

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'AMENAGEMENT LITTORAL

**ETUDE DE LA QUALITE DU MILIEU MARIN
LITTORAL EN MARTINIQUE
(BAIE DE FORT DE FRANCE)**



Etude cofinancée IFREMER et Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
(contrat 90/1223012/F)

Mars 1994





Centre de Brest

B.P. 70 - 29280 PLOUZANE
Tél. 98.22.40.40 - Télex 940 627
Télécopie 98.22.45.45

DEL.MIC/94.38/MP.DG

Plouzané, le 30 mars 1994

Monsieur REYNAL
IFREMER Délégation des Antilles
97231 LE ROBERT
MARTINIQUE

Cher collègue,

Je vous prie de bien vouloir trouver ci-joint, cinq exemplaires du rapport d'étude sur "*la qualité du milieu marin littoral en Martinique*" (baie de Fort de France)

Je transmets également un exemplaire à M. Bateau (DDASS) et à M. Nicoli (DDA), dont les conseils nous ont été précieux tout au long de cette étude. Je vous laisse le soin de le diffuser, si vous le jugez utile aux autres organismes qui pourraient être intéressés, Région, Diren...

Nous vous remercions ainsi que tous vos collègues de Pointe Fort pour l'aide apportée lors de nos travaux et nous espérons que cette collaboration se poursuivra dans les années à venir.

En vous souhaitant bonne réception, je vous prie d'agréer, Cher collègue, en l'assurance de mes salutations distinguées.

A handwritten signature in black ink, appearing to be "M. POMMEPUY".

M. POMMEPUY
Responsable du Laboratoire Microbiologie

Copies :

A. Merckelbagh DEL/D
C. Alzieu DEL/DA
M. Kempf DEL/AA

50919

R730-1FR-E

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION..... | 3 |
| I - ETUDE DE LA QUALITE DES RIVIERES DE LA BAIE DE FORT DE FRANCE | 5 |
| 1.1. <i>Localisation des points de prélèvements</i> | 5 |
| 1.2. <i>Méthodes analytiques</i> | 5 |
| 1.3. <i>Résultats : variations annuelles</i> | 6 |
| 1.4. <i>Résultats : campagne de mars 1993</i> | 8 |
| 1.5. <i>Conclusion</i> | 10 |
| II - MESURE DES TEMPS DE SURVIE | 13 |
| 2.1. <i>Prélèvements d'eaux de la baie</i> | 13 |
| 2.2. <i>Mesure des temps de survie (T90)</i> | 15 |
| 2.2.1. <i>Méthodes utilisées</i> | 16 |
| 2.2.2. <i>Sites étudiés</i> | 16 |
| 2.2.3. <i>Résultats</i> | 16 |
| 2.2.4. <i>Conclusions</i> | 23 |
| III - ETUDE DE LA DYNAMIQUE COTIERE..... | 25 |
| 3.1. <i>Processus Physiques</i> | 25 |
| 3.2. <i>Les mesures</i> | 26 |
| 3.3. <i>Le modèle global</i> | 27 |
| 3.4. <i>Le Modèle de détail</i> | 29 |
| 3.5. <i>Application</i> | 31 |
| IV - CONCLUSION..... | 33 |
| ANNEXE I - LES RIVIERES..... | 35 |
| ANNEXE II - MESURES DES TEMPS DE SURVIE..... | 49 |
| ANNEXE III - Microbial water quality on a caribbean island (martinique)..... | 64 |
| M. Pommepuy, A. Derrien, F. Le Guyader, D. Menard, M.P. Caprais, E. Dubois, E. Dupray and M. Gourmelon..... | |
| Small Island Oceanography Coastal and Estuaries studies (accepté pour publication) | |
| ANNEXE IV - Subtidal circulation in Fort de France Bay..... | 81 |
| Lazure P., Salomon J.C., Breton M. | |
| Small Island Oceanography Coastal and Estuaries studies (accepté pour publication) | |

Ont participé à cette étude :

M. Breton
M.P. Caprais
A. Derrien
P. Douillet
E. Dubois
E. Dupray
M. Gourmelon
D. Guillerm
M. Kempf
P. Lazure
S. Le Guyader
R. Le Menn
D. Menard
M. Pommepuy
J.C. Salomon

Ce travail a été réalisé avec l'aide :

- du centre IFREMER du Robert,
- de la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale de la Martinique, M. Bateau,
- du laboratoire départemental d'hygiène de la Martinique,
- de M. Wouimba (patron pêcheur),
- du centre nautique du Lamentin,
- de la mairie des anses d'Arlets.

Des réunions de travail ont eu lieu avec l'ORSTOM, la Direction Départementale de l'Agriculture, la Diren, l'Université des Antilles et de la Guyane.

INTRODUCTION

- Les départements et territoires d'outre mer sont généralement l'objet d'enjeux économiques importants, et de conflits d'activités liés au développement touristique, aquacole, agricole et industriel. Les études font généralement état d'une lente dégradation de l'environnement marin avec diminution des coraux et de la faune associée, au profit d'une augmentation de la couverture algale. On constate parfois un engorgement ou un ensablement des sites, la présence dans l'eau de polluants organiques, dont des pesticides, des métaux ainsi que des microorganismes d'origine fécale. En Martinique, ce dernier aspect, lié à l'assainissement des zones rurales, urbaines et touristiques est actuellement considéré comme une préoccupation majeure pour les prochaines années.

L'étude réalisée sur le site de la baie de Fort de France en Martinique, en 1990-1993, avait pour objectif de définir l'impact des activités sur la qualité bactériologique des eaux de la baie.

Ce travail comporte plusieurs aspects :

- l'estimation des concentrations en bactéries d'origine fécale des principaux rejets ou rivières situées autour de la baie,
- l'étude de la circulation des masses d'eaux dans la baie pour l'établissement d'un modèle hydrodynamique,
- l'estimation des temps de mortalité des bactéries d'origine fécale dans les eaux martiniquaises en fonction des conditions locales (ensoleillement, température de l'eau, teneur en matière en suspension...).

Pour mener à bien ce travail, des campagnes de mesures et de prélèvements ont été réalisées sur différents sites :

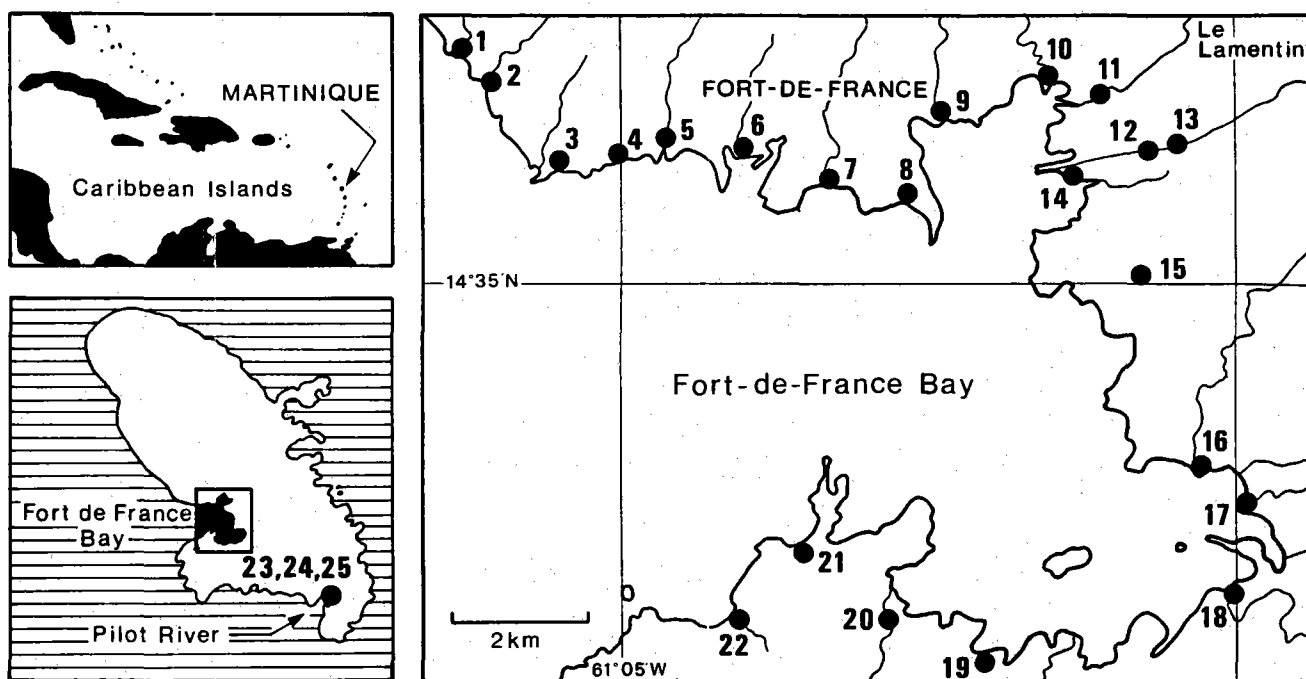


Figure 1 : localisation de la zone d'étude.

- Prélèvements d'eaux de rivières (fig. 1) : 22 rejets ou rivières ont été retenus pour cette étude en concertation avec la Direction Départementale de l'Agriculture, l'ORSTOM et la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale. Les prélèvements ont été réalisés pendant la période d'étude (fin 1991-printemps 1993). L'effort d'échantillonnage le plus important a eu lieu de juin à décembre 1992 où les 22 points ont été échantillonnés chaque mois.

- Des mesures courantologiques ont été réalisées principalement dans la baie de Fort de France et sur la côte ouest de l'île, afin de caler le modèle.

- L'étude des temps de survie des entérobactéries a été réalisée sur trois sites (fig. 2) : la baie du Lamentin (milieu eutrophe), les Anses d'Arlet et la baie du Robert (milieu oligotrophe).

- Une campagne de prélèvements d'eaux de la baie a été réalisée pour étudier la contamination bactériologique de l'eau côtière et caler le modèle.

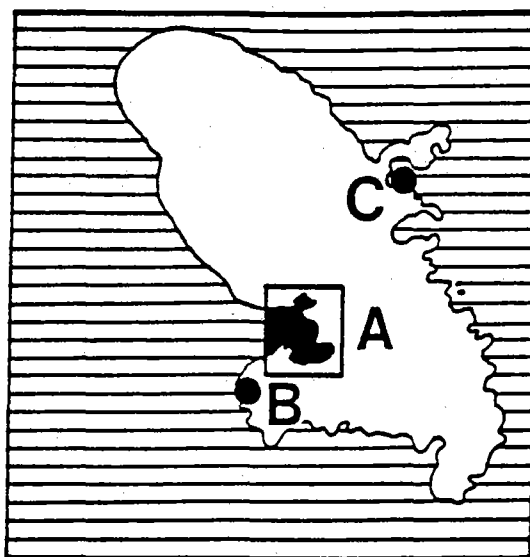


Figure 2 : Localisation des sites de mesure de la survie en mer des coliformes fécaux. A : baie de Fort de France (cohé du Lamentin), B : Anses d'Arlet, C : la baie du Robert.

I - ETUDE DE LA QUALITE DES RIVIERES DE LA BAIE DE FORT DE FRANCE

1.1. Localisation des points de prélèvements

Les eaux issues des principaux apports situés autour de la baie de Fort de France ont été choisis en accord avec la DDASS (M. BLATEAU) et la DDAF (M. NICOLI) ; nous nous sommes intéressés aux rivières principales et aux rejets issus des stations d'épuration (fig. 1) :

- 1) Schoelcher (Embouchure rivière case navire au droit du centre nautique)
- 2) Pont sur la Ravine
- 3) Pointe Simon
- 4) Pointe des Nègres
- 5) Pont de l'Hermitage (rivière Madame)
- 6) Ravine Bouille (au niveau de France-Antille)
- 7) Rivière Monsieur (Pont St. Christophe - entrée de Dillon)
- 8) Station d'épuration de Dillon
- 9) Station d'épuration de Chateauboeuf
- 10) Station d'épuration Acajou
- 11) Pont d'entrée du Lamentin
- 12) Lézarde (intérieur de la zone industrielle)
- 13) Rejet de la station d'épuration du Lamentin
- 14) Canal Carrere (qui draine les eaux de l'Aéroport)
- 15) Canal Ducos et rivière Pierre
- 16) Canal sortie Station Ducos
- 17) Rivière aval petit Bourg (les Coulisses)
- 18) Station d'épuration (rejet dans la rivière les coulisses)
- 19) Aval station les 3 Ilets (citron)
- 20) Rivière Pajerie (Parc des Floralies)
- 21) Station d'épuration anse Mitan actuel
- 22) Rejet dans le Marigot d'Anse à l'Anse actuel

L'échantillonnage a eu lieu pendant toute la période d'étude avec un effort particulier entre juin et décembre 1992 ; une campagne particulière a eu lieu en mars 1993.

1.2. Méthodes analytiques

Coliformes fécaux ou thermotolérants : ils ont été recherchés et dénombrés par une technique de microplaque (Diagnostic Pasteur - milieu additionné de 4-méthylumbellifery- β -D-glucuronidase) incubée 18 h 00 à 44,5 °C (Hernandez *et al.*, 1991).

Streptocoques fécaux (streptocoques du groupe D) : méthode par microplaque (Diagnostic Pasteur) incubé 48 h 00 à 37 °C.

Matières en suspension : filtration (filtre GF/F Whatman), pesé avant et après filtration.

Coliformes fécaux par mesure de l'activité enzymatique : β -D-galactosidase (MuGal). Cette méthode décrite dans Pommepuy *et al.* (annexe 3) utilise un substrat (MuGal - Sigma Chemical Co) qui, dégradé par l'enzyme, fluoresce. La fluorescence est mesurée à l'aide d'un spectrofluorimètre Perkin Elmer 3000 (excitation 365 nm, émission 440 nm). Une corrélation entre le taux de production enzymatique exprimée en $\mu\text{MI}^{-1} \text{min}^{-1}$ et le nombre de coliformes fécaux est ensuite recherchée.

Analyses virales

Enterovirus, rotavirus et virus de l'hépatite A sont recherchés en utilisant des techniques de biologie moléculaire : Polymerase Chain Reaction (PCR). La procédure d'analyse est détaillée dans Pommepuy *et al.* (voir annexe 3). Elle consiste en premier lieu à extraire l'ARN viral. Après une rétrotranscription de l'ARN en ADN, l'amplification génique est faite, les primers utilisés sont issus de la littérature, les produits obtenus sont analysés en électrophorèse (gel à 9 % de polyacrylamide et teinture au bromure d'éthidium).

1.3. Résultats : variations annuelles

Les résultats sont reportés sur les tableaux en annexe (1) et les figures jointes (même annexe) illustrent les concentrations trouvées pendant la période de novembre 1991 à mai 1993 (points 5, 6, 7, 8 et 9) et de juin 1992 à mai 1993 pour les autres points. La figure 3 illustre quelques résultats obtenus.

On peut classer la qualité des eaux de rivières de la baie en trois catégories sur le critère des coliformes fécaux (CF) :

Rivières peu contaminées : $< 10^3$ CF/100 ml : quatre rejets ou rivières appartiennent à cette catégorie : le rejet de la Pointe des Nègres (Pt. 4), la rivière Carrère (Pt. 14), la rivière Les Coulisses (Pt. 17) et la rivière Pagerie (Pt. 20).

Rivières moyennement contaminées entre $1,5 \cdot 10^3$ CF/100 ml et $5 \cdot 10^4$ CF/100 ml ; 7 rivières ou rejets :

- Point 1 : Schoelcher ($1,5 \cdot 10^3$ CF/100 ml) *
- Point 2 : Pont de la Ravine ($9,3 \cdot 10^3$ CF/100 ml)
- Point 5 : Pont de l'Hermitage (Rivière Madame : $3,9 \cdot 10^4$ CF/100 ml)
- Point 10 : Rejet station d'épuration Acajou ($1,5 \cdot 10^3$ CF/100 ml)
- Point 11 : Pont d'entrée du Lamentin ($1,5 \cdot 10^4$ CF/100 ml)
- Point 12 : La Lézarde ($1,07 \cdot 10^4$ CF/100 ml)
- Point 18 : Rivière des Coulisses (en aval de la station d'épuration) ($2,5 \cdot 10^4$ CF/100 ml).

* Les valeurs marquées entre parenthèses sont des moyennes mesurées.

Rivières ou rejet fortement contaminés ($> 5 \cdot 10^4$ CF/100 ml)

Ce sont essentiellement les points situés au nord de la baie et qui reçoivent les eaux usées non épurées (rivière Bouillé, rivière Monsieur) et les rejets des stations d'épuration : Chateauboeuf, Acajou, Le Lamentin. Dans le sud, le canal Ducos et les stations d'épuration du sud de la baie. Dans cette catégorie de très fortes charges peuvent être mesurées ($> 10^6$ CF/100 ml), lors de dysfonctionnement des stations ou de fortes pluies.

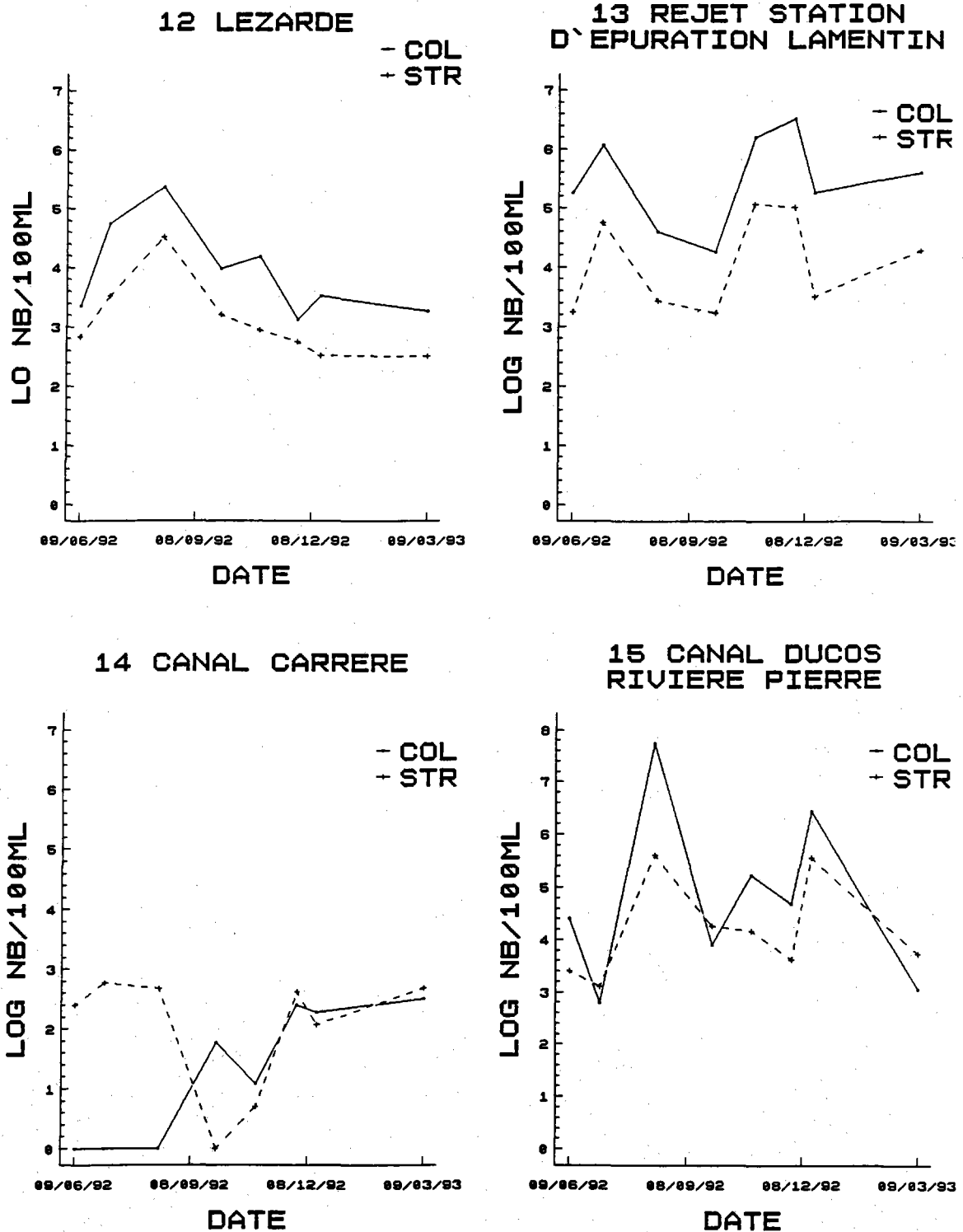


Figure 3 : Variations annuelles - exemples de quatre rivières et rejets de la baie de Fort de France.

1.4. Résultats : campagne de mars 1993

Afin de tester un certain nombre de techniques rapides - techniques enzymatiques pour les coliformes fécaux, techniques de biologie moléculaire pour la recherche des virus entériques - une campagne de prélèvements a été réalisée autour de la Baie en mars 1993. Les résultats sont reportés sur le tableau 1.

Tableau 1 : Résultats microbiologiques - Rivières de Fort de France (Mars 1993).

| Echantillon | Polymerase Chain Reaction | | | β gal (log) | FC (/100 ml) |
|-------------|---------------------------|----|----|----------------------|------------------|
| | HAV | EV | RV | | |
| 2 | + | + | + | - 3.58 | $3.5 \cdot 10^3$ |
| 4 | + | + | + | - 3.23 | $7 \cdot 10^4$ |
| 5 * | - | - | - | - 3.07 | $6 \cdot 10^4$ |
| 6 * | - | + | - | - 0.02 | $3 \cdot 10^7$ |
| 7 | + | + | + | - 1.10 | $3 \cdot 10^5$ |
| 8 * | + | + | + | - 2.01 | $2.6 \cdot 10^6$ |
| 9 * | + | - | + | - 2.36 | $4.8 \cdot 10^5$ |
| 10 * | + | - | + | - 1.64 | $8 \cdot 10^5$ |
| 11 | + | - | - | - 2.17 | $1 \cdot 10^5$ |
| 12 | - | - | - | - 3.72 | $1 \cdot 10^4$ |
| 13 * | - | + | + | - 1.49 | $1.8 \cdot 10^6$ |
| 14 | - | - | - | nd | $6 \cdot 10^2$ |
| 15 * | - | - | - | - 1.12 | $6.7 \cdot 10^7$ |
| 16 | - | - | - | - 2.83 | $5 \cdot 10^4$ |
| 17 | - | - | - | - 3.11 | $4.4 \cdot 10^4$ |
| 19 * | - | - | - | - 0.04 | $1.8 \cdot 10^6$ |
| 20 | - | - | - | nd | $5 \cdot 10^2$ |
| 21 * | - | - | - | - 0,29 | $3 \cdot 10^6$ |
| 22 * | + | + | + | - 1.74 | $2 \cdot 10^5$ |

* : Station d'épuration.

+(-) : Sample found positive (negative) after RT - nested - PCR.

