TD
195
.P7
B68
1998

BIOGÉNIE S.R.D.C. INC.

3615611B

BIOÉPURATION D'UN GAZ PROVENANT D'UN PROCÉDÉ DE FLEXOGRAPHIE

RAPPORT FINAL

RAPPORT PRÉSENTÉ À

ENVIRONNEMENT CANADA (RÉGION DU QUÉBEC)
SECTION ÉCO-INNOVATION TECHNOLOGIQUE
DIRECTION DE LA PROTECTION

MARS 1998

Ce document est publié avec l'autorisation du ministère de l'Environnement.

Ministère des Travaux publics et Services gouvernementaux du Canada 1998
N° de catalogue : En 40-551/1998F
ISBN : 0-662-81310-3

PERSPECTIVE DE GESTION

Ce rapport d'étude est publié dans le cadre du « Programme de Développement et de Démonstration Technologiques » d'Environnement Canada qui vise à appuyer les initiatives du secteur privé dans le développement et la démonstration de nouvelles technologies environnementales. Ce programme est associé au Bureau fédéral de développement régional du Québec (BFDR-Q) et fait partie intégrante du Plan d'action Saint-Laurent Vision 2000 d'Environnement Canada.

AVIS DE RÉVISION

Le présent rapport a été examiné par la Direction de la Protection, Environnement Canada, qui en a autorisé la publication. Cette autorisation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Ministère. Les mentions de marque de commerce et de produits commerciaux qui apparaissent dans ce rapport ne signifient aucunement que leur utilisation est recommandée.

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veuillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport à la Direction de la protection, Section Éco-Innovation technologique, Environnement Canada, 105 rue McGill, 4^{e} étage, Montréal (Québec), H2Y 2E7.

BIOÉPURATION D'UN GAZ PROVENANT D'UN PROCÉDÉ DE FLEXOGRAPHIE

RAPPORT FINAL PRÉSENTÉ À

ENVIRONNEMENT CANADA

Octobre 1997

Biogénie

SPÉCIALISTES EN ENVIRONNEMENT

350, rue Franquet, entrée 10
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 4P3
Tél.: (418) 653-4422 Fax: (418) 653-3583

12 672, boul. Industriel
Pointe-aux-Trembles (Québec)
Canada H1A 3V2
Tél.: (514) 644-1405 Fax: (514) 644-1353

BIOÉPURATION D'UN GAZ PROVENANT D'UN PROCÉDÉ DE FLEXOGRAPHIE

RAPPORT FINAL

Présenté à : M. Jean Lapointe
Environnement Canada

Préparé par :

Jean François Bourassa, ing. M. Sc.
Chargé de projets, Microbiologie

Vérifié et approuvé par :

Marie-Claude Drouin, microbiol., ing. M. Sc. A.
Directrice, Microbiologie

Octobre 1997

RÉSUMÉ / SUMMARY

RÉSUMÉ

Problématique

Sur le plan environnemental, la pollution de l'air est un des problèmes majeurs de notre temps. Beaucoup d'efforts et de capitaux ont été investis pour la lutte contre la pollution atmosphérique. Le marché mondial d'assainissement de l'air, qui représentait 36 milliards de dollars en 1990, atteindrait 52 milliards en l'an 2000 (KPMG, 1992). Le contrôle des composés organiques volatils (COV) est une portion importante de ce marché. Selon une estimation, 1 780 kilotonnes de COV ont été émises dans l'atmosphère en 1985 seulement au Canada. Les industries canadiennes d'imprimerie, à elles seules, génèrent plusieurs dizaines de kilotonnes de COV chaque année (CHEMinfo Services, 1995).

Une variété de technologies de traitement des gaz contaminés par les COV coexistent sur le marché. Parmi les technologies traditionnelles, on retrouve l'adsorption sur le charbon activé et l'oxydation thermique ou catalytique. Depuis quelques années, la bioépuration des effluents gazeux est considérée comme un choix intéressant. Simple, efficace et économique, cette nouvelle approche présente en effet un très grand potentiel d'application à de nombreux secteurs industriels.

Objectifs

Le projet vise à démontrer l'utilisation d'un bioprocédé de lit à ruissellement, élaboré par Biogénie, pour la bioépuration des gaz provenant de l'industrie de l'impression par flexographie. D'une part, le traitement d'un tel effluent nécessite un procédé performant, puisqu'une multitude de COV de nature différente sont présents dans le gaz à des degrés de contamination fluctuant dans le temps. D'autre part, même au niveau mondial, l'application du procédé de lit à ruissellement à l'industrie de flexographie est nouvelle. En ce sens, une démonstration s'avère primordiale pour que cette technologie soit reconnue et considérée.

Ce document rapporte les réalisations du projet qui s'est déroulé de janvier 1996 à septembre 1997. Les travaux ont consisté en l'évaluation sur banc d'essai en laboratoire et à la démonstration sur unité pilote en industrie du nouveau procédé de lit à ruissellement pour la bioépuration des effluents gazeux produits par l'industrie de flexographie.

Les objectifs visés sont les suivants :

- mise au point, en laboratoire, des paramètres spécifiques de conception et d'opération du lit à ruissellement ;
- conception et fabrication d'une unité pilote de lit à ruissellement ;
- démonstration en industrie des performances du lit à ruissellement ;
- atteindre un taux d'efficacité d'élimination des composés volatils de 90 % ;
- caractérisation des effluents industriels de flexographie ;
- technico-économie du procédé à l'échelle industrielle.

Résultats

Technologie développée ; le bioréacteur à lit à ruissellement

La technologie développée par Biogénie pour le traitement de l'air utilise une tour d'absorption suivie d'un lit à ruissellement, tel qu'illustrée à la figure 1. L'air pénètre la tour d'absorption où il est mis en contact à contre-courant avec l'eau de procédé, laquelle absorbe la majorité des COV. L'air passe ensuite par le lit à ruissellement pour un polissage final en écoulement cocourant avec l'eau de procédé chargé de COV qui subit l'action des microorganismes fixés sur le garnissage. L'eau ainsi traitée peut être retournée à la tour d'absorption et utilisée pour un nouveau cycle de traitement. Le procédé est doté de toute l'instrumentation nécessaire à l'optimisation du procédé et à son automatisation lui assurant une autonomie de fonctionnement et minimisant les opérations manuelles.

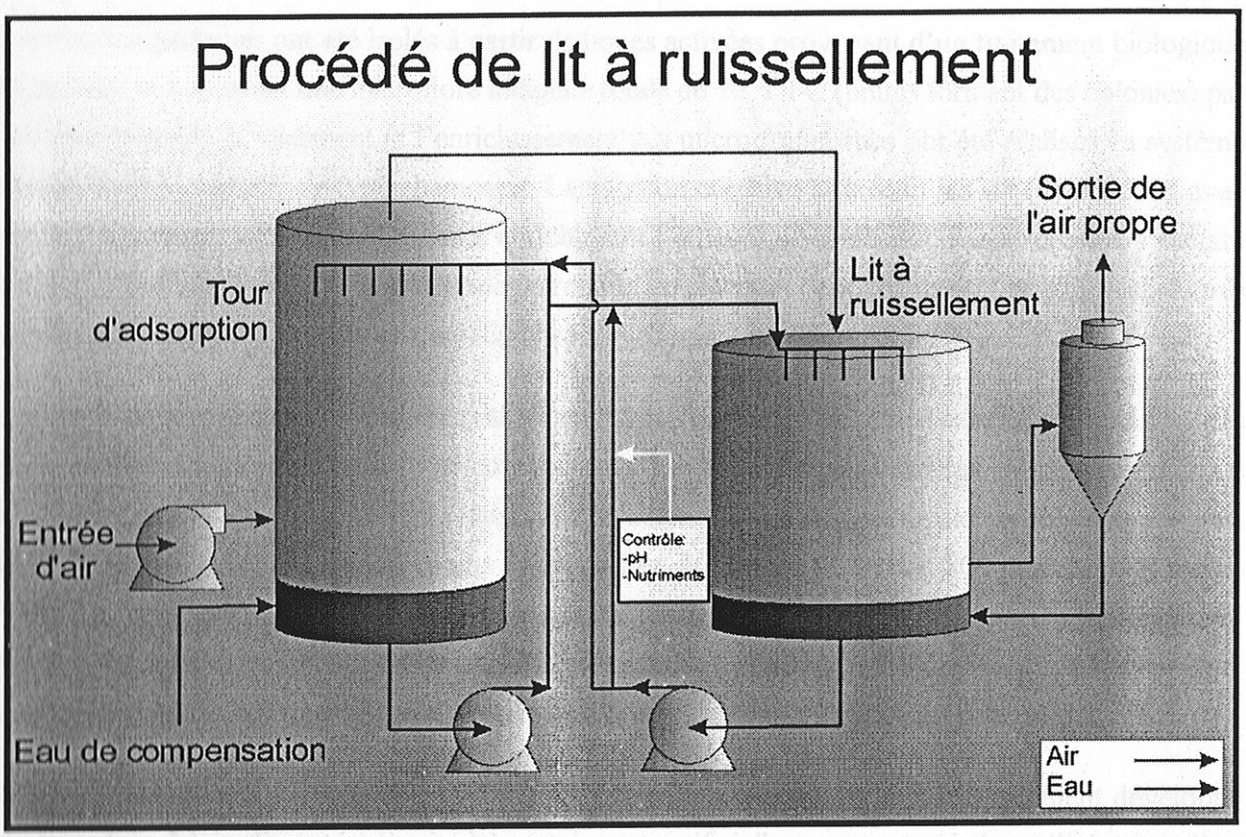


Figure 1 : Diagramme du procédé

Évaluation sur banc d'essai en laboratoire du lit à ruissellement

L'objectif spécifique de cette phase des travaux consistait à définir les paramètres spécifiques à la conception et à l'opération du procédé élaboré par Biogénie, afin de bioépurer les gaz provenant de l'industrie de la flexographie.

Cette première phase du projet fut subdivisée en trois (3) étapes techniques :

Étape 1 : Isolement et sélection de microorganismes performants
Étape 2 : Essais de biodégradabilité des contaminants cibles par la culture mixte
Étape 3 : Évaluation de la performance du lit à ruissellement

Les microorganismes ont été isolés à partir de boues activées provenant d'un traitement biologique secondaire et contenant une microflore indigène totale de 10^7 UFC (unités formant des colonies) par millilitre de boue. L'isolement et l'enrichissement des microorganismes ont été réalisés en système à alimentation continue de type chemostat. La solution nutritive contenait les six (6) produits avec lesquels les microorganismes doivent s'enrichir soit l'éthanol, le méthanol, l'isopropanol, l'acétate d'éthyle, l'acétate de propyle et l'éther de pétrole. L'isolement et l'enrichissement se sont réalisés très rapidement, indiquant que les contaminants sont facilement biodégradables.

Les essais de biodégradabilité ont été réalisés en flacons contenant un milieu minéral auxquels ont été ajoutées différentes concentrations de contaminants. Les fioles ont été incubées sur plaque agitatrice à la température de la pièce. La biomasse isolée en chemostat est très performante. Elle dégrade plus de 97 % des 400 ppm ajoutés en moins de 24 heures, et plus de 90 % des 800 ppm pour le même délai. Ces résultats obtenus sont très intéressants, car les concentrations essayées sont largement supérieures à celles qui seront retrouvées lors des essais en réacteur. La biomasse isolée et enrichie, en système chemostat, dégrade rapidement de très grandes concentrations des produits cibles.

Le consortium microbien a été testé sur le banc d'essai du procédé de lit à ruissellement développé par Biogénie. L'air alimenté à l'unité laboratoire est artificiellement contaminé par l'injection d'un mélange de COV, soit 32 % d'éthanol, 5 % de méthanol, 21 % d'isopropanol, 32 % d'acétate d'éthyle, 5 % d'acétate de propyle et 5 % d'éther de pétrole. L'expérimentation s'est déroulée pendant plus de 10 semaines. Lors de cet exercice, nous avons facilement réalisé notre objectif d'épuration des gaz de 90 %. En effet, un bilan de masse démontre une élimination de 93 % des COV totaux. La dégradation des contaminants dans la phase liquide n'est aucunement limitante, car il n'y a aucune accumulation des composés dans l'eau de procédé. Le système a démontré sa très grande robustesse face aux fluctuations de concentration des COV totaux. Effectivement, lors des essais, la concentration des COV totaux s'est échelonnée de 300 à 3 000 ppm, sans toutefois ébranler l'efficacité de celui-ci.

Le banc d'essai en laboratoire a permis d'éliminer 93 % des COV présents dans l'effluent gazeux. Le temps de résidence de l'air dans le système était de 20 secondes, la concentration moyenne des COV de 750 mg/m^3 et la capacité d'élimination de 145 grammes de COV éliminés par mètre cube de bioréacteur par heure (g COV/m$^3_{\text{réacteur}}$-h).

Mise au point et démonstration d'une unité pilote expérimentale

L'objectif spécifique de cette phase des travaux consistait en la conception et la fabrication d'une unité pilote du procédé de lit à ruissellement développé par Biogénie, afin de réaliser une démonstration en industrie des performances de bioépuration des gaz provenant d'un procédé d'impression par flexographie.

Cette deuxième phase du projet fut subdivisée en quatre (4) étapes :

Étape 1 : Ingénierie de conception et fabrication de l'unité pilote
Étape 2 : Mise au point et mesure de performance sur un site industriel
Étape 3 : Caractérisation des effluents de l'industrie de la flexographie
Étape 4 : Étude technico-économique du procédé industriel

Tout comme l'unité utilisée au laboratoire, l'unité pilote est constituée d'une tour d'absorption à écoulement à contre-courant et d'un lit à ruissellement à écoulement cocourant de l'air à traiter et de l'eau de procédé. La capacité du système va de 2 000 à 6 500 m^3/h selon la nature de l'effluent. L'instrumentation permet la mesure et le contrôle des débits d'air et d'eau de procédé, du pH, de la température, de la mousse, des nutriments et des pertes de charge. De plus, l'unité pilote est dotée d'une soufflante pour assurer un débit d'air constant, de son propre système de conditionnement de l'eau de compensation (évaporation et purge), d'un hydrocyclone afin de minimiser l'entraînement de liquide à la sortie et d'un filtre pour le contrôle des purges. L'unité est munie de plusieurs points d'échantillonnage afin de faciliter la mise au point des paramètres d'opération du procédé.

L'unité pilote a été installée dans une industrie d'impression par flexographie de Montréal. La période de mise au point de l'unité a permis l'acclimatation de la microflore sur le lit à ruissellement, le rodage de l'équipement ainsi que l'ajustement des paramètres d'opération afin d'obtenir les performances recherchées.

Les performances obtenues sont concluantes : plus de 95 % d'élimination des COV dans un effluent d'impression contenant des composés à base d'alcool. Les essais ont permis d'optimiser les conditions d'opération et de doubler la capacité de traitement par rapport aux résultats obtenus en laboratoire. La capacité de notre unité pilote est de 350 g $COV/m^3_{réacteur}$-h.

