, a. 157; L.Q., 1997, c. 43, a. 875.

La Loi sur l'hôtellerie (L.R.Q., c. H-3) est remplacée par la Loi sur les établissements touristiques (L.R.Q., c. E-15.1) L.Q., 1987, c. 12, a. 43.

28. Lacs: L'aire d'exploitation d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit être située à plus de 300 mètres de tout lac.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 28.

29. Conditions hydrogéologiques: L'enfouissement sanitaire des déchets solides doit s'effectuer sur un terrain où les conditions hydrogéologiques sont telles que les eaux de lixiviation s'infiltrent dans le sol et que le temps de migration des eaux y est supérieur à 5 ans avant de parcourir 300 mètres ou avant d'atteindre tout puits ou source servant à l'alimentation en eau potable et situé à une distance inférieure à 300 mètres, à moins que ces eaux n'aient fait résurgence auparavant. Dans ce dernier cas, elles doivent avoir circulé dans le sol pendant plus de 2 ans à une vitesse moyenne inférieure à 150 mètres par an.

Dans le cas où on ne retrouve pas les conditions hydrogéologiques décrites au premier alinéa, l'enfouissement sanitaire peut s'effectuer à condition que l'on procède à des aménagements afin d'empêcher l'infiltration dans le sol de toute eau de lixiviation. Toutefois, il n'est pas permis d'aménager un terrain en vue d'y effectuer de l'enfouissement sanitaire si une infiltration accidentelle risquait de compromettre la qualité des eaux d'une nappe exploitée à des fins d'alimentation en eau potable.

Dans le cas où les conditions hydrogéologiques d'un terrain d'enfouissement sanitaire sont telles que les eaux provenant de ce terrain s'écoulent

en surface ou font résurgence avant 2 ans, on doit y installer un système permettant le captage complet de ces eaux et le traitement de celles-ci conformément aux exigences de l'article 30.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 29.

30. Eaux de lixiviation: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire ne doit pas rejeter dans le réseau hydrographique de surface ou dans un réseau d'égout pluvial, des eaux de lixiviation contenant des contaminants au-delà des normes prescrites ci-dessous:

a) composés phénoliques: 0,02 milligramme par litre;

b) cyanures totaux (exprimés en HCN): 0,1 milligramme par litre;

c) sulfures totaux (exprimés en H₂S): 2 milligrammes par litres;

d) cadmium (Cd): 0,1 milligramme par litre;

e) chrome (Cr): 0,5 milligramme par litre;

f) cuivre (Cu): 1 milligramme par litre;

g) nickel (Ni): 1 milligramme par litre;

h) zinc (Zn): 1 milligramme par litre;

i) plomb (Pb): 0,1 milligramme par litre;

j) mercure (Hg): 0,001 milligramme par litre;

k) fer (Fe): 17 milligrammes par litre;

l) chlorures (exprimés en Cl): 1 500 milligrammes par litres;

m) sulfates (exprimés en SO₄): 1 500 milligrammes par litre;

n) huiles et graisses: 15 milligrammes par litre;

o) bactéries coliformes totales: 2 400 par 100 millilitres;

p) bactéries coliformes d'origine fécale: 200 par 100 millilitres;

q) demande biochimique en oxygène 5 jours (DBO₅): 40 milligrammes par litre;

r) demande chimique en oxygène: 100 milligrammes par litre;

s) odeurs: ne doivent causer aucun des effets visés au deuxième alinéa *in fine* de l'article 20 de la Loi.

Les normes prévues aux paragraphes *q* et *r* du premier alinéa ne s'appliquent pas dans le cas où les eaux de lixiviation sont traitées dans un poste de traitement visé aux articles 31 et 31.1.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 30; D. 195-82, a. 5.

30.1. Dilution: Les eaux de lixiviation ne doivent pas être diluées avant leur rejet dans le réseau hydrographique de surface ou dans un réseau d'égout pluvial.

D. 195-82, a. 5.

30.2. Traitement continu: Dans le cas où un traitement est requis pour respecter les normes prévues à l'article 30, celui-ci doit continuer à fonctionner après la désaffectation du lieu d'enfouissement sanitaire jusqu'à ce que les rejets soient conformes à ces normes sans nécessiter de traitement.

D. 195-82, a. 5.

30.3. Méthodes de prélèvement: Le prélèvement des échantillons d'eau de lixiviation destinés à vérifier le respect des normes prescrites par l'article 30 doit être effectué conformément aux modalités prévues dans le Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales publié par le ministère de l'Environnement et de la Faune.

D. 195-82, a. 5; D. 1036-98, a. 7.

30.4. Méthodes d'analyse: L'analyse des échantillons d'eau de lixiviation doit être effectuée par un laboratoire accrédité par le ministre en vertu de l'article 118.6 de la loi et conformément aux méthodes prévues dans la Liste des méthodes d'analyses relatives à l'application des règlements découlant de la Loi sur la qualité de l'environnement publiée par le ministère de l'Environnement et de la Faune.

