

Rapport rédigé pour
le CQVB - Centre québécois de valorisation de la biomasse
Sainte-Foy (Québec) Canada
(Dossier TR 86-0047)

par
Denis Couillard

**Avis scientifique et technique sur l'extraction
des métaux lourds en vue de la valorisation
des boues d'épuration**

INRS-EAU
Université du Québec
C.P. 7500, Sainte-Foy
G1V 4C7

Rapport Scientifique no 227
1987

TABLE DES MATIERES

1. PROBLEMATIQUE	1
1.1 Problème des métaux lourds dans les boues	2
1.2 Stratégie d'approche pour le Québec	3
1.3 Structure d'organisation du programme de R&D sur l'enlèvement des métaux lourds	3
2. TRAVAUX ANTECEDENTS	6
2.1 Travaux de l'INRS-Eau sur l'enlèvement des métaux lourds	6
2.2 Travaux antérieurs sur l'utilisation des boues comme fertilisant agricole et sylvicole	9
2.2.1 Utilisation sur sols forestiers	
2.2.2 Utilisation en revégétation des haldes minières	
3. OBJECTIF DU PROGRAMME DE R&D.	12
4. METHODOLOGIE	13
4.1 Mise au point du procédé d'extraction des métaux lourds	13
4.1.1 Etude préliminaire en bioréacteur 5 L	
4.1.2 Optimisation des paramètres	
4.2 Détermination du pouvoir fertilisant des boues	20
4.2.1 Effets de la concentration des métaux lourds sur les sols	
4.2.2 Expérimentations en serres	
4.2.3 Expérimentations sur le terrain	
5. PERSONNEL, ECHEANCIER ET BUDGET	27
5.1 Personnel et responsabilité	27
5.2 Echancier provisoire	29
5.3 Prévisions budgétaires	31
6. REFERENCES CITEES	32

1. PROBLEMATIQUE

Depuis quelques années, le ministère de l'Environnement du Québec a beaucoup investi pour l'épuration des eaux usées avant leur rejet dans les cours d'eau (Couillard et al., 1986). Cependant, l'implantation d'usines d'épuration a fait apparaître un nouveau problème, celui de la disposition des boues. En effet, les usines d'épuration produisent une grande quantité de boues dont on ne sait pas encore comment disposer car, ces sous-produits risquent de devenir à leur tour une source de pollution. Toutefois les connaissances acquises au Québec sur ces effluents démontrent des possibilités fertilisantes fort intéressantes à condition qu'une gestion adéquate soit mise en place.

Une telle gestion doit répondre non seulement à la question de manipulation et de disposition des boues mais également au processus en amont, à savoir la recherche et le développement de procédés adéquat de ces effluents.

Lors du Séminaire sur la "Valorisation des déchets urbains" (1986), il a été soulevé à plusieurs reprises et retenu dans le rapport final que l'un des aspects critiques d'utilisation de cette biomasse de basse gamme est la présence de métaux lourds toxiques. Les recommandations ainsi arrêtées (pages 3, 4, 5 et 7) incitent au renforcement de la recherche fondamentales et appliquée pour libérer cette biomasse de plusieurs éléments toxiques dont les plus importants sont les métaux lourds. Il est à noter aussi le programme en cours d'élaboration par le MENVIQ pour asseoir une technique appropriée d'épandage des boues (zone pilote de la Communauté régionale de l'Outaouais).

C'est dans cette lignée et en vue de mettre au point un procédé adéquat d'extraction et de bénéficier du pouvoir fertilisant des effluents urbains que le CQVB a, dans un premier temps, élaboré un avis technique (2).

Ce document de base recommande deux avenues connues sur le plan scientifique pour l'extraction des métaux lourds, à savoir:

- 1) la voie physico-chimique qui fait appel aux réactions d'acidification et de précipitation et aux réactions d'absorption sur matériaux adéquats tel que la tourbe;
- 2) la voie biologique qui fait appel au pouvoir des microorganismes de retenir les métaux lourds dans leur membrane cellulaire.

1.1 Problème des métaux lourds dans les boues:

Lorsqu'un effluent d'eaux usées passe à l'intérieur d'une station d'épuration, à peine 1% du débit total de l'effluent est converti en boues. Cependant, ces boues contiennent environ 50 à 80% de la quantité totale de métaux lourds admis à cette station. De plus, le contenu en métaux lourds de ces mêmes boues est de l'ordre de 0,5 à 2% en poids sec (Henry et Wong, 1984) et peut atteindre quelquefois 4% (Lester et al., 1983). Ce phénomène de concentration des métaux lourds dans les boues, jusqu'à un niveau significativement élevé, s'avère problématique lorsqu'on doit établir un mode d'élimination de ces boues contaminées qui minimise les impacts environnementaux.

Les boues épandues sur les sols cultivés peuvent engendrer la contamination des végétaux terrestres et aquatiques, posant ainsi des risques pour la santé publique quand l'assimilation de ces métaux lourds les fait remonter la chaîne alimentaire jusqu'aux consommateurs humains (Suttle et al., 1975).

1.2 Stratégie d'approche pour le Québec:

Le Gouvernement du Québec (1984; 1983) et Environnement Canada (1985) ont reconnu que le recyclage des boues résiduelles pour leur valorisation agricole était l'avenue privilégiée à leur gestion, ce qui est appuyé par CRIQ, CQVB & Gouvernement du Québec (1986) concernant le recyclage des déchets dans son ensemble. Cependant, tous reconnaissent les risques associés aux métaux lourds qu'elles contiennent.

Par conséquent, si la quantité de métaux associés aux boues était diminuée, un plus grand volume de boues pourrait être utilisé pour fertiliser les terres agricoles et forestières sans risquer des augmentations dans les sols de ces métaux indésirables.

Il faut donc viser à les éliminer. C'est l'objectif de l'approche préconisée par le CQVB en commandant l'avis technique intitulé: "Extraction des métaux lourds en vue de la valorisation des boues d'épuration" (TR 86-0047) auprès de l'INRS-Eau (Couillard, 1987). Il visait à cerner la problématique posée au Québec par la présence des métaux lourds dans les boues provenant de traitements biologiques des effluents urbains, industriels ou agricole, et envisager par après les potentiels d'utilisation de ces boues détoxifiées. Les procédés d'enlèvement des métaux lourds ont été examinés, la situation actuelle de la R&D au Québec décrite et les intérêts et besoins des ministères québécois identifiés. Les recommandations finales de cet avis technique ont guidé à l'élaboration du squelette supportant le programme de R&D décrit ci-dessous.

1.3 Structure d'organisation du programme de R&D sur l'enlèvement des métaux lourds:

Les recommandations, visant à circonscrire la meilleure stratégie pour réaliser la valorisation des boues d'épuration, ont notamment focalisé sur la nécessité:

- d'établir un programme de R&D concerté, centré sur le seul noyau de chercheurs déjà actifs dans le domaine, l'équipe de l'INRS-Eau, autour de laquelle viendront se greffer les équipes de l'IAF et de l'UQAM, ainsi que celle du Centre spécialisé en technologie minérale (voir schéma d'intervention joint).

- de répartir le programme de R&D en question, sur deux volets principaux:
 - 1) l'étude des procédés d'enlèvement des métaux lourds des boues: procédés biologiques et physico-chimiques;
 - 2) l'étude sur le terrain et dans les serres du potentiel fertilisant des boues purifiées sur les sols agricoles, forestiers et miniers.

- d'organiser une action de concertation impliquant les organismes publics et para-publics tels que: MENVIQ, MERQ, MAPAQ, CUQ et des groupes-conseils tels que: Poulin-Thériault, Roche Ass., etc.

Ces recommandations seront prises en ligne de compte pour servir de structure de base autour de laquelle s'articuleront les différentes parties composant le présent plan de travail.