La caractérisation des usines de production par flexographie a permis de compléter les informations nécessaires à l'analyse économique du procédé. Les entreprises contactées de la région de Montréal nous ont permis d'évaluer la teneur en COV de leur effluent et de visiter leurs installations afin de mieux définir leur besoin en équipement de traitement d'air. L'effluent d'une presse d'imprimerie par

flexographie est composé à plus de 80 % d'alcools, 15 % d'acétate de propyle et 5 % d'autres composés. Il est parfaitement approprié à la technologie du lit à ruissellement. L'effluent typique d'une usine de flexographie génère 85 000 m^3/h chargés à 1 000 mg/m^3 de COV issus des presses. La ventilation des aires de production génère 42 500 m^3/h d'air chargé en moyenne à 80 mg/m^3 en vapeurs de solvant. La charge moyenne est donc de 693 mg/m^3 de COV.

L'étude technico-économique du procédé de lit à ruissellement développé par Biogénie permet de dresser un portrait réaliste des implications liées autant à l'implantation du procédé dans une industrie qu'à son opération durant toute la vie du projet. L'étude technico-économique tient compte des aspects techniques du procédé (coût des équipements et d'exploitation) ainsi que des aspects généraux (bâtisses, services divers) et financiers (frais de financement, dépréciation, fiscalité).

L'utilisation d'un lit à ruissellement à écoulement à contre-courant est suffisant pour le traitement des effluents contaminés avec des alcools. L'unité a été calculée avec une charge nominale 50 % plus élevée que la charge moyenne soit 1 040 mg/m^3. L'unité industrielle est composés de trois (3) lits à ruissellement utilisés en parallèle. Cette configuration assure un fonctionnement continu de l'unité de traitement et permet d'effectuer les routines d'entretien sans perturber le fonctionnement de l'usine. L'investissement en capital pour un projet clés en main est de 989 000 $. Les équipements seuls constituent un investissement de 562 000 $. Les coûts d'exploitation directs associés à la production sont de 82 500 $ annuellement. La vie économique du projet a été fixée à 15 ans. Sur cette base, le coût de revient est de seulement 0,32 $ par kilogramme de COV éliminé. L'unité industrielle a la capacité d'éliminer mille (1 000) tonnes de COV annuellement.

SUMMARY

Introduction

On the environmental aspect, air pollution is one of the major concerns of our times. Tremendous efforts and investments were undertaken to reduce atmospheric pollution. The air purification world market, which represented 36 billion dollars in 1990, should reach 52 billion by the year 2000 (KPMG, 1992). The control of volatile organic compounds (VOCs) constitutes an important segment of this market. It has been estimated that in Canada only, 1,780 kilotons of VOCs were discharged in the atmosphere in 1985. Canadian printing industries, on their own, generate tens of kilotons of VOCs each year (CHEMinfo Services, 1995).

A variety of technologies for the treatment of VOC contaminated air are available on the market. Among the traditional technologies, we find adsorption on activated carbon and thermal or catalytic oxidation. Over the last years, biological gas cleaning has been considered as an interesting choice. Simple, efficient and cost effective, this approach indeed offers a huge potential for application in many industrial fields.

Objectives

The project is aimed toward demonstrating the use of a biotrickling filter process, developed by Biogenie, for VOC treatment of contaminated air emanating from the flexographic industry. On the one hand, the treatment of this kind of airstream requires an efficient process, given the number of different VOCs present in the gas with fluctuating concentrations. On the other hand, the biotrickling filter technology for flexographic air treatment is relatively new, even on a worldwide scale. It is therefore necessary to make a demonstration of the technology so that it may be acknowledged and considered.

This paper reports the results of a project that was carried out between January 1996 and September 1997. The work involved testing our biotrickling filter technology on a laboratory scale followed by a pilot scale demonstration on an industrial flexographic plant.

Our objectives are :

- laboratory fine tuning of the specific design and operation parameters of the biotrickling filter ;
- design and construction of a biotrickling filter pilot unit ;
- demonstration of the performance of the biotrickling filter in an industrial environment ;
- reaching a VOC elimination efficiency of over 90 % ;
- characterization of industrial flexographic gas effluents ;
- industrial scale process design and economics.

Results

The technology : biotrickling filter

The technology developed by Biogenie for industrial air treatment uses an absorption tower followed by a biotrickling filter, as illustrated in figure 1. Air enters the absorption tower where it comes in contact with process water in a counter-current flow, which absorbs most of the VOCs. After scrubbing, air passes through the biotrickling filter in co-current flow with process water. Air is there polished and provides oxygenation of the immobilized microbial film which performs VOC degradation from water. Clean air is then released in the atmosphere as the treated water is recirculated towards the absorption tower and used for another air cleaning cycle. The equipment includes all the instrumentation required for process optimization and automation assuring operational autonomy and minimizing manual operations.

Laboratory test bed for biotrickling filter

The principal objective of this phase of the work consisted in defining the specific parameters for the design and operation of the biotrickling filter process developed by Biogenie for gas cleaning in the flexographic industry.

This first phase of the project is subdivided into three (3) technical steps :

Step 1 : Isolation and selection of performing microorganisms
Step 2 : Biodegradation tests of target VOCs by mixed culture
Step 3 : Evaluation of the performance of the biotrickling filter

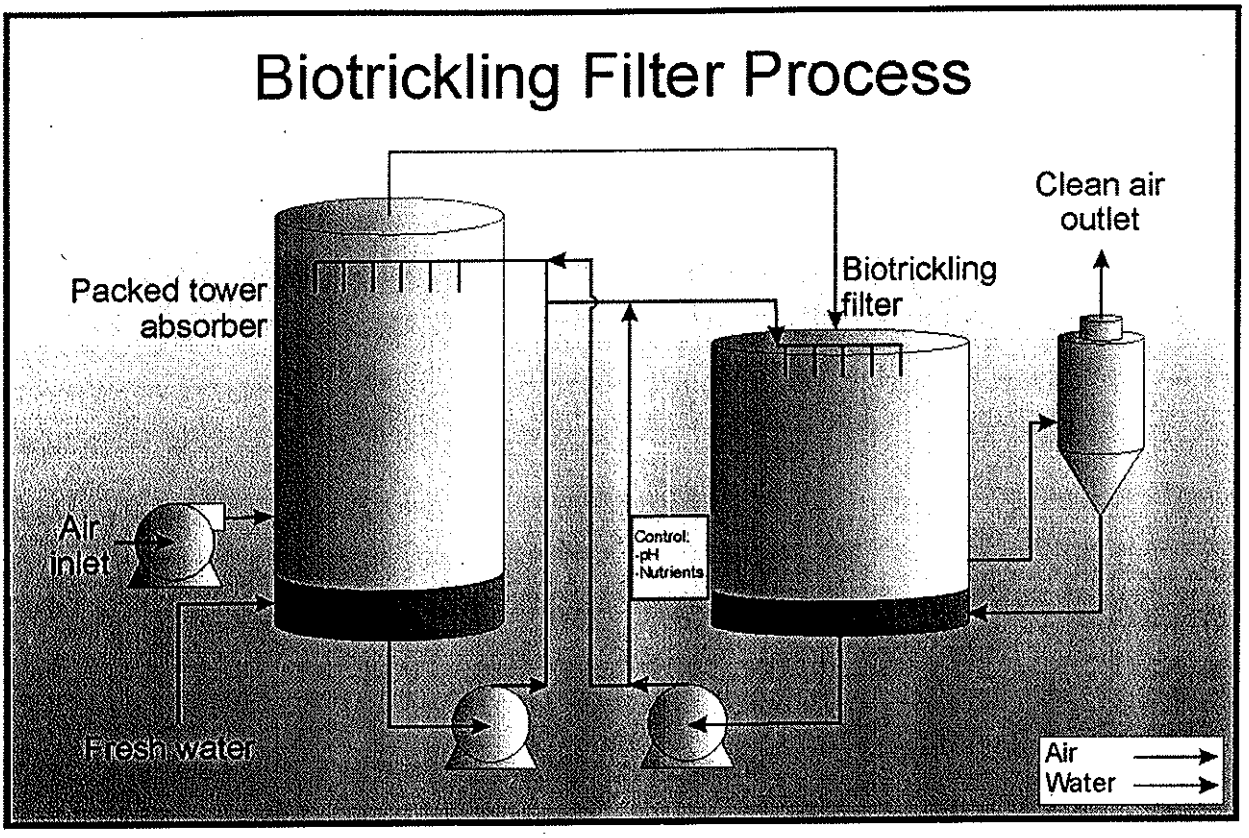


Figure 1: Biotrickling filter schematics

The microorganisms were isolated from activated sludge generated by a secondary biological treatment process which was initially tested to 10^7 CFU (colony forming unit) by ml of sludge. Isolation and enrichment of microorganisms were carried out in a continuously fed bioreactor (chemostat). The nutrient solution was enriched with the six (6) VOCs microorganisms need to adapt : ethanol, methanol, isopropanol, ethyl acetate, propyl acetate and naphta. Isolation and enrichment took place very rapidly and successfully; indicating the VOCs are easily biodegradable.

Biodegradation runs were carried out in flasks containing a mineral solution media to which different concentrations of contaminants were added . The flasks were incubated on shaker plate at room temperature. The biomass cultivated in the chemostat is high-performance. It has degraded more than 97 % of 400 ppm VOC added concentration in less than 24 hours, and more than 90 % of 800 ppm in the same period of time. These results are very interesting because the tested VOC concentrations are much greater than those found in the biotrickling reactor. The isolated and enriched biomass adapted in chemostat can rapidly degrade very large concentrations of the targeted VOCs.

The microbial consortium obtained was tested on a laboratory scale biotrickling filter developed by Biogenie. For experimentation purpose, air is artificially contaminated by direct injection of a VOC blend composed of 32 % ethanol, 5 % methanol, 21 % isopropanol, 32 % ethyl acetate, 5 % propyl acetate and 5 % naphta. Runs were conducted for more than 10 weeks. Our 90 % gas purification objective was easily and rapidly reached during testing. Indeed, a mass balance indicates a 93 % elimination in VOC levels. The degradation of VOC in the liquid phase is by no means restrictive, since there is no accumulation of VOC in the process water. The laboratory system has demonstrated its sturdiness with respect to the fluctuations in VOC concentration levels. In fact, during testing, the VOC concentration levels varied between 300 and 3,000 mg/m^3, without affecting its efficiency.

The biotrickling laboratory test bed has demonstrated a 93 % VOC elimination efficiency. The air resided 20 seconds in the system, the average VOC concentration was 750 mg/m^3 with an elimination rate of 145 gram VOC per cubic meter of bioreactor per hour (g $VOC/m^3_{reactor}$-h).

Design and demonstration of an experimental pilot scale unit

The principal objective of this phase of the work involved the design and construction of a pilot unit to demonstrate the performance of Biogenie's biotrickling filter process for the biopurification of gas emanating from a flexographic printing process.

This second phase of the project was subdivided into four (4) technical steps :

Step 1 : Engineering design and construction of the pilot unit
Step 2 : Fine tuning and performance evaluation on an industrial site
Step 3 : Characterization of industrial flexographic effluents
Step 4 : Technico-economic study of the biotrickling process

Like the laboratory scale unit, the pilot unit is composed of an absorption tower with a counter-current flow and a biotrickling filter with co-current flow of the air stream and the process water. The system capacity varies between 2,000 to 6,500 m^3/h depending on the nature of the effluent to be processed. The instrumentation provided by the pilot unit enables monitoring and control of air and water flows, pH, temperature, foam control, nutrient addition and pressure loss. Moreover, the pilot unit is equipped with a fan blower to ensure constant air flow, with its own water conditioning system for make-up water (evaporation and water bleeds), with a hydrocyclone to minimize water loss at the output and with a filter for drainage control. The unit is equipped with many sampling ports to facilitate the fine tuning of the process' operation parameters.

The pilot unit has been installed at a flexographic printing industry in Montreal, Quebec. The unit's start-up period allowed acclimatization of the microbial population on the biotrickling filter, the running-in of the equipment and the adjustment of the operation parameters to reach targeted performances.

The results obtained are conclusive : more than 95 % VOC elimination for an alcohol based flexographic effluent. Test runs allowed optimization of operation conditions and a twofold increase in the processing capacity compared to the results obtained in laboratory. Our pilot unit has an elimination rate of 350 g $VOC/m^3_{reactor}$-h.

The characterization of plants with flexographic production has allowed the completion of the information required for the economic analysis of the process. The industries contacted in the Montreal area allowed us to assess the VOC concentration of their effluent and to visit their installations to better define their needs in terms of air treatment equipment. The typical flexographic printing press effluent is composed of more than 80 % alcohol, 15 % propyl acetate and 5 % of other compounds. This effluent is perfectly suited for the biotrickling filter technology. The typical flexographic plant effluent generates 85,000 m^3/h from the press exhaust system at a 1,000 mg/m^3 VOC concentration. The ventilation of the production areas generates 42,500 m^3/h of air with an average 80 mg/m^3 concentration in VOC vapors. The average load is established at 693 mg/m^3.

The technico-economic study of the biotrickling filter process developed by Biogenie provides a realistic portrait of the implications related to the establishment of the process in an industry and to its operation during the entire life cycle of the project. The study takes into consideration the technical aspects (equipment and operating costs) as well as the general (buildings, various services) and financial (financing cost, depreciation, taxation) aspects.

The use of a biotrickling filter with counter-current flow is indicated for the treatment of alcohol based flexographic effluents. The unit was calculated with a nominal load of 1,040 mg/m^3 that is 50 % higher than the average load. The industrial unit is composed of three (3) biotrickling filters used in parallel. This configuration complies with a smooth and continuous operation of the unit and enables maintenance routines without affecting the plant's operation. The capital investment for a turnkey project is $989,000 Canadian dollars (1997-98). The equipment on its own constitutes an investment of $562,000. Direct production costs are estimated at $82,500 annually. The economic life cycle of the project was established at 15 years. Based on this, the unit cost of the biotrickling filter process is only $0,32 per kilogram of treated VOC. The industrial unit has an annual degradation capacity of one thousand (1,000) tons of VOC.