D. 195-82, a. 5; D. 1036-98, a. 7.

30.5. Filtration interdite: Les échantillons d'eau de lixiviation ne doivent faire l'objet d'aucune filtration, ni lors de leur prélèvement ni préalablement à leur analyse.

D. 1036-98, a. 7.

31. Postes de traitement des eaux: Tout poste de traitement des eaux de lixiviation doit être placé à plus de 50 mètres de toute voie publique, base en plein air, parc municipal, terrain de golf, piste de ski alpin, plage publique, réserve écologique créée en vertu de la Loi sur les réserves écologiques (L.R.Q., c. R-26.1), parc au sens de la Loi sur les parcs (L.R.Q., c. P-9) ou parc au sens de la Loi sur les parcs nationaux (Lois révisées du Canada (1985), chapitre N-14).

Tout étang ou bassin d'oxydation extérieur aéré mécaniquement et tout champ d'aspersion superficielle doit être situé à plus de 200 mètres de toute habitation, établissement d'enseignement, temple religieux, établissement de transformation de produits alimentaires, terrain de camping, restaurant ou établissement hôtelier titulaire d'un permis délivré en vertu de la Loi sur l'hôtellerie (L.R.Q., c. H-3), colonie de vacances ou établissement au sens de la Loi sur les services de santé et les services sociaux (L.R.Q., c. S-5). Dans le cas des autres étangs et bassins d'oxydation extérieurs, cette distance est portée à 500 mètres.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 31; L.Q., 1992, c. 68, a. 157; L.Q., 1993, c. 32, a. 22; L.Q., 1997, c. 43, a. 875.

La Loi sur l'hôtellerie (L.R.Q., c. H-3) est remplacée par la Loi sur les établissements touristiques (L.R.Q., c. E-15.1) L.Q., 1987, c. 12, a. 43.

31.1. Étangs de stabilisation ou d'aération: Un étang de stabilisation ou d'aération extérieur utilisé pour traiter les eaux de lixiviation d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit:

a) être pourvu de parois et d'un fond constitué de matériaux imperméables ou à travers lesquels la vitesse de migration des eaux est inférieure à 10^{-5} centimètres par seconde;

b) dans le cas où les parois forment un talus au-dessus du niveau du sol, ce talus doit avoir au moins 3 mètres de large dans sa partie supérieure;

c) posséder des parois et des talus dont la pente est de 3 dans 1;

d) être conçu et exploité de sorte qu'une hauteur minimale d'un mètre est laissée en tout temps entre le niveau de l'eau dans l'étang et le rebord des parois;

e) être pourvu d'un fond horizontal et libre de toute végétation;

f) avoir des coins arrondis;

g) être muni d'une entrée et d'une sortie placées aux extrémités opposées dans l'axe longitudinal de l'étang;

h) être pourvu d'un déversoir avec assise de béton qui doit, dans le cas d'un étang de stabilisation, être conçu de façon à permettre une variation du niveau de l'eau dans l'étang;

i) être conçu et exploité de façon à maintenir, dans le cas d'un étang d'aération, une profondeur d'eau maximale de 4 mètres et, dans le cas d'un étang de stabilisation, de 1 mètre entre le 1^{er} mai et le 1^{er} novembre et de 2 mètres entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} mai;

j) être conçu et exploité de façon à assurer un enlèvement de 85 % de la demande biochimique en oxygène 5 jours des eaux de lixiviation;

k) être muni, dans le cas d'un étang d'aération, d'un surpresseur d'urgence;

l) être entouré, à moins de 10 mètres, d'une clôture permanente de broche d'acier d'au moins 2 mètres de hauteur dont les carreaux possèdent des côtés d'une longueur maximale de 8 centimètres; et

m) être pourvu d'un chemin d'accès carrossable en toute saison.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

D. 195-82, a. 6.

32. Dissimulation: Les opérations d'enfouissement doivent être dissimulées derrière une clôture visée à l'article 33, un rideau de conifères, un talus, un accident topographique ou un autre écran naturel de manière à ce qu'elles ne puissent être vues par une personne qui se trouve sur une voie publique ou dans tout bâtiment ou parc où le public a accès.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 32.

33. Clôture de dissimulation: Si on pose une clôture en tout ou en partie autour d'un lieu d'enfouissement sanitaire pour respecter les exigences prescrites à l'article 32, cette clôture

doit avoir une hauteur d'au moins 2,50 mètres, doit être verticale et doit:

a) être pleine et être constituée de bois teint ou peint, de briques, de pierre ou de panneaux de fibre de verre ou d'aluminium peint; ou

b) être faite de planches de bois verticales ou horizontales teintées ou peintes d'une largeur d'au moins 15 centimètres séparées les unes des autres par une distance d'au plus 2,5 centimètres.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 33.

34. Talus: Si un talus est construit autour d'un lieu d'enfouissement sanitaire en vue de respecter les exigences prescrites à l'article 32 et que ce talus est lui-même visible d'une voie publique, il faut qu'il soit recouvert de végétation. Le responsable du lieu d'enfouissement doit prendre les mesures requises pour que la végétation croisse comme dans le milieu environnant.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 34.