β gal : galactosidase assay (log. $\mu\text{MI}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

FC : Coliformes fécaux (/100 ml) - HAV: Hepatite A Virus - EV : Enterovirus - RV: Rotavirus

Les coliformes fécaux ont été mesurés en parallèle par une technique classique (culture sur microplaque) et par l'activité enzymatique (MU Galactosidase). Le logarithme des activités varie de $- 3.70 \mu\text{MI}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ pour les prélèvements peu contaminés à $0,04 \mu\text{MI}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ dans les eaux usées fortement contaminées ; parallèlement les valeurs de coliformes fécaux

varient entre $5 \cdot 10^2$ CF/100 ml et $6.7 \cdot 10^7$ CF/100 ml pour les eaux très chargées. La corrélation entre les deux paramètres (fig. 4) est :

$$\text{Log } \beta\text{gal} : 0,87 \text{ Log CF} - 7,73,$$

$$n = 15$$

$$r = 0,89$$

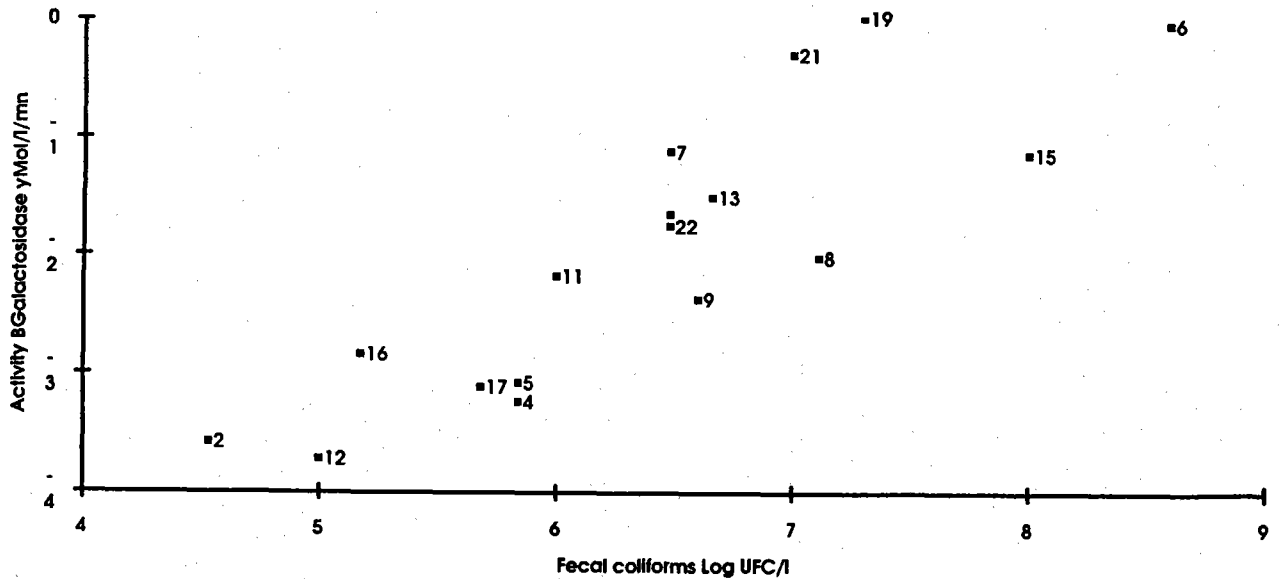


Figure 4 : Relation entre les concentrations en coliformes fécaux et l'activité enzymatique (mars 1993 - rivières de la baie de Fort de France).

La technique enzymatique s'avère intéressante puisqu'en moins d'une demi heure on peut obtenir les résultats de contamination (il faut 24 h à 48 h par la technique classique). Des travaux complémentaires sont nécessaires pour passer cette technique en routine : automatisation, amélioration de la sensibilité...

En ce qui concerne la virologie, l'analyse se fait sur 400 μ l (avec ou sans concentration au PEG (voir Le Guyader *et al.*, 1994). Le contenu génétique du virus est analysé (ARN viral). Cette technique ne permet pas d'avoir une idée de l'infectiosité du virus, mais donne des résultats de présence de matériel génétique. L'extrême sensibilité de la technique semi-nested PCR oblige à prendre des précautions pour éviter les résultats faux-positifs : contrôle de chaque étape de l'analyse (élution, concentration, extraction de l'ARN), retrotranscription (première PCR, semi-nested PCR). D'autre part la présence d'inhibiteurs (présents dans les eaux usées) peut entraîner un résultat négatif malgré la présence virale.

Les analyses virales (RT nested PCR) ont permis de rechercher le virus de l'hépatite A (VHA), le rotavirus (responsable de gastro-entérites chez l'enfant) et les entérovirus (responsable de gastro-entérites) ; sur les échantillons de mars, huit se sont avérés

positifs pour le VHA, sept pour les entérovirus et les rotavirus. Parmi ces échantillons, cinq sont positifs pour tous les virus analysés, deux contiennent des entérovirus et du rotavirus, deux du VHA et du rotavirus, un de l'entérovirus seulement et un du VHA seulement. Il n'a pas été trouvé de corrélation entre coliformes fécaux et présence de virus, cependant certains rejets très contaminés en coliformes fécaux sont positifs également en virus (rivière Monsieur, S.E. Dillon, et dans la zone touristique l'anse à l'Ane). Par contre des rivières peu ou faiblement contaminées (Pt. 2 et 4) s'avèrent très chargés en particules virales. Différentes explications peuvent être avancées : la présence aléatoire de porteurs ou de malades dans la zone de rejet et peut-être des problèmes méthodologiques : limite de détection ou présence d'inhibiteurs pour les analyses virales.

Les techniques utilisant la biologie moléculaire sont très prometteuses mais nécessitent des recherches pour leur application sur des échantillons naturels. Néanmoins la présence dans 60 % des échantillons analysés, de virus d'origine entérique montre la forte contamination de ces eaux. La dissémination de ces virus dans les eaux de baignade et dans les coquillages (soudons consommés par les touristes en Martinique) nécessiterait des études complémentaires.

Les résultats épidémiologiques du centre hospitalier La Meynard et du Centre de Transfusion Sanguine de Fort de France pour le virus de l'hépatite A, dont les principaux vecteurs sont l'eau et les coquillages, laissent à penser à un contact fréquent de la population locale avec ce virus puisque 100 % de la population serait immunisée, contrairement aux départements métropolitains où l'on observe actuellement une diminution de l'immunité de la population. Le séjour de métropolitains dans de telles zones endémiques peut présenter des risques pathologiques importants pour l'adulte.

1.5. Conclusion

Les résultats des études bactériologiques montrent de fortes concentrations en coliformes fécaux et la présence de microorganismes pathogènes pour l'homme (virus de l'hépatite A, rotavirus) dans les eaux usées et les rivières se jetant dans la baie de Fort de France.

La connaissance des flux serait nécessaire pour connaître l'impact réel de ces contaminants dans la baie. Malheureusement pendant notre étude nous n'avons pu obtenir de résultats sur les débits des rivières soit par manque d'équipements et de moyens des administrations compétentes (Service Régional d'Aménagement des Eaux) soit du fait de la restructuration de cette compétence dans le contexte local (ORSTOM - DDA - SRAE). De plus les conditions locales (multiples rejets) et climatiques (impossibilité de mesurer les débits pendant les périodes les plus critiques - forte période des pluies) font que ces mesures auraient été en tout état de cause très difficiles à obtenir.

Les seules informations permettant une estimation - très partielle - des flux ont été recueillies auprès de la Direction Départementale de l'Agriculture.

La liste des équipements en station d'épuration ainsi que de leur capacité en équivalent/habitants est présentée ci-dessous et reportée sur la carte jointe (figure 5) : le nombre d'équivalent habitants peut être converti en flux bactérien ; en effet on considère, pour l'homme, un rejet journalier de 10^{10} CF/100 l d'eau soit un flux de $1.157 \cdot 10^5$ CF/s ; les informations présentées sur le tableau 2 datent de juin 1990.

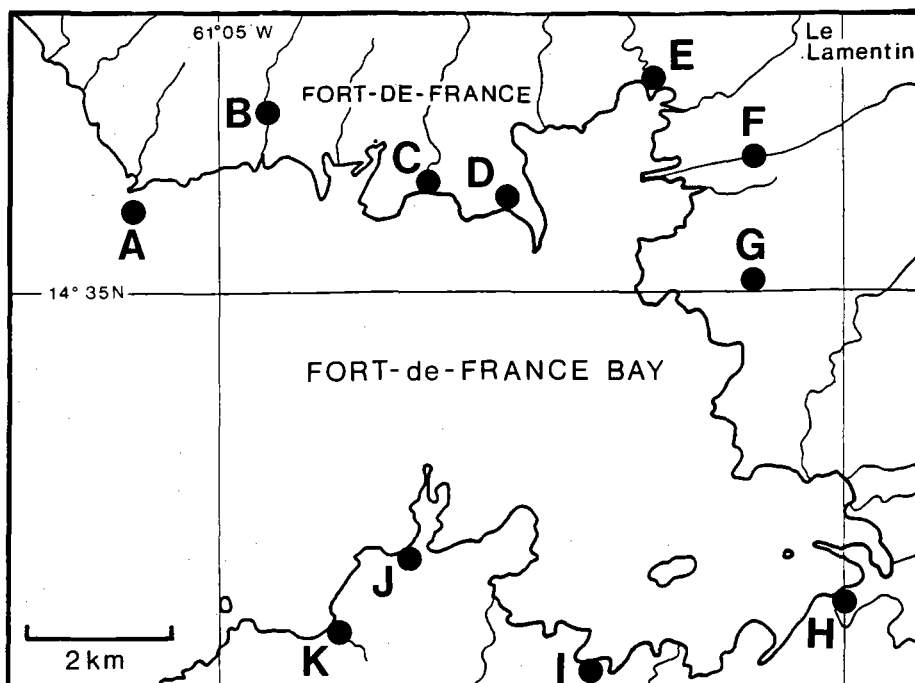


Figure 5 : Equipements en station d'épuration - Baie de Fort de France (DDA 1990).

| N° | SE | Equiv/hab. | Traitement | Flux CF/s | Lieu du rejet |
|----|---------------|------------|------------|------------------|---------------------|
| A | Godissard | 13 000 | BA | $1.5 \cdot 10^9$ | Rivière Madame |
| B | Point Simon | - | - | - | Rejet en mer |
| C | Chateauboeuf | 14 500 | BA | $1.6 \cdot 10^9$ | Rivier Monsieur |
| D | Dillon | 22 000 | BA | $2.5 \cdot 10^9$ | Ravine |
| E | Acajou | 5 000 | BA | $5.7 \cdot 10^8$ | Pluvial (Maugnone) |
| F | Petit Manoir | 18 000 | BA | $2.1 \cdot 10^9$ | Rivière La Lézarde |
| G | Bourg Ducos | 10 000 | BA | $1.1 \cdot 10^9$ | Rivière |
| H | Les Coulisses | 7 000 | BA | $8.1 \cdot 10^8$ | Rivière |
| I | Trois Ilets | 2 000 | BA | $2.3 \cdot 10^8$ | Rivière citron |
| J | Anse Mitan | 3 500 | BA | $4.5 \cdot 10^8$ | Bord de mer |
| K | Anse à l'Ane | 2 500 | BA | $2.9 \cdot 10^8$ | Marigot bord de mer |

BA : Boue activée

Tableau 2 : principaux équipements en stations d'épuration de la baie de Fort de France (DDA - juin 1990)

Un projet actuellement à l'étude prévoit l'extension de l'anse Mitan (anse à l'Ane raccordé) et rejet en mer : capacité 15 000 Eq./hab. ($\approx 1.7 \cdot 10^9$ CF/s).

Ces informations sont très partielles ; aucune donnée n'existe soit sur les rivières soit sur les zones non raccordées (Rivière Bouillé et d'une manière générale, une grande partie des quartiers de Fort de France) ; la Lézarde, principale rivière de l'île (elle draine un bassin versant qui représente environ 1/3 de la superficie de l'île), a fait l'objet de quelques mesures de débits, une crue, en emportant le matériel a rendu impossible l'acquisition de données pendant les périodes critiques (saison des pluies) [information orale ORSTOM]. Nous n'avons pu obtenir les quelques mesures disponibles qui, d'ailleurs, étaient relativement anciennes.

Des estimations de flux seront néanmoins utilisées pour des applications de modèle ; étant donné les niveaux observés dans les rivières nous avons proposé - pour des essais de simulation - d'utiliser des flux de 10^9 CF/s pour les principaux rejets (Rivière Madame, Rivière Bouillé, Rivière Monsieur, La Lézarde...). Des simulations de l'extension de la station d'épuration de l'anse Mitan (rejet en mer) ont également été réalisées (voir chapitre modélisation et annexe IV). Ce projet est actuellement à l'étude et devrait être réalisé très prochainement.

II - MESURE DES TEMPS DE SURVIE

Des mesures en mer ont été réalisées :

- 1) pour étudier la contamination de la baie. Ces mesures devant servir à caler le modèle de dispersion,
- 2) pour déterminer les temps de survie (mortalité des coliformes fécaux en mer).

2.1. Prélèvements d'eaux de la baie

Les prélèvements ont été réalisés le 9 juin 1992 (de 10 h 00 à 12 h 00) dans la baie de Fort de France (fig. 6). L'eau était prélevée en surface pour analyses : salinité, teneur en matière en suspension, coliformes fécaux et streptocoques fécaux. Des prélèvements en rivières ont été effectués simultanément.

Les résultats des analyses sont reportées tableau 3 : deux techniques classiques (par culture) ont été utilisées pour chaque type de bactéries de façon à bien cerner la contamination.

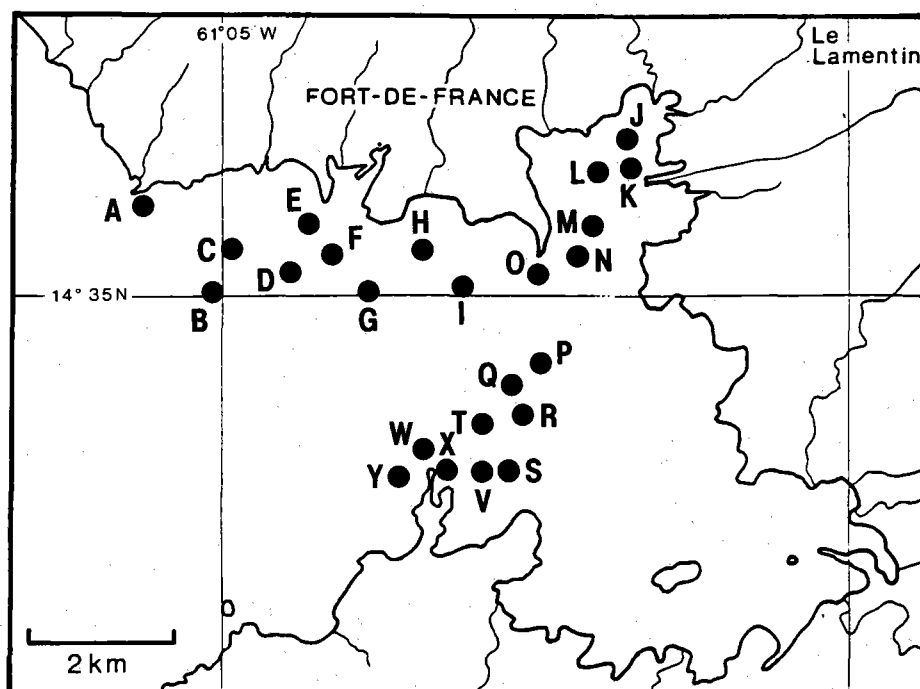


Figure 6 : Prélèvements d'eaux de surface - Baie de Fort de France (9 juin 1992)

➤ *Coliformes fécaux* :

- (1) Filtration : milieu TTC-Tergitol - Confirmation milieu de schubert.
- (2) M.U.G. Microplaque.

Tableau 3 : qualité bactériologique des eaux de la baie de Fort de France : Coliformes Fécaux (CF) et Streptocoques Fécaux (SF)
Prélèvements eau surface - 9 juin 1992

| | CF (1) | CF (2) | SF (3) | SF (4) |
|---|--------|--------|--------|--------|
| A | 8 | < 15 | 21 | < 15 |
| B | 4 | < 15 | 1 | < 15 |
| C | < 1 | 15 | 4 | < 15 |
| D | < 1 | < 15 | < 1 | < 15 |
| E | 60 | 15 | 17 | < 15 |
| F | 77 | 15 | 23 | < 15 |
| G | 210 | < 15 | 9 | < 15 |
| H | 20 | < 15 | 30 | < 15 |
| I | 200 | < 15 | 50 | < 15 |
| J | 15 | < 15 | 30 | < 15 |
| K | > 300 | < 15 | 57 | < 15 |
| L | - | 30 | 150 | < 15 |
| M | 12 | < 15 | 4 | < 15 |
| N | 300 | < 15 | 21 | < 15 |
| O | 50 | < 15 | < 1 | < 15 |
| P | 150 | < 15 | 28 | < 15 |
| Q | < 1 | < 15 | < 1 | < 15 |
| R | 17 | < 15 | < 1 | < 15 |
| S | 22 | < 15 | < 1 | < 15 |
| T | < 1 | < 15 | < 1 | < 15 |
| V | 150 | < 15 | < 1 | < 15 |
| W | 26 | < 15 | < 1 | < 15 |
| X | 250 | 15 | 5 | < 15 |
| Y | 3 | < 15 | 4 | < 15 |
| Z | < 1 | < 15 | 4 | < 15 |

- (1) Filtration TTC Tergitol/Schubert.
 (2) Méthode M.U.G. microplaque.
 (3) Filtration (Slanetz)
 (4) Microplaque (Slanetz)

➤ *Streptocoques fécaux* :

- (1) filtration (milieu de Slanetz) ;
- (2) Microplaque (milieu de Slanetz).

D'une manière générale, on note une très faible contamination. Le milieu microplaque (CF et SF) donnant la plupart du temps des résultats très faibles. Si l'on regarde les techniques par filtration (concentration de 100 ml d'eau) qui dans le cas d'eaux peu contaminées sont plus performantes, on constate également des valeurs très faibles. Les prélèvements ont été réalisés pendant une période de très faible pluviosité (juin 1992 : apports limites de la rivière La Lézarde). En fait, quelques valeurs supérieures à 50 CF/100 ml sont observées près de la zone portuaire, au débouché de la Lézarde et près de la zone touristique de la pointe du Bout ; la pollution est donc limitée localement ; ces résultats sont confirmés par une étude réalisée antérieurement par l'Université Antilles Guyane (P. Assor, communication orale).

Un échantillonnage large à l'échelle de la baie nous a permis d'avoir une image globale, l'étude de cas locaux (par exemple autour de la pointe du Bout) nécessiterait de travailler à une petite échelle sur des distances limitées (200 - 500 m autour du rejet).

2.2. Mesure des temps de survie (T90)

Le devenir des bactéries d'origine fécale en mer est lié à des phénomènes physiques de dilution, de sédimentation et à des phénomènes biologiques (évolution de la bactérie en milieu hostile). Les travaux réalisés ces dernières années en métropole ont mis en évidence le rôle de la qualité du milieu récepteur sur la vitesse de disparition des bactéries fécales dans les zones côtières ; ainsi dans les eaux claires et bien ensoleillées les bactéries évoluent très rapidement (en quelques heures) vers un état dit viable mais non cultivable, c'est-à-dire qu'elles ne sont plus mises en évidence par les techniques classiques d'analyse. Cette étape plus ou moins longue, précède la mort de la bactérie. Au contraire dans des eaux turbides, riches en matière organique, les bactéries fécales trouvent un environnement moins hostile : présence de nutriments, protection vis-à-vis de l'effet bactéricide de la lumière...; dans ces conditions elles peuvent survivre beaucoup plus longtemps (T90 = 2 à 5 jours) ; le T90 est le temps nécessaire pour que 90 % des bactéries ne soient plus cultivables par les techniques classiques d'analyses.

La qualité intrinsèque du milieu récepteur joue donc un rôle important vis-à-vis du devenir des bactéries entériques en mer et il est donc important de l'appréhender. Si en métropole le T90 a fait l'objet de nombreuses études, aucune information n'existait sur la région Antilles. Dans cette étude, des expériences ont été réalisées sur plusieurs sites afin d'étudier l'évolution des bactéries dans les eaux côtières et de calculer les T90 qui seront utilisés lors des simulations par le modèle de dilution.

La souche bactérienne choisie est *Escherichia coli*, (n° H10407 - souche de collection) ; cette bactérie est représentative des bactéries fécales ; son intérêt est lié également aux nombreux travaux qui lui ont été consacrés et qui permettent de replacer nos études dans un contexte plus général. Quelques expérimentations ont été réalisées en utilisant une Salmonelle (*Salmonella typhimurium* 60.62 T) qui est une bactérie fécale pathogène pour l'homme. Son pouvoir de résistance à l'eau de mer était à ce titre intéressant à tester.

2.2.1. Méthodes utilisées

Préparation de la souche : Cultivées dans un bouillon trypticase, les bactéries sont récupérées en fin de phase exponentielle de croissance, elles sont ensuite lavées trois fois par centrifugation, afin d'éliminer le bouillon de croissance.

La suspension est ensuite inoculée dans des chambres à diffusion (volume 300-400 ml) obstruées à chaque extrémité par des filtres Millipore de 14 cm de diamètre (porosité 0,45 μm) ; ces chambres, remplies par de l'eau de mer du site (filtrée à 0,45 μm) emprisonnent les coliformes et limitent aux éléments nutritifs dissous, les échanges avec l'extérieur. Les chambres construites en quartz (pour laisser passer la lumière visible et les rayons ultra-violets) et en Plexiglas (ne laissant passer que la lumière visible), sont immergées à différentes profondeurs sous la surface de l'eau à l'aide d'un mouillage réalisé à cet effet. Une chambre noire (utilisée comme contrôle à l'abri de la lumière) est également installée sous le mouillage.

Un appareil (LICOR - LI 1000) mesurant la lumière reçue par les bactéries est positionné à la même profondeur (longueur d'onde 400 à 700 nm) ; des mesures ponctuelles en profondeur sont réalisées plusieurs fois dans la journée pour étudier le coefficient de pénétration de la lumière sur le site de mesure. L'unité de mesure de la lumière est exprimé en $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Les prélèvements sont réalisés (environ toutes les deux à trois heures) dans les chambres à diffusion, à l'aide d'une seringue stérile.

Les analyses sont alors faites pour étudier l'état physiologique des bactéries :

- recherche par culture (milieu Drigalski à 37 °C),
- contrôle de la population par épifluorescence : l'échantillon est formolé puis observé au microscope à épifluorescence.

2.2.2. Sites étudiés

Trois sites ont été retenus pour cette étude :

- Cohé du Lamentin : embouchure de la Lézarde (juin 1992 - turbidité : 4,92 mg/l - salinité : 35,2 ‰),
- l'anse d'Arlet (juin 1992 - Turbidité : 2,43 mg/l - salinité : 34,75 ‰),
- l'anse du Robert (Décembre 1992 - Turbidité : 0,87 mg/l - Salinité : 32 ‰ et mars 1993 ; turbidité : 4,85 mg/l - Salinité : 35,8 ‰).

Le choix des sites correspond aux différentes conditions physico-chimiques trouvées dans l'île (présence de matière organique au débouché de la Lézarde, eau claire à l'anse d'Arlet et au Robert).

2.2.3. Résultats

Les résultats exhaustifs sont présentés en annexe II (figures et fichiers). Les figures 7 à 10 illustrent les principaux résultats obtenus lors de nos expérimentations.

