



RAPPORT SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE

**CARACTÉRISATION BIOANALYTIQUE
DES EAUX USÉES DE L'USINE PPG
CANADA INC. À BEAUHARNOIS
(QUÉBEC)**

Rapport ST-215

CENTRE SAINT-LAURENT ST. LAWRENCE CENTRE

378476

SC350209
B65c
PPG
Canada
02

Environnement
Canada

Conservation de
l'environnement

Environment
Canada

Environmental
Conservation

Saint-Laurent
Vision 2000

15375

CSL-7572

SC350209 B65c

PPG Canada

Caractérisation bioanalytique des eaux usées de 2^e ex. l'usine PPG Canada Inc. à Beauharnois (Québec)

Manon Bombardier
Section Biologie de l'environnement

CENTRE DE DOCUMENTATION CSL
1, 2ième étage
1 (Québec) H2Y 2E7
Tel.: (514) 283-2762
Fax: (514) 283-7166

28/08/00

Centre Saint-Laurent
Conservation de l'environnement
Environnement Canada – Région du Québec

Août 2000

TD
428
CS
PG4
2000
ex. 2

COMMENTAIRES DES LECTEURS

Veillez adresser vos commentaires sur le contenu du présent rapport au Centre Saint-Laurent, Conservation de l'environnement, Environnement Canada – Région du Québec, 105, rue McGill, 7^e étage, Montréal (Québec), H2Y 2E7.

DOCUMENTATION
Centre de documentation
Environnement Canada
Région du Québec
105, rue McGill
Montréal (Québec)
H2Y 2E7
Téléphone : (514) 588-1188
Fax : (514) 588-1188

On devra citer la publication comme suit :

Bombardier, M. 2000. *Caractérisation bioanalytique des eaux usées de l'usine PPG Canada Inc. à Beauharnois (Québec)*. Environnement Canada - Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport scientifique et technique ST-215, 48 pages.

Collaborateurs

Les personnes suivantes ont participé à la supervision et(ou) à la réalisation des bioessais :

*Personnel de la
Section Biologie de l'environnement
Centre Saint-Laurent, Environnement Canada*

M. Bombardier, M. Sc.
M. Harwood, M. Sc.
S. Trottier, M. Sc.

*Personnel du
Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.*

J. Côté, tech. Chimie et biologie
É. Daigle, tech. Chimie et biologie
S. Veilleux, M.Sc.
M. Perron, chimiste

Remerciements

Sincères remerciements à M^{me} Monique Simond du groupe d'édition du Centre Saint-Laurent pour la relecture du document.

Résumé

L'objectif de la présente caractérisation était d'évaluer dans quelle mesure le potentiel toxique de l'effluent principal de l'usine PPG Canada Inc., à Beauharnois (Québec) varie lorsqu'on y ajoute divers débits de saumure faible. Quatre échantillons, représentant quatre différents débits ajoutés (2, 5, 10 et 15 m³/h) de saumure ont été considérés. Ce rapport présente et discute sommairement les résultats de la caractérisation bioanalytique. Le potentiel (géo)toxique de l'effluent a été évalué à l'aide de bactéries, d'algues, de microcrustacés et de poissons. Une portion de chaque échantillon a été aérée pendant cinq jours puis soumise aux microbioessais afin de vérifier la persistance des effets observés avant le traitement aérobie.

Les échantillons n'ont causé aucun effet délétère chez la bactérie *V. fischeri*, l'algue *S. capricornutum* et la truite *O. mykiss* mais l'un d'entre eux (représentant un débit ajouté de 2 m³/h de saumure) s'est avéré génotoxique chez la bactérie *E. coli* PQ37 en absence d'activation métabolique et tous ont causé des effets létaux et sublétaux chez le cladocère *C. dubia*.

Exprimé en indice BEEP, le potentiel écotoxique des quatre échantillons d'effluent se situe entre 2,12 et 3,41, des valeurs supérieures à la limite de détection par des facteurs variant entre 7 et 34. Les indices BEEP obtenus durant la présente caractérisation indiquent une augmentation du potentiel toxique avec l'accroissement du débit de saumure ajouté et une augmentation de la toxicité de l'effluent par rapport à ce qui a été mesuré en 1998 (en l'absence de saumure). L'augmentation de l'indice BEEP semble donc être attribuable à la présence de saumure. Par ailleurs, bien que peu probable, il est possible que la différence notée entre la présente caractérisation et celle de 1998 résulte également d'un changement survenu au niveau de la qualité intrinsèque de l'effluent depuis 1998.

Bien qu'aucun seuil BEEP n'ait encore été fixé pour indiquer un niveau de gestion, tout porte à croire qu'un indice de 3,0 ou plus traduirait une situation inquiétante à court terme. Actuellement, l'utilité de l'indice BEEP réside surtout dans sa capacité à relativiser les sources de pollution entre elles pour des besoins de gestion environnementale (Birmingham et Boudreau, 1994).

Abstract

The objective of the present characterization was to assess the extent to which the toxic potential of the main effluent of the PPG Canada Inc. plant in Beauharnois (Quebec) would vary with the addition of various weak brine solutions. The tests were conducted on. Four samples representing four different brine flows (2, 5, 10 and 15 m³/h) were considered. This report presents and briefly discusses the results of this bioanalytical characterization. The (geno)toxic potential of the effluent was assessed by means of bacteria, algae, microcrustaceans and fish. A portion of each sample was aerated for five days and then submitted to microbioassays to verify the persistence of the observed effects before aerobic treatment.

The effluent samples caused no deleterious effect in the bacterium *V. fischeri*, the alga *S. capricornutum* or the trout *O. mykiss mykiss*, although one sample (representing a brine flow of 2 m³/h) did prove to be genotoxic in the bacterium *E. coli* PQ37 in the absence of metabolic activation, and all samples caused lethal and sublethal effects in the Cladocera *C. dubia*.

In PEEP units, the ecotoxic potential of the four effluent samples ranged from 2.12 to 3.41, values which exceeded the detection limit by a factor of between 7 to 34. The PEEP indexes obtained during this characterization indicate that toxic potential increases as brine flow increases, and that the effluent's toxicity was higher relative to 1998 when no brine was present. Even though the higher PEEP index seems to be attributable to the presence of brine, it is possible that the difference noted between the present characterization and the one conducted in 1998 is the result of a change in the intrinsic quality of the effluent.

While no PEEP threshold level has been established as a management level, we are led to believe that an index of 3.0 or more would translate into a worrisome situation in the short term. At the present time, the usefulness of the PEEP index resides primarily in its capacity to place pollution sources in relation to one another for purposes of environmental management (Bermingham and Boudreau, 1994).

Table des matières

RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
GLOSSAIRE	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xii
1 INTRODUCTION	1
2 MÉTHODOLOGIE	3
2.1 ÉCHANTILLONNAGE	3
2.2 PRÉPARATION, TRAITEMENT ET SUBDIVISION DES ÉCHANTILLONS	3
2.3 PARAMÈTRES DE SOUTIEN À L'INTERPRÉTATION BIOANALYTIQUE	5
2.4 BIOESSAIS	5
2.4.1 Bioessai avec bactéries luminescentes (<i>V. fischeri</i>)	8
2.4.1.1 Méthode	8
2.4.1.2 Traitement des données	8
2.4.2 Bioessai de génotoxicité (<i>E. coli</i> PQ37)	9
2.4.2.1 Méthode	9
2.4.2.2 Traitement des données	10
2.4.3 Bioessai avec algues (<i>S. capricornutum</i>)	11
2.4.3.1 Méthode	11
2.4.3.2 Traitement des données	11
2.4.4 Bioessai avec microcrustacés (<i>C. dubia</i>)	12
2.4.4.1 Méthode	12
2.4.4.2 Traitement des données	12
2.4.5 Bioessai avec Truites arc-en-ciel (<i>O. mykiss</i>)	13
2.4.5.1 Méthode	13
2.4.5.2 Traitement des données	13
2.5 INDICE BEEP	13
2.6 ASSURANCE ET CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	15

3	RÉSULTATS ET DISCUSSION	16
3.1	PARAMÈTRES DE SOUTIEN À L'INTERPRÉTATION BIOANALYTIQUE	16
3.2	BIOESSAIS	16
3.2.1	Bioessai avec bactéries luminescentes (<i>V. fischeri</i>)	19
3.2.2	Bioessai de génotoxicité (<i>E. coli</i> PQ37)	20
3.2.3	Bioessai avec algues (<i>S. capricornutum</i>)	21
3.2.4	Bioessai avec microcrustacés (<i>C. dubia</i>)	21
3.2.5	Bioessai avec Truites arc-en-ciel (<i>O. mykiss</i>)	23
3.3	INDICE BEEP DE L'EFFLUENT DE L'USINE PPG CANADA INC.	23
3.4	CONTRÔLE DE LA QUALITÉ	25
4	CONCLUSION	27
	RÉFÉRENCES	29

Liste des figures

1	Schéma du procédé de production de l'usine PPG Canada (Beauharnois, Québec)	2
2	Préparation et division des échantillons en laboratoire	4
3	Indices BEEP calculés pour les échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc.: résultats de 1998 et de la présente caractérisation	24

Liste des tableaux

1	Caractéristiques descriptives des bioessais utilisés pour l'évaluation écotoxicologique	6
2	Principales conditions d'essai	7
3	Paramètres de soutien des échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc. : échantillons recomposés en laboratoire	16
4a	Sommaire des résultats bioanalytiques de l'effluent de l'usine PPG Canada Inc. Série A - Avril 00	17
4b	Sommaire des résultats bioanalytiques de l'effluent de l'usine PPG Canada Inc. Série B - Juin 00	18
5a	Taux d'inhibition de la luminescence chez <i>V. fischeri</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A	19
5b	Taux d'inhibition de la luminescence chez <i>V. fischeri</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B	19
6a	Induction de la β -gal (génotoxicité) chez <i>E. coli PQ37</i> et seuil d'effet ponctuel (SEP) : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A	20
6b	Induction de la β -gal (génotoxicité) chez <i>E. coli PQ37</i> et seuil d'effet ponctuel (SEP) : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B	20
7a	Taux d'inhibition de la croissance chez <i>S. capricornutum</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A	21
7b	Taux d'inhibition de la croissance chez <i>S. capricornutum</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B	21
8a	Résultats de survie et effets sur la reproduction (nombre de nouveau-nés) chez <i>C. dubia</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A	22
8b	Résultats de survie et effets sur la reproduction (nombre de nouveau-nés) chez <i>C. dubia</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B	22
9	Taux de mortalité à 96 h chez <i>O. mykiss</i> : effluent de l'usine PPG Canada Inc.	23
10	Composantes et résultats du calcul BEEP pour les échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc.	24
11	Résultats d'analyse des produits toxiques de référence et données statistiques des diagrammes de contrôle	26

Glossaire

Bioaccumulation - Accumulation nette d'une substance dans les tissus d'un organisme résultant d'une exposition aux différentes sources de contamination dans l'environnement.