35. Contrôle des envois ou éparpillements de déchets: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit prendre les mesures nécessaires pour réduire au minimum les envois ou éparpillements de déchets tant à l'intérieur qu'aux abords de ce lieu.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 35; D. 1036-98, a. 8.

36. Accès: Le chemin d'accès et les aires de circulation du lieu d'enfouissement sanitaire doivent être carrossables en toute saison pour des camions de 10 tonnes métriques.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 36.

37. Abrogé.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 37; D. 1036-98, a. 9.

38. Drainage: Tout lieu d'enfouissement sanitaire doit être pourvu d'un système de drainage conçu pour empêcher que le ruissellement des eaux de surface ne communique avec les déchets solides déposés sur le lieu d'enfouissement sanitaire.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 38.

39. Zone-tampon: Tout lieu d'enfouissement sanitaire doit être pourvu d'une zone-tampon d'une largeur d'au moins 10 mètres entre les limites de l'aire d'enfouissement des déchets

solides et tout terrain voisin occupé par une personne autre que l'exploitant du lieu d'enfouissement sanitaire.

Dans le cas où cette zone-tampon est boisée, on doit y conserver les arbres existants afin de maintenir l'encadrement forestier naturel.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 39.

40. Affichage: Tout lieu d'enfouissement sanitaire doit être clairement identifié comme tel à l'entrée au moyen d'une affiche indiquant qu'il s'agit d'un lieu d'enfouissement sanitaire et mentionnant le nom et l'adresse du propriétaire ainsi que les heures d'ouverture du lieu d'enfouissement sanitaire.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 40; D. 492-2000, a. 5.

41. Abrogé.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 41; D. 1036-98, a. 9.

42. Opérations journalières: Les déchets solides déposés dans un lieu d'enfouissement sanitaire doivent être compactés mécaniquement en couches uniformes dont l'épaisseur ne doit pas excéder 2 mètres et la surface de chaque couche ainsi compactée doit être recouverte d'au moins 20 centimètres d'un matériau de recouvrement visé à l'article 48 au fur et à mesure de la progression de la couche de déchets solides compactés.

Le front de la couche de déchets solides doit être également compacté et recouvert de 20 centimètres du même matériau de recouvrement après chaque journée d'opération dans le cas où on interrompt les opérations d'enfouissement pour une durée supérieure à 8 heures et au moins une fois par jour dans le cas d'opérations d'enfouissement continues. Toute opération interrompue pour une durée égale ou inférieure à 8 heures est réputée une opération d'enfouissement continue.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 42.

43. Réaménagement progressif: Les opérations d'enfouissement sanitaire doivent s'effectuer par section de terrain, de façon à permettre le réaménagement progressif de celui-ci. La séquence des opérations dans une section de terrain doit être telle que les déchets solides ne soient jamais laissés plus de 6 mois avec le seul recouvrement journalier.

À cette fin, on doit y superposer une nouvelle couche de déchets solides ou y effectuer un

nouveau recouvrement d'au moins 20 centimètres d'épaisseur. Dès que, dans une section de terrain, le niveau prévu au plan d'aménagement a été atteint, l'exploitant du lieu d'enfouissement sanitaire doit procéder au recouvrement final en la manière prévue à l'article 45.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 43.

44. Déchets solides broyés: Lorsque les déchets solides déposés sur un lieu d'enfouissement sanitaire ont été préalablement broyés mécaniquement et réduits en pièces dont 90 % ont un diamètre inférieur à 10 centimètres, aucun recouvrement régulier n'est requis.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 44.

45. Recouvrement final et revégétation: Le recouvrement final d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit être constitué d'au moins 60 centimètres de terre. Cependant, lorsque l'épaisseur des couches de déchets solides superposées atteint ou dépasse 6 mètres, le recouvrement final doit être constitué d'au moins 120 centimètres de terre. Dans tous les cas, l'aire d'enfouissement doit être régaliée suivant une pente minimale de 2 % et n'excédant pas 30 %.

Les trous, affaissements et failles doivent être remplis ou réparés jusqu'à stabilisation complète du sol. L'exploitant du lieu d'enfouissement sanitaire doit ensemercer le sol et prendre toutes les mesures requises pour que la végétation croisse toujours 2 ans après le recouvrement final.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 45.

46. Équipement requis: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit disposer de l'équipement roulant requis pour aménager le terrain et étendre, compacter et recouvrir les déchets solides ainsi que pour le chargement et le transport des matériaux de recouvrement visés à l'article 48, de même que pour l'excavation de tranchées, s'il y a lieu.

L'exploitant du lieu d'enfouissement sanitaire doit posséder de l'équipement de remplacement ou prendre un arrangement permanent pour en obtenir à tout moment en cas de bris de façon à pouvoir respecter en tout temps le présent règlement.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 46; D. 195-82, a. 7.

47. Compacteur mécanique: Lorsqu'un lieu d'enfouissement sanitaire dessert 50 000 personnes ou plus, la compaction doit s'effectuer au moyen d'un compacteur mécanique conçu spécialement à cette fin.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 47.