TABLE DES MATIÈRES

page

RÉSUMÉ iii
SUMMARY ix

1 INTRODUCTION 1

2 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE 3

3 PHASE I : ÉVALUATION SUR BANC D'ESSAI EN LABORATOIRE DU LIT À RUISSELLEMENT 4
3.1 Étape 1 : Isolement et sélection des microorganismes 4
3.2 Étape 2 : Essai de biodégradabilité des contaminants cibles par culture mixte 6
3.3 Étape 3 : Évaluation de l'efficacité et de la performance du lit à ruissellement 7
3.3.1 Banc d'essai en laboratoire 7
3.3.2 Performance du système d'épuration 9
3.4 Étape 4 : Rapport de phase I 11

4 PHASE II : MISE AU POINT D'UNE UNITÉ PILOTE EXPÉRIMENTALE 12
4.1 Étape 1 : Conception de l'unité pilote expérimentale 12
4.2 Étape 2 : Mise au point et mesure de performance 15
4.2.1 Mise au point de l'unité pilote 17
4.2.1.1 Démarrage de l'unité pilote (jours 0 à 9) 17
4.2.1.2 Arrêt de la production (jours 10 à 25) 18
4.2.1.3 Reprise de la production (jour 26 à 46) 18
4.2.1.4 Mesure de performance de l'unité pilote (jours 47 et +) 19
4.2.2 Discussion 21
4.3 Étape 3 : Caractérisation des effluents gazeux de l'industrie de la flexographie 23
4.3.1 Objectifs 23
4.3.2 Méthode 23
4.3.3 Résultats 24
4.3.4 Discussion 26

TABLE DES MATIÈRES

(Suite)

page

4.4 Étape 4 : Technico-économie du système de traitement des effluents gazeux d'un procédé d'impression par flexographie....26

4.4.1 Introduction....26

4.4.2 Hypothèses de travail....27

4.4.3 Vue macroscopique....28

4.4.4 Description du système....29

4.4.5 Analyse économique....30

4.4.6 Sommaire de l'ICT....31

4.4.7 Sommaire de l'estimation du coût d'exploitation....31

4.4.8 Discussion....34

4.5 Étape 5 : Rapport de phase II....35

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS....36

6 BIBLIOGRAPHIE....38

LISTE DES TABLEAUX

page

Tableau I : Caractéristiques de l'inoculum microbien 5

Tableau II : Taux d'élimination des COV lors des essais de biodégradabilité 7

Tableau III : Mesure de performance du système d'épuration 9

Tableau IV : Composition moyenne de l'effluent gazeux 19

Tableau V : Performances du biolaveur 21

Tableau VI : Caractéristiques de l'air sortant des cheminées d'évacuation 24

Tableau VII : Proportion moyenne des solvants utilisés en impression par flexographie 25

Tableau VIII : Sommaire de l'estimation de l'investissement en capital total 32

Tableau IX : Sommaire de l'estimation du coût d'exploitation 33

Tableau X : Comparaison de coûts entre les différents systèmes de traitement pour une émission de 127 500 m^3/heure et 88 kg/heure de solvants à l'atmosphère (en $ CA) 35

LISTE DES FIGURES

page

Figure 1 : Diagramme d'écoulement du lit à ruissellement 3

Figure 2 : Schéma du montage d'isolement et d'enrichissement des microorganismes 5

Figure 3 : Tests de biodégradabilité en milieu liquide 6

Figure 4 : Schéma du procédé d'épuration des gaz pilote laboratoire 8

Figure 5: Performances d'épuration du lit à ruissellement 10

Figure 6 : Période d'acclimatation du lit à ruissellement 10

Figure 7 : Schéma d'écoulement 13

Figure 8 : Unité pilote de lit à ruissellement 14

Figure 9 : Performance de l'unité pilote 16

Figure 10 : Évolution de la microflore 20

1 INTRODUCTION

Sur le plan environnemental, la pollution de l'air est un des problèmes majeurs de notre temps. Beaucoup d'efforts et de capitaux ont été investis pour la lutte contre la pollution atmosphérique. Le marché mondial d'assainissement de l'air, qui représentait 36 milliards de dollars en 1990, atteindrait 52 milliards en l'an 2000 (KPMG, 1992). Le contrôle des composés organiques volatils (COV) est une portion importante de ce marché. Selon une estimation, 1 780 kilotonnes de COV ont été émises dans l'atmosphère en 1985 seulement au Canada. Les industries canadiennes d'imprimerie, à elles seules, génèrent plusieurs dizaines de kilotonnes de COV chaque année (CHEMinfo Services, 1995).

Une variété de technologies de traitement des gaz contaminés par les COV coexistent sur le marché. Parmi les technologies traditionnelles, on retrouve l'adsorption sur le charbon activé et l'oxydation thermique ou catalytique. Depuis quelques années, la bioépuration des effluents gazeux est considérée comme un choix intéressant. Simple, efficace et économique, cette nouvelle approche présente en effet un très grand potentiel d'application à de nombreux secteurs industriels.

Le projet vise à démontrer l'utilisation d'un bioprocédé de lit à ruissellement, élaboré par Biogénie, pour la bioépuration des gaz provenant de l'industrie de l'impression par flexographie. D'une part, le traitement d'un tel effluent nécessite un procédé performant, puisqu'une multitude de COV de nature différente sont présents dans le gaz à des degrés de contamination fluctuant dans le temps. D'autre part, même au niveau mondial, l'application du procédé de lit à ruissellement à l'industrie de flexographie est nouvelle. En ce sens, une démonstration s'avère primordiale pour que cette technologie soit reconnue et considérée.

Les objectifs visés sont les suivants :

- mise au point, en laboratoire, des paramètres spécifiques de conception et d'opération du lit à ruissellement ;
- conception et fabrication d'une unité pilote de lit à ruissellement ;
- démonstration en industrie des performances du lit à ruissellement ;
- atteindre un taux d'efficacité d'élimination des composés volatils de 90 % ;
- caractérisation des effluents industriels de flexographie ;
- technico-économie du procédé à l'échelle industrielle.

Ce document rapporte les réalisations du projet qui s'est déroulé de janvier 1996 à septembre 1997. Le projet a été subdivisé et réalisé selon les étapes suivantes :

Phase I — Évaluation sur banc d'essai en laboratoire du lit à ruissellement :
- Étape 1 : Isolement et sélection de microorgansimes performants
- Étape 2 : Essai de biodégradation des contaminants cibles par la culture mixte
- Étape 3 : Évaluation de la performance du lit à ruissellement
- Étape 4 : Rapport de la phase I

Phase II — Mise au point d'une unité pilote expérimentale :
- Étape 1 : Ingénierie de conception et sélection des équipements
- Étape 2 : Ingénierie détaillée et construction de l'unité pilote
- Étape 3 : Évaluation de la performance du système sur un site réel
- Étape 4 : Étude technico-économique
- Étape 5 : Rapport de la phase II (étape et phase)

Le rapport final présente la synthèse des activités et résultats issus de la réalisation des étapes ci-haut mentionnées.

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la participation financière d'Environnement Canada qui s'élève au montant de 135 897 $. Pour sa part, Biogénie a investi 334 628 $ pour un montant total de 470 525 $.

2 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE

L'unité pilote est constituée d'une tour d'absorption à écoulement à contre-courant et d'un lit à ruissellement à écoulement cocourant de l'air à traiter et de l'eau de procédé. La capacité du système va de 2 000 à 6 500 m^3/h selon la nature de l'effluent. Le diagramme d'écoulement du lit est présenté en figure 1. L'instrumentation permet la mesure et le contrôle des débits d'air et d'eau de procédé, du pH, de la température, de la mousse, des nutriments et des pertes de charge. De plus, l'unité est dotée d'une soufflante pour assurer un débit d'air constant, de son propre système de conditionnement de l'eau de compensation (évaporation et purge), d'un hydrocyclone afin de minimiser l'entraînement de liquide à la sortie et d'un filtre pour le contrôle des purges. L'unité est dotée de plusieurs points d'échantillonnage afin de faciliter la mise au point des paramètres d'opération du procédé.

L'unité pilote a été installée dans une industrie d'impression par flexographie de Montréal. Cette industrie utilise les procédés d'impression sur film plastique et de laminage sur feuille d'aluminium. Alors que le procédé d'impression utilise principalement des solvants à base d'alcools, le laminage se fait majoritairement avec de l'acétate d'éthyle et de l'isopropanol. L'unité pilote a été raccordée à deux (2) presses d'impression et un laminoir afin de vérifier ses performances sous différentes conditions de production.

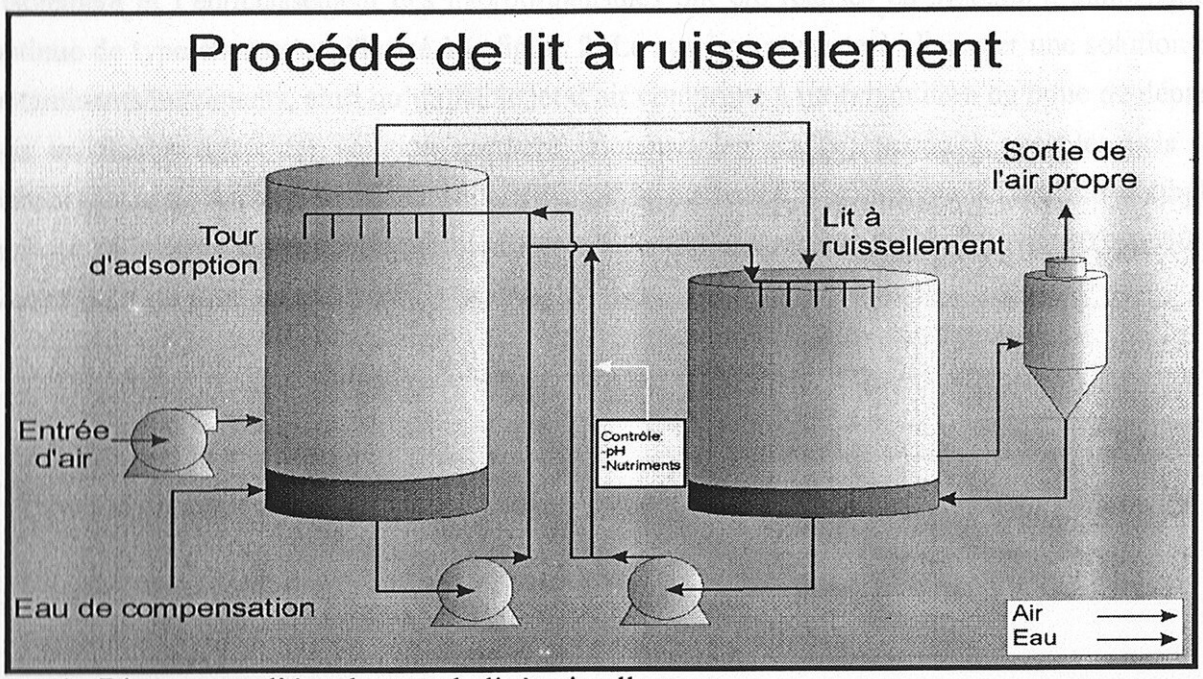


Figure 1 : Diagramme d'écoulement du lit à ruissellement

3 PHASE I : ÉVALUATION SUR BANC D'ESSAI EN LABORATOIRE DU LIT À RUISSELLEMENT

L'objectif spécifique de la phase I consistait à définir les paramètres spécifiques à la conception et à l'opération du procédé élaboré par Biogénie, afin de bioépurer les gaz provenant de l'industrie de la flexographie.

Cette première phase du projet fut subdivisée en quatre (4) étapes techniques :

Étape 1 : Isolement et sélection de microorganismes performants
Étape 2 : Essais de biodégradabilité des contaminants cibles par la culture mixte
Étape 3 : Évaluation de la performance du lit à ruissellement
Étape 4 : Rapport de phase I

3.1 ÉTAPE 1 : ISOLEMENT ET SÉLECTION DES MICROORGANISMES

Les microorganismes ont été isolés à partir de deux (2) boues activées, recueillies à une station d'épuration des eaux usées de la Communauté Urbaine de Québec et chez une papetière de la province. Les boues provenaient d'un traitement biologique secondaire et contenaient une microflore indigène totale de 10^7 unités formant des colonies (UFC) par ml de boue.

L'isolement et l'enrichissement des microorganismes ont été réalisés en système à alimentation continue de type chemostat, illustré à la figure 2. Le système consiste à alimenter une solution de contaminants/nutriments, ainsi qu'un faible jet d'air comprimé à un échantillon de boue de départ, dans un flacon agité. La solution nutritive contenait les six (6) produits avec lesquels les microorganismes doivent s'enrichir soit l'éthanol, le méthanol, l'isopropanol, l'acétate d'éthyle, l'acétate de propyle et l'éther de pétrole à des concentrations respectives de 50, 10, 30, 50, 10 et 10 ppm pour un total de 150 ppm de COV.

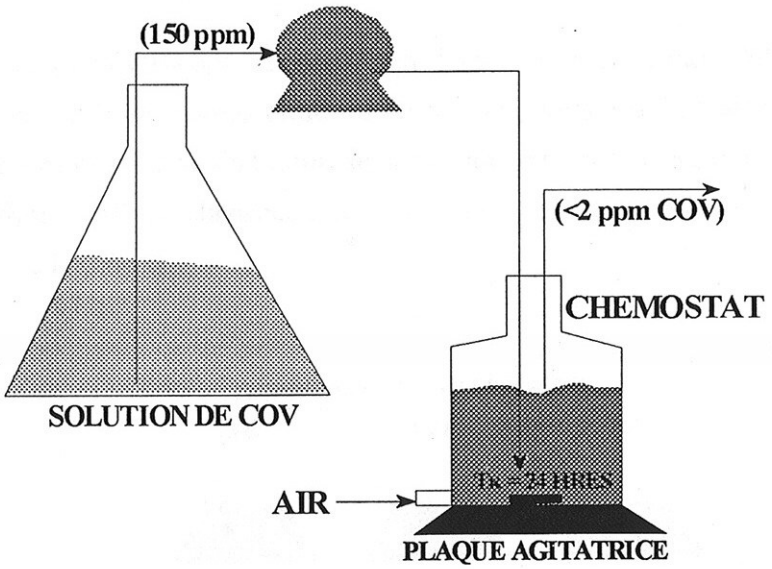


Figure 2 : Schéma du montage d'isolement et d'enrichissement des microorganismes

En seulement 4 semaines d'enrichissement, nous avons observé une très grande croissance des microorganismes spécifiques. Le tableau I illustre le dénombrement microbien total et spécifique de l'inoculum microbien. Nous avons remarqué que le chemostat 1 est plus riche en microflore totale et spécifique, cela est probablement lié au fait que la microflore de départ, provenant du traitement secondaire de l'usine de traitement de la Communauté Urbaine de Québec, est à la base beaucoup plus variée que la seconde boue à l'étude, provenant d'un traitement d'eau d'une papetière. L'isolement et l'enrichissement se sont réalisés très rapidement, cela indique que les contaminants sont facilement biodégradables.

Tableau I : Caractéristiques de l'inoculum microbien

		Dénombrement (UFC/ml)	
		Chemostat 1	Chemostat 2
Microflore totale		$2{,}4 \times 10^8$	$5{,}2 \times 10^7$
Microflore spécifique	Méthanol	$1{,}7 \times 10^8$	$8{,}0 \times 10^6$
	Éthanol	$1{,}7 \times 10^8$	$5{,}0 \times 10^6$
	Isopropanol	$5{,}0 \times 10^7$	$8{,}0 \times 10^5$
	Acétate d'éthyle	$3{,}5 \times 10^7$	$3{,}0 \times 10^6$
	Acétate de propyle	$2{,}4 \times 10^8$	$2{,}3 \times 10^6$
	Éther de pétrole	$7{,}0 \times 10^5$	$7{,}0 \times 10^5$

Note : chemostat 1: isolement à partir d'une boue de la CUQ & chemostat 2 : boue de papetière

3.2 ÉTAPE 2 : ESSAI DE BIODÉGRADABILITÉ DES CONTAMINANTS CIBLES PAR CULTURE MIXTE

Les essais de biodégradabilité ont été réalisés en flacon agités contenant 200 ml de milieu minéral où ont été ajoutées différentes concentrations de contaminants soit 400, 800 et 1 200 ppm de COV totaux. Outre les témoins, 20 ml de biomasse provenant des chemostats ont par la suite été inoculés aux flacons. La figure 3 illustre la procédure décrite. Les fioles ont été incubées sur plaque agitatrice à la température de la pièce.