Sur le site de l'anse d'Arlet (fig. 7) (eau claire et fort ensoleillement : 800 à 1 000 $\mu E m^{-2}s^{-1}$ observés à 1,50 m sous la surface) on note une perte de cultivabilité très rapide d'*E. coli* dans la chambre en quartz (qui reçoit les ultraviolets) tandis que dans les chambres en Plexiglas - arrêt des UV - qui sont positionnées à 5 et 10 m sous la surface - l'effet de la lumière est très faible ; la chambre noire suit les variations des deux autres chambres Plexiglas avec un certain retard. A partir de 25 heures (seconde journée) la perte de cultivabilité est très rapide dans les chambres.

Sur le site du Robert (fig. 8) (eau claire, faible ensoleillement $< 400 \mu E m^{-2}s^{-1}$ en moyenne), *E. coli* reste viable sur des périodes assez longues, puisque en 8 heures on a une perte de cultivabilité inférieure à un logarithme décimal.

Sur le même site (fig. 9), toujours pour la souche *E. coli*, lors de forts ensoleillements (fig. 9), les pertes de viabilité sont très élevées (sauf dans la chambre à l'abri de la lumière), aussi bien pour les chambres en Quartz que pour les chambres en Plexiglas.

La souche de Salmonelle, pour des ensoleillements équivalents (fig. 10) s'avère beaucoup plus résistante.

L'intensité lumineuse reçue par la bactérie dans les chambres à diffusion est calculée à partir des enregistrements Licor en tenant compte de l'atténuation propre à la chambre (Plexiglas ou Quartz) et de la profondeur d'immersion.

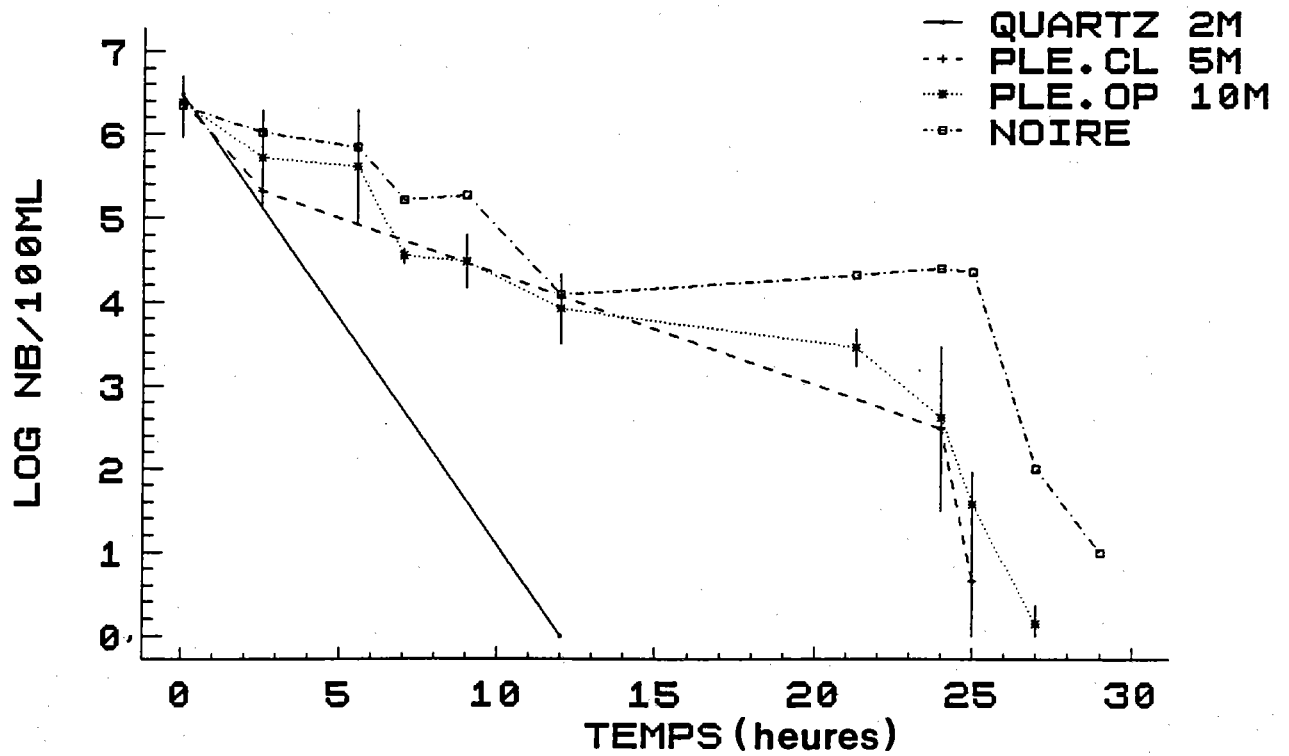
Un modèle simple du premier ordre est utilisé pour estimer le T90. Quelques résultats sont reportés sur le tableau 4 : les T90 varient de quelques heures (1,85 h à 2,5 h) pour de fortes illuminations à quelques dizaines d'heures pour les chambres noires (7 h à 29 heures).

Sur la figure 11 est reporté l'ensemble des points d'expérimentations ; on observe des relations très différentes lors des observations précédemment faites en Europe et celles de Martinique :

$$\begin{aligned} \text{Europe (1) T90} &= 9 I^{-0,5} \\ \text{avec } n &= 61 \\ r &= 0,84 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Martinique (2) T90} &= 113 I^{-0,24} \\ \text{avec } n &= 41 \\ r &= 0,52 \end{aligned}$$

ANSE D'ARLET E. COLI
9.06.92



INTENSITE LUMINEUSE
ANSE D'ARLET

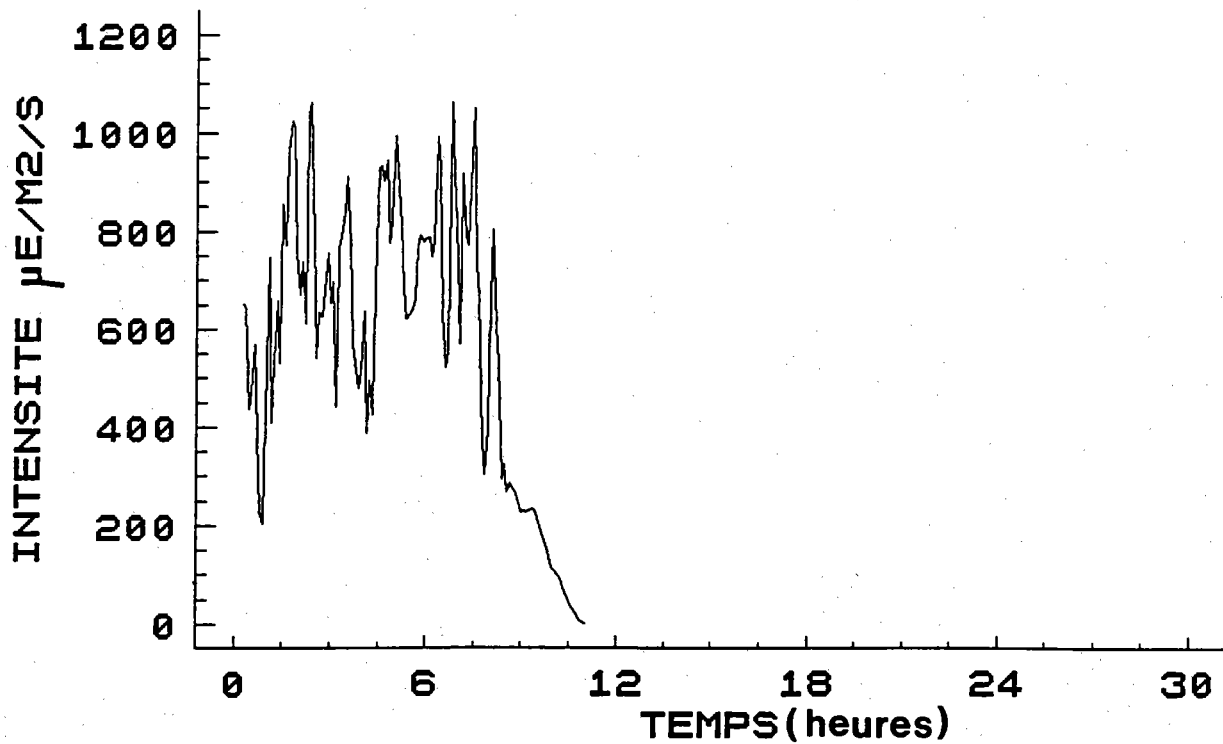
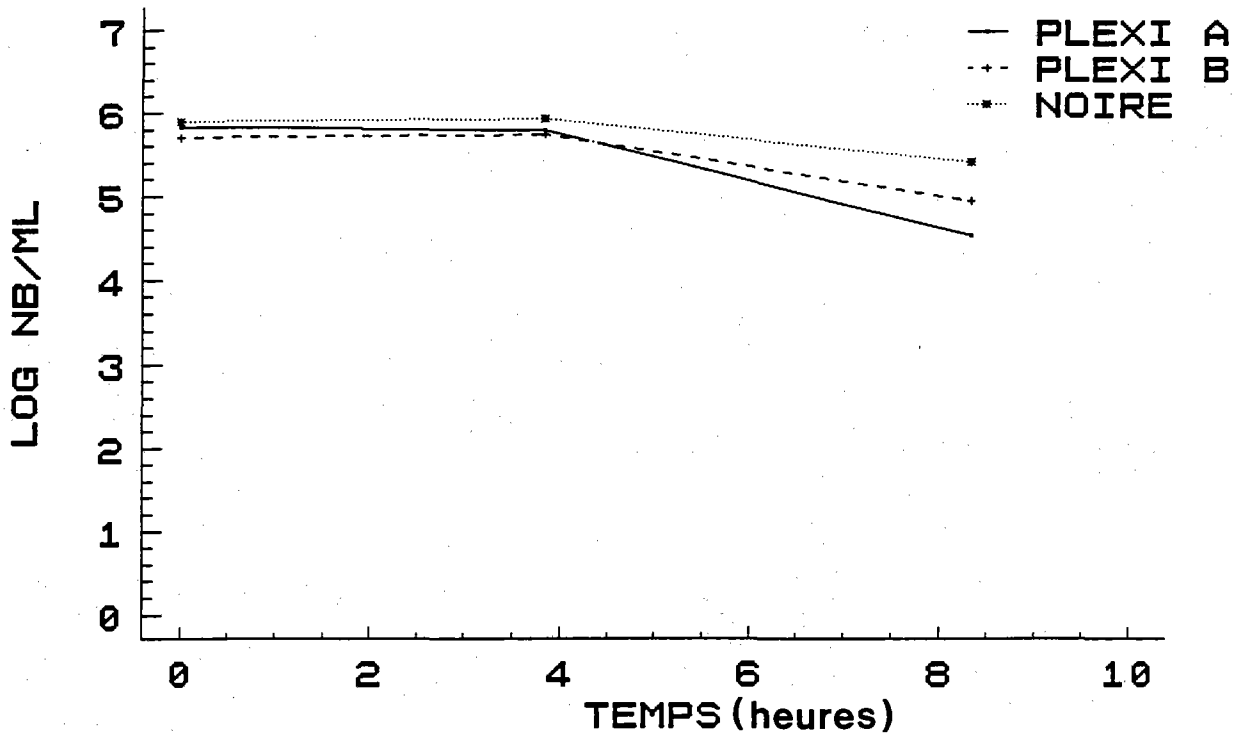


Figure 7 : Survie d'*E. coli* dans les eaux de l'Anse d'Arlet (9 juin 1992) et intensités lumineuses

BAIE DU ROBERT
E. COLI 16.12.92



INTENSITE LUMINEUSE
16.12.92

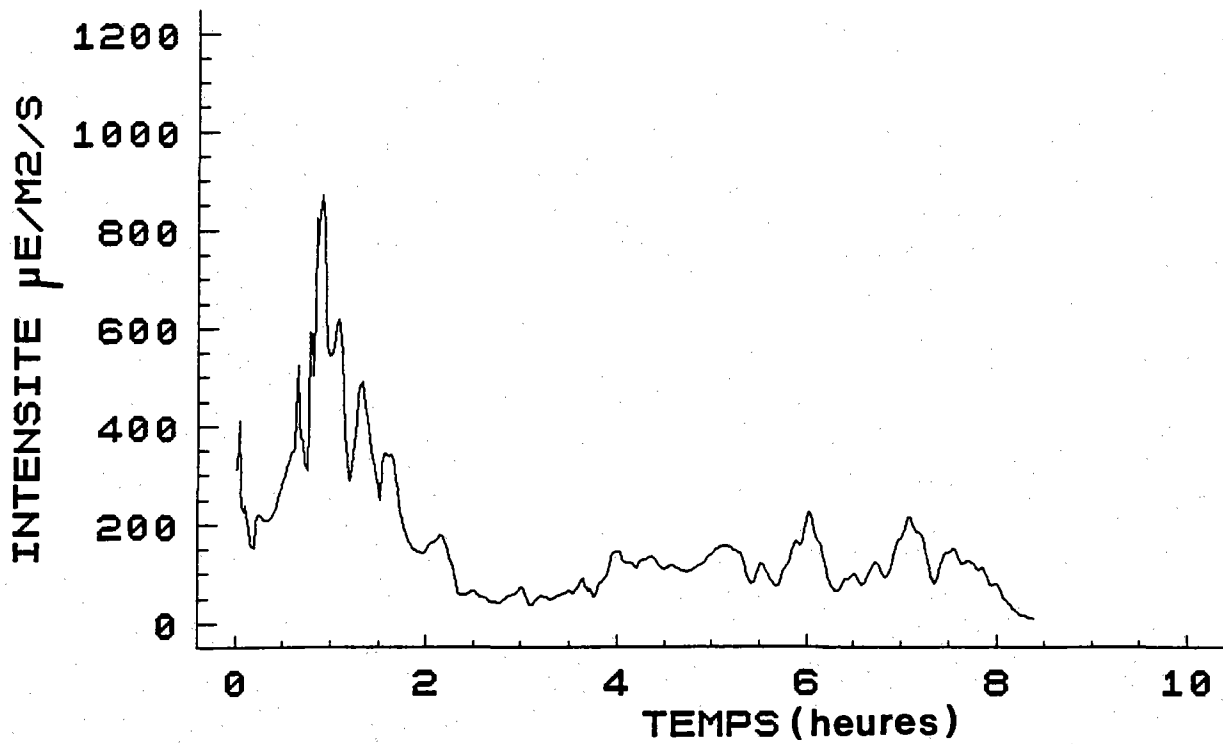
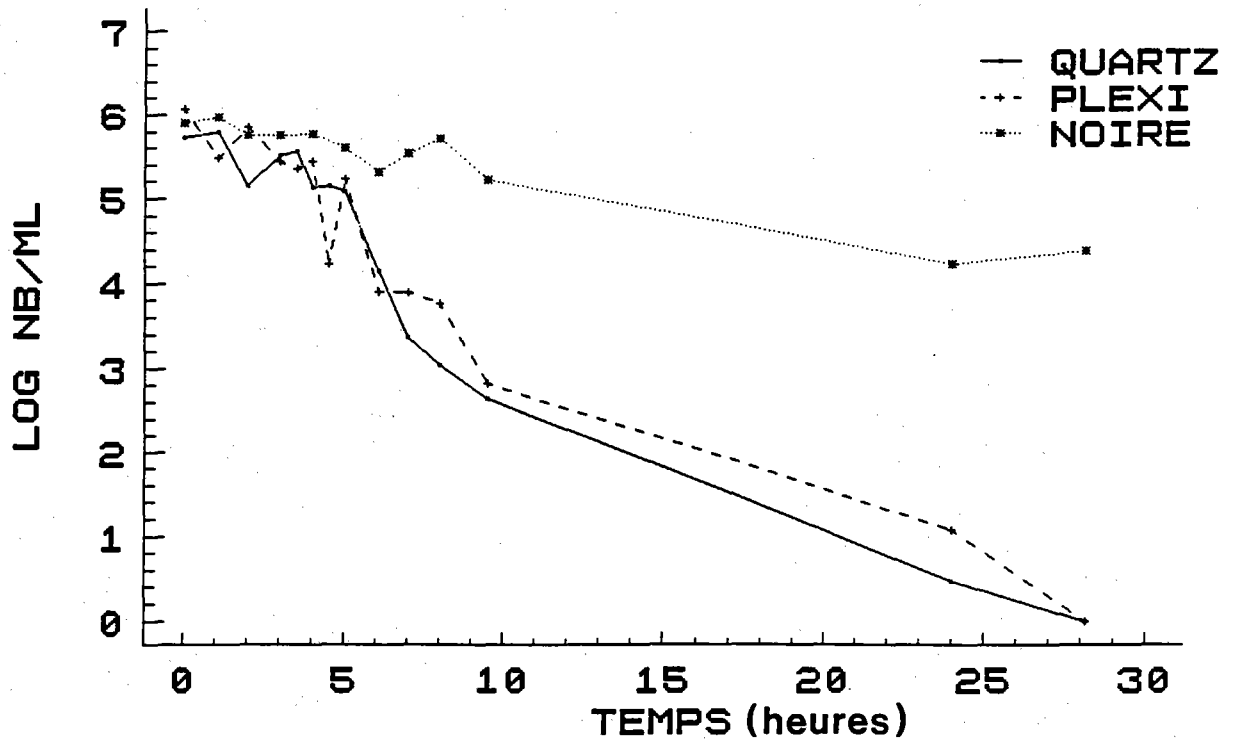


Figure 8 : Survie d'*E. coli* dans les eaux du Robert (16 décembre 1992) et intensités lumineuses

BAIE DU ROBERT
E. COLI 15.12.92



INTENSITE LUMINEUSE
15.12.92

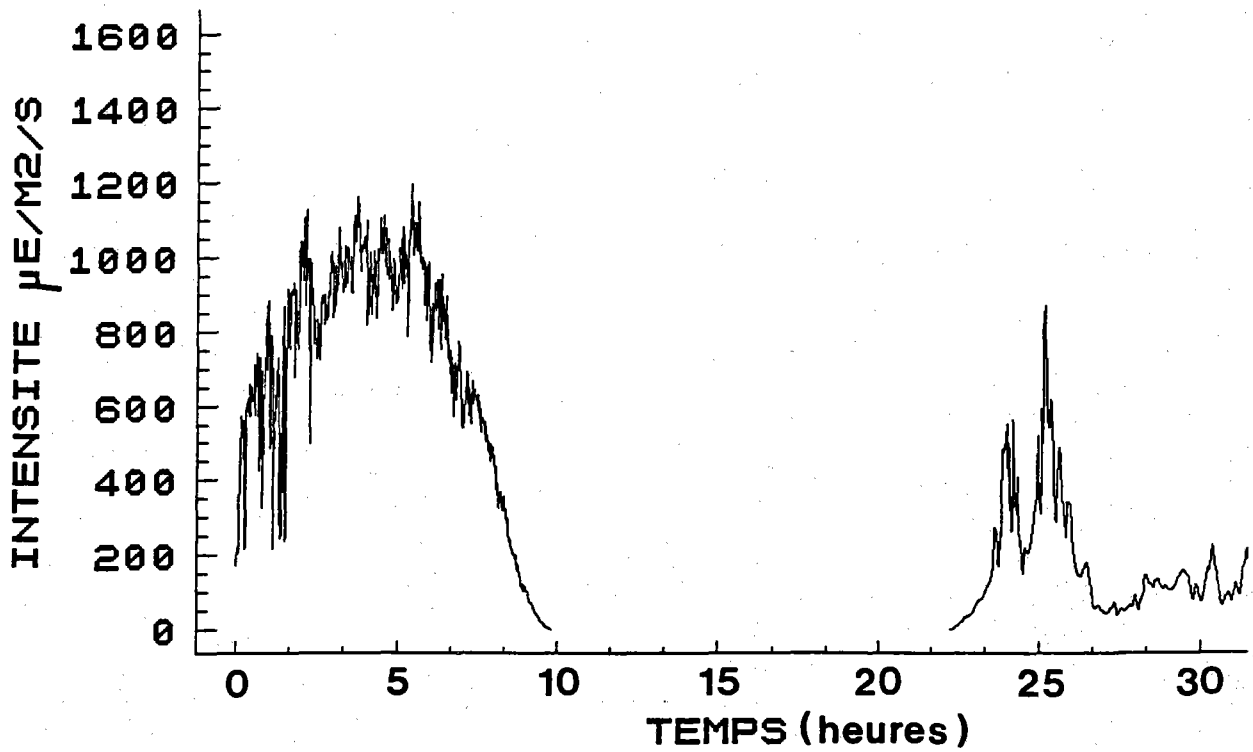
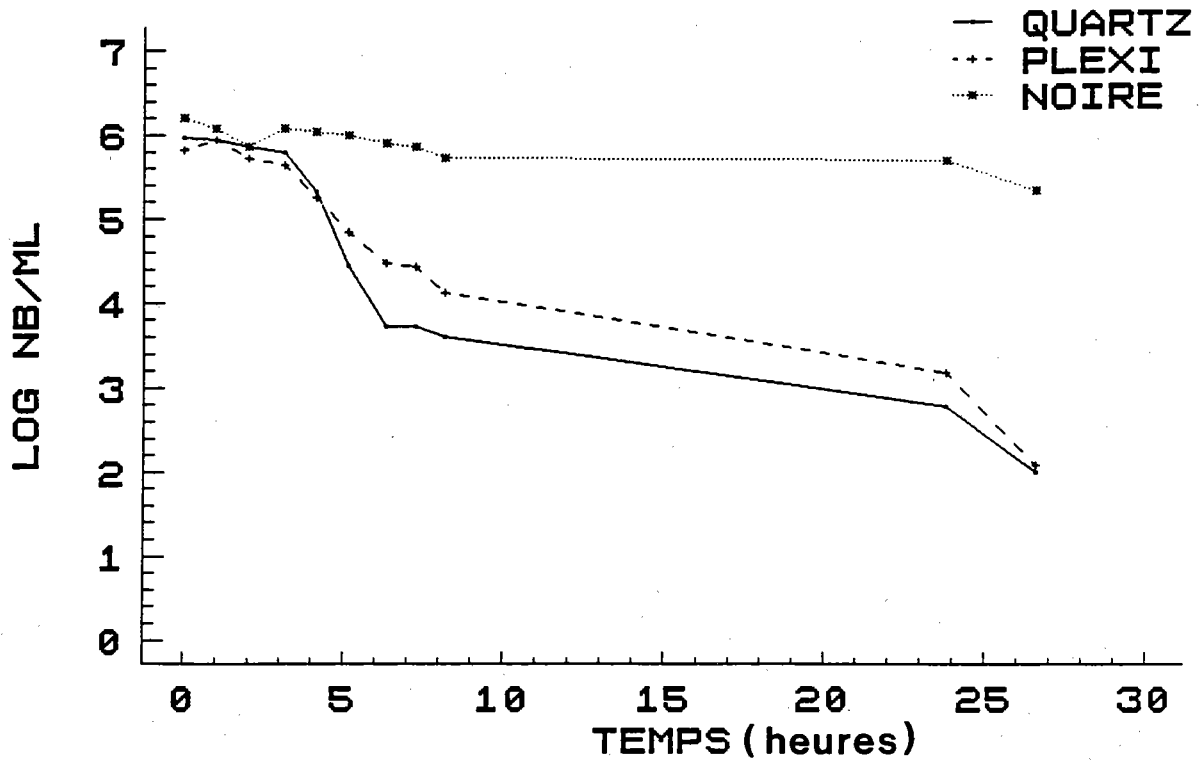


Figure 9 : Survie d'*E. coli* dans les eaux du Robert (15 décembre 1992) et intensités lumineuses

BAIE DU ROBERT
SALMONELLE 12.12.92



INTENSITE LUMINEUSE
12.12.92

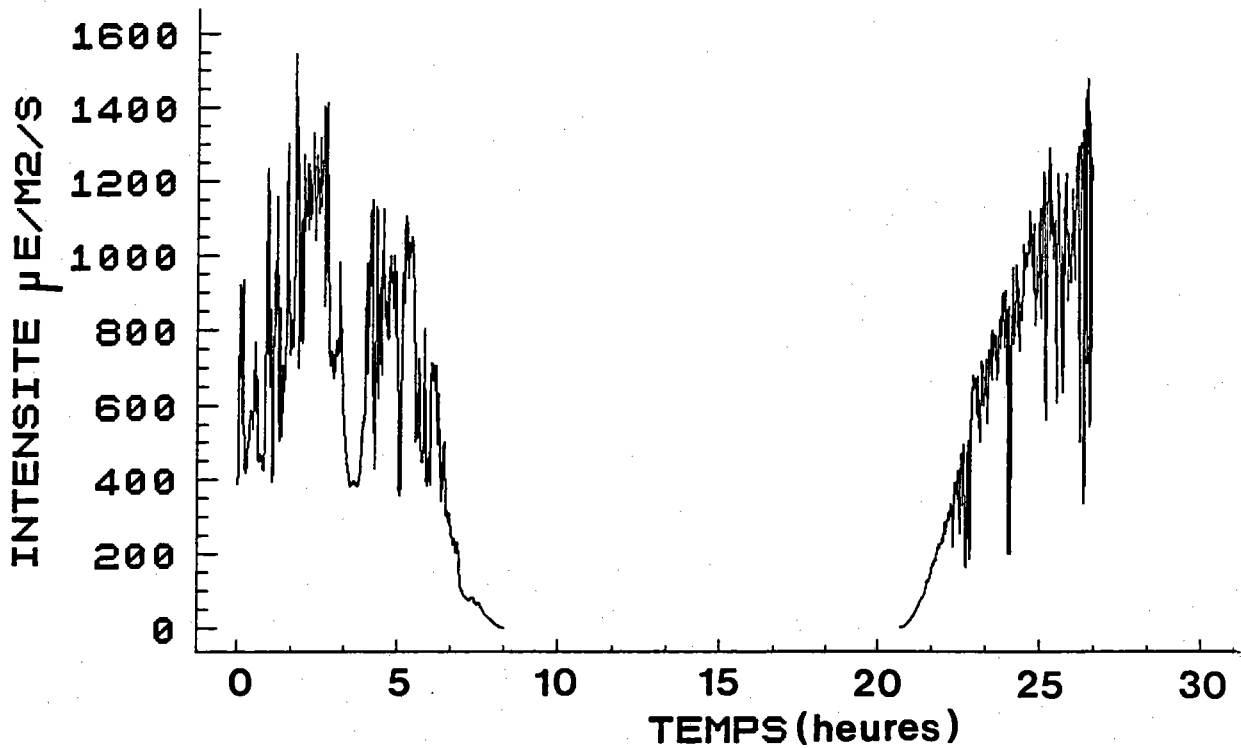


Figure 10 : Surveillance de *Salmonella* dans les eaux du Robert (12 décembre 1992) et intensités lumineuses.