48. Matériaux de recouvrement: Les matériaux de recouvrement requis selon l'article 42 doivent être constitués de terre contenant moins de 30 % d'argile ou être constitués de sable, de mâchefer, de laitiers ou de gravier dont le diamètre moyen est inférieur à 1 centimètre.

Les résidus d'incinération des déchets solides contenant moins de 5 % (en poids) d'imbrûlés et dont la ferraille a été retirée peuvent également servir de matériau de recouvrement.

Les résidus de déchetage de carcasses de véhicules automobiles peuvent aussi servir de matériau de recouvrement, à la condition toutefois que les eaux de lixiviation provenant du lieu où ces résidus seront déposés soient captées et traitées de façon à respecter les normes prévues à l'article 30.

Les matériaux de recouvrement visés au présent article ne doivent contenir aucune substance susceptible d'être diffusée dans l'atmosphère par l'effet du vent.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 48; D. 195-82, a. 8; D. 1036-98, a. 10.

49. Réserve: Le responsable d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit prévoir une réserve de matériaux de recouvrement utilisables et accessibles en tout temps, de sorte à pouvoir effectuer en toute saison les recouvrements requis par le présent règlement.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 49.

50. Surélévation: Sauf sur le territoire de la Communauté urbaine de Montréal, la surélévation d'un lieu d'enfouissement sanitaire par les couches de déchets solides ne doit pas être supérieure à 4 mètres par rapport au profil environnant.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 50.

51. Surveillance: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit, pendant les heures d'ouverture, exercer une surveillance continue de la nature de déchets qui sont apportés sur le site ainsi que des opérations d'enfouissement.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 51; D. 195-82, a. 9.

52. Accès interdit: En dehors des heures d'ouverture ou en l'absence des préposés à la compaction et au recouvrement, l'accès à un lieu d'enfouissement sanitaire doit être interdit aux véhicules-automobiles au moyen d'une barrière ou de tout autre obstacle placé à moins de 20 mètres de la voie publique.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 52.

53. Dépôt des déchets solides: Les déchets solides ne peuvent être déposés dans un lieu d'enfouissement sanitaire alors que l'accès en est interdit selon l'article 52, sauf s'ils sont déposés dans un contenant étanche placé à cette fin à l'entrée du lieu d'enfouissement sanitaire.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 53; D. 1036-98, a. 11.

54. Déchets acceptables: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire ne peut y accepter que des déchets solides, des résidus non dangereux solides à 20°C provenant d'une fabrique de pâtes et papiers ou d'une scierie, des boues pelletables non dangereuses.

L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire peut y accepter des résidus de déchetage de carcasses de véhicules automobiles à la condition que les eaux de lixiviation du lieu où ils seront déposés soient captées et traitées de façon à respecter les normes prévues à l'article 30.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 54; D. 1003-85, a. 2 et 5; D. 585-92, a. 3; D. 1458-93, a. 1; D. 843-2001, a. 69.

55. Prohibition: Nul ne peut déposer ou permettre le dépôt sur un lieu d'enfouissement sanitaire d'un déchet exclu par l'article 54. La présence d'un tel déchet dans le sol d'un lieu

d'enfouissement sanitaire est prohibée au sens de l'article 20 de la Loi.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 55.

56. Pneus hors d'usage: Malgré les autres dispositions du présent règlement, l'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire ne peut accepter des pneus hors d'usage au sens du Règlement sur l'entreposage des pneus hors d'usage (D. 29-92).

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 56; D. 918-2000, a. 30.

57. Brûlage: Il est interdit de brûler ou de tolérer le brûlage de déchets sur un lieu d'enfouissement sanitaire.

La présence dans l'environnement de toute fumée provenant d'une telle combustion est prohibée au sens du deuxième alinéa de l'article 20 de la Loi.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 57.

57.1. Registre: L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire doit tenir un registre de ses opérations indiquant, pour chaque camion qui y dépose des déchets:

- a) le nom du transporteur à qui appartient ce camion;
- b) la nature des déchets déposés par ce camion; et
- c) la provenance de ces déchets.

Il doit conserver ce registre pendant une période d'au moins 2 ans.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

D. 195-82, a. 10.

58. Nettoyage des lieux: Les voies d'accès, les dispositifs mis en place pour limiter l'envol ou l'éparpillement de déchets et les abords de tout terrain d'enfouissement sanitaire doivent être nettoyés après chaque journée d'opération de sorte qu'il n'y subsiste plus aucun déchet solide.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 58; D. 1036-98, a. 12.

59. Extermination: L'exploitant de tout lieu d'enfouissement sanitaire doit faire usage de

poison lorsque requis pour exterminer les rats et la vermine pendant l'exploitation de son terrain d'enfouissement. Il doit également faire usage de poison pendant une période de 3 mois après la fermeture définitive du lieu d'enfouissement sanitaire.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 59.

60. Exception saisonnière: Pendant toute période de l'année où la population desservie par un lieu d'enfouissement sanitaire baisse en deçà de 2 000 personnes, il est permis d'exploiter ce lieu d'enfouissement sanitaire selon les normes prévues aux articles 97 et 100 au lieu des articles 42 et 43, à condition que ces articles 97 et 100 soient rigoureusement respectés.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 60.