Biodégradation - Processus microbiologique (dû par exemple à l'activité de bactéries) qui altère la structure chimique d'un composé. Il cause généralement la décomposition des molécules organiques en composantes plus petites. Par exemple, la biodégradation des hydrocarbures en conditions aérobies libère ultimement du carbone organique (CO₂) et de l'eau (H₂O).

Bioessai - Test permettant de déterminer l'effet d'une matière ou d'une matrice (p. ex. un échantillon d'effluent industriel) sur un groupe d'organismes choisis d'une même espèce (p. ex. *Vibrio fischeri*), dans des conditions bien définies. Un test de toxicité sert normalement à mesurer soit la proportion des organismes atteints, soit l'intensité de l'effet observé, après l'exposition à une matière ou une matrice expérimentale donnée.

Biotest - Voir bioessai.

Caractérisation bioanalytique - Ensemble de bioessais réalisés dans le but d'évaluer le potentiel écotoxique d'une matrice expérimentale (p. ex. un échantillon d'effluent industriel).

CI₅₀ - Concentration inhibitrice médiane. Il s'agit de l'estimation ponctuelle de la concentration d'effluent (% v/v) qui provoque une inhibition de 50 % d'une fonction biologique quantitative (p. ex. la croissance), par rapport à des organismes de contrôle, après une période d'exposition donnée.

CL₅₀ - Concentration létale médiane. Il s'agit de la concentration d'effluent (% v/v) qui est considérée létale chez 50 % des organismes soumis à l'essai. La CL₅₀ est dérivée ici par l'analyse statistique des mortalités survenues à différentes concentrations expérimentales, après une période d'exposition donnée (p. ex. 96 h).

CMEO - Concentration minimale avec effet observé. Il s'agit de la concentration la plus faible d'une matrice expérimentale à laquelle des organismes sont exposés et qui provoque des effets nocifs chez ces organismes. Par exemple, la CMEO est la plus faible concentration à laquelle la croissance d'algues exposées à l'échantillon d'effluent diffère significativement de celle d'organismes témoins.

Contrôle de qualité - Ensemble de techniques et moyens de mesure et d'évaluation de la qualité des données et, le cas échéant, des correctifs à appliquer lorsque les objectifs de qualité ne sont pas atteints.

CSE - Concentration seuil d'effet. Il s'agit de la moyenne géométrique de la CSEO et de la CMEO.

CSEO - Concentration sans effet observé. Il s'agit de la plus forte concentration d'un échantillon expérimental qui, chez les organismes exposés, ne provoque aucun effet nocif observé et statistiquement significatif. Par exemple, la CSEO est la plus forte concentration d'essai à laquelle la croissance d'algues exposées à l'échantillon d'effluent ne diffère pas significativement de celle d'organismes témoins.

Diagramme de contrôle - Diagramme des valeurs de toxicité moyennes préparé en vue des essais de produits toxiques de référence. Les résultats d'une série d'essais consécutifs sont tracés sur un diagramme dont l'abscisse indique la date des essais et l'ordonnée, la concentration correspondant à un effet précis. Le diagramme indique également la variabilité prévue des résultats bioanalytiques.

Échantillon recomposé - Échantillon résultant du mélange des sous-échantillons d'effluent ou d'eau d'alimentation prélevés au point d'échantillonnage de l'industrie.

Effet écotoxique - Effet toxique pour l'environnement.

Létal - Qui provoque la mort des organismes exposés. Par exemple, la mort des truites est définie comme la cessation de tous les signes visibles de mouvement ou d'activité.

Limite d'avertissement - Valeur équivalant à plus ou moins 2 écarts types d'une moyenne géométrique historique d'un bioessai avec un produit toxique de référence. Elle est calculée sur une base logarithmique.

Probit - Unité de divergence par rapport à la moyenne d'une distribution normale, exprimée en écart type. L'utilisation des probits pour estimer une CL_{50} permet de redresser la courbe sigmoïde de distribution normale des pourcentages d'effet en fonction des concentrations exprimées sous forme logarithmique.

Sublétal - Qui est nocif pour l'organisme soumis à l'essai, mais en deçà du niveau qui entraîne la mort au cours d'un essai.

Test de toxicité - Voir bioessai.

Toxicité - Capacité propre d'une substance ou d'une matrice (p. ex. un échantillon d'effluent industriel) de provoquer des effets nocifs chez l'organisme exposé.

Toxicité aiguë - Toxicité qui survient dans un bref délai (secondes, minutes, heures ou quelques jours) par rapport à la durée de vie des organismes soumis à l'essai.

Toxicité chronique - Effets à long terme liés à des changements de métabolisme, de reproduction, génétiques, etc.

Unité toxique - Unité relative de toxicité d'un échantillon expérimental. Pour un effluent, le calcul est effectué comme suit :

$$\text{Unité toxique} = \frac{100 \%}{\text{résultat de toxicité (p.ex. CI}_{50} = x \%)}$$

Liste des abréviations

A405	absorbance à 405 nm
ACLAE	Association canadienne des laboratoires d'analyse environnementale
ADN	acide désoxyribonucléique
APHA	American Public Health Association
BEEP	barème d'effets écotoxiques potentiels
β-gal	β-galactosidase
°C	degré Celsius
CI ₅₀	concentration inhibitrice 50 %
CL ₅₀	concentration létale 50 %
cm	centimètre
CME0	concentration minimale avec effet observé
CRT	chlore résiduel total
CSE	concentration-seuil d'effet
CSE0	concentration minimale sans effet observé
CV	coefficient de variation
d	jour (<i>dies</i>)
FI	facteur d'induction
FICV	facteur d'induction corrigé pour la viabilité
FR	facteur de réduction
h	heure
L	litre
LIA	limite inférieure d'avertissement
LSA	limite supérieure d'avertissement
log ₁₀	logarithme à la base 10
MEF	ministère de l'Environnement et de la Faune (Québec)
m ³ .h ⁻¹	mètre cube par heure
mg	milligramme
min	minute
mL	millilitre
μL	microlitre
μS	microSiemens
nm	nanomètre
Pal	phosphatase alcaline
PAEQ	Programme d'assainissement des eaux du Québec
PASL	Plan d'action Saint-Laurent

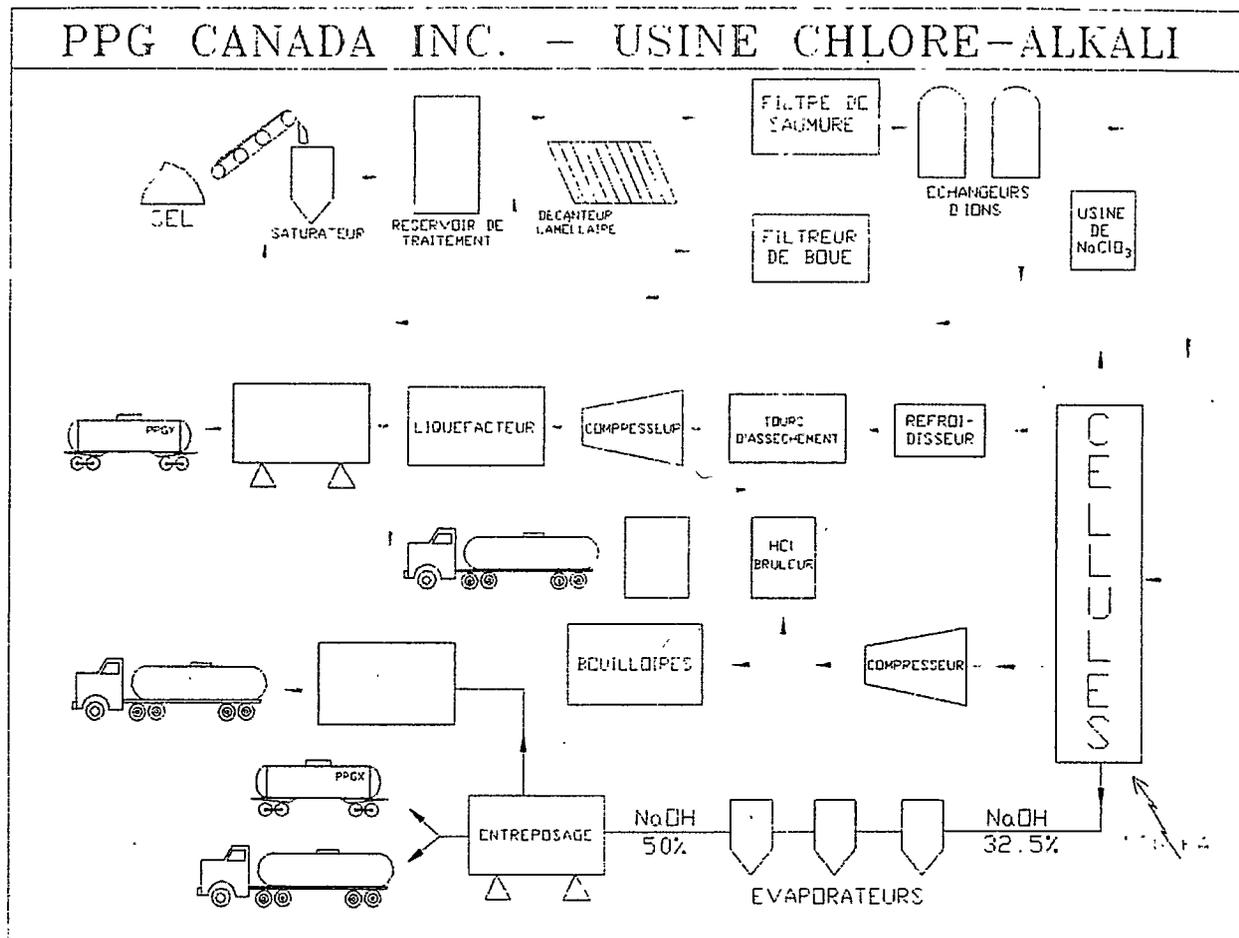
% v/v	pourcentage volume sur volume
PNPP	p-nitrophényle phosphate
<i>s</i>	écart type
S9	fraction microsomiale de foie de rat
SEP	seuil d'effet ponctuel
SET	seuil d'effet temporel
SLV 2000	Saint-Laurent Vision 2000
UFC	unités formant des colonies
UG _{SC}	unité de génotoxicité sublétales chronique
URL	unité relative de lumière
UT _L	unité de toxicité létale
UT _S	unité de toxicité sublétales
UT _{SA}	unité de toxicité sublétales aiguë
UT _{SC}	unité de toxicité sublétales chronique
UTA.uvb ⁻¹	unité toxique ajustée par unité de volume bioanalytique
UTA.h ⁻¹	unité toxique ajustée heure
\bar{x}	moyenne
Xgal	5-bromo-4-chloro-3-β-D-galactoside (X-gal)
<	plus petit que

1 Introduction

À la demande de PPG Canada Inc., une caractérisation a été entreprise afin d'évaluer le potentiel (géo)toxique de l'effluent principal de l'usine de chlore-alkalis située à Beauharnois (Québec) auquel divers débits de saumure faible ont été ajoutés (figure 1). L'usine ne rejette habituellement aucune eau de purge de saumure dans la rivière Saint-Louis, sauf lorsque l'usine de chlorate de sodium est en période de rebouillage ou que la concentration en sulfate est trop élevée dans la boucle de saumure. L'objectif de la présente étude était de déterminer la (géo)toxicité associée à divers débits (purges) de saumure faible ajoutés à l'effluent. Quatre échantillons ont été prélevés au point de collecte 4 et envoyés au laboratoire de la section Biologie de l'environnement du Centre Saint-Laurent (CSL) pour une caractérisation bioanalytique.