SCHEMA D'INTERVENTION POUR PROGRAMME DE RECHERCHE SUR L'UTILISATION
DES BOUES D'EPURATION

EXTRACTION DES METAUX LOURDS EN VUE
DE LA VALORISATION DES BOUES D'EPURATION

PHYSICO-CHEMIQUE

Acidification et précipitation des métaux lourds par neutralisation et adsorption sur tourbe
Adsorption des métaux lourds sur lit de tourbe

BIOLOGIQUE

Solubilisation des métaux lourds par culture de thiobacillus

○ Points d'interventions pour l'enlèvement des métaux lourds

★ Les lagunes aérées font parties des traitements biologiques

CSTM Centre Spécialisé en Technologie Minérale

IRBM Institut de Recherche en Biotechnologie à Montréal

IAF Institut Armand-Frappier

UQAM Université du Québec à Montréal

→ Lignes de procédés de traitement

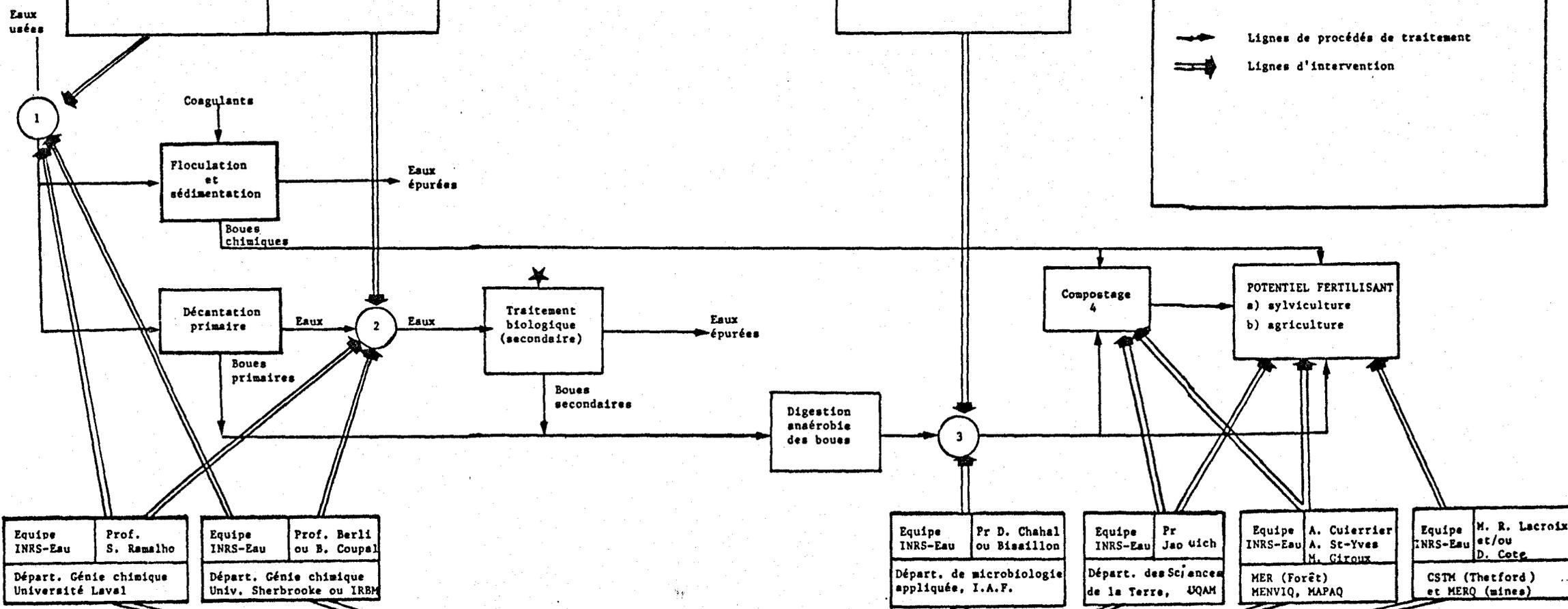
⇨ Lignes d'intervention

PROCÉDÉS D'INTERVENTION

POINTS D'INTERVENTION SUR LA CHAÎNE DE TRAITEMENT

CHAÎNE D'ÉPURATION PHYSICO-CHEMIQUE DES EAUX USÉES

CHAÎNE D'ÉPURATION BIOLOGIQUE DES EAUX USÉES



INTERVENANTS POTENTIELS INSTITUTIONS

OBJECTIF DE L'INTERVENTION

STRATÉGIE D'ACTION FUTURE

ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE COMPARATIVE
(Consultant potentiel: Firms Poulin-Thériault)

IDENTIFICATION DE LA FILIÈRE LA PLUS PERFORMANTE

STRATÉGIE DE MISE

2. TRAVAUX ANTECEDENTS

2.1 Travaux de l'INRS-Eau sur l'enlèvement des métaux lourds:

L'équipe de l'INRS-Eau (Université du Québec) s'est penchée sur le problème des métaux lourds dans les boues depuis plus de trois ans. Les études ont notamment porté sur la comparaison entre les procédés biologiques utilisant les souches de Thiobacillus et les procédés chimiques de traitement à l'acide (Tyagi et Couillard, 1987).

Tous les deux procédés sont basés sur la solubilisation des métaux lourds dans des boues à certaines conditions de pH et de potentiel d'oxydo-réduction (POR). Une fois solubilisés (extraits), les métaux lourds seront précipités à la chaux sous forme d'hydroxydes insolubles.

Les travaux ont fait ressortir l'importance d'un ajustement du potentiel d'oxydo-réduction pour faire dévier l'équilibre chimique vers la formation d'ions métalliques solubles. Le P.O.R. optimum peut être atteint par:

i) l'oxydation chimique: par l'addition d'un agent oxydant ou par aération.

ou

ii) l'oxydation biologique par lixiviation microbienne en utilisant les cultures mixtes de Thiobacillus thiooxidans et ferrooxidans.

i) Résultats obtenus par procédé chimique

L'acide sulfurique (1N) est utilisé pour acidifier des échantillons de boues de 200 ml, agités à 25 RPM, à la température de la pièce (22°C).

Les solides sont ensuite séparés par centrifugation et la portion liquide est analysée pour évaluer la teneur en métaux lourds selon la procédure "Standard Methods" (APHA - AWWA-WPCF, 1980).

Les résultats ont démontré que les facteurs de contrôle les plus critiques sont le pH et la teneur en solides des boues, dépendamment de la nature du métal lourd considéré. Une limite a été atteinte après un temps de 24 h de solubilisation.

Les travaux ont surtout porté sur le zinc, le plomb et le cuivre.

- a) Pour le zinc, à une concentration en solides de 0.5%, une solubilisation de 94% de zinc présent dans la boues a été obtenue à un pH de 2.0, en dedans de 3 h. A des pH de 3 à 4, le temps requis est plus long pour atteindre le seuil de solubilisation maximale.
- b) Pour le cas du plomb, le maximum de réduction obtenu se situe à 86% à un pH de 1.5 et à une concentration en solides de 0.5%. Avec des teneurs croissantes en solides, l'efficacité maximale décroît et le temps requis pour atteindre le seuil de solubilisation maximale est plus long (25 hres).
- c) Pour le cuivre, la solubilisation s'avère très longue (50 hres), et un délai de 10 hres fut nécessaire à pH=3 pour obtenir les premiers signes de solubilisation. Le maximum de solubilisation peut cependant atteindre 87% à une teneur en solides de 0.5% et un pH de 1.5. Dans ce cas-ci, l'effet des paramètres de contrôle (pH et % en solides) a été très notable: à une teneur en solide de 0.5%, l'efficacité dégringole de 87% à 48% en faisant varier le pH de 1.5 à 2.0.

ii) Résultats obtenus dans le procédé biologique

Les souches utilisées sont Thiobacillus ferrooxidans et Thiobacillus thiooxidans. Les cultures servant de semence sont d'abord maintenues dans le milieu 9K, et graduellement adaptées à une boue secondaire d'épuration provenant d'un digesteur anaérobie, par transfert dans des Erlenmeyer de 500 ml.

Ceci constitue l'inoculum pour les bioréacteurs de 5 L, où eut lieu le mélange égal de cultures de T. ferrooxidans et de T. thiooxidans.

Les résultats obtenus en discontinu montrent des niveaux de solubilisation de 97% pour le Zn, 55% pour le Pb et 75% pour le cuivre dans le cas des cultures mixtes. Les temps de séjour requis pour atteindre la solubilisation maximale sont beaucoup plus longs qu'avec les procédés chimiques, variant entre 9 et 16 jours.

Dans le cas du cuivre par exemple, c'est seulement à partir du 9^e jour où une solubilisation mesurable fut détectée. En général, les résultats obtenus avec une culture mixte (50-50) des deux thiobacilles précités sont de 20% plus performants qu'avec ceux obtenus avec une culture unique de T. ferrooxidans.

En opération continue, le taux de solubilisation augmente avec l'inverse du temps de rétention (ou taux de dilution) pour le Cu et le Zinc. Une concentration de Cu de 600 mg/kg de boue sèche a été atteinte avec un temps de rétention de 5 jours. Les pourcentages d'extraction en continu ont été de 96, 75, 55 et 50% respectivement pour Cu, Pb, Zn et Cd.

D'autres résultats seront bientôt obtenus quant aux essais d'optimisation des composantes formant le milieu de culture. Les étapes d'expérimentation proposées dans le plan de travail débutent et tiennent compte des résultats acquis présentés dans cette section.