SECTION V INCINÉRATION

[...]

SECTION X DÉPÔT EN TRANCHÉE DE DÉCHETS SOLIDES

[...]

SECTION XIV LIMITATION DU NOMBRE DE LIEUX D'ÉLIMINATION

[...]

115. Acceptation des déchets solides:

Sauf les cas prévus à l'article 114, à l'article 115.1 ou au quatrième alinéa de l'article 131, l'exploitant d'un lieu d'élimination n'est tenu d'accepter que les déchets solides qui y sont apportés et qui proviennent du territoire de la municipalité régionale de comté ou de la communauté urbaine ou régionale où est situé le lieu d'élimination.

Toutefois, l'exploitant d'un lieu d'élimination ne peut accepter les déchets qui y sont apportés et qui sont générés hors du Québec.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 115; D. 1863-88, a. 1; D. 1615-91, a. 3; D. 859-98, a. 1; D. 1048-2004, a. 3.

115.1. Acceptation des déchets solides : L'exploitant d'un lieu d'enfouissement sanitaire est tenu d'accepter les déchets solides qui proviennent de tout territoire non organisé en municipalité locale ainsi que de toute

municipalité dont la population est inférieure à 2 000 habitants, dans le cas où aucun autre lieu d'enfouissement sanitaire n'est situé plus près de cette municipalité par voie routière carrossable à l'année.

D. 1048-2004, a. 4.

[...]

SECTION XVI DISPOSITIONS TRANSITOIRES

123. Période transitoire: Toute personne ou municipalité qui, le 10 mai 1978, possédait un dépotoir doit, dans les délais indiqués au tableau suivant, le fermer en la manière décrite à l'article 126 ou le transformer en un lieu d'élimination conforme aux sections IV, IX ou X:

[Q-2R3.2#03, R.R.Q., 1981, 8-662]

Région administrative où se trouve le dépotoir	Délai accordé
Bas Saint-Laurent/Gaspésie	1er décembre 1978
Montréal	1er décembre 1978
Québec	1er décembre 1979
Trois-Rivières	1er décembre 1979
Outaouais	1er décembre 1980
Estrie	1er décembre 1980
Saguenay/Lac-Saint-Jean	1er décembre 1981
Côte-Nord	1er décembre 1981
Abitibi-Témiscamingue	1er décembre 1982
Nouveau-Québec	1er décembre 1982

Les régions administratives susmentionnées sont celles qui ont été créées par le Décret sur la division administrative du Québec (c. D-11, r. 1).

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 123; D. 195-82, a. 15.

124. Exception: Le délai prévu à l'article 123 ne s'applique pas aux dépotoirs situés à moins de 30 kilomètres par voie routière carrossable à l'année d'un lieu d'élimination conforme aux sections IV, V, VII, VIII ou XI ni aux dépotoirs qui ne sont pas conformes aux normes prévues à l'article 125. Dans tous ces cas, l'exploitant est tenu de fermer immédiatement le dépotoir en la manière prescrite à l'article 126, à moins qu'il ne choisisse de le transformer immédiatement en un lieu d'élimination conforme aux sections IV, IX ou X.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 124; D. 195-82, a. 16.

[...]

126. Fermeture des dépotoirs: La fermeture de tout dépotoir ou autre lieu de dépôt de déchets à ciel ouvert doit se faire comme suit:

a) l'accès au dépotoir doit être interdit de façon permanente par une barrière, une clôture, un fossé d'au moins 60 centimètres de profondeur ou tout autre obstacle d'au moins 50 centimètres de hauteur;

b) une affiche doit indiquer qu'il est interdit d'y déposer des déchets sous peine d'amende;

c) les déchets solides épars, notamment les papiers emportés par le vent, doivent être ramassés ou recouverts en la manière prescrite au paragraphe d;

d) on doit effectuer d'abord une première extermination au moyen d'un poison destiné à éliminer les rats et la vermine;

e) les déchets solides doivent être compactés et recouverts d'une couche de terre dont l'épaisseur doit atteindre au moins 60 centimètres et le terrain doit ensuite être régalé; et

f) l'extermination des rats et de la vermine doit se prolonger pendant au moins 3 mois après l'étape visée au paragraphe e.

Celui qui ferme un dépotoir ou un autre lieu de dépôt de déchets à ciel ouvert doit, dans les 30 jours suivants la première extermination visée au paragraphe d du premier alinéa, transmettre au ministre une facture attestant que l'extermination a effectivement été entreprise.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 126; D. 195-82, a. 18; L.Q., 1988, c. 49, a. 54.

SECTION XVII DISPOSITIONS FINALES

[...]

134. Propreté des terrains: Celui qui a la garde ou le soin d'un terrain doit prendre les mesures requises pour que ce terrain soit libre de déchets en tout temps, sauf dans la mesure où le permet le présent règlement.

Dans le cas d'un chemin public, les obligations prévues au premier alinéa incombent à celui qui est responsable de son entretien en vertu d'une loi générale ou spéciale.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 134; D. 195-82, a. 22.