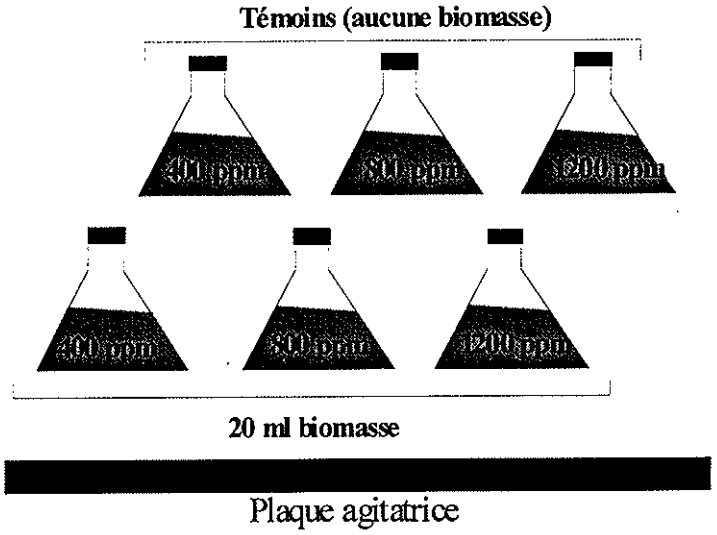


Figure 3 : Tests de biodégradabilité en milieu liquide

La biomasse isolée en chemostat est très performante. Elle dégrade plus de 97 % des 400 ppm ajoutés en moins de 24 heures, et plus de 90 % des 800 ppm pour le même délai. Le tableau II présente les résultats obtenus.

Tableau II : Taux d'élimination des COV lors des essais de biodégradabilité

	Méthanol	Éthanol	Isopropanol	Acétate d'éthyle	Acétate de propyle	totaux
400 ppm	> 81,8 %	> 98,5 %	> 97,5 %	>98,3 %	>87,5 %	>97,2 %
800 ppm	>80,0 %	>98,2 %	68,7 %	>98,0 %	>86,7 %	>90,4 %
1 200 ppm	33,3 %	86,5 %	0 %	>98,9 %	>92,6 %	>70,2 %
1 200T	0 %	0 %	0 %	18,9 %	24,5 %	7,9 %

Note : La mention plus grand que (>) indique que le résultat était sous la limite de détection de l'appareil de mesure qui est de 2 ppm.

On remarque que l'isopropanol est le constituant du mélange qui est le plus difficilement biodégradable. De plus, les témoins illustrent une dégradation abiotique, probablement sous forme de volatilisation, des acétates à un taux de 25 %.

3.3 ÉTAPE 3 : ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ ET DE LA PERFORMANCE DU LIT À RUISSELLEMENT

3.3.1 Banc d'essai en laboratoire

Le montage expérimental, illustré à la figure 4, est principalement constitué de deux (2) unités : la première est une tour d'absorption qui a pour fonction de solubiliser les contaminants de la phase gazeuse dans une phase aqueuse ; la deuxième, un lit à ruissellement, réalise le traitement de l'eau chargée des COV.

L'air est artificiellement contaminé par un mélange de COV injectés dans la ligne d'air selon les proportions suivantes : soit 32 % d'éthanol, 5 % de méthanol, 21 % d'isopropanol, 32 % d'acétate d'éthyle, 5 % d'acétate de propyle et 5 % d'éther de pétrole. Lors de l'essai, nous avons fait fluctuer la concentration de COV entre 300 et 3 000 ppm.

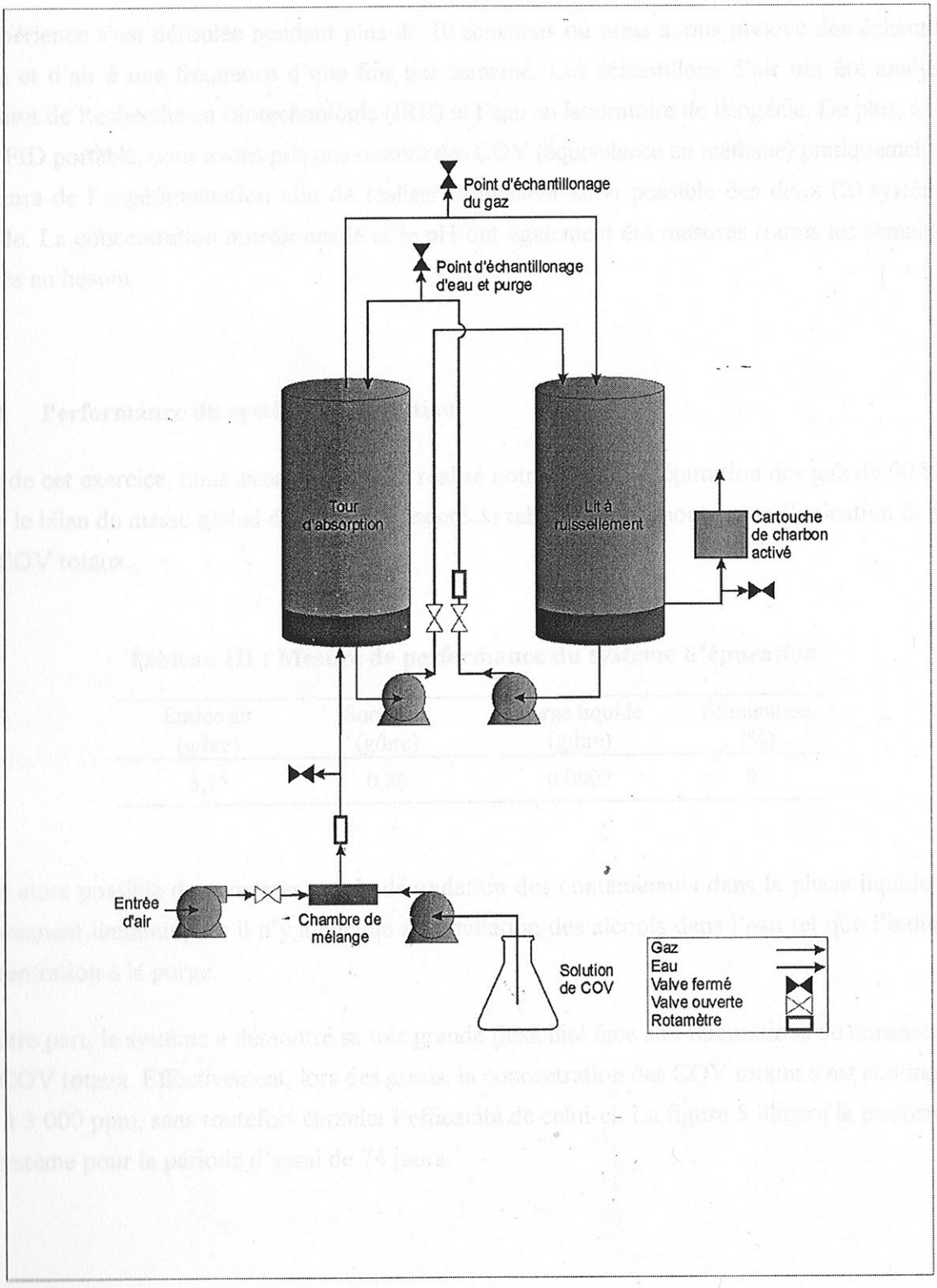


Figure 4 : Schéma du procédé d'épuration des gaz pilote laboratoire

L'expérience s'est déroulée pendant plus de 10 semaines où nous avons prélevé des échantillons d'eau et d'air à une fréquence d'une fois par semaine. Les échantillons d'air ont été analysés à l'Institut de Recherche en Biotechnologie (IRB) et l'eau au laboratoire de Biogénie. De plus, à l'aide d'un FID portable, nous avons pris une mesure des COV (équivalence en méthane) pratiquement tous les jours de l'expérimentation afin de réaliser le meilleur suivi possible des deux (2) systèmes à l'étude. La concentration nutritionnelle et le pH ont également été mesurés toutes les semaines et ajustés au besoin.

3.3.2 Performance du système d'épuration

Lors de cet exercice, nous avons facilement réalisé notre objectif d'épuration des gaz de 90 %. En effet, le bilan de masse global des essais, présenté au tableau III, démontre une élimination de 92 % des COV totaux.

Tableau III : Mesure de performance du système d'épuration

Entrée air (g/hre)	Sortie air (g/hre)	Purge liquide (g/hre)	Élimination (%)
3,15	0,26	0,0002	92

Il est alors possible de constater que la dégradation des contaminants dans la phase liquide n'est aucunement limitante, car il n'y a aucune accumulation des alcools dans l'eau tel que l'indique la concentration à la purge.

D'autre part, le système a démontré sa très grande flexibilité face aux fluctuations de concentration des COV totaux. Effectivement, lors des essais, la concentration des COV totaux s'est étalonnée de 300 à 3 000 ppm, sans toutefois ébranler l'efficacité de celui-ci. La figure 5 illustre la performance du système pour la période d'essai de 74 jours.

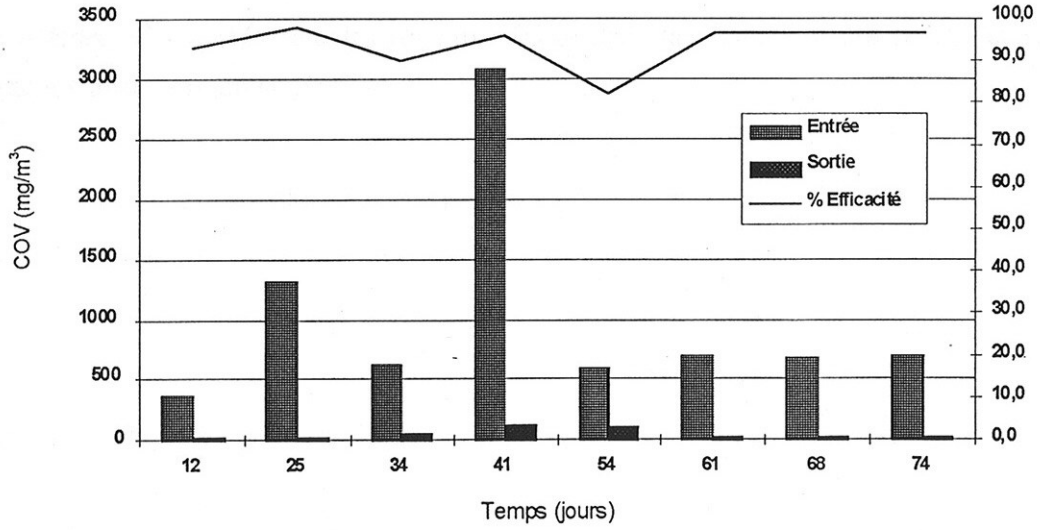


Figure 5 : Performances d'épuration du lit à ruissellement

La figure 6 illustre, par un suivi continu au détecteur FID de l'effluent gazeux, l'évolution de la période d'acclimatation du lit à ruissellement. En seulement 5 jours, la performance du système s'élevait à 90 % d'élimination des COV totaux.

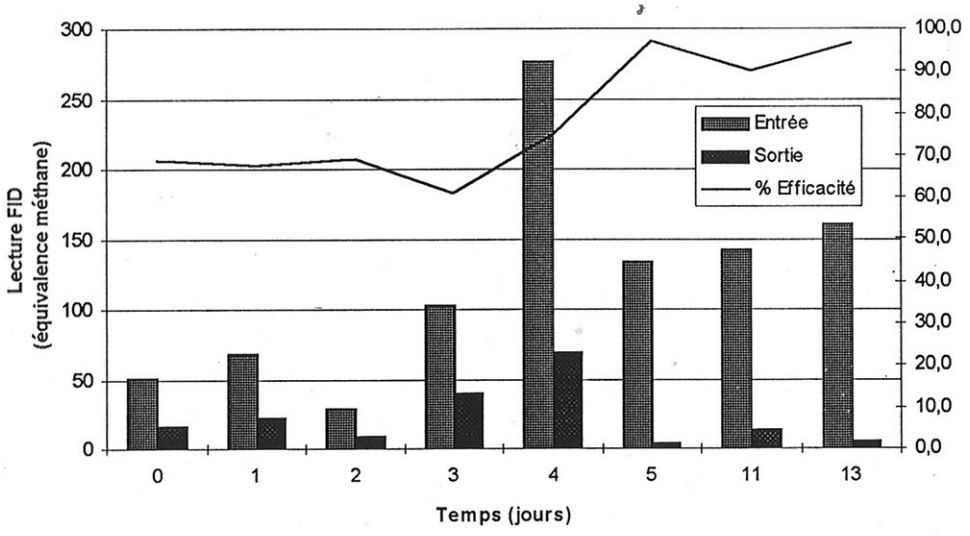


Figure 6 : Période d'acclimatation du lit à ruissellement

3.4 ÉTAPE 4 : RAPPORT DE PHASE I

Le rapport d'étape n° 1, présentant les travaux réalisé dans la phase I, a été rédigé et remis à Environnement Canada en juillet 1996.

4 PHASE II : MISE AU POINT D'UNE UNITÉ PILOTE EXPÉRIMENTALE

L'objectif spécifique de cette phase des travaux consistait en la conception et la fabrication d'une unité pilote du procédé de lit à ruissellement développé par Biogénie, afin de réaliser la démonstration en industrie des performances de bioépuration des gaz provenant d'un procédé d'impression par flexographie.

Cette deuxième phase du projet fut subdivisée en cinq (5) étapes techniques :

Étape 1 : Ingénierie de conception et fabrication de l'unité pilote
Étape 2 : Mise au point et mesure de performance sur un site industriel
Étape 3 : Caractérisation des effluents de l'industrie de la flexographie
Étape 4 : Étude technico-économique du procédé industriel
Étape 5 : Rapport de phase II

4.1 ÉTAPE 1 : CONCEPTION DE L'UNITÉ PILOTE EXPÉRIMENTALE

Le département de l'ingénierie a assisté l'équipe technique responsable du projet flexographie pour effectuer la transition entre l'échelle laboratoire et l'échelle pilote. Le système laboratoire d'épuration d'air permettait de traiter 5 m^3/h, alors que le système pilote permet de traiter entre 2 100 et 6 500 m^3/h selon la nature de l'effluent.

Le rôle de l'ingénierie a principalement consisté à prendre en charge la conception, la fabrication, l'installation et la mise en route de l'unité pilote. Le travail d'ingénierie de conception a consisté à produire les devis d'ensemble, en l'occurrence le schéma d'écoulement (figure 7) et le diagramme de tuyauterie et d'instrumentation. Mis à part l'échelle, la principale distinction entre les systèmes laboratoire et pilote est le degré d'automatisation. En effet, une très grande portion du travail a consisté à instrumenter le système, afin de mesurer et contrôler :

- les débits et niveaux de liquides ;
- le débit gazeux ;
- la formation de mousse ;
- le pH ;
- la température ;
- les pertes de charge.