2.2 Travaux antérieurs sur l'utilisation des boues comme fertilisant agricole et sylvicole:

Dans la stratégie d'approche recommandée par l'avis technique TR 86-0047, le deuxième volet de R&D concerne l'utilisation des boues exemptes de métaux lourds comme fertilisants agricoles et sylvicoles. L'équipe de l'INRS-Eau a déjà entamé des recherches préliminaires pour l'utilisation des boues d'épuration en amendement des sols forestiers (Couillard et Grenier, 1987): la section ci-dessous rend compte des résultats acquis.

L'équipe de chercheurs du Centre spécialisé en technologie minérale de Therford Mines a, de son côté, appliqué les boues d'épuration aux résidus miniers (halles minières) en vue de leur revégétation. Les résultats de leurs travaux seront aussi résumés ci-dessous.

2.2.1 Utilisation sur sols forestiers:

Les travaux réalisés au Québec ont été fort limités, car, jusqu'à ces cinq dernières années, peu d'usines de traitement des eaux usées étaient en opération, d'où l'absence d'intérêt et d'urgence de R&D sur les procédés de valorisation des boues.

Contrairement à ce qui se fait aux Etats-Unis, où plusieurs stratégies de disposition des boues sont appliquées, la majeure partie des travaux de R&D au Québec touche l'utilisation en sols forestiers.

Une brève revue chronologique des travaux réalisés et des résultats obtenus est présentée ci-dessous. Ces travaux furent effectués au Centre de recherche forestière des Laurentides à l'INRS-Eau, au Collège Mc Donald, au MERQ, MENVIQ et au Centre spécialisé en technologie minérale à Thetford Mines.

Les premiers travaux furent réalisés par Gagnon (1972, 1974) du Centre de recherches forestières des Laurentides. Les essais ont porté sur une plantation d'épinettes blanches (Picea glauca Moench Voss) près de Grand-Mère. Une augmentation de croissance en hauteur de 20% a été observée après trois (3) ans, grâce à l'application des boues.

A l'INRS-Eau, Grénier (1985) a utilisé les boues résiduelles de Valcartier (près de Ste-Foy) pour fertiliser des semis de mélèze laricin (Larix laricina Du Roi K. Koch) en les faisant croître sous serres. Après une année, des gains de hauteur de 350% et de diamètre de 210% ont été observés. Un total de 10 000 kg de boues (base sèche) a été appliqué à l'hectare.

Au Collège Mc Donald de l'Université Mc Gill, les travaux de Schuman (1987) ont porté sur des peupliers hybrides (Populus deltoides cv. angulata X P. trichocarpa), fertilisés avec 400 000 kg de boue (base liquide) à l'hectare. Une augmentation de biomasse de 246% a été observée après trois ans.

Giroux (1986) de l'INRS-Eau et Gingras (1985) de l'UQAM ont examiné les possibilités d'épandage de boues en milieu agricole. Leurs travaux ont évalué la surface nécessaire pour la quantité de boues produites. Aucune expérimentation sur le terrain n'a été faite.

D'autres essais sont présentement menés sur le terrain par Veilleux (1987) du MER (section forêt) et par St-Yves et Beaulieu (1987) du MENVIQ pour les applications agricoles. Les résultats de ces travaux ne sont pas disponibles, mais les essais se poursuivront en 1987.

2.2.2 Utilisation en revégétation des haldes minières:

Pour ce type d'application, les travaux les plus avancés semblent être ceux de l'équipe du Centre spécialisé en technologie minière (CSTM) du Cegep de l'amiante (Thetford Mines).

Cette équipe de chercheurs a testé diverses combinaisons de boues + fertilisant chimique + amendements sur les plantes pour la revégétation des haldes minières (résidus d'amiante). Les travaux préliminaires ont été très encourageants pour les volets réalisés en serres et sur le terrain en surface plane (CSTM, 1986). Ils se poursuivront en 1987 pour le volet sur les surfaces en pente, caractéristique la plus problématique de ce type de dépôts.

La stratégie d'approche telle que décrite dans l'avis technique TR 86-0047 prévoit la participation de l'équipe du CSTM dans la partie des travaux concernant l'utilisation des boues comme fertilisant agricole et sylvicole.

3. OBJECTIFS DU PROGRAMME DE R&D

L'objectif global vise à l'obtention d'un procédé optimal de valorisation des boues d'épuration par enlèvement biologique des métaux lourds et utilisation subséquente de ces boues purifiées comme fertilisants pour plantes en serres et en sols agricoles et forestiers.

Dans le procédé biologique d'extraction des métaux lourds par lixiviation avec les souches mixtes de Thiobacillus thiooxidans et ferrooxidans, l'approche portera sur trois principaux éléments:

- a) paramètres optimisés (physico-chimique, mécanique et biologique) en opération en cuinée;
- b) paramètres optimisés en opération continue et semi-continue;
- c) design optimum de bioréacteur (recyclage des cellules, air-lift et autres formes de fixation des cellules);

Une fois les boues libérées, à des seuils acceptables, de leurs métaux lourds, les essais sur sols de cultures, viseront à identifier:

- les meilleures conditions opérationnelles d'application sur les plantes en serre, les espèces les plus performantes et les sols les mieux adaptés;
- les meilleures conditions opérationnelles pour l'application sur les sols agricoles et forestiers sans risque de contamination des nappes phréatiques due à la mobilité des métaux lourds résiduels et des nitrates dans le sol.

Les travaux devraient aboutir à la recommandation d'une filière intégrée et opérationnelle de valorisation des boues d'épuration.

4. METHODOLOGIE

Sera décrite ci-dessous la méthodologie des deux principaux volets qui composent le programme de recherche et développement:

- 1) mise au point du procédé d'extraction des métaux lourds
- 2) détermination du pouvoir fertilisant des boues

Dans cette méthodologie, on expose le protocole expérimental, les matériaux et les équipements utilisés, pour chaque étape de recherche au laboratoire ou de travail en serres et sur le terrain.

4.1 Mise au point du procédé d'extraction des métaux lourds:

4.1.1 Etude préliminaire en bioréacteur 5L:

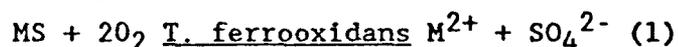
Il s'agira d'enlèvement des métaux lourds (Cu, Pb, Zn et Cd) des boues épuration par lixiviation biologique. Dans le cadre de cette première étape de démarrage du programme de R&D, les boues à traiter seront prélevées d'une station d'épuration biologique des effluents municipaux.

Il y aura lieu, dans une deuxième étape, suite à concertation avec les autres intervenants gouvernementaux et municipaux, de voir à l'application du procédé avec les boues chimiques des effluents municipaux.

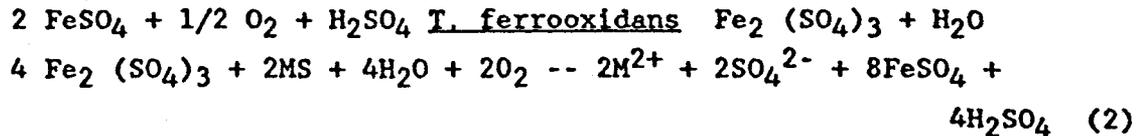
4.1.1.1 Souches bactériennes et milieu de culture:

Dans la section discutant sur les résultats déjà obtenus par l'équipe de l'INRS-Eau sur le procédé de lixiviation biologique, il a déjà été mentionné que ce sont les souches de Thiobacillus qui oxydent les sulfures en sulfates:

soit par procédé direct:



soit par procédé indirect:



Les microorganismes en question, Thiobacillus ferrooxidans (ATCC 19859) et Thiobacillus thiooxidans (ATCC 19377), peuvent être obtenus au bureau de "American Type of Culture collection".

Le milieu de culture est le 9K avec addition de 5g/L de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ à la place du sulfate ferreux à pH 4.0. Les deux organismes croissent dans un agitateur mù par giration à 125 tours à la minute. Les cellules sont transférées deux fois par semaine à un milieu fraîchement préparé et la culture est adaptée graduellement aux boues d'épuration biologique.

4.1.1.2 Inoculum et bioréacteurs:

Les cellules ci-haut adaptées sont maintenues dans des erlenmeyer de 500 ml contenant 100 ml de milieu de culture à pH 3.0 et à 28°C.

Ces flacons sont agités à 250 RPM et maintenus en giration dans un incubateur-agitateur de New-Brunswick Scientific Co. Pour les cultures mixtes, les T. thiooxidans et T. ferrooxidans sont cultivés séparément dans des flacons de 500 ml et mélangés ensuite à volume égal. Le mélange ainsi obtenu sert d'inoculum aux bioréacteurs. Dans toutes les expériences, une dose de 10% en volume d'inoculum est à considérer.