Six bioessais permettant d'évaluer trois niveaux de toxicité – subléthalité aiguë, subléthalité chronique et létalité aiguë – ont été utilisés. Le présent rapport a pour objet de présenter et discuter sommairement les résultats obtenus. Il n'est cependant pas question des effets sur le milieu récepteur, des facteurs environnementaux du milieu récepteur qui peuvent modifier la toxicité des contaminants (par exemple la température, le pH et la présence d'autres sources de contamination), ni des phénomènes de bioaccumulation. Finalement, les microbioessais ayant été effectués sur une portion filtrée à 0,2 µm, la toxicité associée aux matières en suspension a pu être sous-évaluée. À noter que les quantités de matières en suspension (MES) mesurées lors des analyses trimestrielles de l'effluent principal de l'usine PPG Canada inc. sont généralement très faibles. (*source PPG Canada inc.*).

Le barème d'effets écotoxiques potentiels (BEEP), qui permet d'intégrer plusieurs résultats bioanalytiques dans une optique d'évaluation de l'impact écotoxicologique potentiel d'un effluent et de comparaison relative de la toxicité des rejets industriels de différentes sources, a été calculé et comparé à la valeur obtenue lors d'une précédente caractérisation (1997-1998) effectuée dans le cadre du plan d'action fédéral-provincial Saint-Laurent Vision 2000 (SLV 2000).



Source : PPG Canada Inc.

Figure 1 Schéma du procédé de production de l'usine PPG Canada (Beauharnois, Québec)

2 Méthodologie

2.1 ÉCHANTILLONNAGE

L'étude de caractérisation a porté sur l'effluent prélevé à la station d'échantillonnage n° 4 de l'effluent final. Quatre échantillons, chacun représentant un débit spécifique de saumure ajouté au débit habituel de l'effluent final, ont été analysés :

- | <i>Série A - Avril 00</i> | <i>Série B - Juin 00</i> |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| • purge 2 : 2 m ³ /h | • purge 10 : 10 m ³ /h |
| • purge 5 : 5 m ³ /h | • purge 15 : 15 m ³ /h |

Les travaux de terrain ont été réalisés par le personnel de la firme Enviroservices inc. (Terrebonne, Québec), selon les directives du *Guide général de caractérisation SLV 2000* (Environnement Canada, 1995a). L'échantillonnage de type instantané a eu lieu le jeudi 6 avril 2000 pour la première série d'analyses (Série A), et le jeudi 15 juin 2000 pour la deuxième série (Série B). Au total, quatre prélèvements de 60 L d'effluent ont été recueillis pour chacun des échantillons et livrés le jour même au laboratoire du CSL.

2.2 PRÉPARATION, TRAITEMENT ET SUBDIVISION DES ÉCHANTILLONS

Tous les échantillons ont été mélangés (ou recomposés) dès leur réception au laboratoire. La figure 2 illustre la préparation et la division des échantillons d'effluent. Une caractérisation physico-chimique sommaire des échantillons a été réalisée aussitôt les mélanges préparés (voir 2.3).

Une portion de 10 L de chacun des mélanges a été soumise à une aération de cinq jours (voir 2.2.1). Des portions aliquotes de 1 L des échantillons non aérés et aérés ont été filtrées et conservées à 4 °C pour la réalisation des microbioessais. Le pH a été mesuré avant et après la filtration. Un volume de 8 L a été prélevé de chacun des mélanges, transvidé dans un seau de plastique blanc opaque de 10 L et conservé à 4 °C jusqu'à sa livraison au laboratoire contractuel pour la réalisation du bioessai avec microcrustacés.

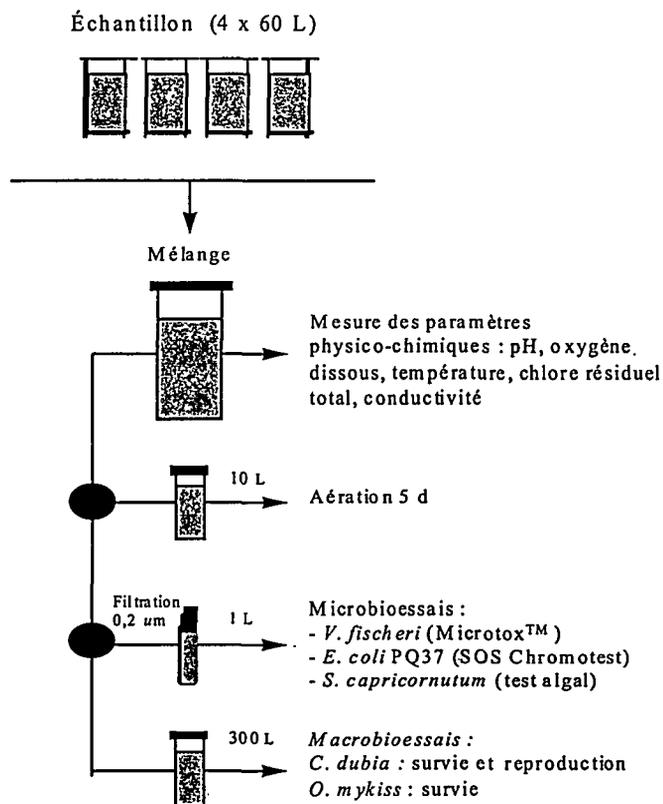


Figure 2 Préparation et division des échantillons en laboratoire

Les mélanges d'effluent ont été aérés puis soumis aux mêmes microbioessais que les portions non aérées afin d'évaluer la persistance et(ou) les modifications de la toxicité potentielle. Ces transformations peuvent résulter de l'activité microbienne naturellement présente dans l'échantillon et(ou) de phénomènes physico-chimiques liés à l'aération même : volatilisation, oxydation et(ou) modification du pH. La méthode consiste à aérer [$\approx 5 \text{ mL}/(\text{min.L}^{-1})$] l'échantillon à la température de la pièce ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) pendant cinq jours. Des seaux de plastique blanc opaque ont été utilisés comme récipients d'essai. Aucune semence microbienne ni sels nutritifs n'ont été ajoutés.

2.3 PARAMÈTRES DE SOUTIEN À L'INTERPRÉTATION BIOANALYTIQUE

Plusieurs facteurs abiotiques peuvent influencer les résultats des tests de toxicité effectués avec des organismes aquatiques. Par exemple, les changements de pH peuvent affecter la solubilité, la polarité, la volatilisation et la spéciation des composés chimiques et par le fait même modifier leur biodisponibilité et leur toxicité. Par ailleurs, la température et l'oxygène dissous sont mesurés de façon routinière dans la plupart des tests de toxicité puisque des changements importants de ces paramètres peuvent modifier les résultats des bioessais (Rand, 1995).

Pour les raisons évoquées précédemment, une caractérisation physico-chimique sommaire a été réalisée sur les portions aérée et non aérée de l'échantillon composé dès que les mélanges ont été préparés en laboratoire. À cette fin, la température, le pH, l'oxygène dissous, la conductivité et le chlore résiduel total (CRT) ont été mesurés selon des méthodes normalisées (APHA, AWWA et WEF, 1992) et des protocoles élaborés au CSL.

2.4 BIOESSAIS

La liste des bioessais réalisés au cours de cette étude est présentée au tableau 1. Comme l'indique ce dernier, les espèces utilisées occupent des échelons trophiques variés : décomposeurs, producteurs primaires, ainsi que consommateurs primaires et secondaires. Quatre groupes taxinomiques y sont représentés : bactéries, algues, crustacés et poissons. Le type d'effet mesuré, plus particulièrement le niveau d'organisation biologique qu'il représente, varie également. Au niveau de l'organisme, les paramètres incluent l'inhibition de croissance, l'inhibition de reproduction et la mortalité, alors qu'au niveau cellulaire, l'inhibition de la luminescence et l'induction d'un système de réparation de l'ADN (SOS) sont mesurées. Par ailleurs, différents niveaux de toxicité (sublétalité et létalité aiguës et chroniques) sont évalués. Le spectre relativement large d'organismes, de types d'effet et de niveaux de toxicité considérés par la présente batterie d'essais permet d'évaluer adéquatement le potentiel écotoxique des rejets d'eaux usées industrielles dans l'environnement aquatique.

Tableau 1
Caractéristiques descriptives des bioessais utilisés pour l'évaluation écotoxicologique

Organismes	Espèces	Échelons trophiques	Niveaux de toxicité	Variabiles d'effet	Paramètres de mesure*	Unités de mesure*
Bactéries	<i>Vibrio fischeri</i> ** (Microtox™)	Décomposeur	Subléthalité aiguë	Inhibition de la luminescence	CI ₅₀ , CME0, CSEO	UT _{SA}
Bactéries	<i>Escherichia coli</i> PQ37 (SOS Chromotest)	Décomposeur	Subléthalité chronique	Génotoxicité	CME0, CSEO	UG _{SC}
Algues	<i>Selenastrum capricornutum</i>	Producteur primaire	Subléthalité chronique	Inhibition de la division cellulaire	CI ₅₀ , CME0, CSEO	UT _{SC}
Cladocères (crustacés)	<i>Ceriodaphnia dubia</i>	Consommateur primaire	Létalité et subléthalité chronique	Mortalité et inhibition de la reproduction	CL ₅₀ , CME0, CSEO	UT _L , UT _{SC}
Poissons	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	Consommateur secondaire	Létalité aiguë	Mortalité	CL ₅₀	UT _L

* Voir la liste des abréviations pour leur signification.

** Espèce autrefois connue sous le nom de *Photobacterium phosphoreum*.

Quoique les protocoles expérimentaux de chaque bioessai diffèrent, il n'en demeure pas moins qu'une démarche commune s'applique à tous. Il s'agit d'exposer, en conditions contrôlées, des organismes vivants à une série de dilutions de l'échantillon, puis à observer et à quantifier les effets toxiques. Les principales conditions d'essai sont présentées au tableau 2.