Pour les forts ensoleillements, les résultats trouvés correspondent à ceux cités dans la littérature (T90 < 2 heures - Bellair *et al.*, 1977). Sur les côtes atlantiques pour des intensités équivalentes nous avons observé des T90 légèrement supérieurs (3 à 5 heures). Dans les chambres à l'abri de la lumière le T90 varie entre 7 h et 30 h en Martinique. Sur les côtes européennes les T90 trouvés - sans illumination - sont généralement plus longs et peuvent atteindre 7 à 9 jours. Le fait qu'en Martinique les T90, à l'obscurité soient faibles (< 30 h) peut être attribué aux conditions locales de température et d'oligotrophie ; en effet de nombreux travaux montrent le rôle de la matière organique et des osmoprotecteurs sur le maintien de la viabilité des bactéries : dans les eaux martiniquaises, du fait de l'oligotrophie des eaux, des bactéries fécales seraient plus stressées que dans les eaux européennes estuariennes. D'autre part différents travaux ont montré que la survie était prolongée dans les eaux froides par rapport aux eaux chaudes ; en Martinique nos expérimentations ont été réalisées dans des eaux à 27-28 °C, en Atlantique 10 à 15 °C maximum.

Ces différents facteurs de stress et leur accumulation peuvent être également responsables ou explicatifs d'autres observations : ainsi en Europe, tandis que les numérations bactériennes se stabilisaient la nuit, en Martinique elles continuent à décroître de façon importante. M. Gourmelon *et al.* (1994) a observé que la matière organique pouvait offrir une bonne protection vis-à-vis de la lumière pour les bactéries. Ces dernières pourraient mettre en place des systèmes de défense contre les radicaux libres, éventuellement formés lors de l'exposition à la lumière visible, ou des systèmes de réparation. Il faudrait avoir une idée plus précise des spectres solaires en Martinique et en Atlantique pour comprendre précisément les mécanismes impliqués dans le stress lumineux.

| Date | Localisation | T° (°C) | Profondeur (m) | Chambres à diffusion | Intensité lumineuse $\mu\text{Em}^{-2}\text{h}^{-1}$ | T90 (heures) | Salinité ‰ | Turbidité (mg/l) |
|-----------|--------------|---------|----------------|----------------------|--|--------------|------------|------------------|
| Juin 1992 | A | 27.7 | 2 | Lumière | nd | 2.50 | 35.20 | 4.92 |
| | | 28.0 | 5 | Lumière | nd | 9.50 | 35.60 | |
| | | 28.0 | 5 | Lumière | nd | 6.40 | 35.60 | |
| | | 28.2 | 6.50 | Obscurité | < 10 ⁴ | 7.80 | 35.70 | |
| Juin 1992 | B | 28.0 | 2 | Lumière | 1.38 10 ⁶ | 1.85 | 34.70 | 2.43 |
| | | 28.0 | 10 | Lumière | 5.13 10 ⁵ | 7.10 | 34.75 | nd |
| | | 28.0 | 10 | Lumière | 3.65 10 ⁵ | 4.80 | 34.75 | nd |
| | | 28.0 | 13 | Obscurité | < 10 ⁴ | 6.50 | 34.75 | nd |
| Déc. 1992 | C | 26.8 | 1 | Lumière | 1.73 10 ⁶ | 1.85 | 32.00 | 0.87 |
| | | 26.8 | 1 | Lumière | 8.44 10 ⁵ | 4.50 | 32.00 | 0.7 |
| | | 26.8 | 1 | Lumière | 2.00 10 ⁴ | 8.30 | 32.00 | 0.7 |
| | | nd | 3 | Obscurité | < 10 ⁴ | 16.30 | nd | nd |
| Mars 1993 | C | 27.0 | 0.5 | Lumière | 3.82 10 ⁶ | 1.55 | 35.80 | 4.85 |
| | | 27.0 | 1 | Lumière | 1.01 10 ⁶ | 5.10 | 35.80 | 4.85 |
| | | nd | 3 | Obscurité | < 10 ⁴ | 29.00 | nd | nd |
| | | nd | 3 | Obscurité | < 10 ⁴ | 15.35 | nd | nd |

Tableau 4 : Exemples de T90 pour *Escherichia coli* sur trois sites de Martinique.
 A : Baie de Fort de France (cohé du Lamentin),
 B : Anse d'Arlet,
 C : Baie du Robert.

2.2.4. Conclusions

Pour l'application de ces T90 dans les études de simulation, l'intégration des conditions locales d'ensoleillement doit également intervenir. La spécificité du climat de ces îles, fréquemment nuageux, avec des temps brefs mais très intenses d'ensoleillement, ainsi que la période journalière d'efficacité (sur les 12 heures entre le lever et le coucher du soleil, 10 heures sont considérées comme pouvant être efficace - intensités élevées) incitent à prendre des précautions sur le choix des T90. Les simulations prennent en compte des T90 de 3 heures pendant 10 heures et de 20 heures le reste du temps. Des T90 plus courts (2 heures pendant 24 heures) se sont avérés complètement irréalistes lors de premières simulations.

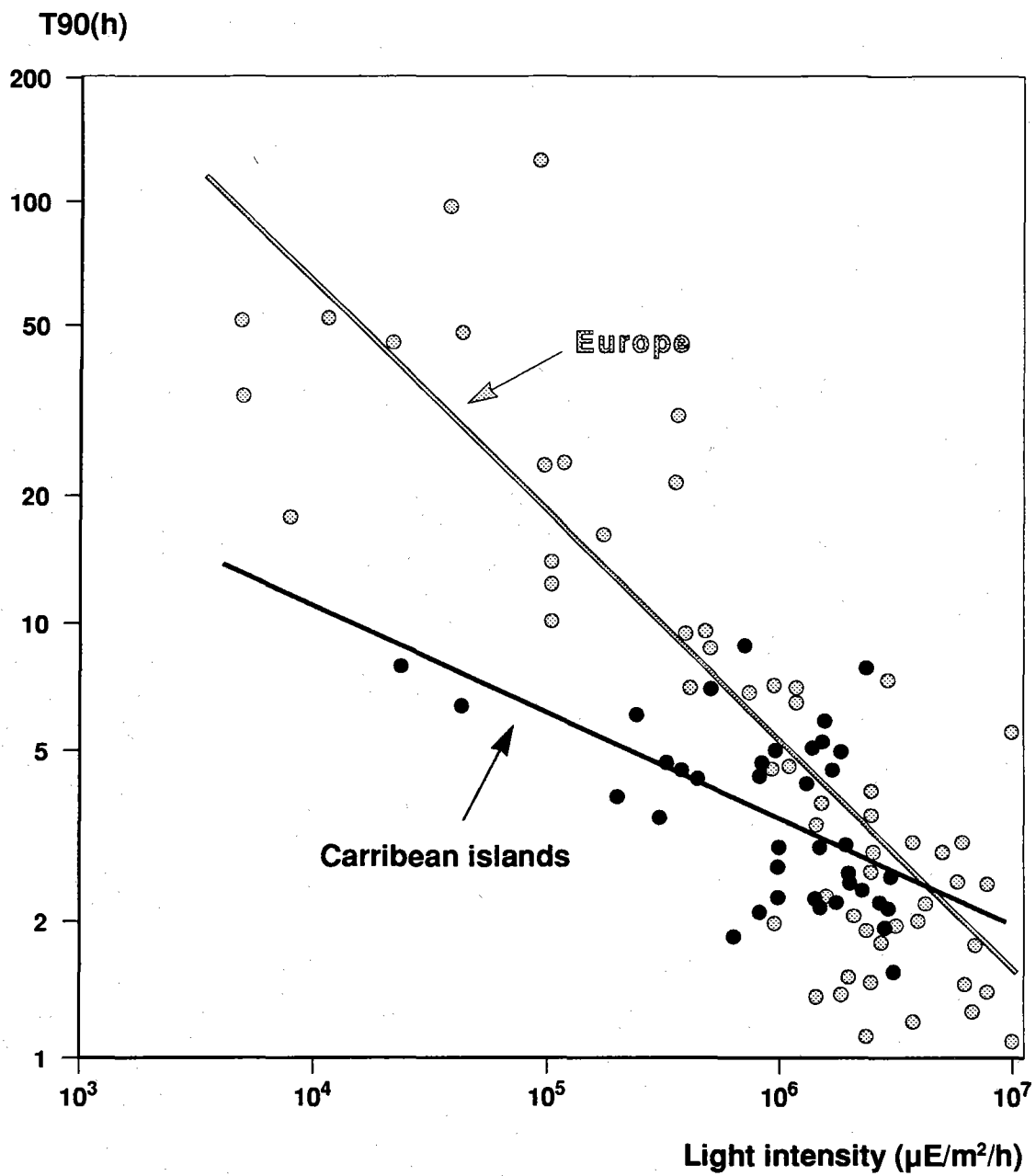


Figure 11 : Relation entre le T90 et l'intensité lumineuse : - Europe, ----- Martinique (tous points) - Martinique (sans obscurité)

III - ETUDE DE LA DYNAMIQUE COTIERE

La connaissance de la dynamique des eaux littorales est en général nécessaire à toutes les études de la qualité de l'eau. Les paramètres physiques déterminent en effet, le transport et le mélange des masses d'eaux. A part la baie de Fort de France, les courants sur le littoral martiniquais ont très peu été étudiés. Notre travail a donc comporté deux aspects complémentaires, d'une part des mesures directes et d'autre part la mise en oeuvre de modèles mathématiques.

Une campagne de mesure a été effectuée sur la côte ouest de la Martinique afin d'acquérir le minimum de données nécessaires à la validation d'un ou plusieurs modèles de circulation côtière

Deux modèles ont été appliqués à cette zone afin de décrire les processus cités. Le premier modèle a pour objectif de décrire les phénomènes à l'échelle de l'île. Il fournit également les conditions aux limites de modèles beaucoup plus fins destinés à répondre à des questions précises mettant en jeu une dynamique très locale.

Le second modèle est appliqué à la baie de Fort de France. Il est plus sophistiqué. Sa petite maille lui permet de décrire avec une bonne résolution, les principales structures courantologiques. Après validation, il a été appliqué aux calculs du devenir des bactéries dans la baie.

3.1. Processus Physiques

Les principaux facteurs susceptibles de mettre les masses d'eaux en mouvement dans cette région ont été identifiés à l'aide de précédentes études. Il s'agit de la circulation à grande échelle, de la marée et du vent.

La circulation à grande échelle est provoquée par le passage du courant nord équatorial de l'océan atlantique à la mer des Caraïbes. Il crée alors entre les îles des courants de forces variables dirigés vers l'ouest. D'après Stalcup et Metcalf (1972), il transiterait dans le canal de Sainte-Lucie (sud de la Martinique) environ six millions de m^3/s et dans le canal de la Dominique (nord de la Martinique) environ un million de m^3/s . Cependant ces mesures anciennes ne sauraient décrire un état moyen. En raison de l'étroitesse du plateau continental aux extrémités sud et nord de la Martinique, il est probable que ce courant puisse agir jusqu'à la côte. Cette hypothèse sera testée par la suite, à l'aide du modèle global.

La marée est le second processus physique, elle est mixte à inégalité diurne (Kjerfve, 1981), c'est-à-dire qu'elle est semi diurne la moitié du temps (deux pleine et haute mer par jour) et diurne (une seule marée par jour) autrement. L'amplitude de la marée varie de 10 à 30 cm et les courants induits sont assez mal connus le long des côtes martiniquaises. De précédentes mesures (Castaing *et al.*, 1986) ont montrés que les courants de marée pouvaient atteindre 30 cm/s notamment à l'entrée de la baie de Fort de France, près de Schoelcher. Par contre, à l'intérieur de la baie ils sont extrêmement faibles. Ailleurs nous ne disposons que de données très éparses ou difficilement exploitables.

Le vent est le dernier processus considéré dans cette étude. Les régimes de vent dans cette zone obéissent au régime des alizés et sont donc assez constants en force et direction. Ils soufflent du secteur nord est, au secteur est 86 % du temps (Castaing *et al.*, 1986) et les mois de juin-juillet sont les plus ventés. La force du vent varie également selon

l'heure de la journée. Le maximum est généralement atteint vers 11 heures. La circulation induite par le vent peut être très variable selon la localisation du point de mesure et notamment sa distance à la côte. Dans la baie de Fort de France, Castaing *et al.* (1986) ont mis en évidence de fréquentes inversions de courant entre la surface et le fond (fig. 12)

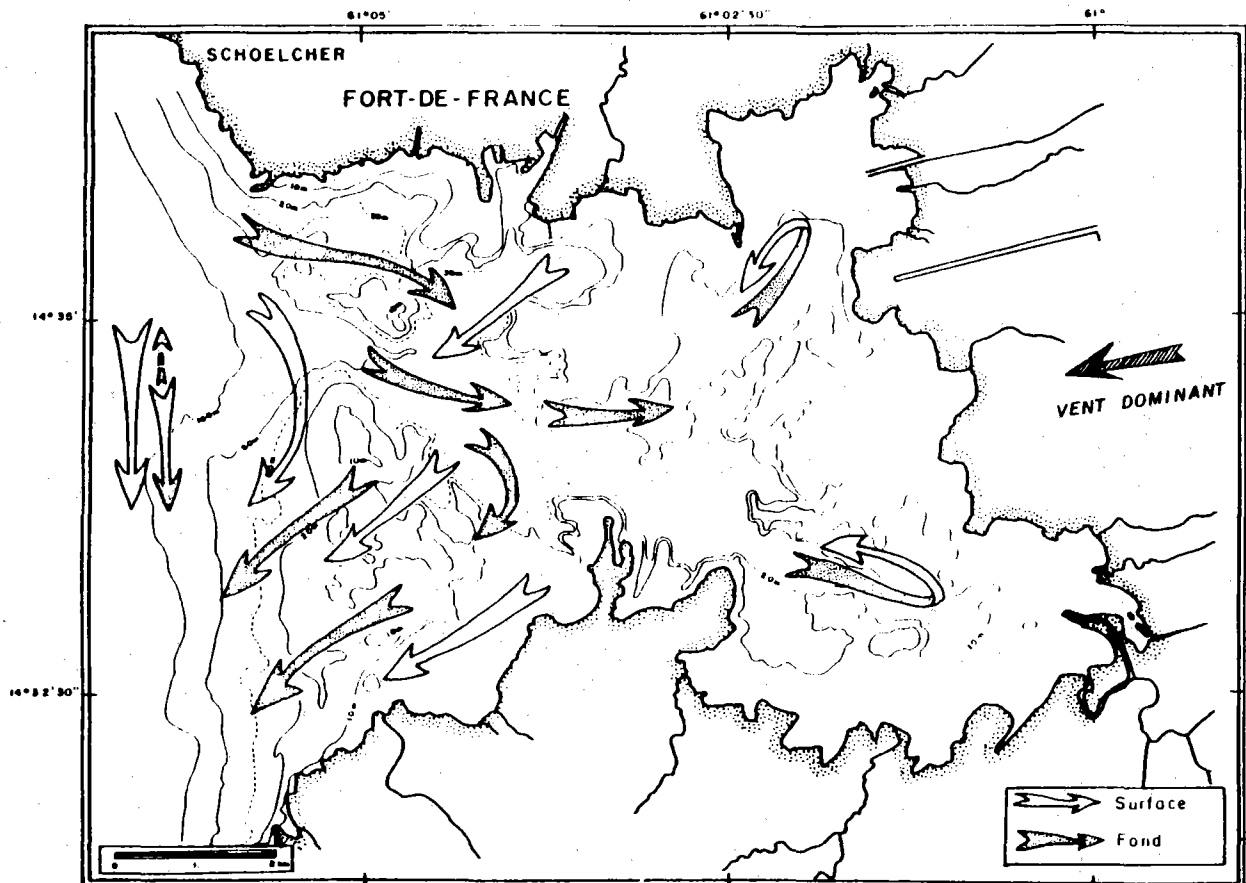


Figure 12 : circulation prédominante des eaux dans la baie (in Castaing *et al.* 1986)

3.2. Les mesures

Une campagne de mesures courantométriques a été effectuée du 29 mars au 8 avril 1992. Deux courantomètres électromagnétiques (S4 InterOcean) ont été utilisés et mis en oeuvre à partir d'un petit bateau. Faute de moyen de levage adapté, les mesures ont été effectuées par petits fonds (inférieurs à 30 m). Des mesures au point fixe d'une durée de l'ordre de la journée et des mesures de courtes durées à différentes immersions ont été effectuées de l'extrémité nord de l'île à Saint-Anne en portant une attention particulière à la baie de Fort de France.

Lorsque la durée des enregistrements de courant ne dépasse pas la journée, il n'est pas toujours facile de distinguer la composante du courant liée à la marée, de celle induite par le vent ou la circulation générale. Toutefois, il apparaît tout de même que les courants de marée sont assez importants et peuvent atteindre 20 cm/s aussi bien en face de Saint-Pierre que dans les Anses d'Arlet (figure 13). Des mesures beaucoup plus longues auraient été nécessaires pour quantifier l'influence des différentes ondes astronomiques, ou mettre en évidence une composante résiduelle de marée.

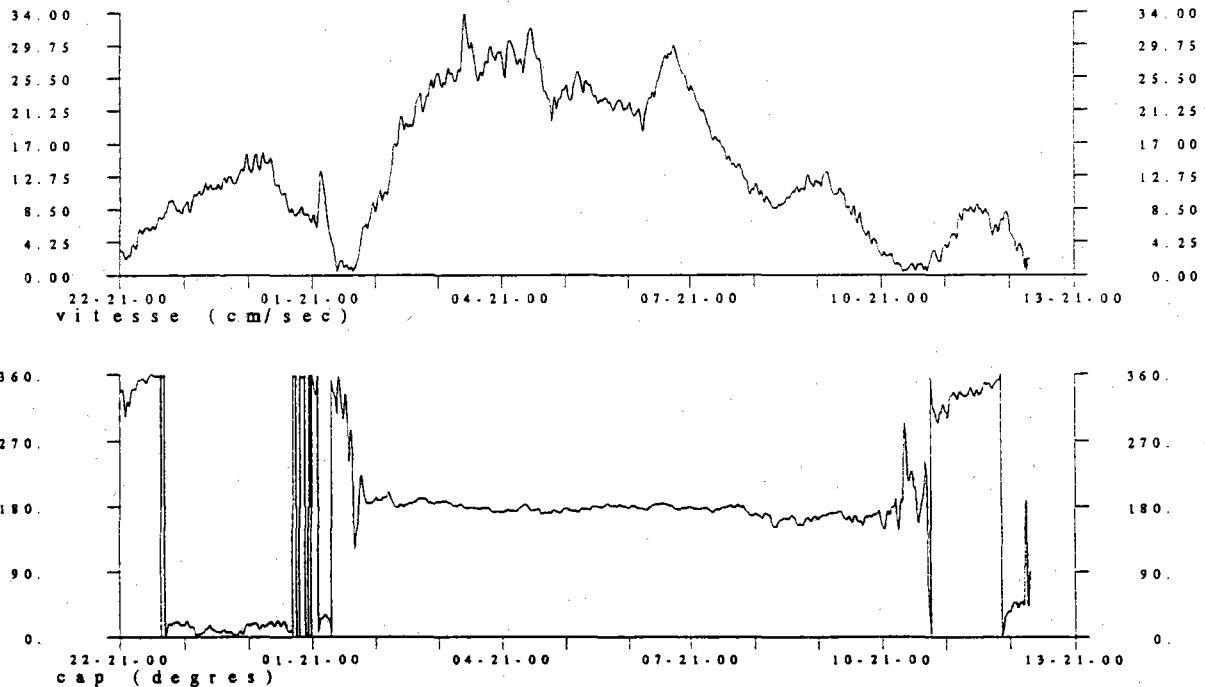


Figure 13 : Mesures du courant (vitesse et direction) dans les anses d'Arlets.

Dans la baie de Fort de France, les courants sont en général plus faibles mais montrent des structures verticales complexes avec éventuellement, inversion totale du courant entre la surface et le fond. Ces courants apparaissent directement reliés à la direction et la force du vent.