Les bioréacteurs utilisés en laboratoire ont 5L de volume et sont munis d'un dispensateur d'air fait de verre fritté et d'un agitateur. Le volume d'air est de l'ordre de 0.5 en V/V à la minute. Le pH initial est ajusté à 4.0 avec de l'acide sulfurique. Un échantillon de 10ml est retiré chaque jour pour analyse des métaux solubilisés.

4.1.1.3 Les méthodes analytiques:

Les échantillons sont centrifugés à 10 000 RPM et leur teneur en métaux lourds déterminée par spectromètre d'absorption.

De la même façon, la teneur en sulfure sera déterminée selon "Standard Methods". La concentration en sulfate sera évaluée par turbidimétrie. Les métaux lourds solubilisés sont récupérés par addition de la chaux. Généralement, un pH au-dessus de 10 est nécessaire.

4.1.2 Optimisation des paramètres:

La stratégie d'approche adoptée est orientée vers l'optimisation des paramètres d'opération selon le cheminement suivant:

4.1.2.1 Opération en cuvette:

Elle touchera à la fois les paramètres physico-chimiques, les paramètres mécaniques et les paramètres biologiques.

a) Paramètres physico-chimiques

L'optimisation du pH, de la température et de la concentration des matières nutritives s'effectuera dans des flacons agités. Le pH est un facteur très important qui contrôle le lessivage microbiologique. A des pH supérieurs à 3,5, l'ion ferrique (Fe^{3+}) qui est une source d'énergie pour T. ferrooxidans, précipite sous forme d'hydroxyde ferrique et ne devient plus disponible pour les bactéries. Cette espèce de bactérie est acidophile, mais ne croit pas à un pH inférieur à 1. La littérature rapporte que les métaux lourds semblent moins disponibles en milieu acide (2), par conséquent l'intervalle à considérer se situe entre 2.5 et 4.5 unités de pH.

Par la suite, on déterminera la température optimale dans la zone de 20 à 40°C. Les flacons seront autoaérés et agités sur un agitateur à plaque rotative. Le taux de lessivage maximum des métaux sera le critère qui définira les conditions de pH et de température optimale.

Certaines substances composant le milieu nutritif comme $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KCl , K_2HPO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ subiront des variations de concentration. La concentration d'acide phosphorique (K_2HPO_4) variera dans une gamme de 0 à 3,5 fois la concentration utilisée dans le milieu de culture initial, alors que dans le cas du sulfate d'ammonium, les concentrations seront de 0 à 10 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$. Les autres substances fluctueront dans un rapport de concentration entre 0 et 4. L'optimisation des concentrations des matières nutritives dans le milieu de culture vise à améliorer de trois ou quatre fois le taux d'extraction des métaux établi lors des travaux antécédents (22).

b) Paramètres mécaniques

Il s'agit de déterminer les conditions optimales ayant trait à:

- a) l'intensité d'agitation
- b) l'intensité d'alimentation en O_2 et CO_2
- c) la concentration en solide

La disponibilité de O_2 et du CO_2 est sans aucun doute un facteur qui contrôle l'extraction des métaux dans le processus de lessivage bactériologique. La solubilité du CO_2 est faible dans des conditions de pH acide, ce qui peut devenir un facteur limitatif pour la croissance cellulaire. L'effet de brassage et la concentration des boues sont aussi des paramètres importants pour la disponibilité de O_2 et du CO_2 (23, 24).

Il a été démontré que la disponibilité du CO_2 pourrait être un facteur limitatif, surtout dans le cas de la lixiviation du sulfure de zinc. L'effet de l'air sous pression sur l'extraction du cuivre a augmenté le rendement de 25%. Ceci serait dû à l'activité bactérienne accrue par une meilleure aération.

L'effet de la concentration en solides sera aussi examiné, car il peut réduire le taux de transfert en oxygène et indirectement l'activité microbienne des T. ferrooxidans. L'inhibition par des concentrations élevées des métaux lourds solubilisés peut nuire à la croissance des bactéries.

Une méthode de séparation graduelle ou de dilution progressive pourra contrecarrer cet effet néfaste et améliorer le rendement en lixiviation.

c) Paramètres biologiques

Les principaux paramètres à étudier concernent la durée d'acclimatation des cultures aux concentrations élevées de métaux lourds, leur effet d'inhibition, l'effet du déphasage d'ensemencement des cultures mixtes et le ratio des cultures mixtes utilisées.

Ces expériences détermineront aussi les seuils d'inhibition qui influent sur le délai avant que l'oxydation biologique commence. Dans les opérations en cuvée, l'état physiologique des microorganismes varie avec la consommation progressive des nutriments et l'accumulation des produits. Chaque point sur la courbe-cuvée représente un état physiologique différent. Les conditions métaboliques correspondantes aux taux de lixiviation maximale peuvent être obtenues en comparant la courbe de croissance et celle de lixiviation. Ces résultats en opération-cuvée serviront de guide à l'opération en continu.

L'étude cinétique des cultures mixtes sera effectuée dans des contenants de 10L. Les ratios d'inoculum des deux souches de Thiobacillus seront variés entre 1:1, 1:2 et 2:1. L'effet du déphasage dans le temps de l'ensemencement de chacune des espèces sera étudié. On estimera aussi les paramètres de cinétique de croissance tels que le taux spécifique de croissance et le taux spécifique d'extraction.

4.1.2.2 Opération en semi-continu et en continu:

Dans ce cas-ci, les substrats (ou nutriments) sont fournis progressivement aux cultures. La vitesse d'alimentation gouverne le temps de séjour hydraulique et le taux de dilution. La concentration de biomasse cellulaire présente peut être maximisée par un recyclage des cellules.

La vitesse de réaction biologique peut être cernée mathématiquement grâce à l'établissement de modèles d'expressions cinétiques. Toutes ces étapes serviront finalement au choix d'un design optimum de bioréacteurs (en cuvée, en semi et en continu avec ou sans recyclage, à alimentation séquentielle, en lit fluidisé sans support, etc.).

a) Optimisation du taux de dilution

La variation du taux de dilution permet d'étudier l'effet du temps de séjour requis par les bactéries dans le bioréacteur. Ce temps de séjour doit être minimisé autant que possible, sans pour autant risquer un lessivage de la culture.

Cependant, il a été déjà noté que la lixiviation peut tendre dans la direction opposée, c'est-à-dire qu'elle peut augmenter avec une diminution du temps de séjour. Ainsi, l'optimisation du taux de dilution (l'inverse du temps de séjour) est de la plus grande importance.

b) Optimisation du taux de recyclage

La vitesse de lixiviation peut être accrue en accroissant la quantité de la biomasse dans le bioréacteur. Le recyclage des cellules de biomasse permet de renvoyer une partie de cette biomasse vers le bioréacteur. Or, dans ce cas-ci, la biomasse est liée à la boue qui, une fois recyclée peut mener à l'inhibition de la croissance due à la pression osmotique. Il est nécessaire de déterminer le ratio optimum de recyclage permettant de résoudre à la fois les deux problèmes.

Une autre possibilité de solution consiste à recycler la portion liquide pour augmenter la concentration des métaux lixiviés tout en évitant le seuil d'inhibition. Une solution alternative consiste à adopter l'alimentation séquentielle. Des essais seront effectués à cet effet.

c) Développement d'expressions cinétiques pour un meilleur design

Les métaux associés aux boues digérées anaérobies se répartissent en différentes proportions à l'intérieur et à l'extérieur des cellules.

On sait que la vitesse d'extraction des métaux est dépendante de la vitesse d'oxydation du fer ferreux (Fe^{2+}) en fer ferrique (Fe^{3+}) par les cellules bactériennes. En d'autres termes, l'extraction des métaux est en fonction directe de la croissance des bactéries, qui est elle-même reliée à la production d'énergie.

Dans le cas des métaux extracellulaires, on peut exprimer la vitesse d'extraction de ces métaux à l'aide d'une corrélation avec la croissance de la culture en régime permanent, comme dans les modèles proposés par Monod.

Les effets inhibiteurs des métaux sur la croissance pourront être subséquemment incorporés lorsque le type d'inhibition, soit compétitif, soit non compétitif, sera déterminé.

Enfin, le problème se résume à déterminer des constantes mathématiques (u_m , Y , K_s , K_i , m , q) pour différentes conditions du procédé. L'inhibition par le substrat peut aussi être étudiée à des concentrations élevées de boues considérant que l'inhibition par les métaux ou par le substrat peut se produire simultanément dans la nature. On vérifiera, grâce à des modèles de simulation utilisant des résultats expérimentaux, si l'effet des deux types d'inhibition est additif ou multiplicatif (synergétique).

d) Sélection d'un design optimum de bioréacteur

L'état physiologique d'une culture peut être contrôlé dans un chemostat en alimentation continue.