[...]

137. Contrat pour un enfouissement sanitaire ou un dépôt de matériaux secs: Tout contrat conclu, renouvelé ou modifié entre une municipalité et une personne en vertu duquel celle-ci s'engage à exploiter un lieu d'enfouissement sanitaire ou un dépôt de matériaux secs appartenant à une municipalité, doit également comporter des clauses indiquant que la personne assurera le respect des articles 17 à 21, 35, 42, 43, 45 à 47 et 51 à 59 dans le cas d'un lieu d'enfouissement sanitaire et 17 à 21, 86, 87 et 91 dans le cas d'un dépôt de matériaux secs et que la municipalité assurera le respect des autres dispositions du présent règlement.

R.R.Q., 1981, c. Q-2, r. 14, a. 137; D. 1036-98, a. 23; D. 492-2000, a. 5.

138. Amendes: Toute personne physique qui enfreint les articles 123, 124 ou 126 est passible d'une amende minimale de 300 \$ et d'une amende maximale de 1 000 \$ dans le cas d'une première infraction et d'une amende minimale de 500 \$ et d'une amende maximale de 3 000 \$ en cas de récidive.

Toute personne morale qui enfreint les articles 123, 124 ou 126 est passible d'une amende minimale de 500 \$ et d'une amende maximale de 2 000 \$ dans le cas d'une première infraction et d'une amende minimale de 800 \$ et d'une amende maximale de 5 000 \$ en cas de récidive.

Toute personne physique qui enfreint le premier alinéa de l'article 134 est passible d'une amende minimale de 100 \$ et d'une amende maximale de 500 \$ dans le cas d'une première infraction et

d'une amende maximale de 1 000 \$ en cas de récidive.

Toute personne morale qui enfreint le premier alinéa de l'article 134 est passible d'une amende minimale de 200 \$ et d'une amende maximale de 1 000 \$ dans le cas d'une première infraction et d'une amende minimale de 400 \$ et d'une amende maximale de 3 000 \$ en cas de récidive.

Toute personne physique qui enfreint l'article 115 est passible d'une amende minimale de 1 000 \$ et d'une amende maximale de 10 000 \$ dans le cas d'une première infraction, et d'une amende minimale de 2 000 \$ et d'une amende

maximale de 25 000 \$ dans le cas d'une infraction subséquente.

Toute personne morale qui enfreint l'article 115 est passible d'une amende minimale de 5 000 \$ et d'une amende maximale de 30 000 \$ dans le cas d'une première infraction, et d'une amende minimale de 10 000 \$ et d'une amende maximale de 50 000 \$ dans le cas d'une infraction subséquente.

Le présent article s'applique notamment dans une aire retenue pour fins de contrôle et dans une zone agricole établies suivant la Loi sur la protection du territoire et des activités agricoles (L.R.Q., c. P-41.1) (L.R.Q., c. Q-2, a. 124.1)

ANNEXE B

**Métabolismes microbiens aérobie et anaérobie intervenant dans le RBS,
Gilles PERRIN, Mémoire de DESS : Gestion des déchets, p.36-37,
Université Paul Sabatier, Toulouse 3, (1992).**

1 - LE METABOLISME ANAEROBIE

Il comprend deux phases (fig 5) :

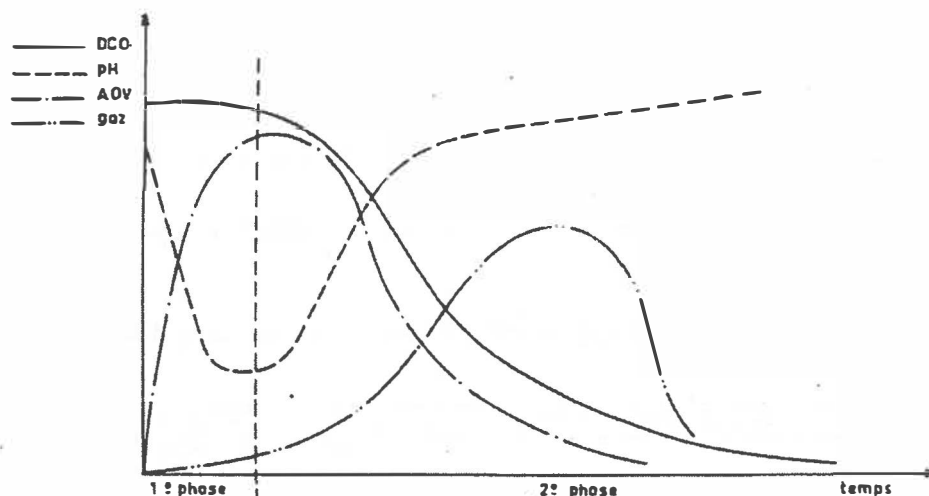


Fig 5 : Représentation schématique de l'évolution des principaux paramètres durant une digestion anaérobie (SOURCE : 2)

- une phase de fermentation acide au cours de laquelle une microflore complexe de bactéries acidigènes dégrade la matière organique en acides gras volatils. Ceci se traduit par une acidification du milieu. Ces transformations sont effectuées par des enzymes extracellulaires sécrétées par les bactéries directement fixées sur la matière organique.
- une phase de gazéification pendant laquelle un deuxième groupe de bactéries utilise comme substrat les acides gras volatils formés au cours de la première phase. Ceux-ci sont dégradés en méthane et dioxyde de carbone.