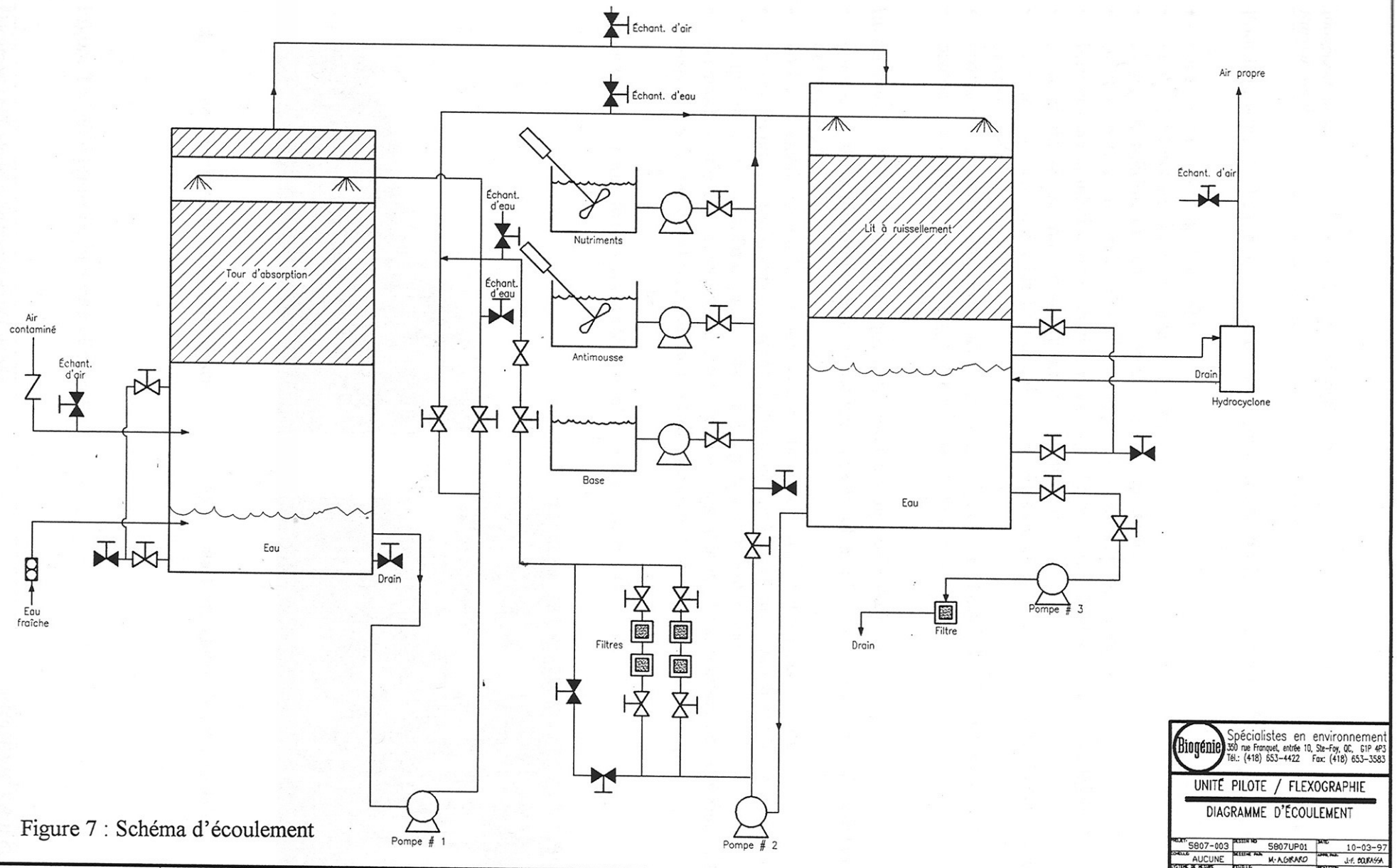


Figure 7 : Schéma d'écoulement

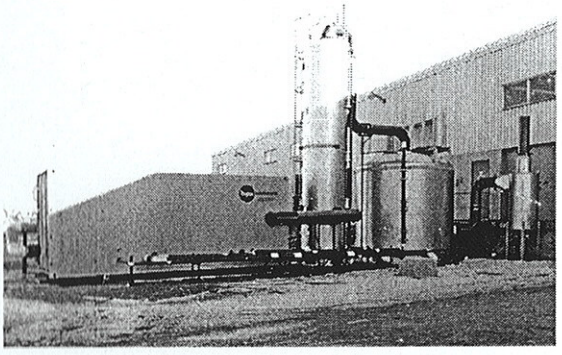
Pour l'unité pilote il a été jugé utile ou nécessaire de prévoir les dispositifs afin de :

- permettre le soutirage (purge) ;
- permettre l'échantillonnage (gaz et liquide) ;
- pouvoir conditionner l'eau à l'entrée (échange ionique) ;
- limiter l'entraînement de liquide dans le gaz de sortie (hydrocyclone) ;
- limiter l'accumulation de biomasse et nettoyer le système (filtres et accès pour lavage) ;
- pouvoir ajouter des nutriments (pompe et circuiterie) ;
- distribuer efficacement les liquides dans les têtes de colonnes (système de dispersion avec buses) ;
- protéger le système (vannes de sécurité, dispositifs d'arrêt, boucles d'évitement, etc.) ;
- protéger les opérateurs (affichage des valeurs et alarmes).

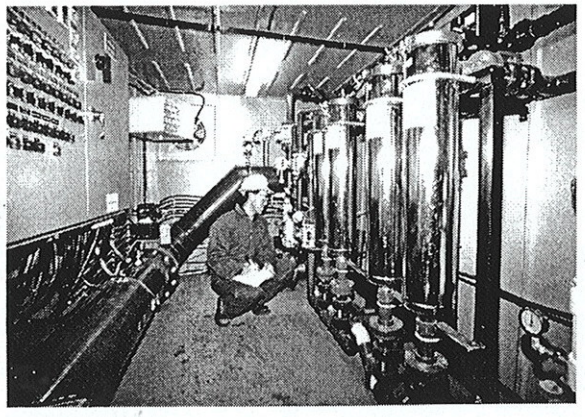
En résumé, le système pilote fabriqué renferme les unités suivantes :

- une tour d'absorption multi-étagée fonctionnant à écoulement à contre-courant, et dont le volume utile est de 4,5 m^3 ;
- un lit à ruissellement à écoulement cocourant dont le volume utile est de 9 m^3 ;
- un séparateur cyclonique permettant la condensation d'une partie de l'humidité contenue dans le gaz de sortie, de même que le captage des gouttelettes entraînées ;
- un module d'équipements renfermant, les pompes, débitmètres, vannes de contrôle, filtres, dispositifs de mesure et panneau de contrôle, dispositifs de sécurité.

Après la fabrication, le système a été assemblé et testé en atelier.



a) configuration de l'unité pilote



b) salle de contrôle du procédé

Figure 8 : Unité pilote de lit à ruissellement

4.2 ÉTAPE 2 : MISE AU POINT ET MESURE DE PERFORMANCE

Cette étape des travaux a permis de vérifier les performances de l'unité pilote expérimentale sur un site industriel choisi par le Conseil de la flexographie. Les travaux comportent une phase de mise au point de l'opération de l'unité suivie d'une période de mesure des performances qui ont été réalisées selon l'échéancier suivant :

- mise au point de l'unité (11 décembre 1996 au 26 janvier 1997) ;
- mesure de performance (27 janvier au 9 mai 1997).

La mesure des COV totaux dans l'air est prise quotidiennement avec un détecteur à ionisation de flamme (FID). L'analyse détaillée des composants dans l'air a été confiée à l'Institut de Recherche en Biotechnologie de Montréal (IRB), affilié au Conseil national de recherches du Canada. L'évaluation des COV dans l'eau et des microflores totale et spécifique a été faite à nos laboratoires.

La figure 9 présente les performances de l'unité pilote pour la durée du projet.

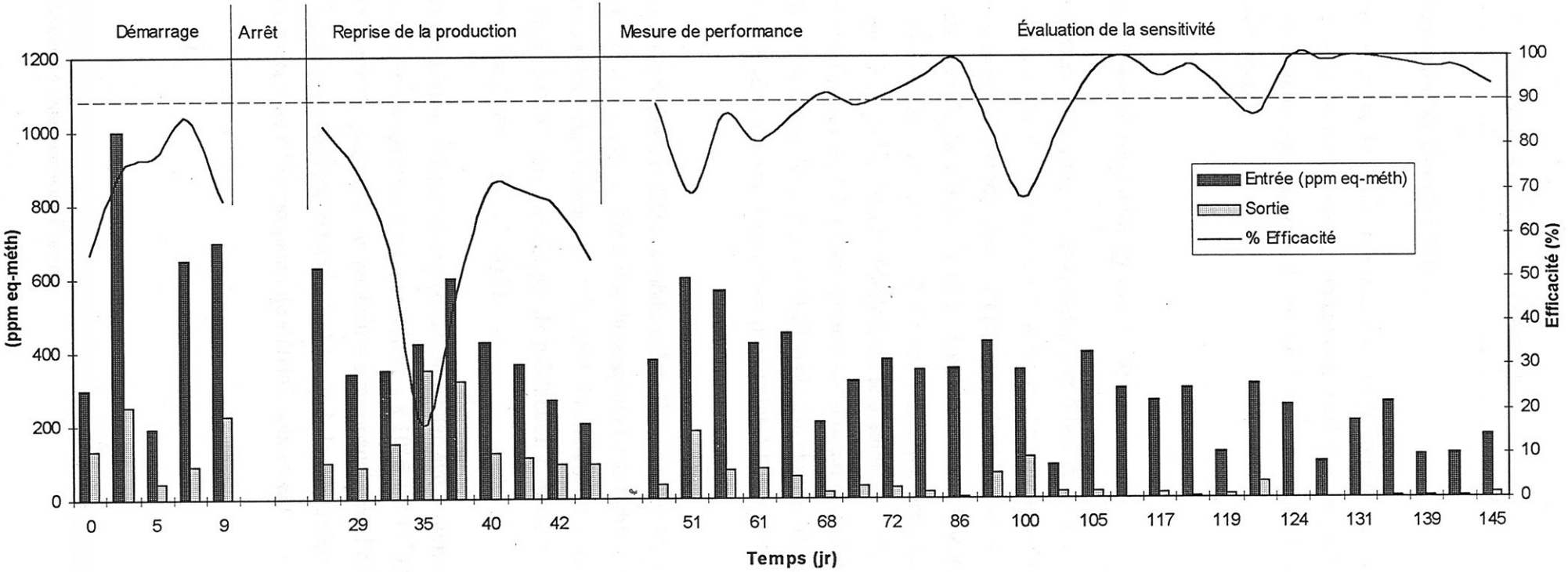


Figure 9 : Performance de l'unité pilote

4.2.1 Mise au point de l'unité pilote

L'étape de mise au point de l'unité pilote a pour but le rodage de l'équipement, la préparation de l'unité pour la mise en opération du traitement, ainsi que le suivi des performances du lit à ruissellement en régime transitoire. Les travaux ont permis de vérifier les protocoles pour ces opérations déterminantes.

4.2.1.1 Démarrage de l'unité pilote (jours 0 à 9)

Le lit à ruissellement a été préparé en ajoutant aux 5 000 litres d'eau du réservoir les nutriments nécessaires. Le pH a été ajusté à 6,0. Le lit a été inoculé d'une culture bactérienne spécialement acclimatée aux composés présents dans l'effluent industriel. L'incubation du lit à ruissellement s'est déroulée sur une période de 6 jours. Le lit à ruissellement a été alimenté continuellement avec l'air contaminé de l'industrie à un débit de 2 900 m^3/h. Les performances du lit à ruissellement ont augmenté significativement de 60 à 86 % d'efficacité d'élimination des COV dans l'air au cours des 6 premiers jours du démarrage. Il y a eu ensuite une diminution des performances dans les 3 jours suivants. Cette baisse de performance est attribuable à la charge organique de l'effluent gazeux qui a été maintenue élevée en raison d'un pic de production à l'approche de l'arrêt pour la période des Fêtes.

Le suivi de la concentration des COV solubilisés dans l'eau nous indique une hausse dans les premiers jours (500 à 4 200 mg/l), attribuable à l'acclimatation et à la faible accumulation de la microflore, suivi d'une baisse (880 mg/l) alors que l'efficacité du traitement augmente. La concentration dans l'eau a augmenté (5 000 mg/l) lors du pic de production précédant l'arrêt. Il est à noter la forte contribution de l'isopropanol (3 000 mg/l).

Le suivi de la population microbienne pendant le démarrage a démontré une augmentation de la concentration en microorganisme qui est passée de 1 x 10^5 à 1 x 10^8 UFC/ml. La baisse d'efficacité entre les jours 6 et 9 s'explique par un pic haut d'isopropanol dans l'effluent alors que la population microbienne n'était pas suffisamment adaptée. L'arrêt de la production, à ce moment, n'a pas permis à la microflore spécifique à l'isopropanol de s'établir solidement.

4.2.1.2 Arrêt de la production (jours 10 à 25)

La production de l'usine a cessé pour la période des Fêtes entre le 21 décembre et le 6 janvier.

Les COV présents à l'arrêt dans l'eau de procédé, ainsi que les ajouts ponctuels ont été consommés rapidement.

4.2.1.3 Reprise de la production (jour 26 à 46)

L'usine a repris ses opérations normales le 6 janvier (jour 26). Les débits d'air et de recirculation de liquide ont été augmentés aux conditions d'opération en vigueur lors du démarrage initial.

L'efficacité du traitement était de 85 % au premier jour de la reprise. Elle a ensuite décliné pendant les 9 jours suivants pour atteindre un creux à 15 %. À ce moment (jour 35), la concentration des COV dans l'eau était très élevée (>4 000 mg/l). En période transitoire, la charge organique imposée au lit est trop importante pour sa capacité de dégradation. L'accumulation de COV enlève au lit ses propriétés d'absorption des COV de l'air et fait chuter l'efficacité du traitement du procédé. Afin de rétablir la situation, la charge organique doit être contrôlée afin de fournir la quantité de contaminant correspondante à la capacité de la biodégradation du lit. Tout excès se traduit par une accumulation de COV dans l'eau et à une baisse d'efficacité.

Le contrôle de la charge organique a été effectué par un contrôle combiné du débit d'air et de sa concentration (à partir du jour 35). La période qui a suivi (jours 35 à 45) a été appliquée à retrouver les conditions initiales d'opération du lit. Une fois l'activité initiale du lit retrouvée, la charge organique a été graduellement rétablie aux conditions de l'usine de production.

4.2.1.4 Mesure de performance de l'unité pilote (jours 47 et +)

La mesure de performance de l'unité pilote a débuté avec l'opération conjointe du lit à ruissellement acclimaté et de la tour d'absorption. Cette étape a permis d'évaluer les performances de l'unité que l'on retrouve à la figure 9.

La tour d'absorption a été démarrée le 27 janvier 1997 (jour 47). L'efficacité de l'unité a alors atteint près de 90 %. Le débit d'alimentation a été successivement augmenté de 1 700 à 2 000, 2 300 et 2 600 m^3/h dans un laps de temps de 13 jours seulement. La réponse positive du système nous a permis d'augmenter la charge de plus de 50 % tout en conservant une efficacité d'élimination supérieure à 90 %.

Les analyses ont permis de déterminer la composition moyenne de l'effluent traité. Les valeurs sont présentées au tableau IV.

Tableau IV : Composition moyenne de l'effluent gazeux

n-Propanol	43 %
Éthanol	31 %
Isopropanol	7 %
Méthanol	3 %
Acétate d'éthyle	7 %
Acétate de propyle	9 %

La figure 10 présente la spécificité de la microflore pour les composés à traiter.