3.3. Le modèle global

Dans une première approche, le modèle global est bidimensionnel horizontal. Il calcule les niveaux et les deux composantes du courant moyen sur la verticale. Les équations résolues sont celles de Saint Venant et le modèle est de type ADI. Les données nécessaires à la mise en oeuvre du modèle sont la bathymétrie et les conditions aux limites. Les données bathymétrique employées proviennent de cartes marines du SHOM. Le travail le plus important a consisté à trouver des conditions aux limites les plus réalistes possibles.

Aux limites du modèle, la circulation à grande échelle a été simulée de manière très simplifiée faute de données récentes et assez nombreuses. Le niveau moyen a été incliné de telle sorte que le courant induit soit du même ordre de grandeur que le courant mesuré, soit environ 1 noeud en surface. Les variations de niveau induites par la marée ont été prescrites aux limites ouvertes à partir de données issues d'un atlas mondial (Schwidorsky, 1981). Un vent de 6 m/s de nord est constant en force et en direction a été imposé. La maille du modèle est de 750 mètres.

La figure 14 présente un champ de courant calculé par le modèle global.

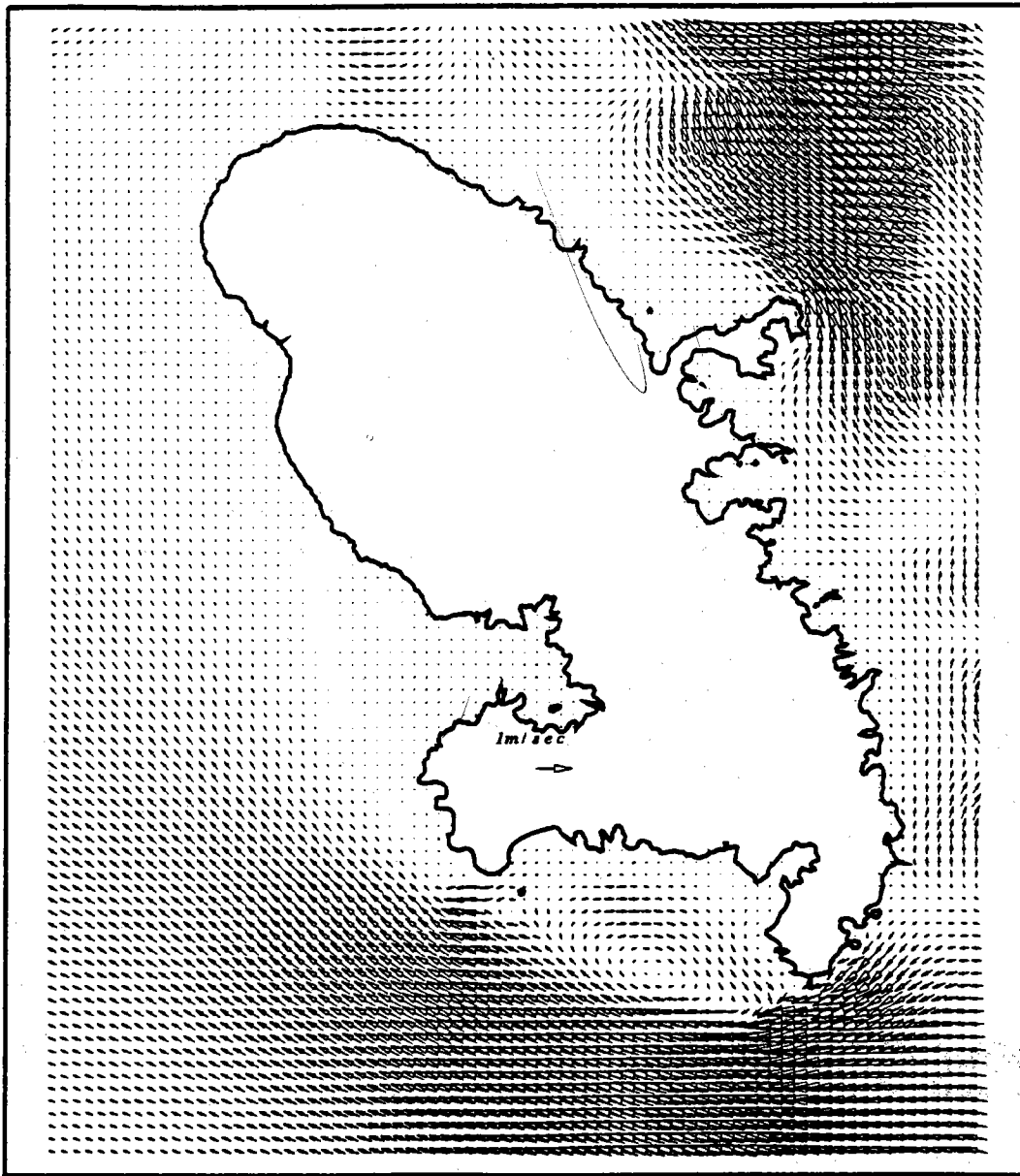


Figure 14 : Champs de courant calculé par le modèle global (1 point sur 4)

Les principaux résultats du modèle peuvent être résumés ainsi.

L'influence de la circulation à grande échelle s'exerce principalement à l'est et au sud de l'île mais n'a qu'un effet négligeable le long de la côte ouest. Par contre, les courants sont assez importants sur la façade Est de l'île, mais ils doivent donc être considérés avec précaution faute de validation par la mesure.

Les oscillations de la surface sous l'effet de la marée sont correctement reproduites mais les courants calculés apparaissent plus faibles d'un facteur deux que les courants mesurés. Ces écarts entre modèle et mesures sont assez inhabituels pour les phénomènes de marée et

traduisent sans doute le fait que l'une des hypothèses de base n'est pas satisfaite. Dans l'état actuel de nos investigations il semble que ces problèmes puissent s'expliquer par le fait que la couche d'eau a été considérée comme homogène de la surface au fond, ce qui ne correspond pas à la réalité. Il est probable que la stratification thermique crée des courants baroclines qui se superposent aux courants barotropes. La prise en compte de la stratification thermique et de la dynamique induite fait actuellement l'objet de travaux théoriques assez complexes (Haidvogel *et al.*, 1993) qui dépassent très largement les objectifs de cette étude. On peut d'ailleurs noter que de précédentes études des courants de marée dans les Caraïbes ont déjà observé l'importance surprenante de ceux-ci par rapport à la faiblesse de l'amplitude. La résolution de ce problème passera sans doute par l'utilisation ultérieure d'un modèle tridimensionnel global.

Le vent crée des courants moyens assez faibles et des variations du niveau moyen lié à des mouvements d'afflux ou de reflux d'eau à la côte.

3.4. Le Modèle de détail

Le modèle utilisé pour une description fine des courants dans la baie de Fort de France est tridimensionnel. Il calcule les courants dans les 3 dimensions à partir des équations de Navier Stokes. Le schéma numérique et la méthode d'intégration sont décrits en détail dans une publication récente (Lazure et Salomon, 1991)

Les conditions aux limites ouvertes proviennent des résultats du modèle global. Comme pour le modèle précédent, un vent moyen de NE de 6 m/s a été prescrit. La maille horizontale du modèle est de 125 mètres et dix niveaux également répartis sur la verticale ont été utilisés.

Les courants calculés en surface et au fond sont présentés sur la figure 15. La comparaison avec les mesures présentées figure 12 montre un excellent accord et valide en partie les résultats du modèle. La résolution spatiale fine permet de mettre en évidence des structures courantologiques de faible extension. On peut notamment remarquer l'influence de la bathymétrie sur la force des courants de surface. Lorsque la profondeur est faible, le courant s'accélère.

Près du fond, l'influence de la bathymétrie est visible, l'entrée d'eau est guidée par la vallée sous-marine située au nord de la pointe du Bout. Cette veine se scinde ensuite en deux parties, l'une empruntant le chenal vers la Cohé du Lamentin, la seconde dirigée vers la baie de Genipa.

Par continuité, il s'établit dans le fond de la baie des mouvements verticaux ascendants.

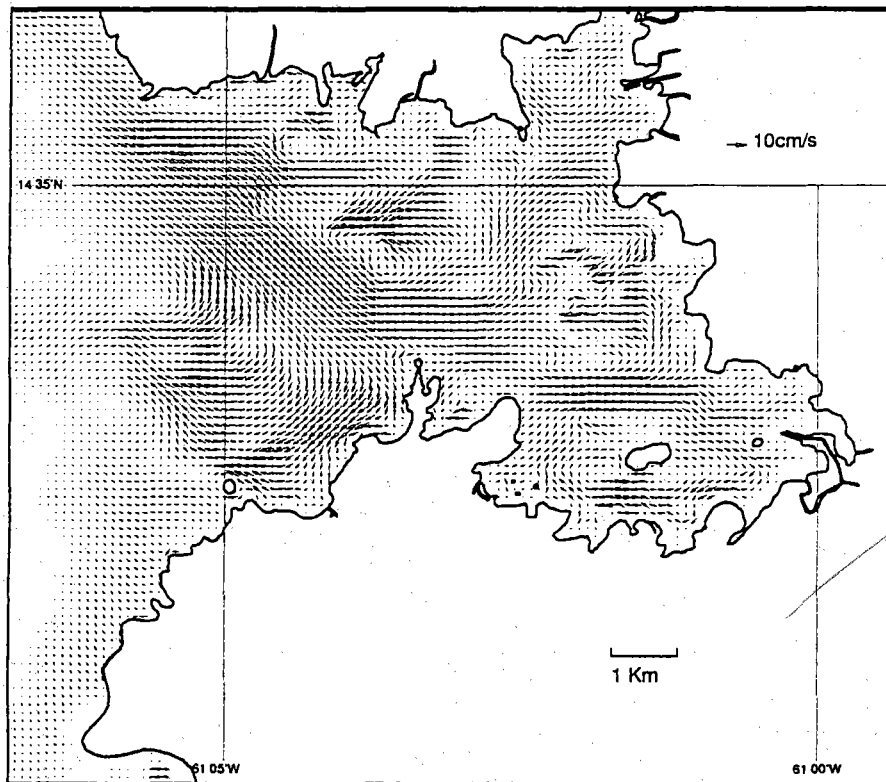
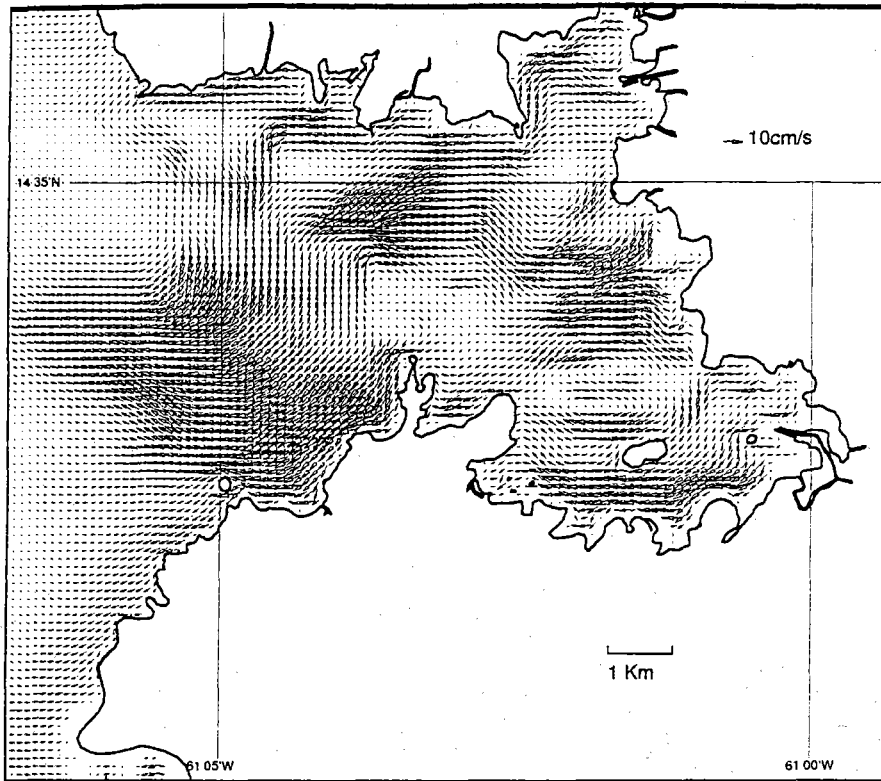


Figure 15 : champs de courant en surface (haut) et au fond (bas)

3.5. Application

La connaissance de la dynamique permet de calculer le transport et le mélange d'une substance dissoute en mer. L'équation régissant ces phénomènes est celle de la conservation de la masse, elle est résolue en même temps que le calcul des courants.

Les données nécessaires à ces calculs sont les flux de matières apportées à la mer et éventuellement les taux de décroissance des éléments dissous lorsque ceux-ci ne sont pas conservatifs.

Une application de ce modèle au devenir des bactéries dans la baie de Fort de France a été effectuée. Le taux de décroissance des bactéries en mer (T_{90}) a été mesuré à 3 heures le jour et 20 heures la nuit. Les principaux rejets ont été localisés, ils sont figurés par des flèches sur la figure 16 et sont en majeure partie concentrés sur la côte nord de la baie. Les activités touristiques intenses sur la Pointe du Bout représentent également une source de bactéries. Pour chacun de ces rejets, le flux de coliformes fécaux a été estimé à 10^9 CF/s. On a enfin inclus dans la simulation, le flux de bactérie prévu ($1.7 \cdot 10^9$ CF/s) pour la nouvelle station d'épuration située entre la pointe du Bout et l'Anse à l'Ane.

Au bout de 2 jours de simulation pour un vent moyen de 6 m/s de NE, les résultats ont atteint un état stationnaire dépendant uniquement de l'heure de la journée (fig.16)

Les eaux de la baie apparaissent bien mélangées et le maximum de contamination se situe le matin car la quantité de bactéries rejetée est constante alors que la mortalité baisse dans la nuit. A mesure que le jour progresse, les faibles T_{90} réduisent considérablement les concentrations dans la baie et peu après midi, un équilibre est atteint jusqu'au coucher du soleil. Durant la nuit, le T_{90} augmente et provoque ainsi une augmentation de la taille des panaches.

Une telle simulation comporte bien sûr de nombreuses approximations. Cependant, les quelques mesures effectuées dans la baie confirment en partie les résultats du modèle. Il apparaît en effet que le centre de la baie reste peu atteint, que les bactéries se concentrent sur une bande côtière collée à la côte nord, que le panache créé par le rejet de la pointe du Bout s'oriente vers le nord.

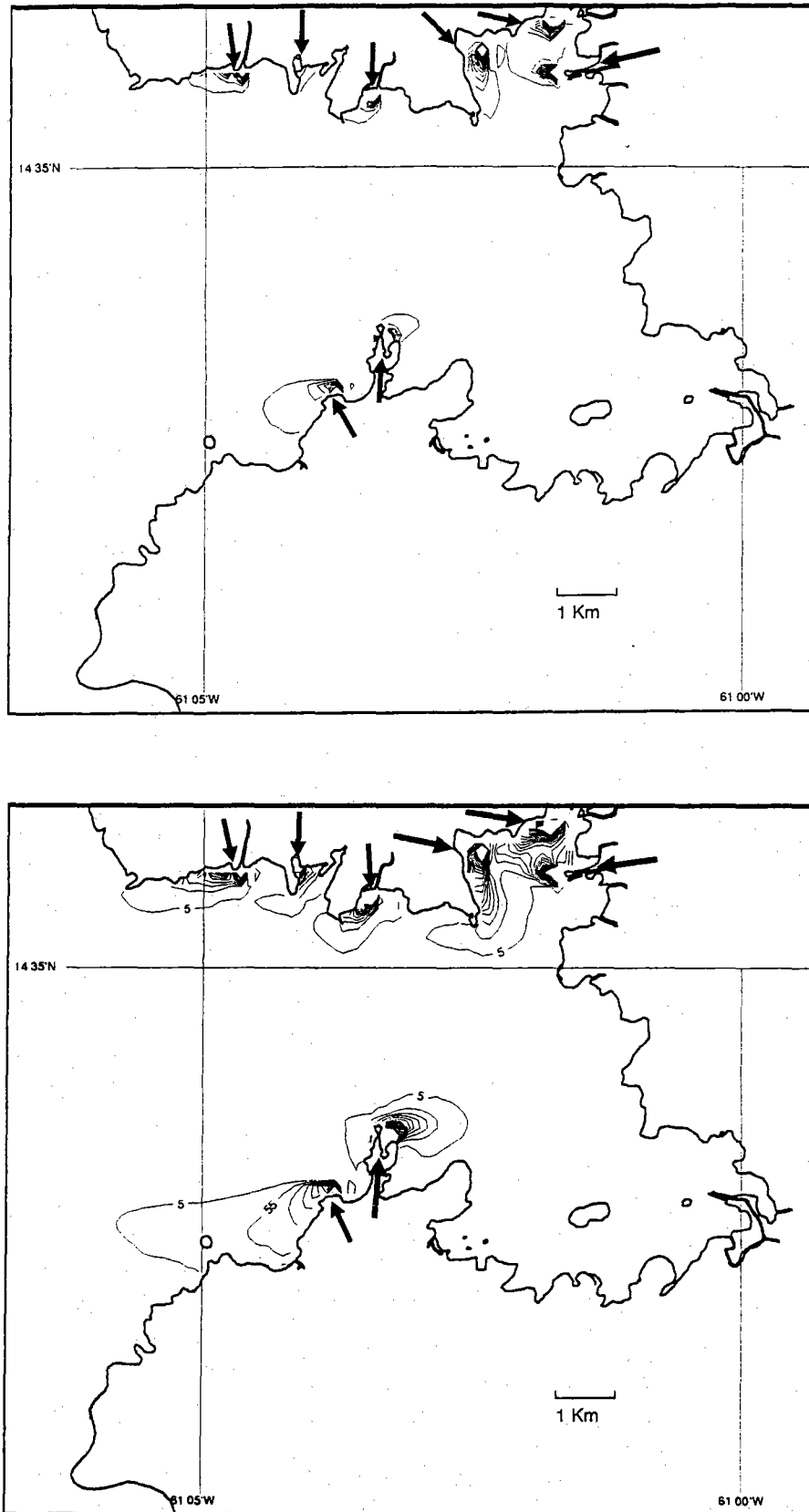


Figure 16 : Concentration en bactérie par 100 ml ($\log(\text{CF})/100\text{ml}$) en milieu de journée (haut) et le matin (bas). L'incrément des isolignes est de 50 bactéries par 100 ml.

IV - CONCLUSION

Cette étude, réalisée sur la baie de Fort de France nous a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs qui peuvent être importants dans un contexte d'aménagement touristique de cette région.

Tout d'abord en ce qui concerne la qualité bactériologique des eaux de rivières et des rejets, les résultats sur une longue durée (suivi annuel) ou des mesures ponctuelles mettent en évidence, pour les trois quart des points analysés, une mauvaise qualité bactériologique : ceci est dû à différents facteurs comme le manque de structure d'assainissement dans la ville de Fort de France (certains quartiers rejettent directement dans les rivières, dans la rivière Bouillé par exemple) ou le dimensionnement insuffisant des structures existantes (sud de la baie). Des efforts sont actuellement faits par le Département pour pallier à cet état de chose (secteur de l'île du Bout).

Outre la contamination fécale importante nous avons mis en évidence la présence de pathogènes vrais tels que le virus de l'hépatite A et le rotavirus dans plus de 50 % des échantillons d'une campagne de prélèvements. Le rotavirus, principal agent de diarrhée sévère chez l'enfant, a été mis en évidence dans certains échantillons ; alors que les cas d'épidémie à rotavirus n'apparaissent en Europe qu'en hiver, dans les îles Caraïbes, des cas sont reportés toute l'année. La prévalence de séropositivité pour le virus de l'hépatite A observée en Martinique, comme au Venezuela (Pujol, 1990) peut être liée au niveau socio-économique de ces régions, alors qu'en Europe on note un très net déclin de la séropositivité.

L'impact de ces rejets sur la qualité des eaux a pu être observé par l'intermédiaire des études de physique (modélisation) et des expérimentations sur la survie des coliformes fécaux dans les eaux de la Martinique.

Le modèle tridimensionnel réalisé reproduit les principaux aspects de la circulation des masses d'eau et permet une simulation de la dispersion des principaux rejets. Cependant il serait nécessaire de procéder à des mesures complémentaires (par exemple des profils verticaux de courant par mesure acoustique Doppler) pour être sûr d'une bonne calibration du modèle.

Afin d'améliorer le modèle global, il conviendrait de prendre en compte les structures de densité existantes et de tester un calcul tridimensionnel.

Les nombreuses incertitudes dans la modélisation de l'ensemble des mécanismes nécessitent l'acquisition de mesures longues durées sur différents points du littoral. Pour l'instant, un degré de confiance raisonnable peut être donné dans une étude locale d'une zone semi-fermée apparemment à l'abri de l'influence des circulations à grande échelle, ce qui est le cas de la baie de Fort de France.

L'étude des temps de mortalité des bactéries fécales dispersées dans la baie a donné lieu à de nombreuses expérimentations sur trois sites particuliers et dans diverses conditions d'ensoleillement. Ces temps se sont avérés plus courts en Martinique qu'en Europe et en particulier la nuit et par temps couvert ; vraisemblablement les conditions locales telles que la qualité du rayonnement solaire, l'oligotrophie du milieu, la température... doivent être responsables d'une telle différence. Cependant bien des limites existent à cette étude, ainsi certains auteurs observent que la lumière solaire provoque chez les bactéries l'apparition de cellules dites viables non cultivables. Ces bactéries "stressées" resteraient présentes dans l'eau,

cellules dites viables non cultivables. Ces bactéries "stressées" resteraient présentes dans l'eau, le sédiment et les coquillages avec des activités métaboliques très ralenties. Leur devenir et surtout le maintien de leur pouvoir pathogène est inconnu. Une autre limite à cette étude est due au fait que l'on connaît peu de choses sur le devenir des virus dans l'environnement, sinon que leur comportement est très différent de celui des bactéries fécales (meilleure résistance du fait de leur inertie en milieu extérieur). Seule une étude épidémiologique pourrait fournir des informations sur l'impact réel des microorganismes pathogènes déchargés dans les eaux côtières sur la population locale ou sur les touristes en vacances dans cette région.



P.S. : les références bibliographiques citées dans le texte sont présentées en annexe III et IV.

ANNEXE I
LES RIVIERES

BAIE DE FORT DE FRANCE

Résultats physico-chimiques et bactériologiques des points de prélèvements pour l'étude des flux bactériens (prélèvements du laboratoire Départemental d'Hygiène de Fort de France).