Les bioessais des tableaux 1 et 2 se répartissent en deux groupes : les microbioessais et les macrobioessais. Le premier groupe comprend les essais réalisés avec les bactéries *Vibrio fischeri* (Microtox™) et *Escherichia coli* PQ37 (SOS Chromotest) et avec la microalgue *Selenastrum capricornutum*. Ces bioessais sont réalisés sur la portion filtrée des échantillons. Le second groupe exploite des organismes de plus grande taille, à savoir le microcrustacé *Ceriodaphnia dubia* ainsi que le poisson d'eau douce *Oncorhynchus mykiss* et les essais sont effectués sur la portion originale des échantillons.

Les microbioessais et le test avec Truites arc-en-ciel (*O. mykiss*) ont été effectués par le personnel du CSL. Les essais avec *C. dubia* ont été réalisés par le Laboratoire de l'Environnement LCQ (Sainte-Foy, Québec).

Tableau 2
Principales conditions d'essai

Conditions d'essai	<i>V. fischeri</i>	<i>E. coli PQ37</i>	<i>S. capricornutum</i>	<i>C. dubia</i>	<i>O. mykiss</i>
Méthodes	Statique	Statique	Statique	Renouvellement quotidien	Statique
Provenance des organismes	Azur Environment* Carlsbad, Californie	Institut Pasteur Paris, France	UTEX**	Paprican***	Aquipro Saint-Apollinaire, Québec
Durée	15 min	2 h	72 h	7 d	96 h
Température (°C)	15 ± 0,3	37 ± 1	24 ± 2	25 ± 1	15 ± 1
Types de récipient	Cuvettes de verre 12 × 50 mm	Microplaques 96 puits	Microplaques 96 puits	Gobelets de 30 mL	Seaux de 60 L
Volume par récipient d'essai	1 mL	200 µL	200 µL	15 mL	60 L
Photopériode lumière/obscurité (h)	s.o.	s.o.	24/0	16/8	16/8
Nombre de concentrations testées	6	4	10	6	5
Nombre de répétitions par concentration	4	4	3	10	1
Nombre d'organismes par récipient d'essai	1 × 10 ⁶	3 × 10 ⁶	10 000	1	10

* Anciennement Microbics Corp.

** Université du Texas (souche 1648).

*** Institut de recherche sur les pâtes et papiers (Pointe-Claire, Québec).

s.o. = sans objet.

Les microbioessais ont été effectués sur une portion non aérée et sur une portion aérée de l'échantillon composé (voir 2.2.1) et ont servi au calcul de l'indice BEEP (voir 2.5). Le calcul de l'indice BEEP nécessite la détermination de la concentration-seuil d'effet (CSE). Cette valeur représente la moyenne géométrique de la concentration minimale avec effet observé (CMEO) et de la concentration sans effet observé (CSEO). La CMEO est déterminée par différentes méthodes statistiques, alors que la CSEO correspond à la concentration testée immédiatement

sous la CMEO. Cette approche expérimentale exige un minimum de trois à quatre répétitions par concentration testée. Les données bioanalytiques sont exprimées en unités toxiques. Celles-ci se calculent en divisant le nombre 100 par le paramètre de mesure exprimé en % v/v. Par exemple, si la CMEO est de 5 % v/v, le résultat sera de 20 UT_{SA}. Le calcul des unités toxiques est le même, peu importe le niveau de toxicité (sublétaux ou létaux).

2.4.1 Bioessai avec bactéries luminescentes (*V. fischeri*)

2.4.1.1 Méthode

L'essai avec la bactérie marine *Vibrio fischeri* (souche NRRL B-11177) est commercialisé sous le nom Microtox™ par la compagnie Azur Environment (Carlsbad, Californie). Ce biotest repose sur la capacité de *V. fischeri* à émettre de la lumière, un processus métabolique qui implique une série d'enzymes, dont la luciférase (Woodland Hastings *et al.*, 1985).

L'essai Microtox™ offre une excellente concordance avec de nombreux autres bioessais (Kaiser et Palabrica, 1991). Les effets toxiques mesurés à l'aide de la bactérie *V. fischeri* sont de type sublétaux aigus puisque :

- a) l'inhibition de luminescence n'indique pas nécessairement la mort cellulaire;
- b) la période de contact entre les bactéries exposées et l'échantillon n'est que de 15 minutes;
- c) l'essai est réalisé sur une population plutôt que sur plusieurs générations.

Certaines modifications ont été apportées au protocole du test Microtox™ d'Environnement Canada (1992a) quant au nombre de concentrations et de répétitions testées ainsi qu'à l'emplacement des cuvettes dans l'incubateur du photomètre. Ces modifications sont décrites dans la procédure d'opération normalisée LB-MIL-931007-3 (Environnement Canada, 1995b).

2.4.1.2 Traitement des données

L'intensité lumineuse des groupes traités et du groupe témoin est mesurée avec un photomètre (Microtox™ Toxicity Analyzer, modèle M500). Ces mesures sont exprimées en unités relatives de lumière (URL). La quantité de lumière émise par les bactéries dans chacune des concentrations testées est comparée à celle mesurée dans le témoin. Les pourcentages d'inhibition et les valeurs gamma (γ , rapport lumière perdue/lumière restante) sont ensuite calculés afin de déterminer les paramètres de mesure. Il s'agit de la CMEO, qui est déterminée par le test de Mann-

Whitney, et de la CI_{50} (concentration qui inhibe 50 % de l'activité lumineuse), calculée par régression linéaire simple selon l'équation :

$$Y = a + bX$$

où Y : $\log_{10}(\gamma)$; X : \log_{10} (% v/v); a : ordonnée à l'origine; et b : pente (Zar, 1984).

Tous les calculs sont effectués à l'aide d'une feuille de travail élaborée avec un chiffrier électronique. Les paramètres de mesure sont rapportés en unités sublétales aiguës (UT_{SA}). Pour que la CMEO soit significative, le pourcentage de réduction de luminescence associé à cette concentration doit être égal ou supérieur au seuil de détection de la méthode. Ce seuil, déterminé expérimentalement, a été fixé à 10 % d'inhibition et correspond en fait à la valeur arrondie de deux seuils définis expérimentalement, à savoir celui de 11 % calculé à partir de 98 données historiques recueillies au laboratoire de la section Biologie de l'environnement du CSL (Environnement Canada, 1993a) et celui de 12 % rapporté par le Bureau de normalisation du Québec (1987) à partir de 236 données historiques.

2.4.2 Bioessai de génotoxicité (*E. coli* PQ37)

2.4.2.1 Méthode

Le SOS Chromotest est un essai colorimétrique à court terme utilisé pour détecter les substances qui provoquent des lésions primaires à l'ADN chez *Escherichia coli* PQ37 (Quillardet *et al.*, 1982). Chez cette bactérie, le gène *lacZ* qui code pour la β -galactosidase (β -gal) et le gène *sulA* ont été fusionnés par manipulation génétique (Quillardet et Hofnung, 1985). Le gène *sulA* appartient au système SOS, un mécanisme de réparation de l'ADN sujet à erreurs (Walker, 1987; Devoret, 1992). Lorsque l'ADN bactérien est agressé par un produit chimique génotoxique, le gène *sulA* est activé, entraînant ainsi la synthèse de l'enzyme β -gal. La région *lacZ* normale ayant été retirée du génome de la souche *E. coli* PQ37, la production de β -gal résulte donc directement d'agressions à l'ADN. Les concentrations relatives de β -gal sont mesurées après l'ajout d'un substrat, soit le 5-bromo-4-chloro-3- β -D-galactoside (X-gal). Une augmentation appréciable de la coloration bleue indique une activité génotoxique.

Les essais SOS Chromotest sont réalisés avec et sans un milieu d'activation mammalien. Ce milieu comprend la fraction microsomiale (S9) de foie de rat traité à l'Aroclore 1254 et des cofacteurs. La fraction S9 renferme notamment le cytochrome P-450 qui joue normalement un rôle

catabolique de détoxification dans le foie, mais qui à l'occasion peut aussi activer le potentiel mutagène ou cancérigène des substances chimiques (De Robertis et De Robertis, 1983). L'utilisation de S9 permet donc la détection de substances dites progénotoxiques, c'est-à-dire de molécules qui une fois métabolisées ont le potentiel d'endommager le matériel génétique.

Pour vérifier l'intégrité des fonctions SOS chez *E. coli* PQ37, des génotoxiques de référence sont testés à chaque essai. Il s'agit de la nitro-4 quinoléine-*n*-oxyde (en anglais, 4-nitroquinoline-*n*-oxide ou 4NQO) pour les tests sans S9 et de l'amino-2 anthracène (en anglais, 2-aminoanthracene ou 2AA) pour les tests avec S9. Toutes les manipulations ont été réalisées selon un protocole mis au point au laboratoire de la section Biologie de l'environnement du CSL (Environnement Canada, 1993b).

2.4.2.2 *Traitement des données*

Les concentrations relatives de β -gal sont lues avec un spectrophotomètre à microplaque (Multiskan™, modèle MCC340) à 620 nm (A620). Les moyennes \bar{x} , écarts types (s) et coefficients de variation (CV) des valeurs d'absorbance des groupes traités et témoins sont d'abord calculés. Les facteurs d'induction (FI) de la β -gal sont ensuite déterminés selon la formule suivante:

$$FI = \bar{x} \text{ A620 échantillon} / \bar{x} \text{ A620 témoin}$$

Chez les groupes témoins, la limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % des lectures A620 est établie afin de fixer le seuil d'effets ponctuels (SEP) de la β -gal comme suit :

$$\text{SEP de la } \beta\text{-gal} = (\bar{x} \text{ A620} + 2 s) / \bar{x} \text{ A620}$$

La valeur SEP représente la variabilité observée la journée même de l'essai. Afin de tenir compte de la variabilité historique, un seuil d'effets temporels (SET) a été défini en calculant la moyenne historique des valeurs SEP de la β -gal. Ainsi, le SET de la β -gal a été fixé à 1,20. La plus grande des valeurs entre le SEP et le SET est choisie pour établir la CME0. Les SEP et les SET constituent donc les limites de détection de la génotoxicité. L'interprétation des résultats de génotoxicité est effectuée à partir des valeurs FI. Ainsi, lorsqu'aucune des concentrations analysées ne répond au critère stipulé précédemment, en d'autres termes, lorsque tous les FI sont inférieurs (<) au seuil retenu (SEP ou SET), la CME0 est inférieure à la plus forte concentration testée (< 2 UG_{SC}). Le paramètre de mesure est exprimé en unités génotoxiques (UG_{SC}) sublétales chroniques.