Cependant, l'activité de ces bactéries méthanigènes dépend beaucoup du pH. Leur implantation, difficile pour un $\text{pH} < 6$, progresse rapidement au fur et à mesure de la dégradation des acides jusqu'à un pH optimal voisin de 7.

Composition du gaz formé :

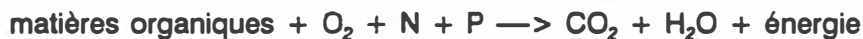
- 60-70% de CH_4
- 30-40% de CO_2
- 1-5% de H_2
- 2-7% de N_2

et quelques pourcents de H_2S provenant du soufre organique et NH_3 provenant des protéines. Ces constituants sont responsables de l'odeur caractéristique très désagréable de ces gaz.

2 - LE METABOLISME AEROBIE

La métabolisation de la matière organique dans un procédé biologique aérobie s'effectue selon 2 processus:

- une partie du substrat est oxydée de la manière suivante :



- le reste du substrat sert de source de carbone pour l'édification de nouvelles cellules :



L'évolution du métabolisme se fait en plusieurs phases (fig 6) :

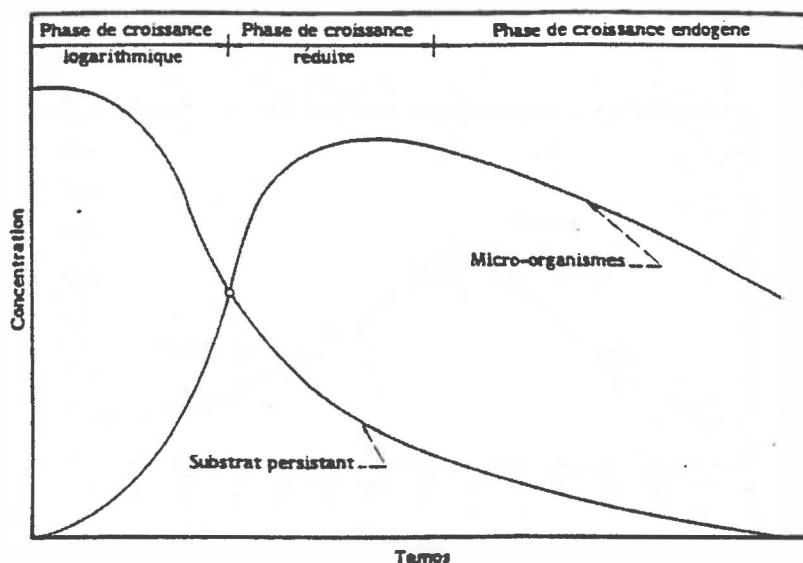


Fig 6 : Evolution de la croissance les microorganismes durant une digestion aérobie (SOURCE : 4) **

- une phase de croissance exponentielle avec accroissement de la masse de microorganismes au détriment du substrat,
- une phase de croissance réduite où le substrat commence à s'épuiser. Il y a agglomération des organismes qui se rassemblent pour former un floc gélatineux qui va décanter,
- une phase de croissance endogène au cours de laquelle, après épuisement du substrat, le taux de décès des organismes vivants augmente brusquement. Ceux-ci vont servir de nourriture aux organismes plus résistants.

*SOURCE 2: *Forum québécois sur le compostage*, Textes des conférences et comptes-rendus d'ateliers, 31 janvier 1991, Hôtel des Gouverneurs, Sainte Foy, Centre québécois de valorisation de la biomasse, 1991, 175 p.

**SOURCE 4: *Le compostage au Québec*, Problématique technique et inventaire des matériaux, Denis POTVIN, Richard CLOUTIER, Centre québécois de valorisation de la biomasse, 1990, 223 p.

ANNEXE C

Schéma du métabolisme d'une cellule humaine lors d'un empoisonnement au Cyanure. Extrait de *Cyanide Poisoning*, chap. 10 par Steven I. Baskin et

Thomas G. Brewer.