Légende des tableaux

Resis : résistivité à 20 °C en Ω hm/cm.
Chloru : dosage des chlorures en mg/l
MES : matières en suspension en mg/l
CT : coliformes thermotolérants en Nb/100 ml
SF : streptocoques fécaux en Nb/100 ml
LCT : Log_{10} CT
LSF : Log_{10} ST

Légende des figures

COL : Coliformes thermotolérants
STR : Streptocoques fécaux

1) Schoelcher (Embouchure rivière case navire au droit du centre nautique)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 101 | 10000 | 342 | 2204 | 1238 | 3.35 | 3.10 |
| 01/07/92 | 95 | 10000 | 317 | 296800 | 46690 | 5.48 | 4.67 |
| 12/08/92 | 96 | 11600 | 444 | 3200 | 4093 | 3.51 | 3.62 |
| 21/09/92 | 3583 | 70 | 40 | 14440 | 10670 | 4.16 | 4.03 |
| 14/10/92 | 1048 | 7000 | 14 | 24680 | 679 | 4.40 | 2.84 |
| 18/11/92 | 88 | 60000 | 40 | 11600 | 185 | 4.07 | 2.27 |
| 03/12/92 | 6074 | 18 | 19 | 20270 | 4093 | 4.31 | 3.62 |
| 13/05/93 | 4456 | 47 | 90 | 11000 | 8424 | 4.04 | 1.93 |

2) Pont sur la Ravine

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 6074 | 21 | 40 | 5368 | 1576 | 3.73 | 3.20 |
| 01/07/92 | 5506 | 20 | 4 | 7231 | 3200 | 3.86 | 3.51 |
| 12/08/92 | 5943 | 25 | 46 | 5368 | 1714 | 3.73 | 3.24 |
| 21/09/92 | 5287 | 40 | 30 | 11600 | 1170 | 4.07 | 3.07 |
| 14/10/92 | 5331 | 1000 | 19 | 6300 | 1170 | 3.80 | 3.07 |
| 18/11/92 | 5375 | 10 | 29 | 13419 | 3860 | 4.13 | 3.59 |
| 03/12/92 | 6686 | 18 | 35 | 29680 | 4093 | 4.48 | 3.62 |
| 08/03/93 | 7225 | | 29 | 1750 | 828 | 3.24 | 2.92 |
| 13/05/93 | 8021 | 17 | 26 | 106700 | 32000 | 5.03 | 4.51 |

3) Pointe Simon

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|---------|-------|------|------|
| 01/07/92 | 88.2 | 13000 | 577 | 24680 | 11454 | 4.40 | 4.06 |
| 12/08/92 | 112.0 | 7000 | 236 | 67600 | 12320 | 4.84 | 4.10 |
| 21/09/92 | 148.0 | 8000 | 140 | 1145400 | 48400 | 6.07 | 4.69 |
| 14/10/92 | 105.0 | 12000 | 23 | 320000 | 20270 | 5.51 | 4.31 |
| 18/11/92 | 90.0 | 15000 | 38 | 3110000 | 24800 | 6.50 | 4.40 |
| 03/12/92 | 135.0 | 4000 | 172 | 116000 | 28730 | 5.07 | 4.46 |
| 13/05/93 | 114.0 | 5200 | 158 | 311000 | 84240 | 5.49 | 4.93 |

4) Pointe des Nègres

| DATE | RESIST | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|--------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 1879.0 | 590 | 50 | 2480 | 7920 | 3.40 | 3.90 |
| 01/07/92 | 87.4 | 13500 | 377 | 40930 | 28730 | 4.62 | 4.46 |
| 12/08/92 | 2709.0 | 44 | 39 | 20270 | 2480 | 4.31 | 3.40 |
| 21/09/92 | 1879.0 | 14000 | 70 | 9170 | 6217 | 3.97 | 3.80 |
| 14/10/92 | 2490.0 | 600 | 15 | 180 | 1067 | 2.26 | 3.03 |
| 18/11/92 | 2578.0 | 30 | 42 | 58 | 2873 | 1.77 | 3.46 |
| 03/12/92 | 3146.0 | 20 | 117 | 248 | 6217 | 2.40 | 3.80 |
| 08/03/93 | 986.0 | | 406 | 20090 | 3216 | 4.30 | 3.51 |
| 13/05/93 | 3620.0 | 45 | 20 | 172400 | 56000 | 5.24 | 4.75 |

5) Pont de l'Hermitage (rivière Madame)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|---------|--------|------|------|
| 13/11/91 | 306 | 900 | 88 | 87900 | 27070 | 4.94 | 4.43 |
| 10/12/91 | 2709 | 57 | 29 | 48400 | 9817 | 4.69 | 4.00 |
| 09/01/92 | 1923 | 125 | 15 | 409300 | 15760 | 5.62 | 4.20 |
| 05/02/92 | 1626 | 140 | 70 | 39900 | 27070 | 4.61 | 4.44 |
| 11/03/92 | 93 | 7500 | 328 | 116000 | 10670 | 5.07 | 4.03 |
| 10/04/92 | 140 | 3500 | 118 | 92000 | 4093 | 4.97 | 3.62 |
| 14/05/92 | 2447 | 86 | 55 | 115100 | 17140 | 5.07 | 4.24 |
| 09/06/92 | 101 | 9800 | 372 | 20090 | 2480 | 4.31 | 3.40 |
| 01/07/92 | 1171 | 190 | 236 | 92000 | 12380 | 4.97 | 4.10 |
| 12/08/92 | 2272 | 72 | 31 | 723100 | 321600 | 5.87 | 5.51 |
| 21/09/92 | 4195 | 52 | 50 | 46690 | 10670 | 4.67 | 4.03 |
| 14/10/92 | 3102 | 700 | 14 | 560000 | 40930 | 5.75 | 4.62 |
| 18/11/92 | 3146 | 40 | 6 | 92000 | 12380 | 4.97 | 4.10 |
| 03/12/92 | 4457 | 20 | 55 | 24680 | 7231 | 4.40 | 3.86 |
| 08/03/93 | 9816 | | 402 | 18000 | 4669 | 4.26 | 3.67 |
| 13/05/93 | 3119 | 50 | 27 | 2204000 | 398000 | 6.34 | 6.99 |

6) Ravine Bouille (au niveau de France-Antille)

| DATE | RESIST | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|--------|--------|-----|----------|---------|------|------|
| 13/11/91 | 2185.0 | 70 | 123 | 621700 | 46690 | 5.79 | 4.67 |
| 10/12/91 | 2622.0 | 48 | 29 | 101500 | 13530 | 5.01 | 4.14 |
| 09/01/92 | 2141.0 | 79 | 29 | 653000 | 56300 | 5.82 | 4.76 |
| 05/02/92 | 1879.0 | 82 | 5 | 621700 | 175000 | 5.80 | 5.25 |
| 11/03/92 | 80.5 | 11000 | 509 | 15960000 | 28730 | 7.21 | 4.46 |
| 10/04/92 | 2447.0 | 120 | 12 | 180000 | 116000 | 5.26 | 5.07 |
| 14/05/92 | 2535.0 | 51 | 77 | 325600 | 116000 | 5.52 | 5.07 |
| 09/06/92 | 87.0 | 17000 | 694 | 296800 | 39900 | 5.48 | 5.61 |
| 01/07/92 | 647.0 | 60000 | 50 | 527600 | 257500 | 5.73 | 5.42 |
| 12/08/92 | 3102.0 | 53 | 39 | 220400 | 25750 | 5.35 | 4.42 |
| 21/09/92 | 2141.0 | 82 | 17 | 241000 | 29680 | 5.39 | 4.48 |
| 14/10/92 | 2490.0 | 700 | 7 | 399000 | 101500 | 5.61 | 5.01 |
| 18/11/92 | 257.0 | 1200 | 44 | 320000 | 24680 | 5.51 | 4.40 |
| 03/12/92 | 205.0 | 2000 | 57 | 2027000 | 84240 | 6.31 | 4.93 |
| 08/03/93 | 111.0 | | 315 | 17140000 | 2027000 | 7.23 | 6.31 |
| 13/05/93 | 2840.0 | 575 | 28 | 2250000 | 106700 | 6.35 | 5.03 |

7) Rivière Monsieur (Pont St. Christophe - entrée de Dillon)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|---------|--------|------|------|
| 13/11/91 | 5244 | 25 | 24 | 204900 | 53700 | 5.31 | 4.73 |
| 10/12/91 | 6380 | 25 | 110 | 40930 | 11454 | 4.62 | 4.06 |
| 09/01/92 | 4719 | 29 | 26 | 117000 | 40930 | 5.07 | 4.62 |
| 05/02/92 | 3540 | 43 | 81 | 1750000 | 144000 | 6.25 | 5.16 |
| 11/03/92 | 1880 | 180 | 107 | 5880000 | 270700 | 6.78 | 5.44 |
| 10/04/92 | 3977 | 38 | 72 | 842400 | 62170 | 5.93 | 4.80 |
| 14/05/92 | 4545 | 35 | 43 | 1238000 | 106700 | 6.10 | 5.03 |
| 09/06/92 | 98 | 10200 | 396 | 48400 | 2468 | 4.69 | 3.40 |
| 01/07/92 | 3060 | 6 | 64 | 2027000 | 116000 | 6.31 | 5.07 |
| 12/08/92 | 6118 | 28 | 30 | 4680 | 599 | 3.67 | 2.78 |
| 21/09/92 | 5681 | 38 | 20 | 123800 | 13419 | 5.10 | 4.13 |
| 14/10/92 | 4719 | 700 | 19 | 270700 | 40930 | 5.44 | 4.62 |
| 18/11/92 | 4763 | 30 | 39 | 259200 | 36160 | 5.42 | 4.56 |
| 03/12/92 | 7123 | 18 | 59 | 24100 | 8424 | 4.39 | 3.93 |
| 08/03/93 | 124 | | 88 | 48400 | 2250 | 4.68 | 3.35 |
| 13/05/93 | 8669 | 25 | 50 | 179000 | 32560 | 5.25 | 4.51 |

8) Station d'épuration de Dillon

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|------|--------|-------|------|------|
| 13/11/91 | 2578 | 33 | 16 | 24100 | 4840 | 4.38 | 3.68 |
| 10/12/91 | 2360 | 39 | 35 | 5770 | 468 | 3.77 | 2.67 |
| 09/01/92 | 2359 | 55 | 25 | 106700 | 5770 | 5.03 | 3.77 |
| 05/02/92 | 2098 | 53 | 12 | 87900 | 10150 | 4.95 | 4.01 |
| 11/03/92 | 6642 | 60 | 73 | 117000 | 11600 | 5.07 | 4.07 |
| 10/04/92 | 2360 | 82 | 10 | 67900 | 2873 | 4.84 | 3.46 |
| 14/05/92 | 2622 | 40 | 17 | 246800 | 48400 | 5.40 | 4.69 |
| 09/06/92 | 83 | 19400 | 1715 | 501 | 58 | 2.70 | 1.77 |
| 01/07/92 | 2534 | 39 | 11 | 11600 | 2480 | 4.07 | 3.40 |
| 12/08/92 | 2333 | 58 | 34 | 28730 | 6217 | 4.46 | 3.80 |
| 21/09/92 | 142 | 7000 | 165 | 46690 | 5770 | 4.67 | 3.77 |
| 14/10/92 | 778 | 10000 | 86 | 32000 | 5600 | 4.51 | 3.75 |
| 18/11/92 | 244 | 1200 | 50 | 40930 | 5600 | 4.62 | 3.75 |
| 03/12/92 | 142 | 4000 | 167 | 556000 | 53680 | 5.75 | 4.74 |
| 08/03/93 | 1683 | | 18 | 170200 | 17020 | 5.23 | 4.23 |
| 13/05/93 | 2785 | 50 | 25 | 48400 | 3860 | 4.68 | 3.59 |

9) Station d'épuration de Chateauboeuf

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|------|---------|--------|------|------|
| 13/11/91 | 2228 | 47 | 18 | 1912400 | 361600 | 6.28 | 5.56 |
| 10/12/91 | 2202 | 53 | 50 | 792000 | 46690 | 5.91 | 4.67 |
| 09/01/92 | 2141 | 67 | 5 | 1714000 | 204900 | 6.24 | 5.32 |
| 05/02/92 | 1879 | 63 | 15 | 621700 | 220400 | 5.80 | 5.35 |
| 11/03/92 | 1900 | 80 | 51 | 3110000 | 248000 | 6.50 | 5.40 |
| 10/04/92 | 1923 | 63 | 65 | 981700 | 96800 | 6.00 | 4.99 |
| 14/05/92 | 2141 | 50 | 1392 | 191240 | 138600 | 5.29 | 5.15 |
| 01/07/92 | 2447 | 52 | 0 | 32160 | 1444 | 4.51 | 3.16 |
| 12/08/92 | 3933 | 45 | 19 | 101500 | 5368 | 5.01 | 3.73 |
| 21/09/92 | 4588 | 52 | 60 | 18000 | 9817 | 4.26 | 4.00 |
| 14/10/92 | 3758 | 800 | 7 | 233300 | 25750 | 5.37 | 4.42 |
| 18/11/92 | 4282 | 30 | 12 | 84240 | 19124 | 4.93 | 4.29 |
| 03/12/92 | 5331 | 18 | 40 | 87900 | 185800 | 4.95 | 5.27 |
| 08/03/93 | 3272 | | 24 | 106700 | 6217 | 5.03 | 3.79 |
| 13/05/93 | 5013 | 29 | 57 | 8900 | 24680 | 3.95 | 4.39 |

10) Station d'épuration Acajou

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|--------|------|------|
| 09/06/92 | 2884 | 46 | 32 | 0 | 119 | 0.00 | 2.08 |
| 01/07/92 | 2490 | 64 | 4 | 23981 | 17900 | 4.38 | 4.26 |
| 14/08/92 | 1660 | 100 | 63 | 116000 | 36160 | 5.07 | 4.56 |
| 21/09/92 | 3234 | 44 | 35 | 15760 | 2410 | 4.20 | 3.39 |
| 14/10/92 | 1923 | 1500 | 63 | 106700 | 24800 | 5.03 | 4.40 |
| 18/11/92 | 3583 | 28 | 366 | 170200 | 25750 | 5.24 | 4.42 |
| 03/12/92 | 3146 | 22 | 63 | 248000 | 180000 | 5.40 | 5.26 |
| 08/03/93 | 2040 | | 37 | 38600 | 5368 | 4.59 | 3.73 |
| 13/05/93 | 2651 | 35 | 26 | 39330 | 6790 | 4.59 | 3.83 |

11) Pont d'entrée du Lamentin

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|-------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 3583 | 42 | 54 | 5276 | 3616 | 3.73 | 3.56 |
| 02/07/92 | 3408 | 48 | 880 | 32160 | 6790 | 4.51 | 3.84 |
| 14/08/92 | 2797 | 54 | 718 | 12380 | 1317 | 4.10 | 3.12 |
| 21/09/92 | 5856 | 32 | 260 | 2049 | 2049 | 3.32 | 3.32 |
| 14/10/92 | 3889 | 1600 | 353 | 12320 | 4840 | 4.10 | 3.69 |
| 18/11/92 | 5418 | 20 | 425 | 57500 | 2480 | 4.77 | 3.40 |
| 03/12/92 | 4545 | 20 | 308 | 11700 | 3216 | 4.07 | 3.51 |
| 08/03/93 | 3145 | | 60 | 20490 | 11110 | 4.31 | 4.05 |

12) Lézarde (intérieur de la zone industrielle)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 7953 | 20 | 21 | 2250 | 679 | 3.36 | 2.84 |
| 02/07/92 | 6730 | 21 | 26 | 53680 | 3256 | 4.74 | 3.52 |
| 14/08/92 | 4894 | 42 | 103 | 225000 | 32160 | 5.36 | 4.51 |
| 28/09/92 | 7603 | 7 | 50 | 9200 | 1576 | 3.97 | 3.20 |
| 29/10/92 | 5069 | 500 | 12 | 14730 | 879 | 4.17 | 2.95 |
| 27/11/92 | 6800 | 16 | 39 | 1317 | 560 | 3.12 | 2.75 |
| 15/12/92 | 6686 | 18 | 17 | 3256 | 331 | 3.52 | 2.52 |
| 09/03/93 | 7480 | | 17 | 1800 | 320 | 3.26 | 2.51 |

13) Rejet de la station d'épuration du Lamentin

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|---------|--------|------|------|
| 09/06/92 | 2054 | 80 | 39 | 180000 | 1714 | 5.26 | 3.24 |
| 02/07/92 | 1748 | 93 | 8 | 1160000 | 55600 | 6.07 | 4.75 |
| 14/08/92 | 2491 | 68 | 137 | 39900 | 2707 | 4.61 | 3.44 |
| 28/09/92 | 3933 | 62 | 50 | 18000 | 1702 | 4.26 | 3.23 |
| 29/10/92 | 952 | 5000 | 15 | 1587000 | 116000 | 6.21 | 5.07 |
| 30/11/92 | 1200 | 200 | 29 | 3256000 | 101500 | 6.52 | 5.01 |
| 15/12/92 | 2578 | 60 | 38 | 180000 | 3200 | 5.26 | 3.51 |
| 09/03/93 | 1343 | | 30 | 399000 | 19124 | 5.60 | 4.28 |

14) Canal Carrere (qui draine les eaux de l'Aéroport)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|-----|-----|------|------|
| 09/06/92 | 3146 | 39 | 11 | 0 | 248 | 0.00 | 2.40 |
| 02/07/92 | 3409 | 44 | 13 | 0 | 577 | 0.00 | 2.77 |
| 14/08/92 | 3408 | 44 | 26 | 0 | 468 | 0.00 | 2.67 |
| 28/09/92 | 4457 | 16 | 20 | 58 | 0 | 1.77 | 0.00 |
| 29/10/92 | 2884 | 500 | 55 | 11 | 4 | 1.08 | 0.70 |
| 30/11/92 | 8950 | 10 | 20 | 248 | 412 | 2.40 | 2.62 |
| 15/12/92 | 3277 | 40 | 39 | 185 | 116 | 2.27 | 2.07 |
| 09/03/93 | 2890 | | 14 | 320 | 484 | 2.51 | 2.68 |

15) Canal Ducos et rivière Pierre

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LSF | LCT |
|----------|-------|--------|-----|----------|--------|------|------|
| 09/06/92 | 77 | 15600 | 936 | 24800 | 2468 | 3.40 | 4.40 |
| 02/07/92 | 79 | 22000 | 614 | 608 | 1238 | 3.10 | 2.79 |
| 14/08/92 | 2272 | 68 | 47 | 53680000 | 399000 | 5.61 | 7.74 |
| 28/09/92 | 118 | 6000 | 200 | 7890 | 18000 | 4.26 | 3.90 |
| 29/10/92 | 3233 | 500 | 10 | 171400 | 14440 | 4.16 | 5.24 |
| 30/11/92 | 470 | 800 | 126 | 48400 | 4093 | 3.62 | 4.69 |
| 15/12/92 | 2665 | 34 | 33 | 2707000 | 361600 | 5.56 | 6.44 |
| 09/03/93 | 75 | | 725 | 1160 | 5368 | 3.73 | 3.06 |

16) Canal sortie Station Ducos

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|----------|---------|------|------|
| 09/06/92 | 2884 | 46 | 14 | 57700 | 15760 | 4.77 | 4.20 |
| 02/07/92 | 1835 | 77 | 10 | 1800000 | 159600 | 6.26 | 5.21 |
| 14/08/92 | 2159 | 49 | 40 | 35500000 | 3200000 | 7.56 | 6.51 |
| 28/09/92 | 4370 | 58 | 40 | 731 | 119 | 2.87 | 2.08 |
| 29/10/92 | 2884 | 1000 | 26 | 50 | 248 | 1.70 | 2.40 |
| 30/11/92 | 2140 | 38 | 7 | 67900 | 6217 | 4.84 | 3.80 |
| 15/12/92 | 1835 | 60 | 18 | 386000 | 56000 | 5.59 | 4.75 |
| 09/03/93 | 2252 | | 25 | 621700 | 84240 | 5.79 | 4.93 |

17) Rivière aval petit Bourg (les Coulisses)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|-------|------|------|------|
| 09/06/92 | 384 | 3000 | 46 | 1714 | 331 | 3.24 | 2.52 |
| 02/07/92 | 392 | 1200 | 59 | 2204 | 1160 | 3.35 | 3.07 |
| 14/08/92 | 2840 | 52 | 27 | 1800 | 247 | 3.26 | 2.40 |
| 28/09/92 | 2796 | 134 | 50 | 4669 | 731 | 3.67 | 2.87 |
| 29/10/92 | 1660 | 16000 | 16 | 3200 | 824 | 3.51 | 2.92 |
| 30/11/92 | 3365 | 30 | 25 | 3256 | 879 | 3.52 | 2.95 |
| 15/12/92 | 3277 | 25 | 33 | 1800 | 828 | 3.26 | 2.92 |
| 09/03/93 | 2932 | | 34 | 20270 | 412 | 4.31 | 2.61 |

18) Station d'épuration (rejet dans la rivière les coulisses)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 2141 | 91 | 7 | 24680 | 577 | 4.40 | 2.76 |
| 02/07/92 | 1573 | 84 | 1 | 399000 | 27070 | 5.61 | 4.44 |
| 14/08/92 | 92 | 9600 | 974 | 1800 | 45300 | 3.26 | 4.66 |
| 28/09/92 | 1616 | 82 | 30 | 720000 | 20270 | 5.86 | 4.31 |
| 29/10/92 | 664 | 10000 | 7 | 3616 | 59 | 3.56 | 1.77 |
| 30/11/92 | 3321 | 30 | 25 | 3256 | 1015 | 3.52 | 3.01 |
| 15/12/92 | 1966 | 60 | 17 | 39900 | 5600 | 4.61 | 3.75 |

19) Aval station les 3 Ilets (citron)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|-----------|---------|------|------|
| 09/06/92 | 244 | 2500 | 89 | 268240000 | 1145400 | 8.44 | 6.07 |
| 02/07/92 | 1093 | 120 | 70 | 3616000 | 53680 | 6.57 | 4.74 |
| 14/08/92 | 1311 | 60 | 71 | 920000 | 67900 | 5.97 | 4.84 |
| 28/09/92 | 559 | 32000 | 80 | 3933000 | 320000 | 6.60 | 5.51 |
| 29/10/92 | 952 | 11000 | 84 | 556000 | 46690 | 5.75 | 4.67 |
| 30/11/92 | 800 | 300 | 32 | 409300 | 40930 | 5.62 | 4.62 |
| 15/12/92 | 804 | 400 | 53 | 2480000 | 134190 | 6.40 | 5.13 |
| 09/03/93 | 620 | | 484 | 296800 | 114540 | 5.47 | 5.06 |

20) Rivière Pajerie (Parc des Floralties)

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|------|-----|------|------|
| 09/06/92 | 2141 | 105 | 19 | 399 | 412 | 2.60 | 2.62 |
| 02/07/92 | 1967 | 110 | 86 | 4840 | 41 | 3.69 | 1.63 |
| 14/08/92 | | | | 119 | 412 | 2.08 | 2.62 |
| 28/09/92 | 2796 | 92 | 130 | 9200 | 331 | 3.97 | 2.52 |
| 29/10/92 | 1914 | 12000 | 28 | 4660 | 1 | 3.67 | 0.30 |
| 30/11/92 | 3583 | 35 | 40 | 1160 | 501 | 3.07 | 2.70 |
| 15/12/92 | 1748 | 80 | 24 | 2707 | 0 | 3.44 | 0.00 |
| 09/03/93 | 1334 | | 80 | 255 | 879 | 2.41 | 2.94 |