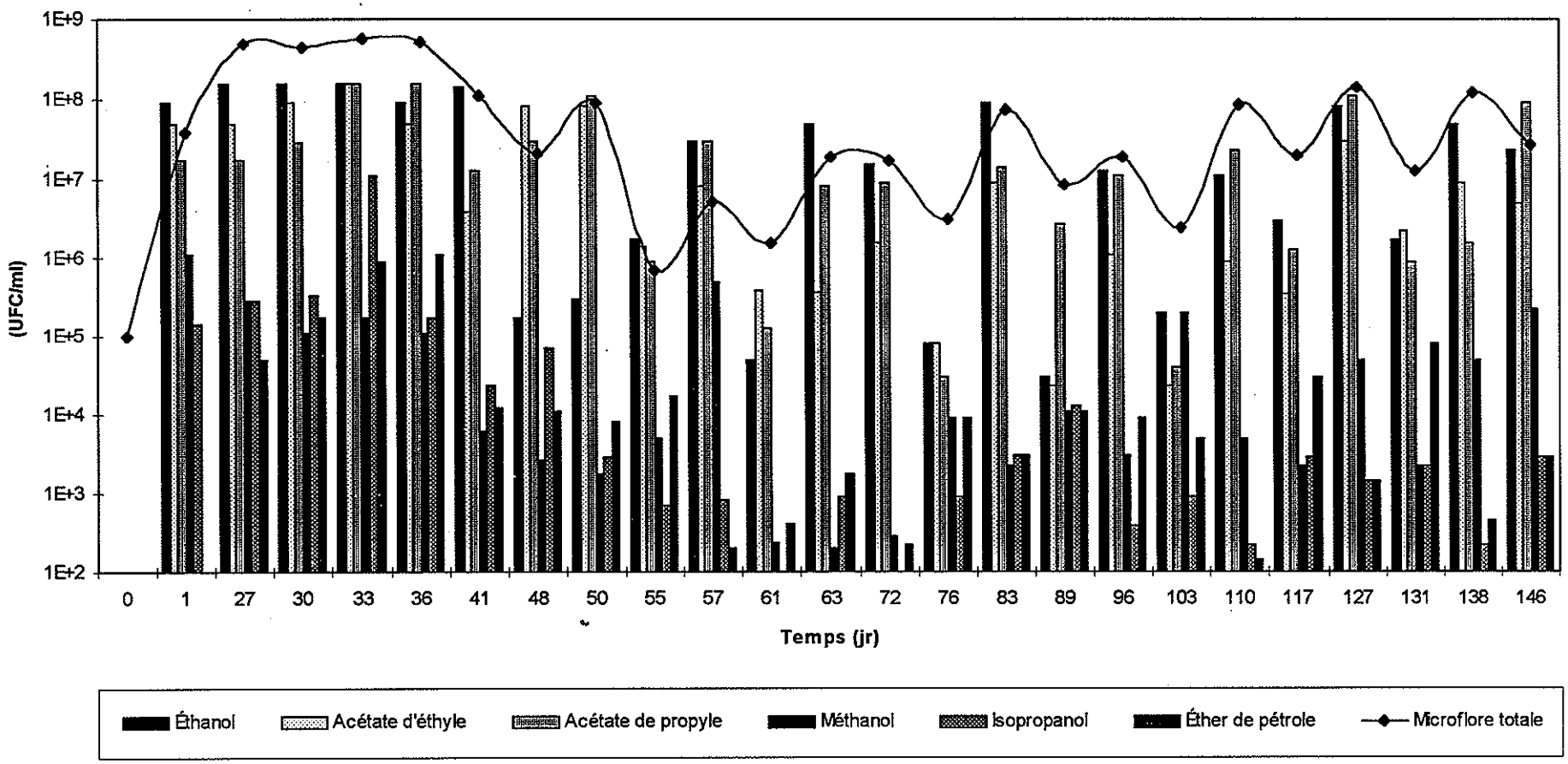


Figure 10 : Évolution de la microflore

L'acétate d'éthyle s'avère le composé le plus difficile à éliminer. Malgré sa solubilité dans l'eau (10 %, soit 100 000 mg/l), l'acétate d'éthyle est un composé volatil qui privilégie la phase gazeuse au détriment de la phase aqueuse.

On peut procéder au calcul d'un bilan de matière nous permettant de déterminer la capacité de dégradation du biolaveur. En régime stationnaire, la concentration dans l'eau est constante et on peut déduire la capacité de dégradation de l'unité par différence entre les lectures d'air (tableau V). La capacité de la tour d'absorption d'éliminer les contaminants est de 4 à 20 fois celle du lit. La tour recevant en premier l'effluent gazeux peut facilement absorber les composés solubles. De plus, le volume de la tour est deux (2) fois inférieur à celui du lit à ruissellement. La performance de la tour est de l'ordre de 600 $g/m^3_{réacteur}$-h alors qu'elle peut être évaluée à 300 $g/m^3_{réacteur}$-h pour le système global. Dans plusieurs cas, la performance du lit est affectée par la bonne performance de la tour en raison de la faible quantité de COV résiduels alimentés.

Tableau V : Performances du biolaveur

Temps	Débit d'air	FID			Efficacité	Capacité d'élimination*		
		Entrée	Milieu	Sortie	Globale	Tour**	lit***	Globale
(jours)	(m^3/h)	(ppm eq-méth)			(%)	(g/m^3_{react}- h)		
114	1 700	300	35	0	100 %	601	40	227
120	2 300	310	145	41	87 %	506	159	275
124	2 300	250	40	0	100 %	644	61	256
133	2 600	260	80	3	99 %	624	133	297
142	2 600	120	30	3	98 %	312	47	135
146	2 600	210	105	28	87 %	364	133	210

* *Facteur de réponse = 6,0 (mg/m^3)/ppm eq-méth*
** *Volume de la tour = 4,5 m^3*
*** *Volume du lit = 9 m^3*

4.2.2 Discussion

La réalisation de la démonstration pilote s'est déroulée avec succès. L'unité pilote s'est avérée d'opération facile et fiable.

L'acclimatation du lit nécessite un contrôle sur la charge organique, afin d'éviter la saturation de l'unité. Il est important de ne pas surcharger l'eau de procédé avec les COV, alors que la biomasse n'est pas présente en quantité suffisante sur les éléments du garnissage. La concentration élevée peut avoir des effets inhibiteurs, voire toxiques sur la microflore. Cette observation prévaut

particulièrement pour les composés solubles dans l'eau qui peuvent s'accumuler à des concentrations élevées. Ainsi, il se peut que la forte concentration en isopropanol présente dans l'effluent lors du démarrage ait eu un effet négatif sur la microflore. Un contrôle en temps réel de la composition de l'effluent gazeux permettrait d'éviter cette situation.

L'efficacité du traitement a atteint un niveau supérieur à 95 % en régime permanent pour un effluent principalement composé d'alcool. L'efficacité d'élimination est directement liée à la capacité de dégradation des microorganismes. En effet, toute accumulation de COV dans l'eau hypothèque la capacité d'absorption du procédé et limite l'atteinte des objectifs d'épuration de l'air.

Les informations issues des 100 premiers jours ont conduit à l'ajustement de ce qui devait conduire à des conditions plus robustes du système, car il fut possible par la suite d'augmenter successivement les débits d'aération jusqu'à 2 600 m^3/h sans perte de performance.

Les pertes de charge sont négligeables et indiquent un faible risque d'engorgement. Le contrôle de la température est efficace même par des froids hivernaux. Le débit de purge est faible : inférieur à 2 % en opération normale de traitement, il a été augmenté jusqu'à 12 % lors de séquences d'entretien afin d'éliminer l'eau de procédé des minéraux accumulés et de la biomasse excédentaire.

L'unité pilote a été conçue afin d'assurer un nettoyage de l'effluent gazeux dans une tour d'absorption à contre-courant permettant aux vapeurs de COV de se condenser dans l'eau. L'eau de la tour est ensuite pompée vers le lit à ruissellement qui y effectue la dégradation des COV. L'air passe par le lit en écoulement cocourant avec l'eau, assurant l'oxygénation du lit et le polissage de l'air si nécessaire. L'utilisation combinée et, à quelques occasions, séparée de la tour et du lit nous a indiqué la capacité de traitement élevée de la tour seule. En effet, la présence inévitable de biomasse dans la tour a résulté en quelque sorte en un lit à ruissellement à contre-courant dont les performances sont des plus intéressantes. Le tableau V indique clairement que la tour réussit à éliminer de 50 à 90 % des COV de l'effluent selon les conditions. Or, comme le volume de réaction de la tour est 50 % celui du lit à ruissellement, il apparaît avantageux d'utiliser la tour d'absorption pour le traitement complet des COV. La solubilité de la majorité des composés retrouvés en procédé de flexographie nous permet d'obtenir de bonnes performances avec un équipement simplifié. Le traitement des effluents de flexographie peut se faire efficacement par l'utilisation d'un lit à ruissellement à écoulement à contre-courant.

4.3 ÉTAPE 3 : CARACTÉRISATION DES EFFLUENTS GAZEUX DE L'INDUSTRIE DE LA FLEXOGRAPHIE

4.3.1 Objectifs

Suite aux essais de démonstration pilote, il nous a été donné de constater les différences et variations notables de concentration en COV entre l'effluent industriel et l'effluent synthétique utilisé en laboratoire. Les plus grandes concentrations de l'effluent industriel ont eu un impact direct sur le volume d'air traité par notre unité pilote. Afin de poursuivre les travaux, et particulièrement au niveau de la conception d'une unité industrielle, il apparaît important de mieux connaître le profil des industries de flexographie.

Cette section présente la démarche entreprise afin de caractériser les effluents des imprimeurs par flexographie. Notre enquête a permis d'identifier les composés volatils utilisés et d'en évaluer les proportions dans les effluents.

4.3.2 Méthode

La quête d'information a été effectuée chez des entreprises du Montréal métropolitain. Leur collaboration a été rendue possible grâce au Conseil de la flexographie du Québec. L'information de base a été obtenue lors d'une entrevue téléphonique ; des données supplémentaires ont été fournies par les réponses à un questionnaire transmis par télécopieur ; une visite de l'usine avec prise de mesures complémentaires a permis de compléter notre recherche.

La visite à l'usine a permis de visualiser et noter le système de ventilation, ainsi que d'effectuer des mesures sur le site. Les mesures ont été prises à la sortie des cheminées sur le toit. La température de l'air, son humidité et la concentration en COV ont été mesurées lorsque possible. La mesure des COV totaux a été faite avec un détecteur à ionisation de flamme (FID de Photovac).

4.3.3 Résultats

Cinq (5) compagnies de Montréal ont collaboré à notre démarche. Les sites visités sont modernes, dotés d'équipements relativement récents et respectant l'environnement. L'utilisation de lames de type "enclosed doctor blades" permet de diminuer les quantités et les émissions de solvant dans l'air ambiant. L'utilisation d'encre à haute pigmentation est un autre facteur diminuant les odeurs dans l'air ambiant. La très grande majorité des solvants est directement évacuée au toit de l'édifice par le système de ventilation intégré à chaque presse. Les presses sont généralement dotées de deux (2) systèmes de séchages : "between colors" et "overhead". Le premier séchage de la pellicule imprimée se fait entre chaque application de couleur. L'air y est plus chaud et plus concentré en solvant. Le séchage final de la pellicule se fait dans le tunnel ("overhead") avant sa mise en rouleau. L'air est moins chaud et moins concentré en COV. Le tableau VI résume les conditions de l'air aux points de sortie situés sur le toit.

Tableau VI : Caractéristiques de l'air sortant des cheminées d'évacuation

Séchage des couleurs	T = 50 – 65 C H.R. = 15 % COV = 350 – 650 ppm eq-méth Débit = 4 000 – 5 500 cfm
Séchage final (en tunnel)	T = 35 – 45 C H.R. = 15 % COV = 100 – 250 ppm eq-méth Débit = 2 500 – 4 000 cfm
Air ambiant	COV = 0 – 120 ppm eq-méth

La concentration de COV dans l'air ambiant varie beaucoup. La concentration lue dans les corridors principaux de la salle des presses était très faible. Par contre, elle augmente rapidement à proximité des presses. Des lectures aux cheminées d'évacuation de l'air ont donné des résultats de 100 ppm eq-méth. Ces cheminées ventilaient des espaces d'entreposage et de nettoyage des équipements.

La consommation annuelle de solvants d'une entreprise de flexographie nous indique la proportion et la quantité potentielle d'émission de l'entreprise. En fonction de la capacité d'évacuation de son système de ventilation, il est possible d'en déduire la caractéristique moyenne de l'effluent. Le tableau VII nous indique les produits les plus utilisés dans l'industrie.

Tableau VII : Proportion moyenne des solvants utilisés en impression par flexographie

	Imprimerie	Laminage
Méthanol	15 %	-
Éthanol	10 – 35 %	0 – 2 %
n-propanol	40 – 65 %	-
Isopropanol	5 – 15 %	-
Acétate d'éthyle	0 – 5 %	80 – 85 %
Acétate d'isopropyle	0 – 5 %	10 – 20 %
Acétate de propyle normal	0 – 20 %	-
Éther de pétrole	0 – 5 %	-
Autres	0 – 5 %	-
Débit moyen d'aération	50 000 cfm	
Concentration moyenne en COV	1 000 mg/m^3	
Concentration normale en opération	1 500 mg/m^3	
Température moyenne de l'air	45 °C	
Humidité relative	12 – 20 %	

Le débit de ventilation typique des usines de Montréal est de 40 à 50 000 cfm, soit de 7 à 12 000 cfm par presse selon la capacité et l'âge de la presse. Les presses modernes minimisent les émanations de solvant dans l'usine ; les vapeurs sont donc majoritairement évacuées dans la ventilation. Le renouvellement de l'air ambiant est de l'ordre de 15 à 25 000 cfm selon les usines.

Les solvants utilisés pour l'impression sont en majorité composés d'alcools (>80 %), d'acétate de propyle normal (>15 %), d'acétate d'éthyle (1 %) et autres (4 %) comme les éthers de pétrole et les solvants de nettoyage. Les solvants utilisés pour le laminage sont en majorité composés d'acétate d'éthyle (80 %) et d'isopropanol (15 %). L'éther de pétrole est de moins en moins utilisé : les nouvelles plaques en polymère utilisées pour l'impression ne supportent pas ce solvant, elles gonflent.

La concentration moyenne est de l'ordre de 1 500 mg/m^3 avec des pointes de 4 000 mg/m^3 et des arrêts à 0. La température de l'air varie de 40 à 65 °C selon les presses. L'humidité relative est de l'ordre de 15 %. L'air sortant des presses est propre. Les poussières contamineraient les pellicules qui sont souvent utilisées par le domaine alimentaire.

4.3.4 Discussion

Cette étape des travaux a permis d'obtenir des informations précieuses qui nous permettent de mieux connaître et cibler le marché de la flexographie. La réalisation de l'étude technico-économique, présentée à la section suivante, n'en sera que plus juste.

Les industries visitées utilisent les procédés suivants :

- extrusion du film de polyéthylène ;
- impression du film par flexographie ;
- impression du film et laminage sur papier métallique ;
- pliage et coupage des sacs de plastique.