2.4.3 Bioessai avec algues (*S. capricornutum*)

2.4.3.1 Méthode

Le bioessai avec algues a été réalisé en microplaque de 96 puits selon la méthode mise au point par Environnement Canada (1992b). Soumise à une étude d'intercalibration (Thellen *et al.*, 1989), cette méthode est maintenant reconnue et adoptée dans de nombreux laboratoires.

L'espèce utilisée, *Selenastrum capricornutum*, appartient à l'ordre des Chlorophycées. C'est une algue verte non mobile et unicellulaire qui abonde dans les eaux douces presque partout en Amérique du Nord. Comme producteurs primaires, les algues jouent un rôle vital dans la chaîne alimentaire. Elles servent de nourriture à de nombreux organismes (par exemple les daphnies), et leurs sécrétions et leur activité photosynthétique participent de façon importante à l'apport d'éléments nutritifs et d'oxygène au milieu aquatique (Bold et Wynne, 1978). Par contre, lorsqu'elles sont trop abondantes, les algues peuvent entraîner l'eutrophisation des plans d'eau. *S. capricornutum* est particulièrement sensible aux métaux. Par exemple, les concentrations inhibitrices 50 p. 100 de la croissance (CI_{50}) pour le cadmium, le cuivre, le nickel et le zinc sont inférieures à $100 \mu\text{g.L}^{-1}$ (Blaise *et al.*, 1986; St-Laurent *et al.*, 1992).

2.4.3.2 Traitement des données

Le nombre de cellules est déterminé par comptage électronique (Coulter™, modèle ZM). Les pourcentages d'inhibition de la croissance sont d'abord déterminés, puis la CI_{50} et la CMEO sont calculées. La CI_{50} est estimée par régression linéaire simple, tandis que la CMEO est déterminée par le test de Mann-Whitney (Zar, 1984). Le pourcentage d'inhibition associé à la CMEO doit cependant être égal ou supérieur à 20 (limite de détection pour ce test) qui représente en fait la valeur arrondie du seuil de 22 % calculé à partir de 586 données historiques (Environnement Canada, 1993c). Les résultats sont exprimés en unités de toxicité sublétales chroniques (UT_{SC}).

2.4.4 Bioessai avec microcrustacés (*C. dubia*)

2.4.4.1 Méthode

Le microcrustacé *Ceriodaphnia dubia* appartient à l'ordre des Cladocères et à la famille des Daphniidés. Il représente un maillon important de la chaîne alimentaire puisqu'il convertit les algues et les bactéries en protéines animales. Il se retrouve en abondance dans les plans d'eau douce d'Amérique du Nord où il constitue une source essentielle de nourriture pour les poissons.

Ce bioessai indique à la fois la sévérité des effets létaux (survie) et sublétaux chroniques (reproduction). En raison de sa sensibilité, cette espèce est couramment utilisée pour caractériser la toxicité des effluents industriels (U.S. EPA, 1989; Ankley *et al.*, 1990; Mazidji *et al.*, 1990). L'approche expérimentale d'Environnement Canada (1992c) a été appliquée pour ce bioessai.

2.4.4.2 Traitement des données

Les jeunes crustacés (nouveau-nés) ainsi que les organismes morts sont comptés quotidiennement. Les effets sur la survie sont quantifiés par la CL_{50} et la CMEO, et ceux sur la reproduction, par la CMEO uniquement. Les méthodes statistiques appliquées pour déterminer ces paramètres de mesure varient selon les résultats observés. La CL_{50} peut être déterminée par trois techniques : probit, moyenne mobile et binomiale. Le choix de la méthode statistique pour évaluer la CL_{50} , qui est rapportée en unités de toxicité létale (UT_L), dépend des données obtenues, par exemple :

- a) la méthode probit est utilisée lorsque plusieurs concentrations produisent des taux de mortalité inférieurs à 100 %;
- b) la méthode de la moyenne mobile est appliquée lorsqu'une seule concentration produit un taux de mortalité inférieur à 100 %;
- c) la méthode binomiale n'est appliquée que lorsque deux concentrations successives produisent des taux de mortalité de 0 % et de 100 %.

Une analyse de comparaison intergroupes (par exemple Dunnett, Bonferroni, Tukey, Williams) est utilisée lorsque les données suivent une distribution normale et que les variances sont homogènes. Lorsque ces deux dernières conditions ne sont pas respectées, une analyse non paramétrique (par exemple Wilcoxon, Steel Many-One Rank) est appliquée. Zar (1984) explique en détail l'application de ces méthodes statistiques. La version 3.11 (1985) du programme de C.E. Stephan (1977) sert au calcul de la CL_{50} , tandis que le logiciel TOXSTAT® (Gulley *et al.*, 1991) est utilisé pour la détermination de la CMEO. Les résultats sont rapportés en unités de toxicité létale (UT_L) pour la survie et en unités de toxicité sublétale chronique (UT_{sc}) pour la reproduction.

2.4.5 Bioessai avec Truites arc-en-ciel (*O. mykiss*)

2.4.5.1 Méthode

La Truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) est une espèce qui appartient à la famille des Salmonidés, et son aire de distribution couvre tout le pays. La Truite arc-en-ciel est devenue dans le monde entier l'espèce de choix pour les tests de toxicité en eau douce et il existe une quantité importante de données toxicologiques à son sujet (Environnement Canada, 1990a). Elle sert d'espèce

étalon pour l'application des lois et des règlements (Gouvernement du Québec, 1992; Gouvernement du Canada, 1992).

Les essais avec Truites servent normalement à mesurer les effets létaux aigus. À noter que depuis quelques années, on utilise les Salmonidés dans des recherches qui portent sur la mise en évidence d'effets sublétaux indicateurs de stress (Gagné et Blaise, 1993), mais ces bioessais ne font pas l'objet du présent rapport. Tous les bioessais avec Truite arc-en-ciel ont été réalisés selon les méthodes normalisées d'Environnement Canada (1990a; 1990b).

2.4.5.2 Traitement des données

Les mortalités sont notées quotidiennement, et le nombre de poissons morts par concentration testée est comptabilisé à la fin de l'essai. Le calcul de la CL_{50} s'effectue tel que décrit à la section 2.4.4.2. Une version du programme de C.E. Stephan, obtenue du laboratoire d'Environnement Canada de la région de l'Atlantique, est utilisée pour le traitement des données.

2.5 INDICE BEEP

Le concept de l'indice BEEP (Barème d'effets écotoxiques potentiels) ainsi que son application sont décrits en détail dans la publication de Costan *et al.* (1993), tandis que Bermingham et Boudreau (1994) ont joint des recommandations sur l'orientation et la mise au point de cet indice.

En bref, l'indice BEEP permet l'intégration de plusieurs résultats de toxicité¹ issus des bioessais et permet d'évaluer, de façon relative, le potentiel écotoxicologique d'un effluent, qu'il soit d'origine industrielle, municipale ou autre. Les unités BEEP sont déterminées à partir d'une formule qui intègre trois variables : *a*) la somme des effets (généto)toxiques; *b*) la multispécificité des effets; et *c*) le débit du ou des effluents étudiés. Le calcul des unités se fait à partir des concentrations-seuils d'effets (CSE). Cependant, lorsqu'une CSE plus petite que la concentration maximale testée, exprimée en unité toxique, est rapportée (par exemple < 2), on lui attribue alors la valeur zéro (0). Le calcul de l'indice BEEP s'effectue selon la formule suivante :

¹ Pour des raisons de comparabilité, seuls les résultats des tests réalisés avec *V. fischeri*, *E. coli* PQ37 (génotoxicité uniquement), *S. capricornutum* et *C. dubia* sont utilisés dans le calcul de l'indice.

$$\text{BEEP} = \log_{10} \left\{ 1 + n \left(\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \right) Q \right\}$$

où:

\log_{10} : logarithme à la base 10;

1 : nombre ajouté de manière à ne pas avoir de valeur négative;

n : nombre de bioessais ayant démontré un effet toxique ou génotoxique;

N : nombre total de bioessais utilisés pour calculer l'indice;

ΣT_i : somme des CSE des portions non aérées et aérées;

Q : débit en mètres cubes à l'heure ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

L'indice BEEP se compose en fait de deux mesures. Il s'agit de la toximesure et de la toxicharge dont les formules apparaissent ci-après. La première représente l'importance relative de l'étendue de l'intensité toxique et exprime, en Unité Toxique Ajustée par unité de volume bioanalytique ($\text{UTA} \cdot \text{uvb}^{-1}$), la concentration des substances potentiellement biodisponibles. La deuxième, qui est le produit de la toximesure par le débit et qui s'exprime en $\text{UTA} \cdot \text{h}^{-1}$, permet d'évaluer la contribution relative d'un effluent à la toxicité de l'ensemble des industries (Bermingham et Boudreau, 1994).

$$\text{Toximesure} = n \left(\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \right)$$

$$\text{Toxicharge} = n \left(\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \right) Q$$

2.6 ASSURANCE ET CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Le souci de générer des résultats de qualité est partagé par tout le personnel de la section ÉCE. De plus, les laboratoires contractuels auxquels des analyses sont confiées doivent faire la preuve qu'ils appliquent un programme d'assurance et de contrôle de la qualité et qu'ils sont accrédités par un organisme officiel (par exemple le Ministère de l'environnement du Québec ou

l'Association canadienne des laboratoires d'analyse environnementale). La qualité des résultats des bioessais est assurée, entre autres, par l'application de modes opératoires normalisés, la participation à des études interlaboratoires, l'utilisation de produits toxiques de référence et la mise à jour de diagrammes de contrôle (Environnement Canada, 1990c).

3 Résultats et discussion

3.1 PARAMÈTRES DE SOUTIEN À L'INTERPRÉTATION BIOANALYTIQUE

Le tableau 3 présente les résultats des analyses physico-chimiques réalisées sur les échantillons non aérés de l'effluent final. La teneur en chlore résiduel total (CRT) des échantillons était sous la limite de détection de l'appareil. La conductivité relativement élevée de la purge 15 suggère la présence de substances ioniques. La conductivité des échantillons analysés ici est supérieure à celle rapportée en 1998 (0,8 mS) pour un échantillon d'effluent (sans ajout de saumure) prélevé à la même station; il en est de même pour le pH (6,5 en 1998).

Le pH de la purge 2 a sensiblement augmenté après aération. Il est toutefois peu probable que cette hausse ait eu aucun impact sur le potentiel toxique de cet échantillon puisque la valeur se situe toujours dans l'intervalle de 6,0 à 8,5 recommandé pour les tests de toxicité.