21) Station d'épuration anse Mitan

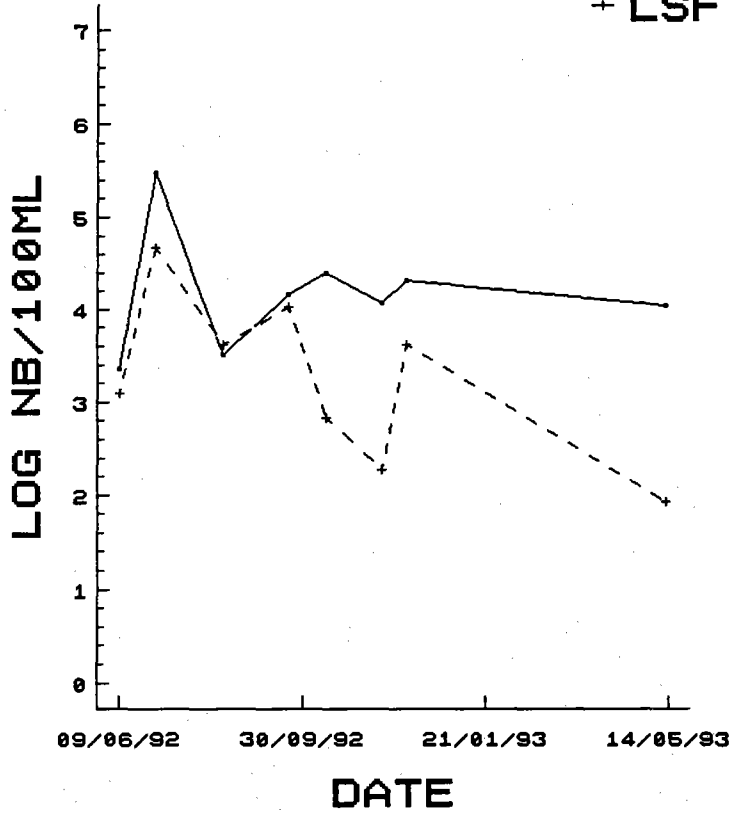
| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|--------|-------|------|------|
| 09/06/92 | 423 | 700 | 124 | 4093 | 5368 | 3.62 | 3.73 |
| 02/07/92 | 874 | 270 | 9 | 46690 | 2468 | 4.67 | 3.40 |
| 14/08/92 | 175 | 3100 | 130 | 1160 | 1800 | 3.07 | 3.26 |
| 28/09/92 | 778 | 12000 | 40 | 18000 | 1473 | 4.26 | 3.17 |
| 29/10/92 | 708 | 5000 | 513 | 170200 | 36160 | 5.24 | 4.56 |
| 30/11/92 | 890 | 200 | 8 | 239200 | 36160 | 5.38 | 4.56 |
| 15/12/92 | 1031 | 200 | 14 | 577000 | 48400 | 5.77 | 4.69 |
| 09/03/93 | 867 | | 173 | 536800 | 40930 | 5.73 | 4.61 |

22) Rejet dans le Marigot d'Anse à l'Ane

| DATE | RESIS | CHLORU | MES | CT | SF | LCT | LSF |
|----------|-------|--------|-----|---------|--------|------|------|
| 09/06/92 | 92 | 10800 | 436 | 3216 | 180 | 3.51 | 2.26 |
| 02/07/92 | 101 | 5400 | 206 | 270700 | 48400 | 5.44 | 4.69 |
| 14/08/92 | 78 | 15200 | 547 | 2250 | 4093 | 3.36 | 3.62 |
| 28/09/92 | 100 | 17000 | 400 | 320000 | 24800 | 5.51 | 4.40 |
| 29/10/92 | 89 | 16000 | 37 | 36160 | 131 | 4.56 | 2.12 |
| 30/11/92 | 262 | 1300 | 55 | 2480000 | 135300 | 6.40 | 5.14 |
| 15/12/92 | 1095 | 600 | 171 | 161400 | 17240 | 5.21 | 4.24 |
| 09/03/93 | 986 | | 179 | 48400 | 5370 | 4.68 | 3.73 |