Alors que toutes pratiquent l'imprimerie par flexographie utilisant une majorité de solvants à base d'alcool, une seule d'entre elles pratique le laminage utilisant principalement l'acétate d'éthyle. Il est donc important de considérer ce fait lors du calcul des appareils. Comme l'acétate d'éthyle est un composé plus difficile à éliminer de l'air, il faut s'assurer de sa présence et de sa concentration dans l'effluent avant de procéder au dimensionnement d'une unité industrielle

4.4 ÉTAPE 4 : TECHNICO-ÉCONOMIE DU SYSTÈME DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX D'UN PROCÉDÉ D'IMPRESSION PAR FLEXOGRAPHIE

4.4.1 Introduction

Cette section présente les résultats de l'étude technico-économique sur l'intégration d'une unité de traitement des effluents de flexographie par lit à ruissellement. L'étude technico-économique permet de dresser un portrait réaliste des implications liées autant à l'implantation du procédé dans une industrie qu'à son opération durant toute la vie du projet.

Les informations recueillies au cours du projet, que ce soit à la phase laboratoire, pilote et lors de la caractérisation des effluents, ont permis de formuler les hypothèses qui sont à la base de cette étude.

L'étude économique considère plusieurs aspects, pour n'en nommer que quelques uns :

- aspects techniques du procédé :
  - évaluation du coût des appareils ;
  - coûts d'opération ;
- aspects généraux :
  - coûts de bâtisses et des services ;
- aspects financiers :
  - coût du financement, dépréciation, fiscalité.

L'étude technico-économique va au-delà de ce qui est généralement présenté dans les soumissions ou articles scientifiques. Nous nous sommes efforcés de comparer notre évaluation avec les données disponibles sur d'autres technologies.

4.4.2 Hypothèses de travail

La présente estimation économique est valide pour un système de traitement biologique s'adressant à un cas typique d'usine d'impression flexographique. Le système est dimensionné pour traiter un effluent de 50 000 cfm, à la température moyenne de 47 °C, et chargé en moyenne de 1 000 mg/m^3 de vapeurs de solvants, en plus d'un rejet à l'atmosphère de 25 000 cfm d'air ambiant, à la température moyenne de 25 °C, lequel est chargé en moyenne de 80 mg/m^3 de vapeurs des mêmes solvants.

L'effluent total combiné est donc de 75 000 cfm, sa température moyenne est de 40 °C et il est chargé de COV en moyenne à 693 mg/m^3. Le rejet total journalier à l'atmosphère est donc évalué à 2 120 kg de COV.

Il a été démontré que les solvants utilisés en flexographie sont tous solubles dans l'eau et ont été facilement dégradés par notre système avec une efficacité supérieure à 90 %.

Le système étudié est constitué principalement d'un lit à ruissellement à contre-courant. Il est automatisé afin d'en minimiser les coûts d'opération. Sa capacité nominale de traitement est estimée à 2 850 kg COV/jour, et il sera donc opéré en moyenne à 67 % de sa capacité.

Afin d'estimer les coûts associés au financement, nous avons présumé que la durée de vie économique du projet est de 15 ans, que 40 % du capital requis pour réaliser le projet est directement investi, et que le 60 % manquant est emprunté sur 10 ans à un taux de 5,75 %.

L'estimation est donnée en dollars canadiens de 1997, et elle demeure valide pour 1998.

4.4.3 Vue macroscopique

En fonction des cas étudiés, nous sommes en mesure de caractériser une usine typique d'impression flexographique, comme étant une installation mettant en fonction 5 ou 6 presses, chacune étant dotée de son propre système de ventilation et d'évacuation de l'air vicié. Chaque presse rejette à l'atmosphère entre 7 000 et 12 000 cfm d'un air chargé en COV, selon leur âge et leur capacité d'impression. Par ailleurs, des COV sont présents dans l'air ambiant, et ce même si les presses plus modernes tendent à minimiser les émanations de solvants à l'intérieur de l'usine. Le renouvellement de l'air ambiant provoque généralement un rejet, qui à lui seul engendre le dépassement des règlements en vigueur.

Afin de pouvoir rencontrer les normes de rejet, il faut un système qui permette d'éliminer 90 % des COV présents. À notre connaissance, il y a trois (3) types de systèmes qui sont appropriés pour traiter un tel effluent :

- les systèmes d'adsorption sur charbon ;
- les systèmes d'oxydation thermique régénérative ;
- les systèmes biologiques.

Les systèmes d'adsorption sur charbon sont généralement très efficaces, et par surcroît permettent la récupération des solvants. Ils sont particulièrement appropriés pour de larges volumes d'air faiblement concentrés. Leur coût en capital est cependant très élevé. Dans le cas présent, les coûts de nettoyage du charbon et de la récupération des solvants seraient plus élevés du fait de la charge en COV. Le charbon est généralement nettoyé à la vapeur ou à l'aide de chaleur, le coût énergétique est alors élevé.

L'oxydation thermique régénérative est également appropriée pour traiter ce type d'effluent. Elle permet un taux d'élimination élevé. Par contre, la charge moyenne en COV est trop faible pour que

le système soit opéré sans utiliser de combustible. Le coût énergétique est donc encore une fois important. Le coût en capital est également un facteur défavorable au choix de cette technologie.

Il y a aussi l'alternative du traitement biologique. À ce chapitre, le système de type « lit à ruissellement » semble le plus approprié. Il tire profit du fait qu'il est aisé d'absorber les solvants utilisés en flexographie dans l'eau, et son « rendement volumique » en dégradation de COV est supérieur par rapport aux autres systèmes biologiques connus, ex. : les biofiltres qui sont également utilisés pour le traitement des COV.

Le lit à ruissellement peut être décrit comme étant la combinaison en une seule unité d'une tour d'absorption avec un réacteur à cellules immobilisées. Plusieurs configurations ont été testées à l'échelle pilote, celle à contre-courant s'étant avérée supérieure aux autres. Le coût en capital du lit à ruissellement est plus faible que ceux des systèmes énumérés précédemment, de même que le coût en énergie pour le faire fonctionner.

4.4.4 Description du système

L'effluent typique décrit précédemment nous fait voir un débit de 75 000 cfm (127 500 m^3/heure) chargé de 693 mg COV par m^3, ce qui signifie que la quantité de COV larguée à l'atmosphère est de 2 120 kg/jour.

La réglementation stipule qu'au moins 90 % des solvants doivent être éliminés, il faut donc qu'au minimum 1 908 kg soient traités à chaque jour. Le système biologique étudié à l'échelle pilote nous a démontré un rendement volumique de traitement de 350 g COV/$m^3_{réacteur}$-h.

Notre système a été dimensionné en fonction d'une capacité théorique d'élimination de 2 862 kg par jour, soit 1,5 fois la quantité requise. Il consiste en trois (3) lits à ruissellement fonctionnant en parallèles. Deux (2) des trois (3) bioréacteurs suffisent à traiter la totalité de l'effluent, le troisième agit en tant que bioréacteur auxiliaire. Celui-ci permet, entre autres, de traiter des concentrations et débits de pointe, en plus de procurer une souplesse et une sécurité. L'entretien d'un lit à ruissellement peut se faire sans hypothéquer l'efficacité du traitement.

Les dimensions des lits à ruissellement sont de 4,6 m (diamètre) par 12,7 m (hauteur totale). Le système occupe au sol une superficie globale de 75 m^2 (5 m x 15 m). La disposition idéale serait que les trois (3) tours soient attenantes à un des murs extérieurs de l'usine.

Les rejets gazeux sont donc poussés vers les trois (3) lits. Ceux-ci possèdent une section garnie, laquelle permet de retenir en place la flore microbienne active en plus de favoriser l'échange entre les phases gazeuse et liquide.

Le système est instrumenté et automatisé. Les débits gazeux et liquides sont tous contrôlés en fonction de la charge de contaminants mesurés en ligne en amont et en aval par un appareil FID. Les pressions et températures sont également mesurées et ces lectures sont utilisées par le système pour prendre des actions sur les débits et les cycles de nettoyage. Le pH est contrôlé, de même que l'ajout de nutriments et la formation de la mousse. Tous les paramètres mesurés et calculés peuvent être sauvegardés. Le contrôle est effectué par des automates programmables, et ceux-ci sont supervisés par un logiciel de type SCADA ("Supervisory Control And Data Acquisition"), lequel gère également les alarmes et la communication.

Le lit à ruissellement laisse échapper deux (2) rejets, soit l'effluent gazeux qui a été traité et une faible quantité d'eau (purge). Au niveau de l'effluent gazeux, des séparateurs cycloniques sont installés afin de minimiser l'entraînement de gouttelettes à l'atmosphère. L'effluent gazeux est chargé d'humidité. Le système doit donc être alimenté en eau pour compenser la purge et les pertes à l'atmosphère. Quant à la purge, elle est nécessaire afin d'évacuer les minéraux accumulés et la biomasse en excès. Le liquide rejeté subit un léger traitement, afin qu'on n'y retrouve pas de COV résiduels. Le liquide est donc acheminé dans un réservoir de neutralisation où les traces de COV seront traitées et ce, par la biomasse même qui s'y retrouve. Dans une autre section du réservoir, la biomasse sera décantée. Celle-ci devra être ponctuellement soutirée (vacuum) et disposée. Des ajustements chimiques seront également possibles si requis.

4.4.5 Analyse économique

Cette section présente les calculs de l'analyse économique et les considérations retenues pour l'estimation. Les résultats sont présentés en deux (2) volets. Le tableau VIII présente le sommaire de l'investissement en capital nécessaire pour la réalisation du projet. Le tableau IX évalue les coûts d'exploitation de l'unité industrielle. Les calculs tiennent compte de la dépréciation des équipements et des frais de financement.

L'étude couvre tous les coûts associés à un projet clés en main incluant les frais encourus par l'industriel pour l'implantation de la technologie et qui sont trop souvent négligés dans les prestations de vente.

La conception du procédé et le calcul des appareils permet d'évaluer le coût d'achat des équipements. Cette donnée est la pierre angulaire pour l'évaluation des autres coûts associés à la réalisation du projet. En fonction de la nature du procédé, il est possible d'estimer par des facteurs judicieusement choisis, les coûts nécessaires pour l'opération du procédé. Une étude technico-économique de ce type est précise à 10 %.

4.4.6 Sommaire de l'ICT

L'investissement en capital total est la somme qu'il faut prévoir pour supporter la mise en place des équipements et leur mise en opération. Ce montant n'inclut aucun frais d'opération. Il est calculé comme étant la somme des investissements directs, des investissements indirects et du fond de roulement.

4.4.7 Sommaire de l'estimation du coût d'exploitation

Une fois le système mis en place et mis en opération (décollage seulement), des déboursés seront encourus pour le faire fonctionner. Ceux-ci peuvent être distingués en trois (3) catégories, soit les coûts directs (ceux qui sont proportionnels au taux d'utilisation ou de production), les coûts indirects (sont aussi proportionnels au taux d'utilisation mais un minimum subsiste même si l'équipement n'est pas opéré), et les coûts fixes (coûts invariables). À ces coûts s'ajoutent des frais supplémentaires, lesquels font aussi partie du coût d'exploitation. Les composantes du coût d'exploitation sont énumérées au tableau IX.

Tableau VIII : Sommaire de l'estimation de l'investissement en capital total

I Données générales

A	Produit:	Lit ruissellement		D	Débit moyen rejet gazeux traité	127 500	m^3 / heure
B	Procédé:	Dégradation biologique aérobie de COV		E	Charge moyenne COV à traiter	693.33	mg / m^3
				F	Site de l'usine:	Montréal	
C	Capacité nominale	2880	kg / jour	G	Capital fixe:	989 835	$
	d'enlèvement COV:	1 051 200	kg / an	H	Fonds de roulement:	4 163	$

II Composantes de l'investissement en capital fixe (ICF)

		Facteurs		Coûts		
		Suggérés	Employés	$	($/kg)-an	($/$m^3$)-h
A	INVESTISSEMENTS DIRECTS					
1	Coût d'achat des équipements (CAE)					
A	Equipement de production			523 692	0.498	4.107
B	Equipement de stockage & manutention			3 090	0.003	0.024
C	Equipement d'analyse et contrôle de la qualité			35 700	0.034	0.280
	Coût d'achat total de l'équipement (CAE)			562 482	0.535	4.412
2	Coût d'installation de l'équipement (% du CAE)	35-45	25.5	143 363	0.136	1.124
3	Coût de la tuyauterie (% du CAE)	31	13.2	74 186	0.071	0.582
	Type de procédé: solide-fluide, fluide					
4	Coût de l'isolation (équipement et tuyauterie): (% du CAE)	8-9	12.8	72 072	0.069	0.565
5	Coût de l'instrumentation et du contrôle: (% du CAE)	6,13,30	16.4	92 367	0.088	0.724
6	Coût des installations électriques: (% de ICF)	4-11		14 265	0.014	0.112
7	Coût des bâtisses: (% du CAE)	47	3.5	19 656	0.019	0.154
	(solide-fluide, fluide, usine et site nouveaux)					
8	Coût des services (% de l'ICF)					

Type de service	Facteurs		Coûts	Type de service	Facteurs		Coûts
	Suggérés	Employés	$		Suggérés	Employés	$
Vap: génér	2.6,3.6	0.0	0	Air: compr& distr	0.2,1,3	0.10	998
Vap: distr.	0.2,1,2	0.0	0	Réfrigération	1,2,3	0.0	0
Eau: refroid	0.4,1.8,3.7	0.0	0	Elimin. déchets	0.4,1.1,1.8	0.0	0
Eau: trait	0.2,0.6,1.1	0.53	5 250	Elimin. égoûts	0.1,0.3,.4	0.0	0
Eau: distr.	0.1,0.9,2	0.0	0	Syst. communic.	0.1,0.2,0.3	0.0	0
Electr: ss-station	0.9,1.5,2.6	0.0	0	Stockage ingr.	0.3,1.1,3.2	0.0	0
Electr: distr.	0.4,1,2.1	0.0	0	Stock. prod. finis	0.7,1.8,2.4	0.0	0
Gaz: alim&distr	0.2,0.3,0.4	0.0	0	Protection feu	0.3,0.7,1	0.0	0

				$	($/kg)-an	($/$m^3$)-h
	Coût total des services			6 248	0.006	0.049
9	Coût du terrain: (% CAE)	4-8	0.5	0	0.000	0.000
	Aménagement du site: (% du CAE)	10-15	4.0	5 198	0.005	0.041
	TOTAL DES INVESTISSEMENTS DIRECTS (INVDIR)			989 835	0.942	7.763
B	Investissements indirects (INVIND)					
1	Ingénierie et supervision (% du CAE)	35	0.0	0	0.000	0.000
2	Coûts de la construction (% des INVDIR)	10	0.0	0	0.000	0.000
3	Honoraires du contracteur (% des INVDIR)	2-7	0.0	0	0.000	0.000
4	Faux-frais pour éventualités (% de l'ICF)	8,10,20	0.0	0	0.000	0.000
5	Frais pour décollage de l'usine (% de l'ICF)	8-10	0.0	0	0.000	0.000
	TOTAL DES INVESTISSEMENTS INDIRECTS (INVIND)			0	0.000	0.000
	Total de l'investissement en capital fixe (ICF)			**989 835**	**0.942**	**7.763**

III Composantes du fonds de roulement (FdR)