Tableau 3
**Paramètres de soutien des échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc. :
échantillons recomposés en laboratoire**

Paramètre	<i>Série A - Avril 2000</i>		<i>Série B - Juin 2000</i>	
	Purge 2	Purge 5	Purge 10	Purge 15
Température (°C)	12,7	13,6	19,5	19,9
pH - avant aération*	7,4 (7,4)	8,4 (8,4)	7,7 (7,7)	7,1 (7,3)
pH - après aération*	8,3 (8,1)	8,3 (8,2)	8,1 (8,1)	8,1 (8,1)
Oxygène dissous (%)	99	101	100	104
Conductivité (mS/cm)	4,5	6,3	5,6	8,5
Chlore résiduel total (mg/L)**	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02

* Entre parenthèses, pH après filtration à 0,2 µm.

** Déterminé par la méthode DPD (Hach™).

3.2 BIOESSAIS

Un sommaire des résultats des bioessais réalisés sur les échantillons de l'usine PPG Canada Inc. est présenté aux tableaux 4a et 4b. Les résultats spécifiques à chacun des bioessais sont ensuite présentés et brièvement discutés dans les sections qui suivent.

Tableau 4a
Sommaire des résultats bioanalytiques de l'effluent de l'usine PPG Canada Inc.
Série A - Avril 2000

Bioessai	Unité de mesure	Paramètre de mesure	Purge 2		Purge 5	
			Non aéré	Aéré	Non aéré	Aéré
<i>V. fischeri</i>	UT _{SA}	CI ₅₀	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CME0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSE0	2,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>E. coli</i> PQ37 (- S9) Génotoxicité	UG _{SC}	CME0	2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSE0	4,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	2,8	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>E. coli</i> PQ37 (+ S9) Génotoxicité	UG _{SC}	CME0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSE0	2,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>S. capricornutum</i>	UT _{SC}	CI ₅₀	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
		CME0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
		CSE0	1,0	1,0	1,0	1,0
		CSE	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
<i>C. dubia</i> Survie	UT _L	CL ₅₀	1,3	n.t.	1,5	n.t.
		CME0	1,0	n.t.	1,0	n.t.
		CSE0	2,0	n.t.	2,0	n.t.
		CSE	1,4	n.t.	1,2	n.t.
<i>C. dubia</i> Reproduction	UT _{SC}	CI ₅₀	1,9	n.t.	2,1	n.t.
		CME0	2,0	n.t.	4,0	n.t.
		CSE0	4,0	n.t.	8,0	n.t.
		CSE	2,8	n.t.	5,6	n.t.
<i>O. mykiss</i>	UT _L	CL ₅₀	< 1,0	n.t.	< 1,0	n.t.

* Résultats non intégrés dans le calcul de l'indice BEEP.

n.t. = non testé.

Tableau 4b
Sommaire des résultats bioanalytiques de l'effluent de l'usine PPG Canada Inc.
Série B - Juin 2000

Bioessai	Unité de mesure	Paramètre de mesure	Purge 10		Purge 15	
			Non aéré	Aéré	Non aéré	Aéré
<i>V. fischeri</i>	UT _{SA}	CI ₅₀	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CME0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSEO	2,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>E. coli</i> PQ37 (- S9) Génotoxicité	UG _{SC}	CME0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSEO	2,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>E. coli</i> PQ37 (+ S9) Génotoxicité	UG _{SC}	CME0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
		CSEO	2,0	2,0	2,0	2,0
		CSE	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
<i>S. capricornutum</i>	UT _{SC}	CI ₅₀	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
		CME0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
		CSEO	1,0	1,0	1,0	1,0
		CSE	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
<i>C. dubia</i> Survie	UT _L	CL ₅₀	3,1	n.t.	5,0	n.t.
		CME0	2,0	n.t.	4,0	n.t.
		CSEO	4,0	n.t.	8,0	n.t.
		CSE	2,8	n.t.	5,7	n.t.
<i>C. dubia</i> Reproduction	UT _{SC}	CI ₅₀	4,0	n.t.	7,4	n.t.
		CME0	4,0	n.t.	8,0	n.t.
		CSEO	8,0	n.t.	16,0	n.t.
		CSE	5,7	n.t.	11,3	n.t.
<i>O. mykiss</i>	UT _L	CL ₅₀	< 1,0	n.t.	< 1,0	n.t.

* Voir note au tableau 4a.

n.t. = non testé.

3.2.1 Bioessai avec bactéries luminescentes (*V. fischeri*)

Conformément aux résultats d'analyses rapportés en 1998, les échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc. ne se sont pas avérés toxiques pour *V. fischeri* (tableaux 5a et 5b). *A fortiori*, des effets légèrement stimulateurs ont été observés chez cet organisme bactérien. Ce phénomène est souvent noté lorsque la toxicité des échantillons testés est en deçà de la limite de détection du bioessai. À noter que ce bioessai a été effectué sur la portion filtrée des échantillons; il est possible que la toxicité associée aux particules en suspension ait été sous-estimée.

Tableau 5a
Taux d'inhibition de la luminescence chez *V. fischeri* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A

Concentrations (% v/v)	Taux d'inhibition (%)*			
	Purge 2		Purge 5	
	non aéré	aéré	non aéré	aéré
50,0	- 8,9	- 9,3	- 8,4	- 8,2
25,0	- 6,7	- 6,0	- 6,0	- 5,8
12,5	- 3,3	- 4,1	- 3,3	- 6,5

* Les valeurs négatives indiquent une stimulation plutôt qu'une inhibition.

Tableau 5b
Taux d'inhibition de la luminescence chez *V. fischeri* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B

Concentrations (% v/v)	Taux d'inhibition (%)*			
	Purge 10		Purge 15	
	non aéré	aéré	non aéré	aéré
50,0	- 5,1	- 5,1	- 8,6	- 7,7
25,0	- 2,1	- 5,4	- 4,4	- 5,3
12,5	- 3,2	- 3,7	- 2,0	- 3,0

* Voir note au tableau 5a.

3.2.2 Bioessai de génotoxicité (*E. coli* PQ37)

Mis à part la portion non aérée de la Purge 2 qui s'est avérée génotoxique en l'absence d'activation métabolique, les échantillons d'effluent n'ont causé aucun dommage à l'ADN bactérien (tableaux 6a et 6b). Lors de l'évaluation effectuée en 1998, un échantillon prélevé au même point de collecte n'avait causé aucun dommage à l'ADN de la bactérie *E. coli* PQ37.

Tableau 6a
Induction de la β -gal (génotoxicité) chez *E. coli* PQ37 et seuil d'effet ponctuel (SEP) :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A

Concentrations (% v/v)	Facteur d'induction (FI)							
	Purge 2				Purge 5			
	non aéré**		aéré		non aéré		aéré	
	- S9	+ S9	- S9	+ S9	- S9	+ S9	- S9	+ S9
50,0	1,29	1,15	1,18	1,09	1,15	0,86	1,01	1,01
25,0	1,15	1,15	0,95	1,08	0,95	0,84	0,88	1,02
12,5	1,08	1,03	0,89	1,07	0,92	0,84	0,98	1,01
6,3	1,06	1,03	0,89	1,03	0,86	0,86	1,05	1,04
<i>Seuil d'effet ponctuel (SEP)*</i>	<i>1,26</i>	<i>1,21</i>	<i>1,09</i>	<i>1,05</i>	<i>1,19</i>	<i>1,30</i>	<i>1,02</i>	<i>1,16</i>

* Le seuil d'effet temporel (SET) pour la génotoxicité avec et sans S9 est de 1,20. La valeur la plus élevée entre le SEP et le SET est sélectionnée pour déterminer la CMEO (voir 2.4.2.2).

** En raisons de valeurs légèrement trop élevées pour les génotoxiques de référence, les analyses ont été reprises; les résultats étaient néanmoins identiques. Les données présentées ici sont celles générées lors de la reprise.

Tableau 6b
Induction de la β -gal (génotoxicité) chez *E. coli* PQ37 et seuil d'effet ponctuel (SEP) :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B

Concentrations (% v/v)	Facteur d'induction (FI)							
	Purge 10				Purge 15			
	non aéré		aéré		non aéré		aéré	
	- S9**	+ S9	- S9	+ S9	- S9**	+ S9	- S9	+ S9
50,0	0,99	0,73	1,01	0,83	1,17	0,77	0,97	0,84
25,0	0,99	0,77	1,08	0,89	1,19	0,84	0,92	0,88
12,5	1,08	0,79	1,06	1,01	1,17	0,98	0,96	0,95
6,3	0,83	0,86	1,04	1,00	1,06	0,79	0,92	0,92
<i>Seuil d'effet ponctuel (SEP)*</i>	<i>1,10</i>	<i>1,06</i>	<i>1,20</i>	<i>1,08</i>	<i>1,16</i>	<i>1,33</i>	<i>1,16</i>	<i>1,06</i>

* Voir notre du tableau 6a.

** En raisons de difficultés analytiques, les analyses ont été reprises; les résultats de ces reprises sont présentés ici. À noter que le délai de 72h recommandé pour réaliser le test a été dépassé pour cet échantillon.

3.2.3 Bioessai avec algues (*S. capricornutum*)

Aucun échantillon ne s'est avéré toxique pour l'algue *S. capricornutum* (tableaux 7a et 7b). Ces résultats sont conformes à ceux rapportés en 1998 pour un échantillon d'effluent prélevé au point de collecte 4.

Tableau 7a
Taux d'inhibition de la croissance chez *S. capricornutum* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A

Concentrations (% v/v)**	Taux d'inhibition (%)			
	Purge 2		Purge 5	
	non aéré	aéré	non aéré	aéré
100,0	3,2	4,0	2,9	2,9
50,0	4,6	5,6	5,5	4,8
25,0	7,7	8,3	7,5	7,2

* Il s'agit des concentrations initiales; l'ajout de l'inoculum enrichi représente un facteur de dilution d'environ 10 %.

Tableau 7b
Taux d'inhibition de la croissance chez *S. capricornutum* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B

Concentrations (% v/v)**	Taux d'inhibition (%)*			
	Purge 10		Purge 15	
	non aéré	aéré	non aéré	aéré
100,0	2,74	3,28	2,60	4,28
50,0	4,78	7,73	3,48	9,66
25,0	6,87	10,15	6,06	9,87

* Voir note du tableau 7a.

3.2.4 Bioessai avec microcrustacés (*C. dubia*)

La survie et la reproduction de *C. dubia* ont été significativement affectées par les échantillons d'effluent (tableaux 8a et 8b). En effet, respectivement 70 et 100 % des organismes exposés aux échantillons de la Série A (Purges 2 et 5) sont morts après 7 jours d'exposition. Par ailleurs, le nombre moyen de néonates produites par femelle a diminué de façon significative par rapport aux témoins à partir de la dilution de 50 % v/v (CMEO = 2 UT_{SC}) pour l'échantillon représentatif de la Purge 2 et à partir de 25% v/v (CMEO = 4 UT_{SC}) pour l'échantillon

représentatif de la Purge 5 (tableau 5). À la dilution de 100 % v/v, le nombre de néonates produites était de, ou près de, zéro. Les échantillons de la Série B se sont également avérés toxiques pour ce cladocère. La totalité ou la presque totalité des organismes exposés aux concentrations de 50 et 100 % v/v sont morts après 7 jours et le nombre de néonates produites était significativement inférieur à celui rapporté pour les témoins à partir des dilutions de 25 et 12,5 % v/v, respectivement pour les purges 10 et 15.