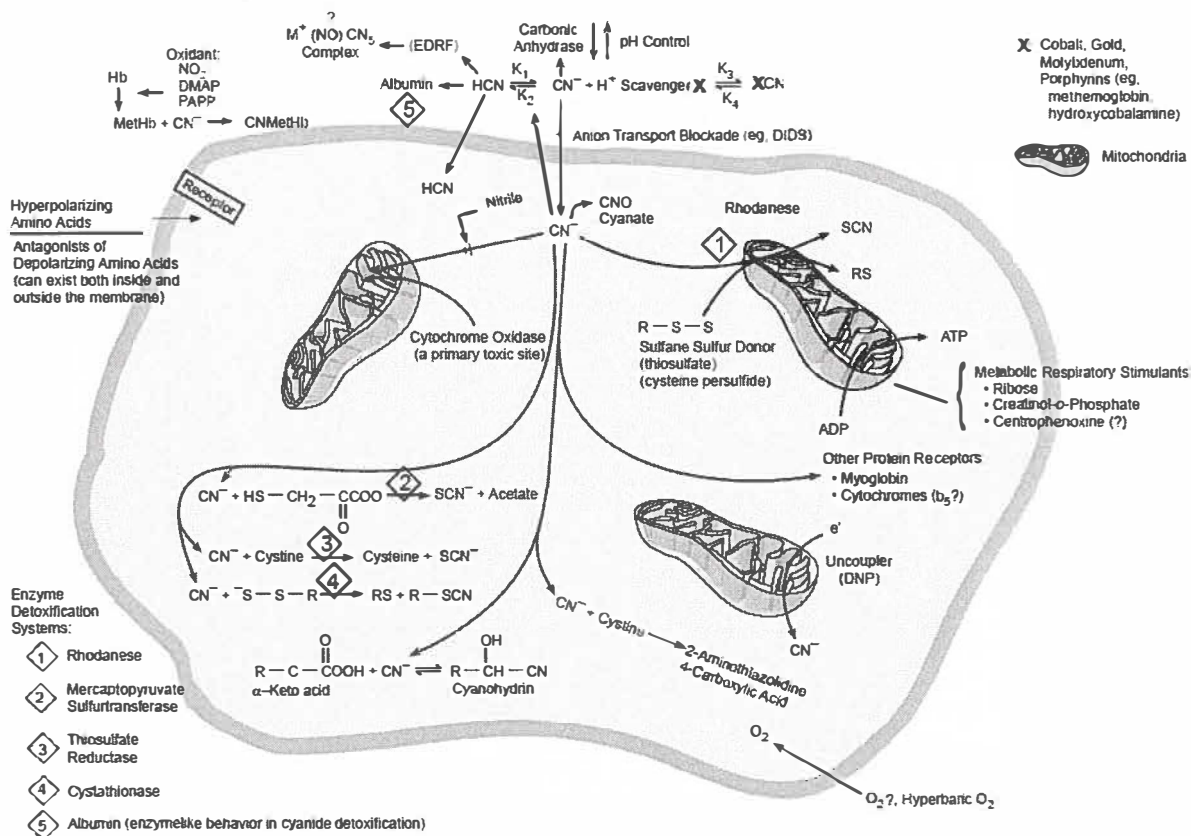


Fig. 10-1. The possible detoxification reactions for cyanide are shown for this hypothetical cell.

Cyanide can be removed by several processes before it can enter the cell. Perhaps of greatest importance is the formation of cyanomethemoglobin (CNMetHb), which is produced when the cyanide ion (CN⁻) reacts with MetHb. Methemoglobin is formed when hemoglobin (Hb) reacts with a variety of oxidants (eg, nitrite, dimethylaminopheno [DMAP], and *p*-aminopropiopheno [PAPP]). Cyanide may complex with endothelial-derived relaxing factor (EDRF, which is thought to be nitric oxide). Cyanide can interfere with the action of carbonic anhydrase and lower pH, thereby decreasing the concentration of CN⁻ in the extracellular space. Heavy metals (eg, gold, molybdenum, or cobalt salts) or organic compounds (eg, hydroxocobalamin) may scavenge CN⁻, effectively removing it from the milieu of the cell. Finally, albumin can exhibit enzymelike behavior and use bound elemental sulfur¹ to detoxify cyanide. It is also theoretically possible to prevent entrance of cyanide ions into the cell by blocking transport mechanisms with substances such as DIDS.

At least four intracellular enzymes may be involved for cyanide detoxification. The generalized reactions of rhodanese, mercaptopyruvate sulfurtransferase, thiosulfate reductase, and cystathionase are shown within the cell.

Several broad classes of reactions may serve to ameliorate cyanide toxicity. They include but are not limited to the following. Metabolic respiratory stimulants may cross into the cell and stimulate adenosine triphosphate (ATP) production through a scavenger-ATP pathway (ie, ribose) or substrate augmentation (ie, creatinol-*o*-phosphate) or a free radical mechanism (ie, centrophenoxine). Hyperbaric oxygen or perhaps oxygen itself can reduce cyanide toxicity by competing with cyanide at some site (such as cytochrome oxidase in the mitochondria, which is thought to be a primary site for cyanide poisoning). Substances that act as hyperpolarizing agents or that antagonize depolarizing amino acids at ion channel receptors may ameliorate the convulsions from cyanide. Other possible reactions are formation of cyanohydrin with α -keto acids, competitive blockade by other nitriles, and reaction with other sites such as myoglobin, cytochrome b₅, or other electron transport system (ETS) compounds (eg, dinitrophenol [DNP]). (1) Source for this statement: Lieske CN, Clark CR, Zoefel LD, et al. Temperature effects in cyanolysis using elemental sulfur. *J Appl Toxicol.* 1996;16:171-175.

DIDS: 4,4'-diisothiocyano-2,2'-disulfonic stilbene