Puisque le niveau de densité cellulaire peut être augmenté grâce à la séparation des cellules et à leur recyclage dans le réacteur, les fortes concentrations de boues et le degré d'inhibition par les métaux solubilisés pourraient être contrôlés avec un réacteur à alimentation séquentielle. Dans le but d'améliorer le taux d'extraction des métaux, plusieurs types de bioréacteurs (par cuvée, alimentation continue sans recyclage, alimentation continue avec recyclage de la biomasse, alimentation séquentielle, à lit fluidisé sans support) seront étudiés.

Toute cette première partie de l'étude de l'enlèvement des métaux lourds par lixiviation biologique aura permis d'optimiser les conditions d'opération et de design pour mettre au point un procédé biologique capable de séparer les métaux lourds des boues d'épuration, en vue de leur utilisation ultérieure comme fertilisants sur les sols de culture en minimisant les risques de déplacement de ces métaux lourds dans les sols ou dans les plantes elles-mêmes.

4.2 Détermination du pouvoir fertilisant des boues:

4.2.1 Effets de la concentration des métaux lourds sur les sols:

Une fois que les boues sont appliquées sur les sols, les métaux se distribuent entre les différentes fractions du système du sol (phases solides et solubles) et ils participent aux diverses réactions d'équilibre entre ces fractions (25). Les métaux qui sont immédiatement pris en charge par les racines des plantes sont en phase liquide, ce qui correspond aux métaux en solution dans le sol. Cependant, la disponibilité des métaux pour les plantes ne dépend pas seulement de la concentration de ces métaux en solution dans le sol, mais aussi de la capacité de la phase solide à maintenir, contre l'épuisement, le gradient de concentration.

La capacité du sol à retenir les métaux lourds dans la phase solide dépend de son pH (indirectement de son groupement OH) et de sa capacité d'échange cationique (CEC). Dans la plupart des cas, le CEC du sol dépend de la matière organique et du contenu en argile et en oxyde.

4.2.1.1 Etude de seuil de comptabilité des sols aux métaux lourds:

La concentration des métaux compatibles avec la biologie des sols sera simulée avec du NaNO_3 après avoir mélangé les boues (lessivées à différents degrés) avec le sol. Les solutions d'extraction qui contiennent des acides forts ou des agents chélateurs ne sont pas absorbés par les sols. Par exemple, la solution de NH_4OH + EDTA extrait environ 80% du cadmium ajouté, tandis que la plante n'assimile que 7 à 9% de métal. Au contraire, une solution électrolytique neutre de faible intensité, comme une solution de NaNO_3 , simule la plupart du temps, la partie soluble des métaux dans les sols. Cette solution évalue avec succès la concentration des métaux compatibles avec la biologie des sols qui demeure pratiquement uniforme et toujours égale pour différents types de sol. Les résultats obtenus par extraction avec du NaNO_3 seront corroborés expérimentalement avec ceux obtenus dans les expériences d'absorption par les plantes.

Les expériences en laboratoire vont apporter de l'information comparative sur les diverses qualités de sols pouvant influencer la prise en charge des métaux par les plantes, et ce, sous des conditions constantes. Des expériences, à des taux différents de boues sèches et à des niveaux variables d'azote, seront effectuées. Deux types de sol seront utilisés, à savoir, de la glaise alcaline et sablonneuse. Les boues lessivées à des divers degrés (c'est-à-dire l'enlèvement de métaux selon des degrés divers) et selon différents pH seront employées pour mélanger avec le sol.

4.2.1.2 Effets sur la prise en charge de N et P par les plantes:

Les boues lessivées seront aussi évaluées pour leur contenu en azote et en phosphore disponible aux différentes plantes. Les paramètres suivants seront observés:

- le rapport entre la prise en charge et la récupération de l'azote;
- le rapport entre la prise en charge et la disponibilité du phosphore;
- le rapport entre l'accumulation des métaux dans les plantes et la disponibilité des métaux pour la prise en charge par les plantes.

4.2.1.3 Effets sur les microorganismes des sols:

Afin de déterminer l'effet du contenu en métaux lourds des boues sur les microorganismes du sol, une solution nutritive (pH=6) contenant du glucose, du peptone et des sels nutritifs sera inoculée avec des microorganismes extraits de boue contaminée. Ces échantillons seront incubés à 25° et leur taux de respiration sera mesuré par le respiromètre Warburg. Les résultats seront comparés à ceux obtenus avec des boues brutes.

4.2.1.4 La mobilité des métaux lourds dans les sols:

Les expériences sur le terrain seront effectuées afin de déterminer la lixiviation métaux dans le sol à la suite de l'addition des boues. Les boues seront épandues sur un site à l'aide d'un tuyau d'arrosage relié à un réservoir, de volume connu, muni d'une pompe à vide.

Par ce moyen, elles vont être appliquées également sur toute la surface de l'aire préétablie. Les échantillons seront pris dans la couche de la litière et dans la couche supérieure du sol. Lors des expériences sur le terrain, les boues seront épandues au sol en quantités variables et les échantillons seront pris à diverses profondeurs, soit de 0 à 15 cm et de 30 à 45 cm pour être analysés afin d'en déterminer leur concentration en métaux.

4.2.2 Expérimentations en serres:

Dès que des quantités suffisantes de boues traitées seront disponibles, les expériences en serres seront entreprises, suivies ultérieurement d'expériences sur le terrain. Cette partie du programme sera réalisée avec la collaboration technique et/ou financière de l'UQAM, du MAPAQ, du MENVIQ et du MER (section forêt).

Les expérimentations en serres sont préliminaires aux applications sur les terrains. Elles visent à réduire le nombre de variables à tester (voir tableau 1) selon les conditions éventuellement rencontrées sur le terrain.

4.2.2.1 Taux de minéralisation:

Le taux de minéralisation permet de connaître les quantités de boues à épandre pour ne pas intoxiquer les plantes. Les taux de minéralisation de N, P et C seront mesurés. De plus, les eaux de percolation seront recueillies pour évaluer les pertes, surtout en NO_3 . Le tableau 1 est un résumé du nombre d'expériences possibles pour cette partie, nombre qui peut aller jusqu'à 64.

4.2.2.2 Analyses de croissance des plantes:

Les résultats de l'expérience de minéralisation indiqueront les quantités de boues à employer pour chaque type de sols. De plus, les eaux de percolation seront recueillies pour évaluer les pertes, surtout en NO^{-3} . La biomasse (hauteur, diamètre et masse) sera évaluée, de même que la composition chimique des tissus des plantes tel que N, P, C, Cu, Zn, Pb, Cd.

Le tableau 2 est un résumé du nombre d'expériences possibles pour cette partie, nombre qui peut aller jusqu'à 144.

Les résultats de cette expérience seront utilisés pour fixer les conditions des essais sur le terrain.

4.2.3 Expérimentations sur le terrain:

Les expériences en serres auront permis de circonscrire les conditions optimales d'implantation du système "boues-cultures-sols" sur le terrain. Les mêmes analyses que celles suggérées en 4.2.2.2 et au tableau 2 seront reprises ici, à l'exception de la collection des eaux de percolation. La variable "type de sol" sera considérée dans l'optique d'une bonne représentativité à l'échelle du Québec.

TABLEAU 1

Description des expériences de minéralisation en serres

Variables	Caractéristiques	Nombre de variables	Remarques
Types de traitement	Enfouissement En surface	2	L'enfouissement est envisagé pour l'agriculture et l'application en surface pour la foresterie.
Doses de boue	0, 100, 250, 500 Kg N/ha	4	N étant souvent l'élément limitatif à la croissance
Types de boues	Brute Lixiviée	2	
Types de sols	A, B, C, D	4	A déterminer après rencontre avec les spécialistes du MER et du MAPAQ.
Nombre d'expériences possibles		64	
Nombre de répétitions suggérées		4	Accepté pour interprétations statistiques valables.
Nombre d'unités à mettre en place		256	

TABLEAU 2

Description des expériences de croissance
en serres et/ou sur le terrain

Variables	Caractéristiques	Nombre de variables	Remarques
Types de traitement	Enfouissement En surface	1	Un type par sol et par type de culture (forestier ou agricole).
Doses de boues	0, x, y	3	Selon la meilleure performance par type de sol plus un témoin dans chaque cas.
Types de boues	Brute Lixiviée	2	Selon la meilleure performance par type de sol.
Types de sols	A, B, C, D	4	A déterminer après rencontre avec les spécialistes du MER et du MAPAQ. Les résidus miniers pourraient être un type de sol envisageable.
Types de cultures	I, II, III, IV, V, VI	6	Trois forestières et trois agricoles; à déterminer après rencontre avec les spécialistes du MER et du MAPAQ.
Nombre d'expériences possibles		144	
Nombre de répétitions suggérées		4	Accepté pour des interprétations statistiques valables.
Nombre d'unités à mettre en place		576	

5. PERSONNEL, ECHEANCIER ET BUDGET

5.1 Personnel et responsabilité

Couillard, D. (professeur)

Verra à la direction du projet et à la réalisation des différentes étapes. De plus, il s'occupera de la direction scientifique du projet et sera directement impliqué dans la planification, l'exécution et l'interprétation des résultats. Plus spécifiquement, il dirigera les études sur la valeur fertilisante de la boue brute et de la boue lessivée sur la biomasse des plantes.