L'augmentation des CL_{50} et des CI_{50} (tableaux 4a et 4b) avec l'accroissement du débit de saumure ajouté indique que ce cladocère est sensible à la présence de saumure dans cet effluent. De plus, l'ensemble des résultats présentés ici révèlent une augmentation du potentiel toxique de l'effluent de cette usine par rapport à la caractérisation de 1998, où aucun effet délétère n'avait été observé chez cet organisme. Il aurait été intéressant d'analyser, dans le cadre de la présente caractérisation, un échantillon d'effluent dépourvu de saumure afin de déterminer si la toxicité observée est également attribuable à la qualité intrinsèque de l'effluent.

Tableau 8a
Résultats de survie et effets sur la reproduction (nombre de nouveau-nés) chez *C. dubia* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série A

Concentration (% v/v)	Purge 2		Purge 5	
	Taux de mortalité (%)	Nombre moyen de nouveau-nés	Taux de mortalité (%)	Nombre moyen de nouveau-nés
100	70	0,5	100	0,0
50	10	11,4	10	14,6
25	10	19,9	10	17,7
12,5	10	18,8	10	26,5
6,25	0	21,4	10	25,9
Témoins	10	19,7	0	28,0

Tableau 8b
Résultats de survie et effets sur la reproduction (nombre de nouveau-nés) chez *C. dubia* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc. - Série B

Concentration (% v/v)	Purge 10		Purge 15	
	Taux de mortalité (%)	Nombre moyen de nouveau-nés	Taux de mortalité (%)	Nombre moyen de nouveau-nés
100	100	0,0	100	0,0
50	90	0,0	100	0,0
25	20	10,9	70	4,7
12,5	10	20,8	10	15,2
6,25	0	18,4	0	29,5
Témoins	0	23,1	0	27,8

3.2.5 Bioessai avec Truites arc-en-ciel (*O. mykiss*)

L'effluent de l'usine PPG Canada Inc. n'a pas causé de toxicité aiguë chez la Truite arc-en-ciel (tableau 9). En effet, aucune mortalité n'est survenue après 96 h d'exposition. De plus, aucun poisson moribond ou ayant un comportement anormal n'a été observé. De façon similaire, aucune toxicité n'avait été rapportée avec l'échantillon d'effluent analysé en 1998. Ces résultats indiquent que des ajouts faibles de saumure (à des débits pouvant varier entre 2 et 15 m³/h) à l'effluent final de l'usine PPG Canada inc. ne causent aucune létalité aiguë chez *O. mykiss*.

Tableau 9
Taux de mortalité à 96 h chez *O. mykiss* :
effluent de l'usine PPG Canada Inc.

Concentrations (% v/v)	Nombre d'organismes morts (pourcentage de mortalité)			
	Série A		Série B	
	Purge 2	Purge 5	Purge 10	Purge 15
100,0	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)
50,0	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)
25,0	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)	0/10 (0)
Témoins	0/10 (0)	0/10 (0)	0/9 (0)	0/10 (0)

3.3 INDICE BEEP DE L'EFFLUENT DE L'USINE PPG CANADA INC.

Durant les deux périodes d'échantillonnage (séries A et B) pour les bioessais, le débit au point de collecte était de 10 200 m³.d⁻¹ et de 18 053 m³.d⁻¹, respectivement (comm. pers.,

Enviroservices inc.). Les composantes et les résultats du calcul BEEP sont présentés au tableau 10. Les indices BEEP varient entre 2,78 et 3,41, ce qui est de 7 à 34 fois supérieur à la limite de détection de chacun des échantillons¹ (figure 3). Les résultats indiquent que l'indice BEEP de l'effluent s'accroît avec l'ajout d'un débit de saumure. La seule exception à cette tendance générale est la légère diminution de l'indice lorsque le débit passe de 2 à 5 m³/h; la valeur plus élevée de la Purge 2 s'explique par la réponse génotoxique notée chez *E. coli*. À noter qu'aucune toxicité n'avait été mesurée en 1998, d'où une valeur BEEP inférieure au seuil de détection pour cet échantillon.

Tableau 10
Composantes et résultats du calcul BEEP pour
les échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc.

Analyse	Échantillon d'effluent	Variables BEEP		
		Toximesure (UTA.uvb ⁻¹)	Toxicharge (UTA.h ⁻¹)	Indice BEEP (log ₁₀)
2000				
Série A - Avril	Purge 2	2,12	902	2,96
	Purge 5	1,41	601	2,78
Série B - Juin	Purge 10	1,70	1277	3,11
	Purge 15	3,39	2553	3,41
1998		< 0,10	< 104	< 2,00

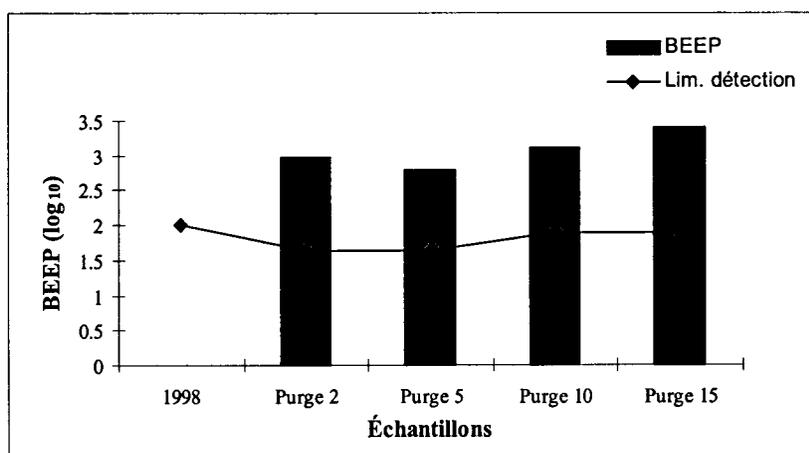


Figure 3 Indices BEEP calculés pour les échantillons d'effluent de l'usine PPG Canada Inc.: résultats de 1998 et de la présente caractérisation

¹ À noter qu'une augmentation de l'indice BEEP d'une unité indique un accroissement du potentiel toxique par un facteur de 10, l'indice BEEP étant calculé sur une échelle logarithmique.

3.4 CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Les résultats des essais effectués avec des produits toxiques de référence sont présentés au tableau 12. Ce tableau indique :

- a) le produit utilisé;
- b) la date d'analyse du produit, c'est-à-dire celle qui se rapproche le plus des essais effectués sur les échantillons;
- c) le résultat obtenu à cette date d'analyse;
- d) les données statistiques du diagramme de contrôle, qui comprennent la moyenne, la limite inférieure (LIA) et la limite supérieure (LSA) d'avertissement.

La LIA correspond à la moyenne dont on a soustrait deux écarts types, alors que la LSA représente la moyenne à laquelle on a ajouté deux écarts types (Environnement Canada, 1990c). À noter que pour le SOS Chromotest, la LIA et la LSA correspondent à des limites empiriques plutôt qu'à des limites statistiques.

Les résultats des essais effectués avec les produits toxiques de référence montrent que la sensibilité des organismes et la reproductibilité des essais se situent à l'intérieur des limites historiques.

Tableau 11
Résultats d'analyse des produits toxiques de référence et données statistiques des diagrammes de contrôle

Bioessais	Variables mesurées	Paramètres	Produits toxiques de référence	Dates d'analyse	Résultats	Données de contrôle							
						Moyennes	LIA	LSA					
<i>V. fischeri</i>	Inhibition de la luminescence	CI ₅₀ mg.L ⁻¹ Zn ⁺⁺	Zn ⁺⁺	27-03-00	1,06	1,40	0,53	2,19					
				16-06-00	1,12								
<i>E. coli</i> PQ37	Génotoxicité	SOSIP*	4NQO (-S9)	07-04-00	181,3	158,0	75,9	240,4					
				12-04-00	193,0								
				12-04-00	133,8								
				20-04-00	196,8								
				20-06-00	195,7								
				22-06-00	175,1								
				22-06-00	131,0								
				22-06-00	133,1								
				SOSIP	2AA (+S9)				07-04-00	9,3	10,2	2,3	18,1
									12-04-00	9,7			
									12-04-00	12,4			
									20-04-00	12,6			
									16-06-00	15,2			
									16-06-00	12,0			
22-06-00	14,0												
22-06-00	15,8												
<i>S. capricornutum</i>	Inhibition de la croissance	CI ₅₀ mg.L ⁻¹	NaCl	07-04-00	2204	2065	1619	2510					
				16-06-00	2023								
<i>C. dubia</i> **	Inhibition de la reproduction	CI ₂₅ mg.L ⁻¹	KCrO ₂	24-03-00	0,27	0,22	0,11	0,34					
<i>O. mykiss</i>	Survie	CL ₅₀ mg.L ⁻¹	Zn ⁺⁺	24-03-00	0,51	0,53	0,23	1,10					
				07-06-00	1,00								

* Pente de la concentration-réponse, où les facteurs d'induction corrigés pour la viabilité cellulaire (FICV) représentent la variable dépendante (Y), et où la variable indépendante (X) est exprimée en nanomoles.

** LIA et LSA du diagramme de contrôle du Laboratoire de l'Environnement LCQ.

4 Conclusion

Quatre échantillons d'effluent prélevé au point de collecte 4 de l'usine PPG Canada Inc. à Beauharnois (Québec) ont été soumis à une batterie bioanalytique afin d'évaluer leur potentiel toxique chez cinq espèces aquatiques appartenant à quatre niveaux trophiques différents (bactérie, algue, cladocère et poisson). L'objectif de la présente caractérisation était d'évaluer dans quelle mesure le potentiel toxique de l'effluent change lorsqu'on y ajoute divers débits de saumure faible. Quatre débits ajoutés de saumure ont été considérés : 2, 5, 10 et 15 m³/h.

Les échantillons n'ont causé aucun effet délétère chez la bactérie *V. fischeri*, l'algue *S. capricornutum* et la truite *O. mykiss*. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus lors d'une caractérisation antérieure (1998) d'un échantillon d'effluent prélevé au même point de collecte. Il faut toutefois noter que les microbioessais réalisés dans le cadre de cette étude ont été effectués sur un échantillon filtré, et que la toxicité associée aux substances adsorbées aux matières en suspension peut avoir été sous-estimée. (White *et al.*, 1995a; 1995b).