A	Inventaires 1 | Ingrédients (multiple de CING mensuel)	0.8,1,1.8	2.0	4 163	0.004	0.033
	2 | Produits semi-finis (mult. PRU mensuel)	0.5 - 1.0	0.0	0	0.000	0.000
	3 | Produits finis (mult. du PRU mensuel)	1,1.2,1.8	0.0	0	0.000	0.000
	Total des inventaires			4 163	0.004	0.033
B	Comptes à recevoir (multiple des ventes mensuelles)	1.1,1.2	0.0	0	0.000	0.000
C	Encaisse (mult. de diff. mens. entre le coût expl. et la dépréc.)	1.0,1.5	0.0	0	0.000	0.000
	Fonds de roulement (FdR)			**4 163**	**0.004**	**0.033**
IV	**INVESTISSEMENT CAPITAL TOTAL (ICT)**			**993 998**	**0.946**	**7.796**

Tableau IX : Sommaire de l'estimation du coût d'exploitation

I Données générales

A	Produit	Lit ruissellement		D	Charge moyenne COV:	693.33	mg / m³
B	Site de l'usine	Montréal		E	Pourcentage enlèvement COV:	90	%
C	Capacité nominale enlèvement	2 880	kg / jour	F	Investissements permanents:	989 835	$

II Composantes du coût d'exploitation

A COÛTS DIRECTS

1 Coûts des ingrédients

	Appellation et spécifications			Quantités	Prix	Facteurs		Coût annuel		
	No ¦ Nom	Grade	Teneur	/an	$/unité	Sugg.	Empl.	$	($/kg)-jr	($/m³)-h
a ¦ Réaction	1 ¦ NaOH	tech	98.5%	8834 kg	1.35			11 926	4.141	0.094
	2 ¦ Azote	tech	95.0%	1900 kg	0.37			703	0.244	0.006
	3 ¦ Phosphore	tech	50.0%	1525 kg	1.11			1 693	0.588	0.013
	4 ¦							0	0.000	0.000
Coût total ingrédients réaction								14 322	4.973	0.112
b ¦ Conditionnement	5 ¦ Antimousse	tech.	95.0%	3786 L	2.74			10 374	3.602	0.081
	6 ¦ Hydrogène	UHP	99.9%	15 m3	18.76			281	0.098	0.002
	7 ¦							0	0.000	0.000
Coût total ingrédients conditionnement								10 655	3.700	0.084
Coût total de tous les ingrédients								24 977	8.672	0.196

2 Coût de maind'oeuvre

Types	Cat.	Qté	$/hre	hres/an					
Opérateur	A	1	20.00	1000			20 000	6.944	0.157
Opérateur	B		15.00	0			0	0.000	0.000
Opérateur	C		10.00	0			0	0.000	0.000
							0	0.000	0.000
							0	0.000	0.000
Coût total de la main-d'oeuvre							20 000	6.944	0.157

3 Coût de la supervision: (% du coût total de la main-d'oeuvre)	15	15	3 000	1.042	0.024
4 Coût des services			0	0.000	0.000
Air comprimé			0	0.000	0.000
Combustibles			1 283	0.445	0.010
Eau			10 293	3.574	0.081
Electricité			0	0.000	0.000
Réfrigération			0	0.000	0.000
Vapeur			11 575	4.019	0.091
Coût total des services					
5 Entretien et réparation (% du CAE + % du coût bâtisses) 2-20 / 3-4	4	0	22 499	7.812	0.176
6 Fourniture de production (% du coût pour l'entretien et réparation)	15	2	450	0.156	0.004
7 Royautés et brevets (% du prix de vente ou des ventes)	1-5	0	0	0.000	0.000
TOTAL DES COÛTS DIRECTS			82 501	17.048	0.385

B COÛTS INDIRECTS 1 ¦ Frais généraux 'usine' (% du total des coûts A2, A3)	50-70	15	3 450	1.198	0.027
2 ¦ Frais généraux' salaires' (% du coût main-d'oeuvre)	15-20	15	3 000	1.042	0.024
TOTAL DES COÛTS INDIRECTS			6 450	2.240	0.051
C COÛTS FIXES 1 ¦ Assurance sur propriétés (% de l'ICF)	1-2	1	9 898	3.437	0.078
2 ¦ Dépréciation moy. (Période: 15 ans)			64 932	22.546	0.509
3 ¦ Taxes sur propriétés (% ICF)	1-4	2.00	622	0.216	0.005
TOTAL DES COÛTS FIXES			75 453	26.199	0.592
COÛT D'OPÉRATION DU SYSTÈME = A + B + C - dépréciation moy.			99 471	34.539	0.780
D FRAIS					
1 Frais d'administration (% de la main-d'oeuvre)	40-60	10	2 000	0.694	0.016
2 Frais de vente (% des ventes)	1-15	0	0	0.000	0.000
3 Frais de R&D (% des ventes)	2-5	0	0	0.000	0.000
4 Frais de financement (moyens)			12 558	4.360	0.098
TOTAL DES FRAIS			14 558	5.055	0.114
COÛT D'EXPLOITATION TOTAL (avant réduction d'impôt)			178 962	62.139	1.404

4.4.8 Discussion

Au même titre que l'oxydation thermique régénérative (RTO) et que l'adsorption sur charbon activé, le lit à ruissellement est une solution pour éliminer les COV d'un effluent typique d'une usine d'impression flexographique.

Le marché actuel des équipements de traitement des COV laisse entrevoir une forte croissance des RTO, au détriment des systèmes d'adsorption. En effet, la technologie du RTO est accessible à un moindre coût en capital, et son coût d'opération est également plus faible. Il devient particulièrement intéressant dans les cas où la concentration en COV est élevée (>2 500 mg/m^3), alors que l'énergie à fournir pour la combustion est minime. Par ailleurs, les RTO sont conçus pour traiter des charges fixes, alors que les arrêts de fonctionnement des presses sont fréquents.

Le charbon activé est quant à lui positionné dans les segments de marché où la valeur des solvants est élevée, car il en permet la récupération partielle. Par ailleurs, lorsque la température de l'effluent à traiter grimpe vers les 40 °C et plus, l'efficacité de l'adsorption diminue considérablement (la chaleur est utilisée dans les procédés de désorption) et les dangers d'autocombustion s'accroissent. La récupération des solvants nécessite la distillation fractionnée du mélange.

Le lit à ruissellement apparaît comme la solution idéale. Il est vrai que du point de vue économique cette solution présente de grands avantages (voir le tableau X). Il s'avère que le lit à ruissellement est probablement la meilleure des solutions biologiques, les biofiltres étant trop volumineux et les traitements en anaérobie étant moins performants par unité de volume.

Tableau X : Comparaison de coûts entre les différents systèmes de traitement pour une émission de 127 500 m³/heure et 88 kg/heure de solvants à l'atmosphère (en $ CA)

	Thermique regénératif RTO (1)	Lit à ruissellement (2)	Anaérobie (3)	Charbon (4)
Coût en capital ($)	1 814 065	989 835	1 256 088	3 150 000
Coût exploitation ($/an)	921 959	58 270	63 120	> 100 000
Main-d'œuvre	12 691	23 000	38 714	n.d.
Coût électricité	100 335	10 293	3 872	> 100 000
Coût combustible	808 933			n.d.
Ingrédients		24 977	20 533	

1) *Données extrapolées à partir de soumissions et données techniques fournies pour des RTO-DURR, de 30 000 cfm de capacité, avec des concentrations de VOC de 2 500, 1 875 et 1 250 mg/m³. Il est spécifié que la préparation du terrain (base de béton), les conduites de ventilation, le raccordement électrique et le raccordement des combustibles n'est pas fourni. Si on analyse le schéma d'écoulement et estime la puissance des pompes nécessaires, il nous apparaît que le coût de l'électricité soit sous-estimé.*
2) *Clés en main*
3) *Extrapolé à partir d'un article de SNC Research pour un système de 27 050 cfm avec une charge de VOC de 24 kg/heure.*
4) *D'après un survol de marché effectué par Biogénie. Aucune donnée significative sur les coûts d'opération, si ce n'est que les coûts sont réputés comme étant nettement supérieurs au RTO et même au traitement thermique conventionnel.*

Le cas étudié d'une usine d'impression flexographique est fort probablement un segment de marché où le lit à ruissellement supplante tous ses concurrents. Son coût hors tout, capital et opération pendant 15 ans confondus, revient à environ 3 500 000 $ (avant déduction d'impôt et incluant la dépréciation et les frais financiers), en comparaison à 15 643 450 $ (sans compter les frais de financement) pour un RTO sur une même période. Exprimé en $ par kg de COV éliminé pendant 15 ans, le lit à ruissellement revient à 0,32 $/kg, en comparaison à 1,43 $/kg pour le RTO.

4.5 ÉTAPE 5 : RAPPORT DE PHASE II

Les travaux de la phase II ont été présentés dans un rapport d'étape sommaire de phase II en mars 1997. Le rapport d'étape complet de la phase II a été déposé en octobre 1997.

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Tel que prévu, le système élaboré par Biogénie s'est démontré simple à opérer et très performant. Nous estimons que le potentiel de cette technologie est très grand pour l'épuration des gaz provenant des industries de flexographie. L'efficacité du traitement a atteint un niveau supérieur à 95 % en régime permanent.

La phase I de ce projet a été un succès. La biomasse isolée et enrichie, en système chemostat, dégrade rapidement de très grandes concentrations des produits cibles. L'objectif d'épuration de plus de 90 % sur lit à ruissellement a été rencontré sans grande difficulté. Entre autres, l'acclimatation du lit à ruissellement s'est avérée très rapide soit seulement 4 jours. De plus, le procédé a très bien résisté aux différents pics de concentration de COV totaux, toujours en gardant une efficacité de traitement adéquate. Nous avons d'ailleurs remarqué que la biodégradation ne semble pas limiter le traitement, car seulement une très faible concentration d'alcool est retrouvée dans la phase liquide à la sortie du lit à ruissellement.

Les travaux de la phase II ont débuté par la conception et la fabrication d'une unité pilote de traitement des effluents. Une tour d'absorption et un lit à ruissellement ayant respectivement 4,5 et 9 m^3 de volume utile constituent les éléments principaux de l'unité pilote. L'unité est dotée d'un panneau de contrôle permettant l'opération des équipements et la régulation automatique et programmée de certains paramètres comme le pH, le niveau, l'addition d'agent antimoussant, l'addition de nutriments et un dispositif de chauffage d'appoint.

Les essais se sont déroulés sur 150 jours. Les premières semaines ont permis l'acclimatation du lit, suivi d'un arrêt pour le congé des Fêtes, d'une reprise des activités en janvier, de la mise au point des paramètres d'opération et d'une période de mesure des performances. Les performances supérieures à 90 % ont été obtenues du jour 71 au jour 150, soit pendant 11 semaines consécutives. Durant cette période, nous avons augmenté graduellement la charge organique sur le biolaveur afin de déterminer sa capacité et sa sensitivité. Il a été possible de traiter plus de 90 % d'un effluent alimenté à 2 600m^3/h pour une capacité d'élimination globale de l'ordre de 350 $g/m^3_{réacteur}$-h.

L'étude technico-économique présente les coûts associés à la fabrication, l'installation et l'opération d'une unité de traitement de l'effluent gazeux. L'unité industrielle a la capacité d'éliminer mille (1 000) tonnes de COV annuellement. La vie économique du projet a été estimée à 15 ans et le coût de revient est de 0,32 $/kg COV traité, comparativement au RTO qui a été évalué à 1,43 $/kg COV.

Les procédés biologiques sont très compétitifs dans le traitement d'effluents gazeux de fort débit et faiblement contaminés. L'industrie de la flexographie est un domaine d'application idéal pour une unité utilisant un bioréacteur à lit à ruissellement.

6 BIBLIOGRAPHIE

BISHOP, P.L., KINNER, N.E. (1981), Aerobic Fixed – Film Processes. In Biotechnology, (Ed. Rehm H. J. and Reed G.), vol. 8, VCH Verlag, Weinheim.

BREWER, J. (1991). Litterature Review and Research Scoping Study on the Treatment of Volatile Organic Composands in the Off Gaz from Contaminated Grounwater and Soil Remedial Technologies. GASREP, Environment Canada

CCME (1990). Management Plan for Nitrogen Oxides and Volatile Organic Compounds. Phase I, CCME-EPC/TRE – 31E.

CHEMINFO SERVICES INC. (1995). Status of Solvents, Inks, VOC Emissions & Controls at Commercial and Industrial Printing Facilities prepared for Environment Canada, 218 p.

DIRKS, R.M.M. (1992). The Removal of Dichloromethane from Waste Gases in a Biological Trickling Filter, Thesis, Eidhoven Univ. of Technol., The Netherlands.

HARTMANS, S., TRAMPER J. (1991). Dichloromethane Removal from Waste Gases with a Trickle-bed Bioreactor, Bioproc. Eng., 6 : 83-92.

KPMG MANAGEMENT CONSULTANTS (1992). Technology Opportunities in Air Pollution Control. Prepared for Environment Canada, 165 p.

LEI, J., LORD, D., ARNEBERG, R., RHO, D., MERCIER, P., CYR, B. (1995). Field Demonstration of a Biological System for the Removal of Volatile Hydrocarbons from Soil Bioventing Gases. 3th International Symposium on In Situ and On Site Bioreclamation, San Diego, USA, April 1995.

LEI, J., LORD, D., ARNEBERG, R., RHO, D., MERCIER, P., CYR, B. (1994). Design, Field System to Remove Volatile Hydrocarbons from Waste Gases. 4th Annual Symposium on Groundwater and Soil Remediation, Calgary, Canada, Sept. 1994.

MULLIGAN, C., CHEBIB, J., SAFI, B. (1996). The Anaerobic Treatment of VOC's Emissions in the Flexographic Industry : the BIO-VOC Process. The Second North American Conference and Exhibition on Emerging Clean Air Technologies, Clean Air '96, Orlando, USA, November 1996.

OOSTING, R., URLINGS, L.G.C.M., RIEL, P.H. VAN, DRIEL, C. VAN (1992). Biopur = Alternative Packaging for Biological Systems. In : Process Engineering Aspects of Biological Waste Ctas Purification. Proc. ISEB, Belgium, p. 63-70.

PETERS, MAX S., TIMMERHAUS, KLAUS D. PLANT. Design and Economics for Chemical Engineers, third edition. New York, McGraw-Hill Book Company, c1980. 973 p.

RYDIN, S., DALBERG, P., BODKER, J. (1994). Biological Waste Gas Treatment of Air Containing Phenol and Ammonia Using a New Type of Trickling Filter. In : Biological Waste Gas Cleaning, VDI BERICHTE 1104, VDI Verlag, p. 231-237.

TREYBAL, ROBERT E., Mass-Transfer Operations. New York, McGraw-Hill Book Company, c1980. 784 p.

WAALEWIJN, E., MEIJER, C.D., WEBER, F.J., DNURSMA, U.C., RIJS, P. VAN (1994). Practice Runs of a Biotrickling Filter in the Exhaust Gases from a Fibre Factory. In : Biological Waste Gas Cleaning, VDI BERICHTE 1104, VDI Verlag, p. 545-553.

WEBER, F.J., HARTMANS, S. (1994). Toluene Degradation in a Trickle Bed Reactor – Prevention of Clogging. In Biological Waste Gas Cleaning, VDI BERICHTE 1104, VDI Verlag, p. 161-168.

YOUNG-SOOK, O., BARTHA, R. (1993). Microbial Scrubbing of BTEX Solvent Mixtures and Chlorinated Solvents from Air. In : Proc. Bioscrubbing of Gaseous Emissions. Rutgers University, USA.