Tyagi, R.D. (professeur)

Secondera le Pr Couillard dans la direction scientifique du projet et sera aussi directement impliqué dans la planification, l'exécution et l'interprétation des résultats. Plus spécifiquement, il dirigera les études reliées à l'optimisation des conditions du processus d'enlèvement biologiques des métaux. Estimation des constantes cinétiques et des expressions mathématiques du phénomène de lessivage microbiologique.

Tran, F. (associé de recherche, professeur invité du CRSNG)

Verra à maintenir le contact entre l'INRS-Eau et le CQVB, à la rédaction des rapports d'étape, au contrôle des résultats fixés à chaque étape. Plus spécifiquement, il s'occupera du design du bioréacteur à recyclage et à lit fluidisé et à air pulsé et les tests nécessaires à l'optimisation des paramètres d'opération du bioréacteur. Une étudiante en maîtrise fera son projet sur ce sujet et sera pilotée par Francis Tran.

Grenier, Y. (assistant de recherche)

Verra aux études de la valeur fertilisante des boues brutes et lixiviées sur la croissance des plantes, à l'effet des applications des boues sur la concentration des métaux dans le sol, sur les plantes et sur les microorganismes. (Sous la direction de D. Couillard).

Assistant de recherche (À recruter)

Procédera aux études des cultures mixtes pour lixiviation et l'enlèvement des métaux, aux études en bioréacteur des facteurs physiques et chimiques du procédé, principalement du rapport de recyclage et de la concentration de biomasse dans le débit recyclé. (Sous la direction de R.D. Tyagi).

Technicien (demi-temps) à recruter

Assurera l'aide technique en laboratoire, en serres et sur le terrain: préparation des milieux de culture et de croissance, préparation des milieux fertiles en serres et sur le terrain, application des boues et prises de mesures.

Etudiant(e)s à la maîtrise ou post-doctorat

S'impliqueront dans des études fondamentales touchant la décontamination biologique des boues résiduelles et la valeur fertilisante des boues brutes et lixiviées.

L'équipe de l'INRS-Eau prévoit profiter, au besoin, de l'expertise d'autres chercheurs:

Chahal, D.S. ou J.G. Bisailon (IAF)

Expertises microbiennes et biochimiques, adaptation et amélioration des souches; aussi détermination du rôle précis de chacune des souches de bactéries.

Jaouich, A. (UQAM)

Effets des applications des boues sur l'aquiculture et sur les microorganismes du sol.

Une réunion préliminaire des intervenants sera nécessaire afin d'élaborer un plan de travail détaillé, incluant les questions d'échantillonnage.

5.2 Echéancier provisoire

Le calendrier des travaux proposé ci-après est provisoire et ne sera fixé qu'à la suite d'une réunion avec le CQVB et les intervenants impliqués dans le domaine. En effet, la concentration des ressources humaines et matérielles, de même que l'accélération dans le temps des travaux en vue de l'obtention rapide de résultats sera largement fonction de la contribution financière et technique des intervenants. Ce programme initialement d'une durée de deux (2) ans peut être échelonné différemment en fonction des attentes des intervenants dans le cadre des activités de base proposées dans l'échéancier provisoire.

CALENDRIER DES TRAVAUX

Phase	Opération	Responsabilité	1 ^{re} année		2 ^e année							
			1	2	3	4	5	6	7	8		
I Procédé d'extraction	* Optimisation des paramètres en cuvée	R.D. Tyagi										
	. paramètres physico-chimiques	D. Couillard	_____									
	. paramètres mécaniques . besoins en O ₂ et CO ₂ , concentration solide	F. Tran		_____								
	. paramètres biologiques	Ass. de rech.										
	. acclimations des cultures aux métaux lourds	Étudiants	_____									
	. effets d'inhibition des métaux lourds		_____									
	. effet du déphasage d'ensemencement				_____							
	. étude du ratio des cultures mixtes				_____							
	* Optimisation en semi-continu et en continu	F. Tran										
	. étude du temps de résidence	R.D. Tyagi										
	. évaluation du taux de recyclage	D. Couillard						_____				
	. développement du modèle cinétique	Ass. de rech.							_____			
	. choix d'un design optimum	Étudiants								_____		
II Pouvoir fertilisant	* Effets des métaux lourds sur les sols	D. Couillard										
	. analyse du seuil de comptabilité	Y. Grenier										
	. effets sur la prise en charge de N et P par les plantes	F. Tran						_____				
	. effets sur les microorganismes du sol	Techniciens						_____				
	. mobilité dans les sols	Ass. de rech.							_____			
	* Expérimentations en serres	Id.										
	. taux de minéralisation							_____				
	. analyses de croissances des plantes								_____			
	* Expérimentations sur le terrain	Id.								_____		

5.3 Prévisions budgétaires (\$ 000)

	1 ^{re} année		2 ^e année		Total
	P/A*	\$	P/A	\$	
<u>Personnel</u>					
Directeur du programme	0.25	15	0.25	15	30
Chercheur sénior	0.25	12	0.25	12	24
Chercheur coordonnateur	1.00	44	1.00	44	88
Assistant de recherche	2.00	66	2.00	66	132
Techniciens	0.50	11	1.00	22	33
	<u>4.00</u>	<u>148</u>	<u>4.50</u>	<u>159</u>	<u>307</u>
Frais généraux (75%)		111		119	230
		—		—	—
		259		278	537
<u>Expertise ponctuelle</u>					
Etudiants gradués		11		11	22
Université du Québec à Montréal		10		10	20
Institut Armand-Frappier		10		10	20
		<u>30</u>		<u>30</u>	<u>60</u>
<u>Frais divers</u>					
Produits chimiques, etc.		3		3	6
Petit matériel de base		5		5	10
Déplacements		2		2	4
Informatique		2		2	4
		<u>12</u>		<u>12</u>	<u>24</u>
		—		—	—
TOTAL:		301		320	621

* P/A - personne année

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. APHA - AAWWA - WPCF. "Standard Methods for the examination of water and Wastewater". 15th Edition, 1134 pages, 1980.
2. COUILLARD, R.D. "Extraction des métaux lourds en vue de la valorisation des boues d'épuration". Avis technique no TR 86-0047", Centre québécois de valorisation de la biomasse (CQVB), Pavillon Paul-Comtois, Cité Universitaire, Sainte-Foy (Québec), 1987.
3. COUILLARD, D. et Y. GRENIER. "Alternative à la gestion des boues résiduelles municipales: recyclage en sylviculture", Sciences et technique de l'eau, soumis pour publication, 1987.
4. COUILLARD, D., TYAGI, R.D. ET F. TRAN. "Heavy metals removal form anaerobically digested sludge by chemical and micro-biological methods". Soumis pour publication dans "Water Research", 1987.
5. CRIQ (Centre de recherche industrielle du Québec), CQVB (Centre québécois de valorisation de la biomasse) et Gouvernement du Québec. "Valorisation des déchets urbains", Compte rendu du séminaire du 6 novembre 1986, 9 pages + 3 annexes, 1986.
6. CSTM. "Ensemencement des haldes minières à l'aide de boues d'épuration", Phases I et II, 1986.
7. ENVIRONNEMENT CANADA. "L'épandage des eaux usées traitées et des boues d'épuration d'origine urbaine", Service de protection de l'Environnement, guide SPE 6-EP-84-1, 190 pages, 1985.
8. FORSTNER, V. et G.T.W. WITTMAN. "Metal pollution in aquatic environment", Springer - Verlag, New York, 1979.
9. GAGNON, J.D. "Results in fertilizer experiment in Quebec", Proc. fo a workshop on forest fertilization in Canada, Sault Ste-Marie, Ontario, Edité par Environnement Canada, Service des forêts, pp. 83-91, 1974.
10. GAGNON, J.D. "Les égouts domestiques, un engrais valable en foresterie", Edité par Environnement Canada, Centre de recherches forestières des Laurentides, Québec, Rapport Q-F-X-30, 13 pages, 1972.
11. GINGRAS. 1985.
12. GOUVERNEMENT DU QUEBEC. "Document de politique sur la gestion des boues provenant de l'épuration des eaux usées", Ministère de l'Environnement, 22 pages, 1983.