L'échantillon représentant un débit ajouté de 2 m³/h de saumure faible a toutefois causé des dommages génétiques chez *E. coli* PQ37 en l'absence d'activation métabolique; ce résultat, confirmé lors d'une reprise de l'analyse, suggère la présence de substances génotoxiques à action directe dans l'effluent de cette usine. Bien qu'incontestable, cette réponse est néanmoins surprenante compte tenu qu'aucune génotoxicité n'a été notée avec les trois autres échantillons, conformément à ce qui a été rapporté pour la caractérisation de 1998.

Des effets chroniques ont également été notés chez le cladocère *C. dubia*. En effet, 70 à 100 % des organismes exposés à la plus forte concentration testée des quatre échantillons d'effluent étaient morts au terme de l'essai et le nombre de néonates produites était significativement inférieur à celui rapporté pour les échantillons témoins. Tel qu'indiqué par les CL₅₀ (valeurs de 1,3, 1,5, 3,4 et 5,1, respectivement pour les purges 2, 5, 10 et 15) et les CI₅₀ (valeurs de 1,9, 2,1, 4,0 et 7,4, respectivement pour les purges 2, 5, 10 et 15), une augmentation du débit de saumure ajouté à l'effluent engendre une toxicité plus importante; cela suggère que *C. dubia* est sensible à la présence de saumure dans l'effluent de cet usine.

Exprimé en indice BEEP, le potentiel écotoxique de l'effluent de l'usine PPG Canada Inc. auquel on a ajouté un débit de saumure faible se situe entre 2,12 et 3,41, valeur entre 7 et 34 fois

supérieure à la limite de détection. Les indices BEEP obtenus durant la présente caractérisation indiquent qu'en général, plus le débit de saumure ajouté à l'effluent augmente, plus le potentiel toxique de l'effluent s'accroît. Ces indices sont supérieurs à la valeur ($< 2,0$) générée lors de la caractérisation de 1998. Bien que peu probable, il est possible également que l'augmentation de l'indice BEEP entre les deux caractérisations bioanalytiques soit attribuable à un changement de la qualité intrinsèque de cet effluent depuis 1998; pour vérifier cette hypothèse, il faudrait soumettre un échantillon d'effluent dépourvu de saumure à la batterie bioanalytique utilisée ici.

Des quatre échantillons analysés, deux (purges 10 et 15) ont révélé des indices BEEP supérieurs à 3,0. Bien qu'aucun seuil BEEP n'ait encore été fixé pour indiquer un niveau de gestion, tout porte à croire qu'un indice de 3,0 ou plus traduirait une situation inquiétante à court terme. Actuellement, l'utilité de l'indice BEEP réside surtout dans sa capacité à relativiser les sources de pollution entre elles pour des besoins de gestion environnementale (Bermingham et Boudreau, 1994).

Références

- Ankley, G.T., G.S. Peterson, J.R. Amato et J.J. Jenson (1990). «Evaluation of sucrose as an alternative to sodium chloride in the Microtox assay: Comparison to fish and cladocerans tests with freshwater effluents», *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9 : 1305-1310.
- APHA, AWWA et WEF (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 18th ed., American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, Washington, D.C. 10 sections & figures.
- Bermingham, N. et D. Boudreau (1994). *Synthèse de l'application du barème d'effets écotoxiques potentiels (BEEP) et recommandations d'orientation pour son développement*, Environnement Canada, Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport technique et scientifique, 30 pages.
- Blaise, C., R. Legault, N. Bermingham, R. Van Coillie et P. Vasseur (1986). «A simple microplate algal assay technique for aquatic toxicity assessment», *Toxicity Assessment*, 1 : 261-281.
- Bold, H.C. et M.J. Wynne (1978). *Introduction to the Algae: Structure and Reproduction*, Prentice-Hall Inc., Englewood NJ. ISBN 0-13-477786-7, chapitre 1.
- Bureau de normalisation du Québec (1987). *Norme - eaux - détermination de la toxicité, méthode avec la bactérie bioluminescente Photobacterium phosphoreum*, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Industrie et du Commerce, Québec. NQ 3600-205. 24 pages.
- Costan, G., N. Bermingham, C. Blaise et J.-F. Férard (1993). «Potential ecotoxic effects probe: A novel index to assess and compare the toxic potential of industrial effluents», *Environmental Toxicology and Water Quality*, 8 (2) : 115-140.
- De Robertis, E.P.D. et E.M.F. De Robertis fils (1983). *Biologie cellulaire et moléculaire*, S.A. Maloine, Paris, et Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 236-257.
- Devoret, R. (1992). «Les fonctions SOS ou comment les bactéries survivent aux lésions de leur ADN», *Annales de l'Institut Pasteur – Actualités*, 1 : 11-20, Elsevier, Paris.
- Environnement Canada, région du Québec (1995a). *Guide général de caractérisation SLV 2000*, Saint-Laurent Vision 2000 (édition d'avril 1995).
- Environnement Canada (1995b). *Préparation et exécution des essais de toxicité sur la bactérie luminescente Vibrio fischeri - phase liquide*, Conservation et Protection, Région du Québec Centre Saint-Laurent. LB-MIL-931007-3. 21 pages (édition octobre 1997).
- Environnement Canada, région du Québec (1993a). *Procédures de contrôle de qualité : test de toxicité avec la bactérie bioluminescente Photobacterium phosphoreum*, Version 1. 22 pages.

- Environnement Canada (1993b). *Test de génotoxicité avec la bactérie Escherichia coli PQ37 (SOS Chromotest) : protocole pour échantillons aqueux*, Version 1.2, Conservation et Protection, Région du Québec, Centre Saint-Laurent. 20 pages.
- Environnement Canada (1993c). *Procédures de contrôle de qualité : test d'inhibition de croissance en microplaque avec l'algue verte Selenastrum capricornutum*, Version 1, Conservation et Protection, Région du Québec, Centre Saint-Laurent. 37 pages.
- Environnement Canada (1992a). *Méthode d'essai biologique : essai de toxicité sur la bactérie luminescente Photobacterium phosphoreum*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/24. 67 pages.
- Environnement Canada (1992b). *Méthode d'essai biologique: essai d'inhibition de la croissance de l'algue d'eau douce Selenastrum capricornutum*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/25. 43 pages.
- Environnement Canada (1992c). *Méthode d'essai biologique : essai de reproduction et de survie sur le cladocère Ceriodaphnia dubia*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/21. 78 pages.
- Environnement Canada (1990a). *Méthode d'essai biologique : méthode de référence pour la détermination de la létalité aiguë d'effluents chez la Truite arc-en-ciel*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/13. 22 pages.
- Environnement Canada (1990b). *Méthode d'essai biologique : essai de létalité aiguë sur la Truite arc-en-ciel*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/9. 53 pages.
- Environnement Canada (1990c). *Document d'orientation sur le contrôle de la précision des essais de toxicité au moyen de produits toxiques de référence*, Conservation et Protection, Région du Québec, Rapport SPE 1/RM/12. 91 pages.
- Gagné, F. et C. Blaise (1993). «Hepatic metallothionein level and mixed function oxidase activity in fingerling Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after acute exposure to pulp and paper mill effluents», *Water Research*, 27 (11) : 1669-1682.
- Gouvernement du Québec (1992). *Règlements sur les fabriques de pâtes et papiers*, Q-2, r.12 et Q-2, r.12.1. ISBN2-551-15446.
- Gouvernement du Canada (1992). «Suivi des effets sur l'environnement aquatique par les fabriques de pâtes et papiers et les installations extérieures de traitement visées par le *Règlement sur les effluents des fabriques de pâtes et papiers de la Loi sur les pêches*», Annexe 1. 21 pages.
- Gulley, D.D., A.M. Boelter et H.L. Bergman (1991). *TOXSTAT Release 3.3*, Laramie Wy, University of Wyoming, 20 pages.
- Kaiser, L.E. et V.S. Palabrica (1991). «*Photobacterium phosphoreum* toxicity data index», *Water Pollution Research Journal of Canada*, 26 (3) : 361-431.

- Mazidji, C.N., B. Koopman, G. Bitton et G. Voiland (1990). «Use of the Microtox and *Ceriodaphnia* bioassays in wastewaters fractionation», *Toxicity Assessment*, 5 : 265-277.
- Quillardet, P., O. Huisman, R. Dari et M. Hofnung (1982). «SOS Chromotest, a direct assay of induction of SOS function in *Escherichia coli* K-12 to measure genotoxicity». *National Academy of Science*, 79 : 5971-5975.
- Quillardet, P. et M. Hofnung (1985). «The SOS Chromotest, a bacterial assay for genotoxins: Procedures», *Mutation Research*, 147 : 65-78.
- Rand, G.M. (1995). *Fundamentals of aquatic toxicology : effects, environmental fate, and risk assessment*, 2^e éd., Taylor & Francis, Washington, D.C. 1125 pages.
- Stephan, C.E. (1977). «Methods for calculating an LC50», dans F.L. Mayer et J.L. Hamelink (éd.), *Aquatic Toxicology and Hazard Evaluation*. American Society for Testing and Materials, PA, pp. 65-84.
- St-Laurent, D., C. Blaise, P. MacQuarrie, R. Scroggins et B. Trottier (1992). «Comparative assessment of herbicides phytotoxicity to *Selenastrum capricornutum* using microplate and flask bioassay procedures», *Environmental Toxicology and Water Quality*, 7 : 35-48.
- Thellen, C., C. Blaise, Y. Roy et C. Hickey (1989). «Round robin with the *Selenastrum capricornutum* microplate assay», *Hydrobiologia*, 188/189 : 259-268.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1989). *Short-term Methods for Estimating the Chronic Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater Organisms*, 2nd ed., U.S. EPA/600/4-89/001, 248 pages.
- Walker, G.C. (1987). «The SOS response of *Escherichia coli*», dans F.C. Neidhart, J.L. Ingraham, B. Magasanik, K.B. Low, M. Schaechter et H.E. Umbarger (éd.), *Escherichia coli and Salmonella typhimurium, Cellular and Molecular Biology*. American Society for Microbiology, Washington DC, volume 2, pp. 1346-1357.
- White, P., J. Rasmussen et C. Blaise (1995a). «Comparing the presence, potency and potential hazard of genotoxins extracted from a broad range of industrial effluents», *Environ. Molec. Mutagen.*, 27 : 116-139.
- White, P., J. Rasmussen, et C. Blaise (1995b). «Sorptions of organic genotoxins to particulate matter in industrial effluents», *Environ. Molec. Mutagen.*, 27: 140-151.
- Woodland Hastings, J., C.J. Potrikus, S.C. Gupta, M. Kurfüst et J.C. Makemson (1985). «Biochemistry and physiology of bioluminescent bacteria», *Advances in Microbial Physiology*, 26 : 235-291.
- Zar, J.H. (1984). *Biostatistical Analysis*, 2nd ed. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs NJ, ISBN 0-13-077925-3. 718 pages.