13. GOUVERNEMENT DU QUEBEC. "Bilan du programme de l'assainissement des eaux", Allocution du Ministre de l'Environnement monsieur Adrine Ouellette lors du Colloque de l'Union des municipalités du Québec sur l'assainissement des eaux, Montréal, 6-7 septembre 1984, 14 pages, 1984.
14. GERNIER, Y. "La valorisation des boues d'usine d'épuration des eaux en fertilisation forestière", Université du Québec, INRS-Eau, mémoire de maîtrise, 290 pages, 1985.
15. HENRY, J.G. et L. WONG. "Commercial mining technique offers a new approach to removing heavy metal from sludges", Water Pollution Control, 122(3): 56-61, 1984.
16. LACY, D.T. et F. LAUSON. "Kinetics of liquid-phase oxidation of acid ferrous sulphate by the bacterium thiobacillus ferrooxidans". Biotechnology & Bioengineering XII, 29-50, 1970.
17. LESTER, J.N., R.M. STERRITT et P.W.W. KIRK. "Significance and behaviour of heavy metals in wastewater treatment processes, The Science of Total Environment, 30: 45-53, 1983.
18. SCHWAN, T.D. "The effect of sewage sludges and chemical applications on solids and on the growth yield of hybrid poplar, Université Mc Gill, Collège Mc Donald, Thèse de maîtrise, 1987.
19. ST-YVES, A. et R. BEAULIEU, "Communication personnelle", (professionnel au MENVIQ), 1987.
20. SUTTLE, N.F., B.J. ALLOWAY et I. THORNTON. "An effect of soil ingestion on the utilisation of dietary copper in sheep", J. Agr. Sci. Camb. 84: 249-254, 1975.
21. VEILLEUX, J.M. "Communication personnelle", (professionnel au MER), 1987.
22. VERGES, G. "La disposition des boues des stations d'épuration", Colloque sur l'assainissement des eaux, U.M.Q., septembre 1984, 11 pages, 1984.

ANNEXE 1

FICHER SUR LES ORGANISMES CONTACTÉS

Organisme : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de
l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

Personne contactée: Marcel Giroux.

Service : Service de recherches en sols.

Besoins

- taux de minéralisation NPK.
- concordance avec les besoins des plantes.
- spéciation des métaux lourds.

Suggestions

- essais avec du maïs, des céréales, du foin.
- présence essentielle d'agronomes.

Organisme : Ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) (section forêt).

Personne contactée: Alain Cuierrier et Harold Tremblay.

Service : Service de transfert technologique.

Besoins : Compostage avec des déchets ligneux.

Suggestions : Amélioration des sols sableux.

Organisme : Ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ).

Personne contactée: Angèle St-Yves

Service : Service de l'assainissement agricole.

Besoins : Études sur toxiques organiques (BPC, HPA, etc.)
Études sur les métaux lourds et Fe, Na, Al.

Suggestions : Disponibilité de N et P après lessivage bactérien.
Minéralisation de N.
Pertes de N par épaissement des boues.

Organisme : Ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) (section mines).

Personne contactée: Denis Côte

Service : Service de technologie minière.

Besoins : Remise en valeur des déchets miniers.

Suggestions : Contacter le Centre Spécialisé en Technologie Minérale (CSTM) du Cégep de Thetford-Mines qui a déjà des essais en place.

Organisme : Éco-Énergie.

Personne contactée: Robert Magny

Service : Firme privée.

Activités : Enlèvement des métaux des effluents industriels par
procédés électrochimiques et catalytiques.

Organisme : Groupe Poulin-Thériault

Personne contactée: Danielle Cossette

Service : Firme privée.

Activités : Gestion de déchets urbains, économique, génie conseil,
environnement.

Organisme : Cégep de l'Amiante.

Personne contactée: M.R. Lacroix

Département : Centre Spécialisé de Technologie Minérale (CSTM).

Activités : Revégétation des déchets miniers d'amiante.

Commentaires : Il travaille en collaboration avec le MER (section mines).

Organisme : Université du Québec à Montréal (UQAM).

Personne contactée: Dr. A. Jaouich

Département : Département des sciences de la terre.

Activités : Hydrocarbures, boues résiduaires, aménagement du territoire.

Équipe : Renseignements non-disponibles.

Commentaires : Il est intéressé par l'aspect agronomique des boues.

Organisme : Université Laval

Personne contactée: Dr R.S. Ramalho

Département : Département de génie chimique

Activités : Effluents industriels, réacteurs anaérobiques.

Équipe : 1 professeur.
1 assistant de recherche à temps partiel.
3 étudiants.

Commentaires : Aucun travail sur les boues.

Organisme : Institut Armand-Frappier (IAF)

Personnes contactées: Dr D.S. Chahal et J.G. Bisailon

Département : Centre de recherches en microbiologie appliquée.

Activités : Biomasse, bioconversion, procédés de transformation,
micro-organismes.

Équipe : 4 professeurs (Chahal, Bisailon, Audet et Ishaque).
6 techniciens.
2 étudiants.

Commentaires : Aucun travail sur les boues.

Organisme : Université du Québec

Personne contactée: Dr Denis Couillard

Département : Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Eau).

Activités : Assainissement des eaux, optimisation des procédés de traitement, lessivage microbiologique, valorisation des boues.

Équipe : 2 professeurs (Couillard, D. et Tyagi, R.D.).
1 assistant de recherche.
7 étudiants.

Organisme : Université McGill

Personne contactée: Dr B. Volesky

Département : Département de génie chimique

Activités : Fermentation du petit lait, adsorption biologique sur la biomasse bactérienne, fermentation pour tirer des solvants industriels des ressources renouvelables, optimisation des processus de fermentation.

Équipe : Renseignements non-disponibles.

Commentaires : Aucun travail sur les boues résiduairees.

Organisme : Université McGill

Personne contactée: Dr A.R.C. Jones

Département : Département des ressources renouvelables

Activités : Boues d'épuration comme fertilisant forestier.

Équipe : Renseignements non-disponibles.

Organisme : Institut de Recherche en Biotechnique de Montréal (IRBM).

Personne contactée: Dr B. Coupal

Commentaires : Abandon complet des recherches sur la tourbe parce que le matériel est devenu trop dispendieux.

Organisme : Université de Sherbrooke

Personne contactée: Dr M. Beerli

Département : Département de génie chimique.

Activités : Décontamination des sols; eaux de lixiviation.

Équipe : 4 professeurs.
12 étudiants.

Commentaires : Les recherches sur l'enlèvement des métaux par la tourbe sont terminées depuis une dizaine d'années, mais des étudiants s'intéressent encore ponctuellement à cette question; la reprise de cette activité les intéresseraient.

ANNEXE 2

MANDAT POUR LA RÉALISATION DE L'AVIS TECHNIQUE

**MANDAT POUR LA REALISATION
D'UN AVIS TECHNIQUE**

1. Titre

Extraction de métaux lourds en vue de la valorisation des boues d'épuration biologiques.

2. Objectif

Par la mécanique de cet avis technique, le CQVB veut cerner grossièrement la problématique posée au Québec par la présence des métaux lourds dans les boues provenant de traitements biologiques des effluents urbains, industriels ou agricoles, et envisager par après les potentiels d'utilisation de ces boues détoxifiées.

3. Mandat du consultant

La problématique posée par la présence des métaux lourds sera cernée par le consultant, en faisant ressortir toutes les implications.

3.1 Le consultant présentera l'état de la situation sur les procédés d'enlèvement des métaux lourds au Québec et ailleurs les plus récemment connus (cinq dernières années) incluant les procédés non biologiques. A ce niveau, le consultant aura à présenter le degré d'avancement en terme de R&D pour chaque procédé en y mettant en relief la caractéristique majeure et les verrous technologiques rencontrés. Ce survol de la littérature conduira à l'identification d'un ou des procédés jugés les plus pertinents au regard de l'objectif ci-haut.

3.2 Le consultant brossera l'état actuel de la R&D et des installations opérant présentement au Québec. Il précisera le niveau de développement (lab-scale, PDU, échelle-pilote, unité commerciale) de celles-ci.

Dans ce cadre-ci, le consultant présentera la liste des groupes de recherche au Québec intéressés et oeuvrant dans le contexte des métaux lourds. Un cheminement opérationnel doit y être présenté et sur lequel sera illustré schématiquement le niveau d'intervention de chacun de ces groupes afin de déterminer le degré de concertation, si concertation il y a.

Sur le plan de cet inventaire seront précisées, pour chaque groupe, les ressources humaines oeuvrant dans le domaine, les ressources financières (provenance et utilisation des fonds) et enfin les dossiers majeurs ayant fait l'objet de subventions (actions structurantes, thématiques, propositions spontanées, etc.).

- 3.3 Le consultant ira sonder le point de vue des organismes gouvernementaux publics et para-publics pour recueillir leur feedback sur les procédés ci-haut identifiés, ainsi que les approches que ces organismes entendent favoriser ou exploiter. Il est aussi recommandé au consultant de pousser l'investigation plus loin pour savoir quelles seront les meilleures solutions envisagées par ces organismes pour l'utilisation ultérieure des boues détoxifiées.

Dans ce cadre-ci, le consultant doit prendre en considération les résolutions du séminaire sur les déchets urbains auquel le Centre a participé en novembre dernier.

- 3.4 A partir de toutes les informations recueillies, le consultant recommandera le ou les alternatives les plus prometteuses, compte tenu des contraintes propres au Québec. Il présentera aussi une esquisse de stratégie d'action concertée impliquant les intervenants québécois identifiés ci-haut: table-ronde, séminaire, programme de recherche structurante, etc.

4. Ressources humaines

Le consultant mettra le personnel nécessaire à la réalisation de cet avis technique et informera le chargé de projet du Centre sur son profil technique.

ANNEXE 3

LETTRE DE CONCERTATION DE Mr. JEAN-MAURICE PLOURDE (CQVB)

QUÉBÉCOIS
ORISATION
BIOMASSE

Sainte-Foy, le 11 février 1987

Monsieur Clermont Gignac
Sous-ministre adjoint à la gestion
et à l'assainissement de l'eau
Ministère de l'environnement
du Québec
3900, rue Marly, 6^e étage
Sainte-Foy (Québec)
G1X 4E4

Monsieur,

J'accuse réception de la lettre que vous m'adressiez à la fin du mois de janvier dernier relativement au projet de recherche et de démonstration des techniques de valorisation agricole des boues d'épuration municipales. Je note aussi que dans cette lettre vous avez indiqué un montant qui pourrait correspondre à la participation financière attendue de la part de notre organisme dans le consortium mis en place pour assurer le financement d'un tel projet de recherche et de démonstration.

En réponse à votre demande, nous aimerions, dans un premier temps, préciser la forme de contribution que nous pensons apporter à ce projet et les motifs qui nous incitent à y participer d'une manière significative quoique minoritaire. Par la suite, dans le but de situer l'action du CQVB dans l'ensemble des dossiers de recyclage et de transformation des résidus organiques faisant appel à l'utilisation de la technologie du compostage, nous voudrions vous faire part des orientations que notre organisme veut se donner en ce domaine. Cette stratégie globale d'intervention en matière de compostage fournit un éclairage sur l'importance relative de notre participation dans le projet de valorisation des boues d'épuration, lequel projet privilégie l'épandage c'est-à-dire le compostage de surface comme technologie de valorisation de cette biomasse.

Notre participation est effectivement limitée par le fait que ce projet se situe parmi de nombreux autres projets à l'intérieur desquels la technologie du compostage, principalement le compostage en tas et non celui de surface, peut être utilisée pour permettre la valorisation de différents résidus organiques en des produits commerciaux à valeur ajoutée et qui peuvent être destinés au marché non seulement de la valorisation agricole mais aussi de la valorisation horticole.

.../2

CORPORATION
VERNEMENT
BEC

Paul-Comtois
1316
résitaire
y OC G1K 7P4
3853

Monsieur Clermont Gignac

- 2 -

Le 11 février 1987

En tout premier lieu concernant le sujet qui fait l'objet de votre lettre, j'aimerais vous confirmer notre intention de participer financièrement à la réalisation d'un tel projet impliquant des ministères, des organismes et une compagnie. Outre cette concertation fort recherchée, notre participation est principalement motivée par le fait que le projet touche une technologie que nous voulons explorer, c'est-à-dire le compostage. Bien que ce projet fasse appel à un seul type d'intrant, soit les boues urbaines, qu'il utilise une technologie connue, l'épandage, dont la mise à l'échelle n'a pas à être démontrée et qu'il débouche sur un produit dont la valeur ajoutée reste à être mesurée, le CQVB est toutefois conscient que des efforts doivent être consacrés pour mettre au point cette technologie en tenant compte des caractéristiques de nos boues d'épuration et des particularités de notre climat.

En conséquence, dans le but de réaliser ce projet et plus particulièrement l'ensemble des tests prévus au point 2.3 du plan de travail soumis, lors de la réunion du 14 janvier dernier, nous vous confirmons que notre participation financière pourrait atteindre la somme maximale de 60 000,00\$, répartie au cours des trois prochaines années. Par ailleurs, une forme additionnelle de collaboration peut être envisagée comme nous l'avons mentionné lors de cette réunion. En effet, le CQVB entend faire démarrer, à courte échéance, un projet de recherche portant sur les métaux lourds et à l'intérieur duquel il serait possible d'inclure des activités de recherche qui pourraient satisfaire les fins du projet de valorisation des boues urbaines. Nous vous proposons donc d'organiser, une fois élaborée avec l'équipe de recherche le plan de travail que nous voulons lui confier, une rencontre où il pourrait être question d'agencement des activités de recherche requises dans la poursuite des deux projets: celui sur la valorisation des boues d'épuration et celui du CQVB sur l'extraction des métaux lourds. Cette contribution additionnelle aurait donc pour effet d'augmenter indirectement notre participation financière dans le projet des boues urbaines. Notre implication financière totale au projet au cours des trois prochaines années dépasserait ainsi la somme de 60 000 \$ mentionnée précédemment.

Pour terminer cette lettre, nous voudrions vous présenter la position que le CQVB désire prendre lorsqu'il sera question de valorisation de certains résidus. Tout d'abord, pour ce qui est de la valorisation des déchets organiques de bas-de-gamme de types fumiers, boues d'épuration et déchets urbains, le CQVB

.../3

Monsieur Clermont Gignac

- 3 -

Le 11 février 1987

compte adopter une stratégie qui aurait pour but de favoriser le développement d'une expertise dans le domaine de la mise à l'échelle et la mise au point de procédés applicables à plusieurs types de déchets, tels les procédés de compostage, de production de protéines et d'extraction des métaux lourds.

Compte tenu que la valeur ajoutée demeure dans plusieurs cas assez faible, le Centre ne prévoit pas privilégier la valorisation d'un type de déchet de bas-de-gamme au détriment d'un autre. En somme, nous voulons accorder la priorité au procédé plutôt qu'au substrat.

D'autre part, en matière de compostage plus précisément, nous tenons cependant à souligner, et cela conformément à notre mandat qui consiste à financer la mise à l'échelle de procédés prometteurs, que la technologie dans laquelle nous voulons principalement nous impliquer est celle du compostage en tas grâce à laquelle il est possible de faire intervenir divers intrants et de produire un produit fini ayant une valeur ajoutée éventuellement supérieure comme, par exemple, en fabriquant des terreaux spécialisés. Le choix de cette technologie comparativement à celle du compostage de surface s'explique par le fait que nous désirons vérifier la faisabilité technologique de ce procédé en analysant les résultats de mélanges de divers types d'intrants que peuvent constituer les déchets de bas-de-gamme mais aussi les déchets ou résidus de haut-de-gamme que sont notamment les sciures et copeaux de bois, les sous-produits du lait, les résidus des usines de transformation des produits de la pêche. L'ensemble de ces essais devrait donc nous permettre, nous l'espérons, d'avoir une idée assez précise des différents produits que l'on pourrait avoir en bout de course et qui pourraient toucher aussi bien le domaine de la valorisation agricole que celui de la valorisation horticole.

C'est d'ailleurs dans cette ligne de pensée que nous pourrions supporter un projet qui viserait à mettre en place une infrastructure expérimentale sur le compostage où il serait alors possible de mieux vérifier et contrôler les différentes variables assurant la production d'un produit fini de qualité. Ce projet nous l'avons d'ailleurs évoqué lors de la réunion convoquée dernièrement par le Ministère de l'Energie et des Ressources concernant la récupération et la valorisation des résidus organiques et leur utilisation en milieu agricole et forestier et à laquelle assistaient des représentants de différents ministères et organismes concernés par la question dont Monsieur Carol Emond du MENVIQ.

.../4

Monsieur Clermont Gignac

- 4 -

Le 11 février 1987

Le leadership exercé par votre ministère demeure un atout précieux pour mener à bien et à terme le projet de recherche et de démonstration des techniques de valorisation agricole des boues d'épuration. Pour réaliser ce mandat, nous tenons à vous assurer de notre entière collaboration et, pour la poursuite du dossier, nous invitons vos collaborateurs à communiquer directement avec monsieur Denis Morrissette, chargé de projet à la planification.

Veuillez agréer, Monsieur le Sous-ministre, l'expression de mes meilleurs sentiments.



Jean-Maurice Plourde
Directeur de la planification
et de l'administration

JMP/hc

c.c. B. Benabdallah, dir. des opérations
D. Morrissette, chargé de projets