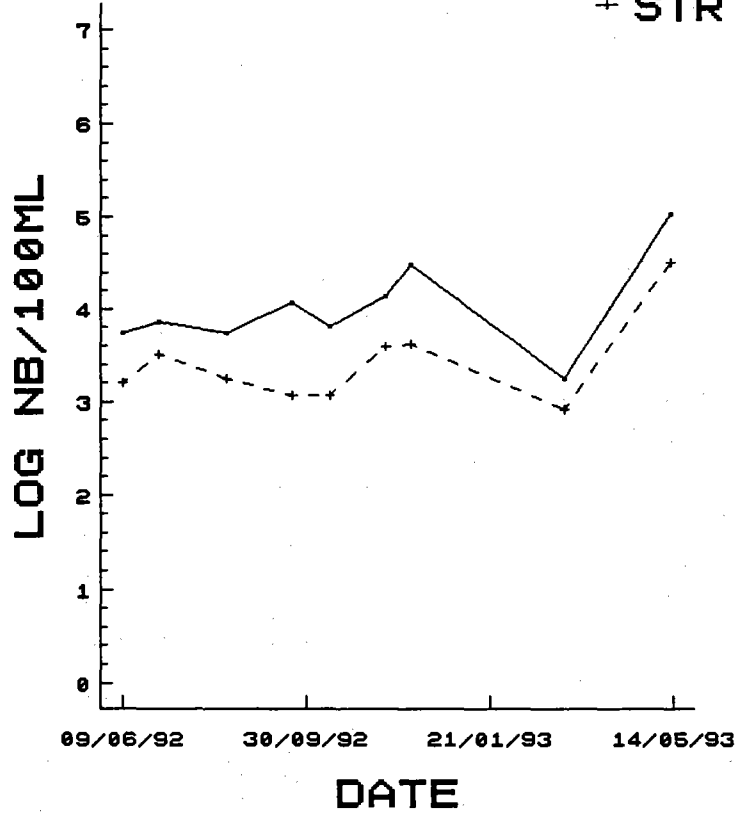
1 SCHOELCHER

- COL
+ LSF



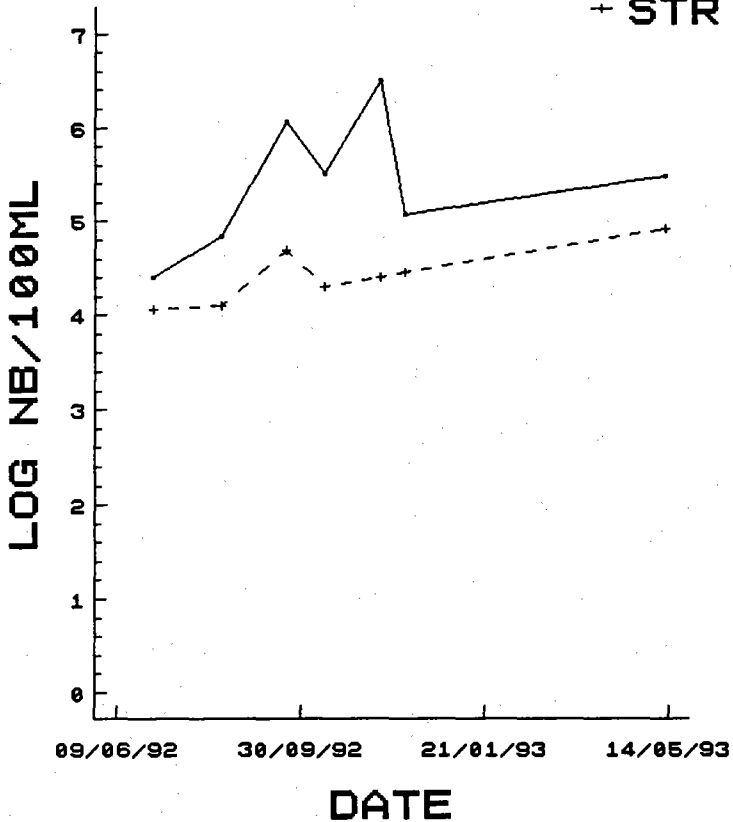
2 PONT SUR LA RAVINE

- COL
+ STR



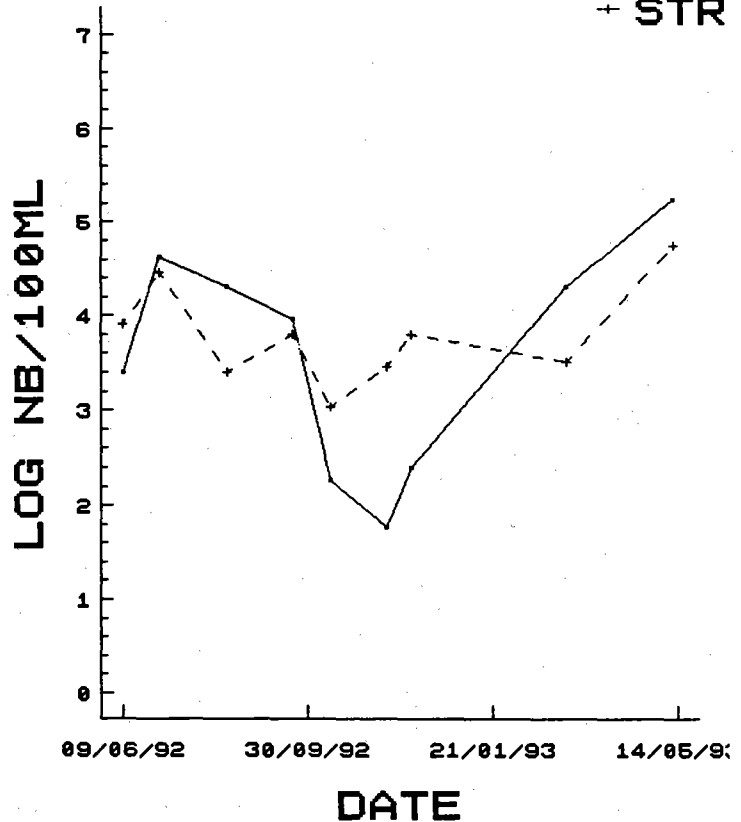
3 POINTE SIMON

- COL
+ STR

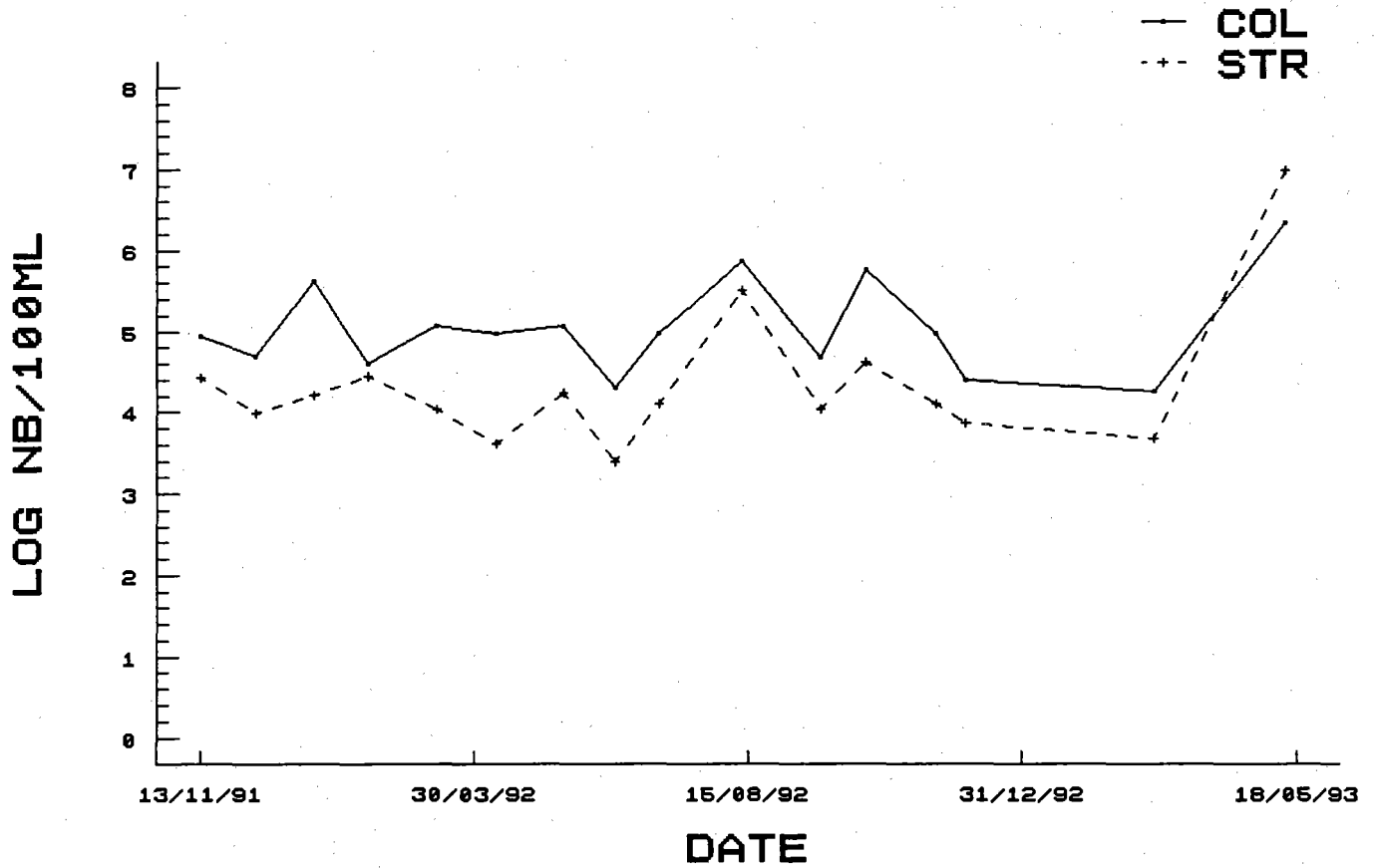


4 POINTE DES NEGRES

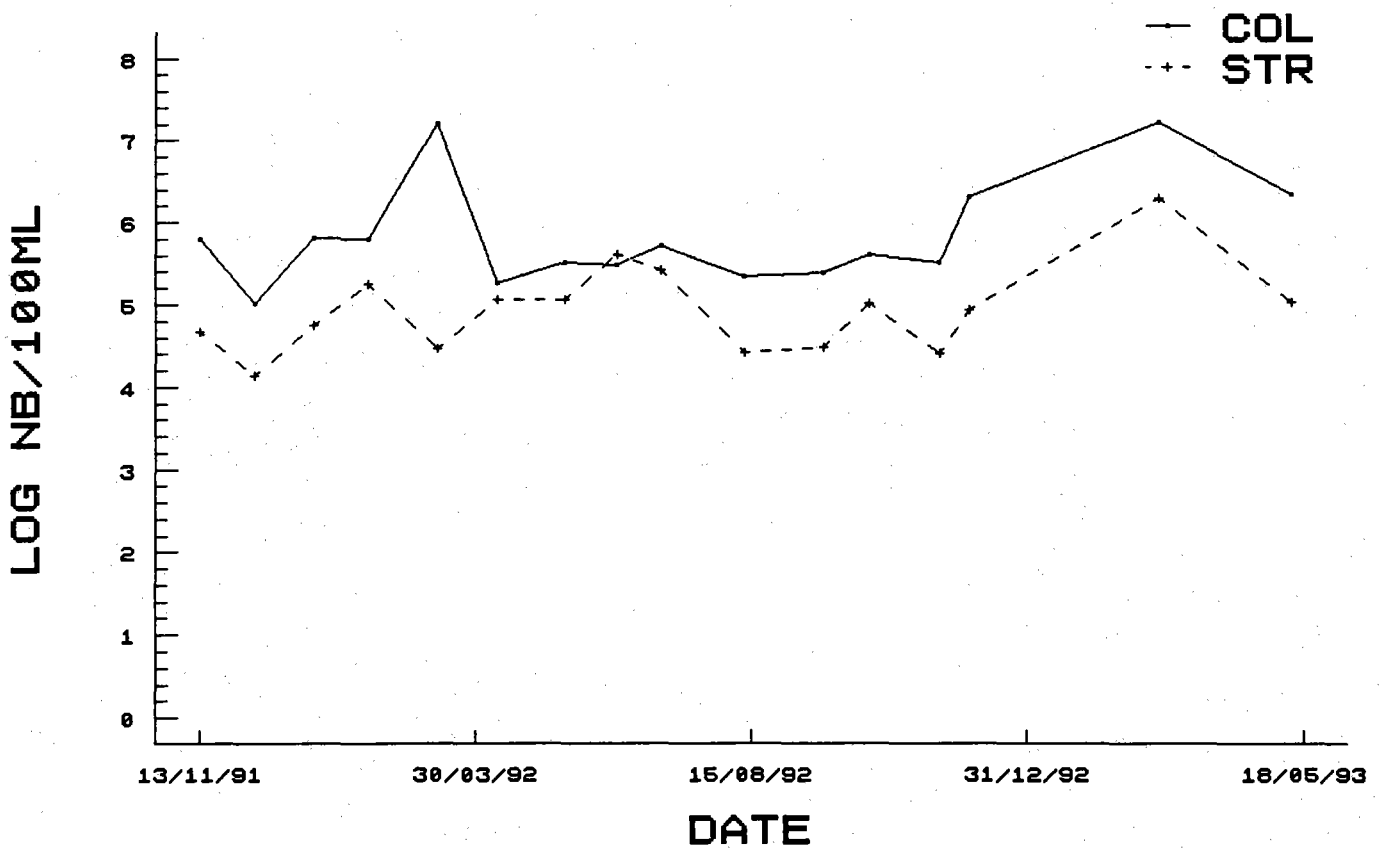
- COL
+ STR



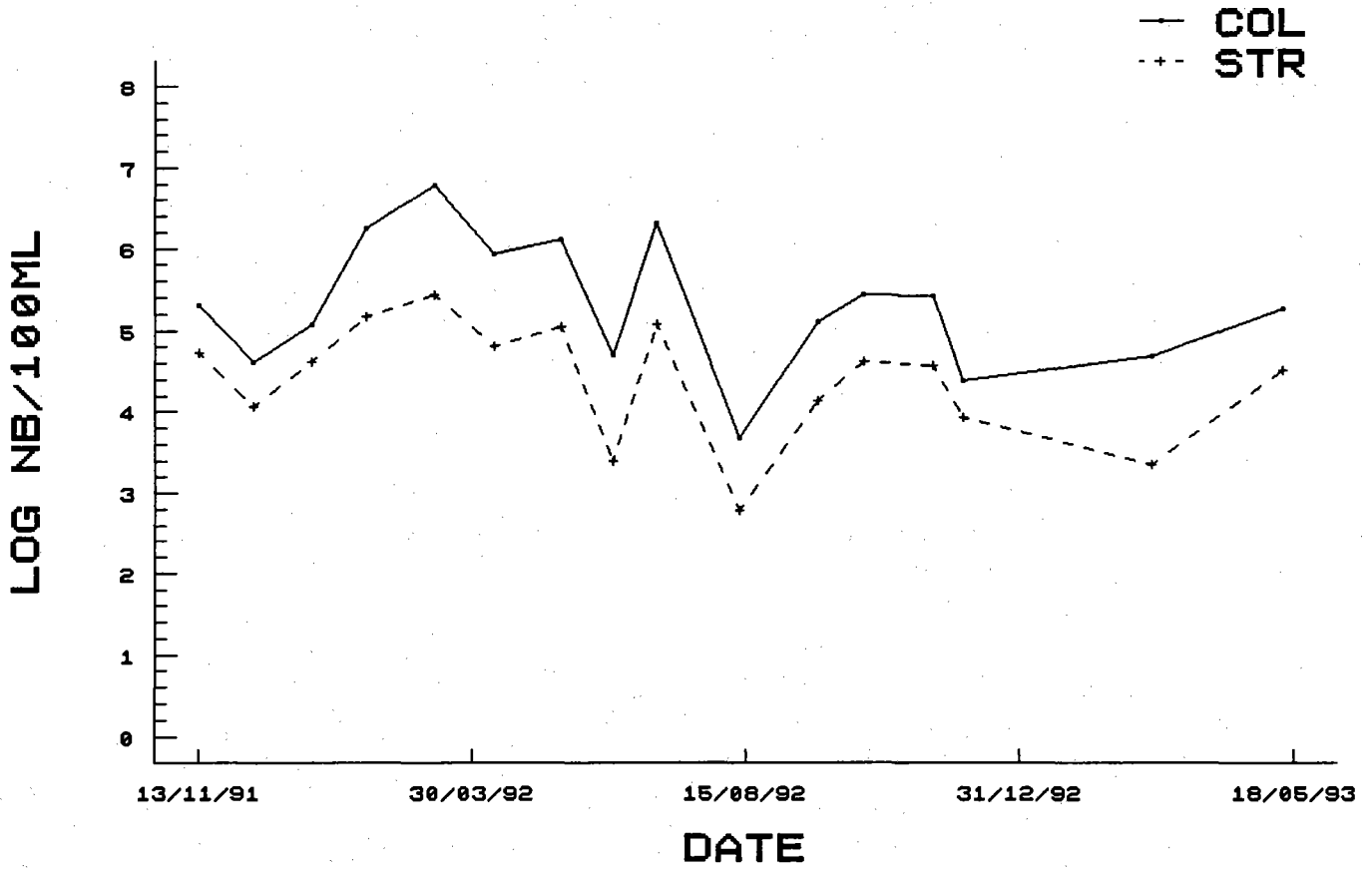
5 PONT DE L'HERMITAGE



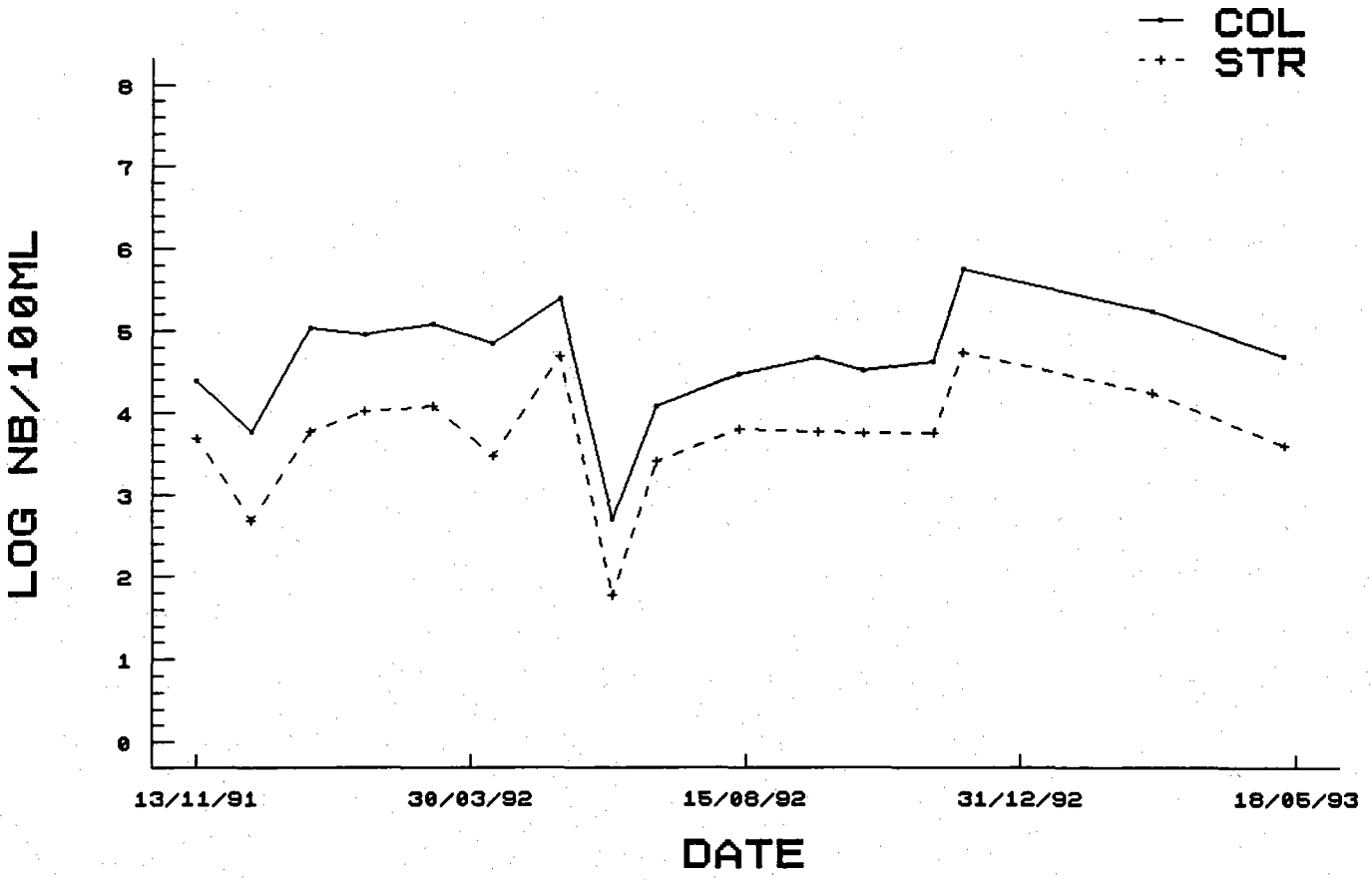
6 RAVINE BOUILLE



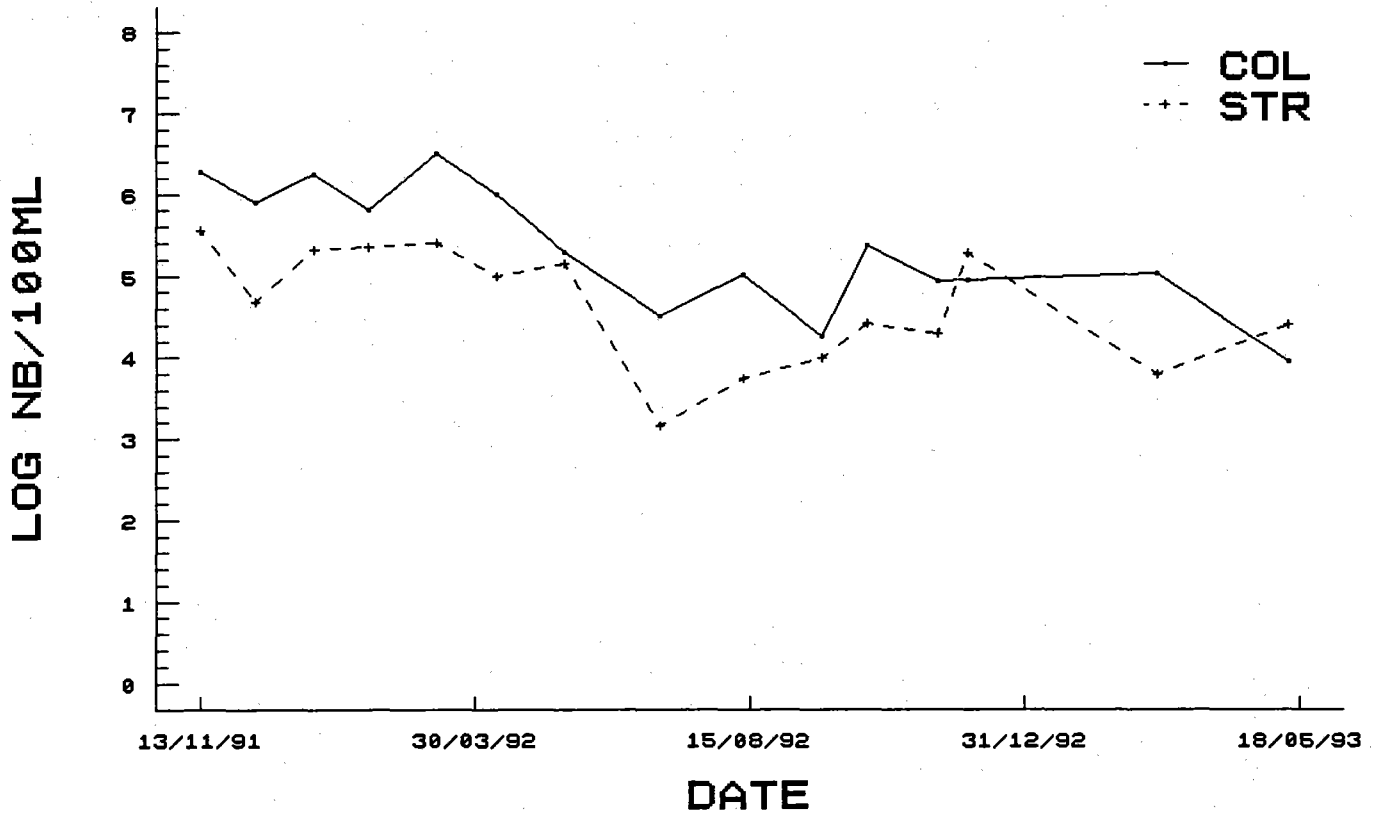
7 RIVIERE MONSIEUR



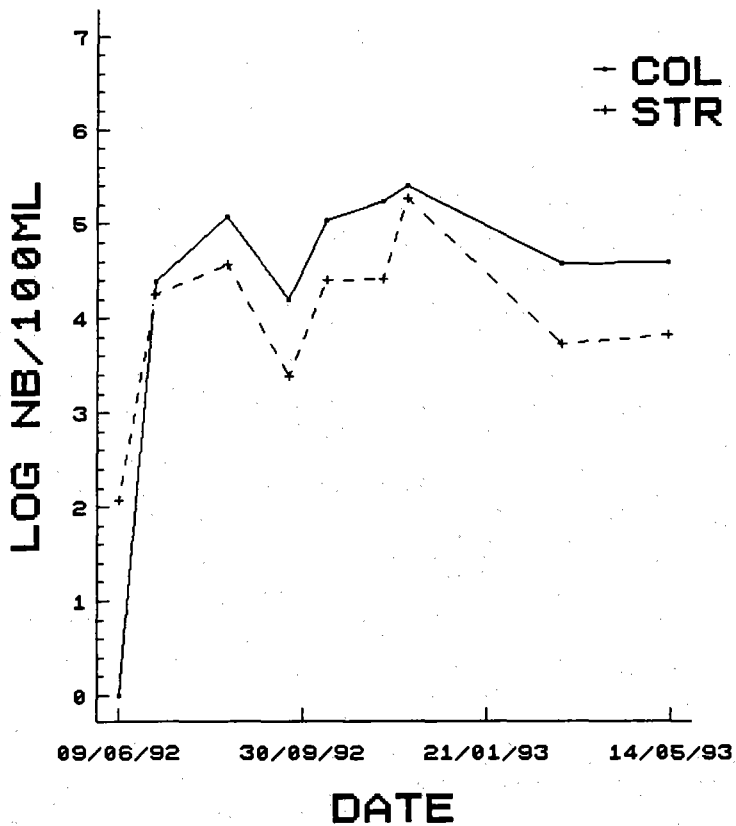
8 STATION D'EPURATION DE DILLON



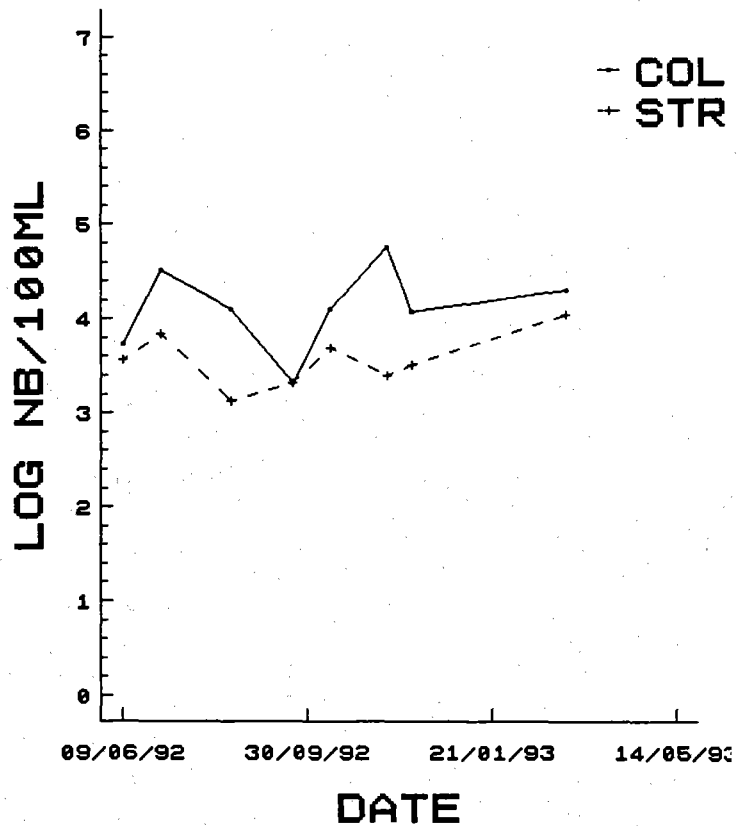
9 STATION D'EPURATION DE CHATEAUBOEUF



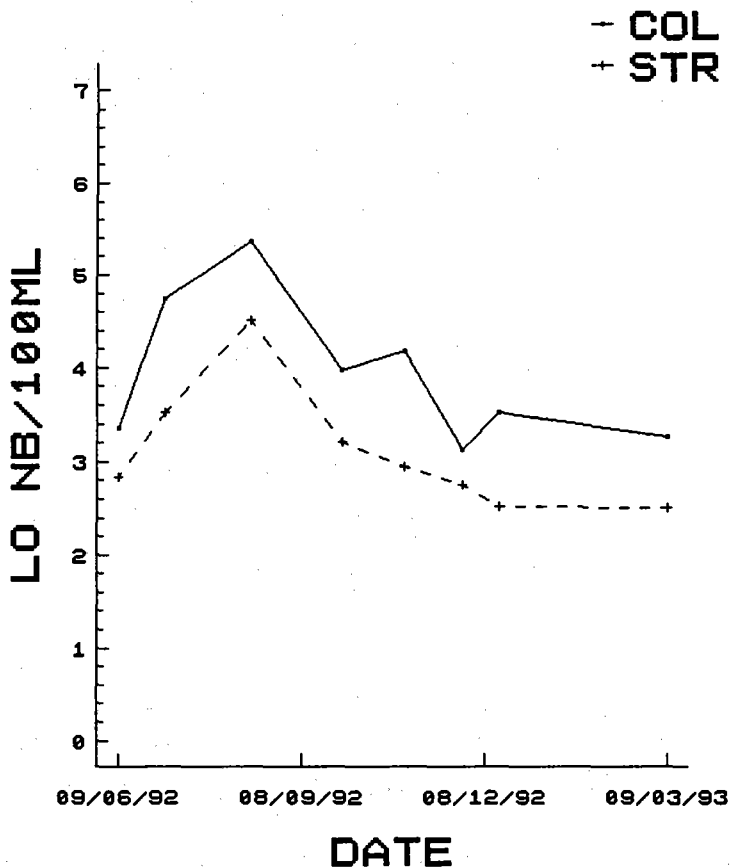
10 STATION EPURATION ACAJOU



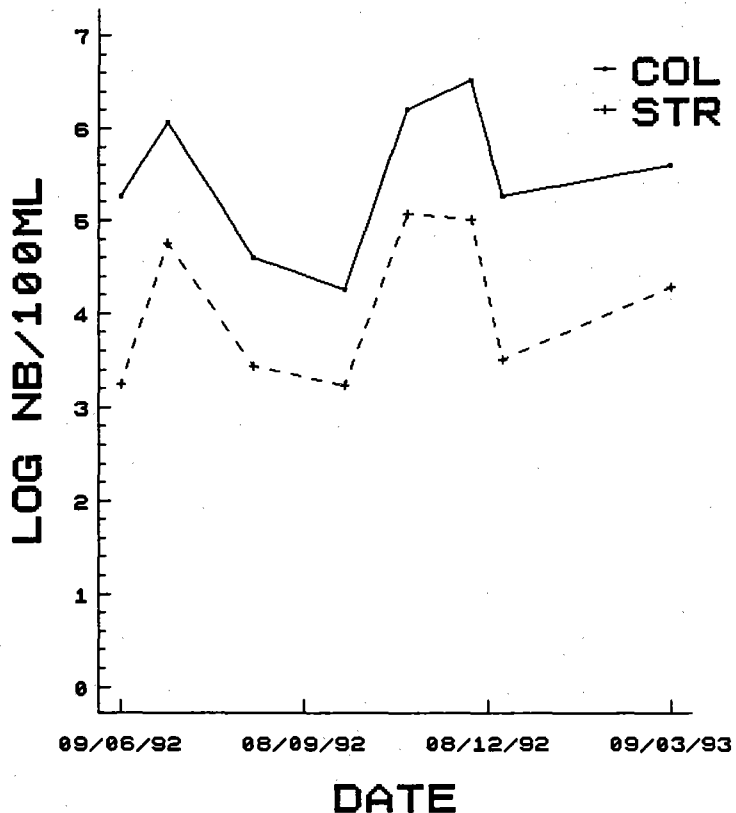
11 PONT D'ENTREE DU LAMENTIN



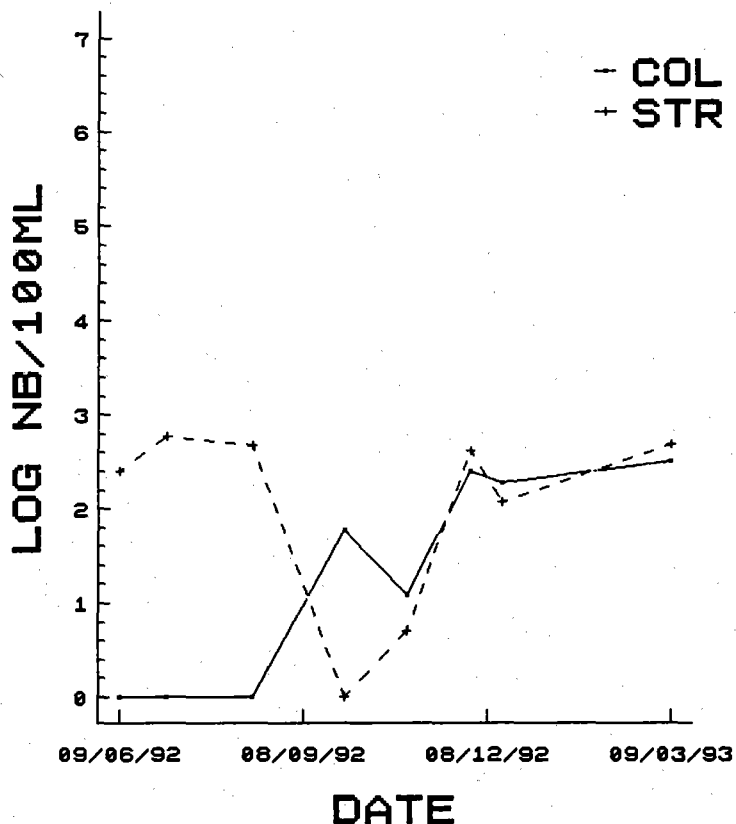
12 LEZARDE



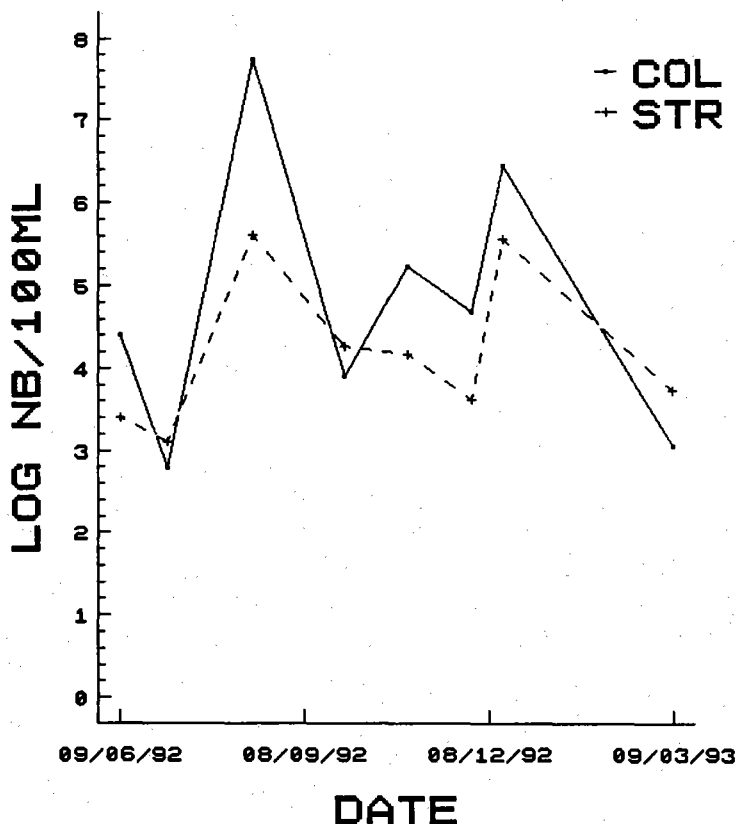
13 REJET STATION D'EPURATION LAMENTIN



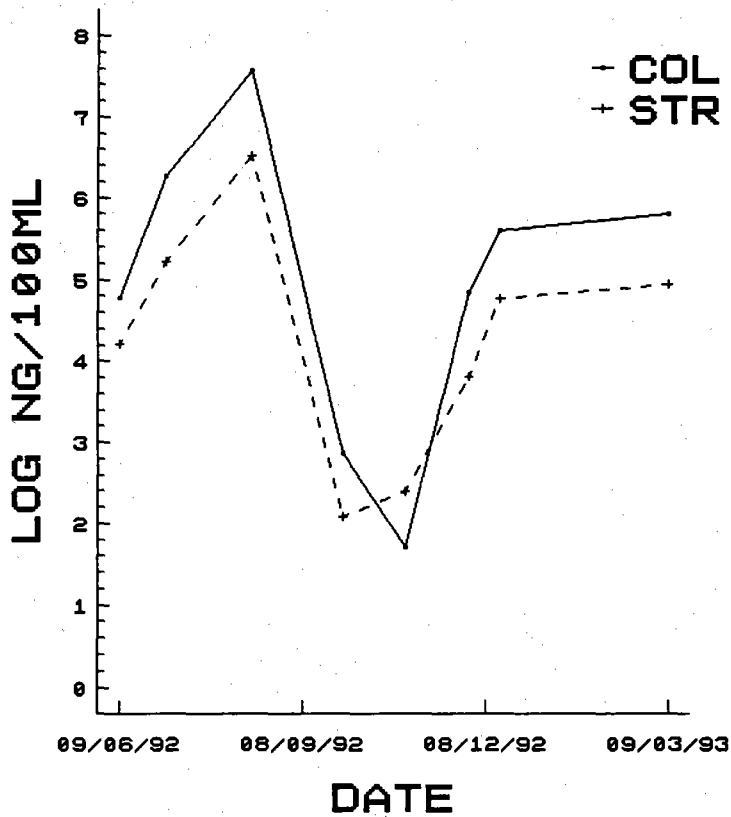
14 CANAL CARRERE



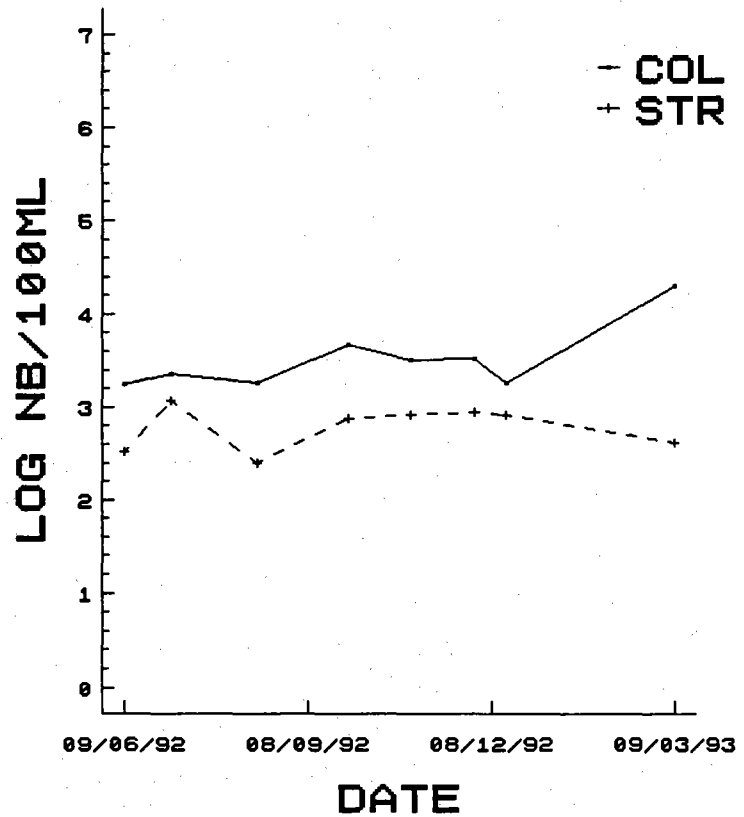
15 CANAL DUCOS RIVIERE PIERRE



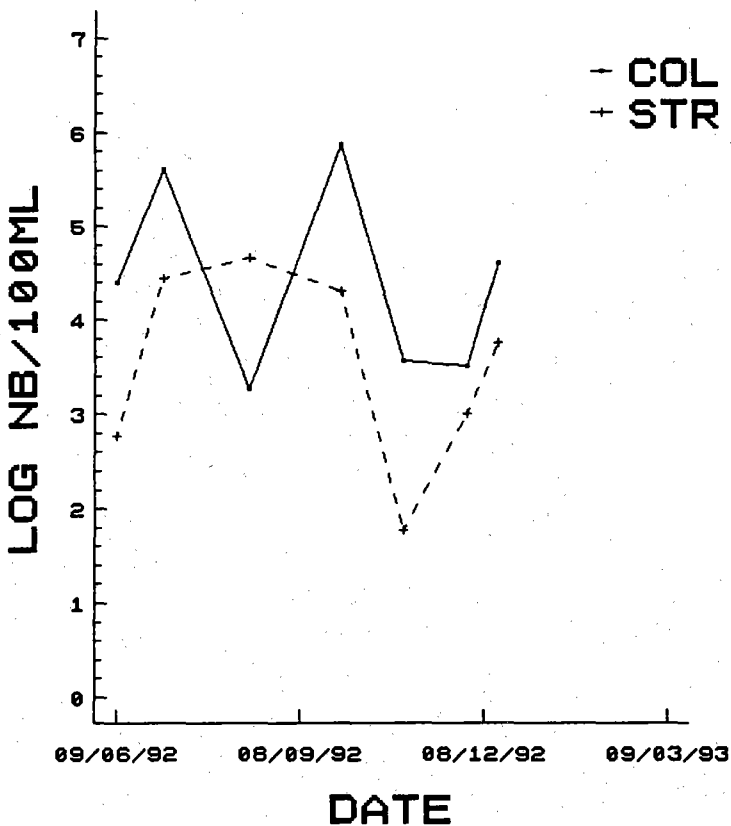
16 CANAL SORTIE
STATION DUCOS



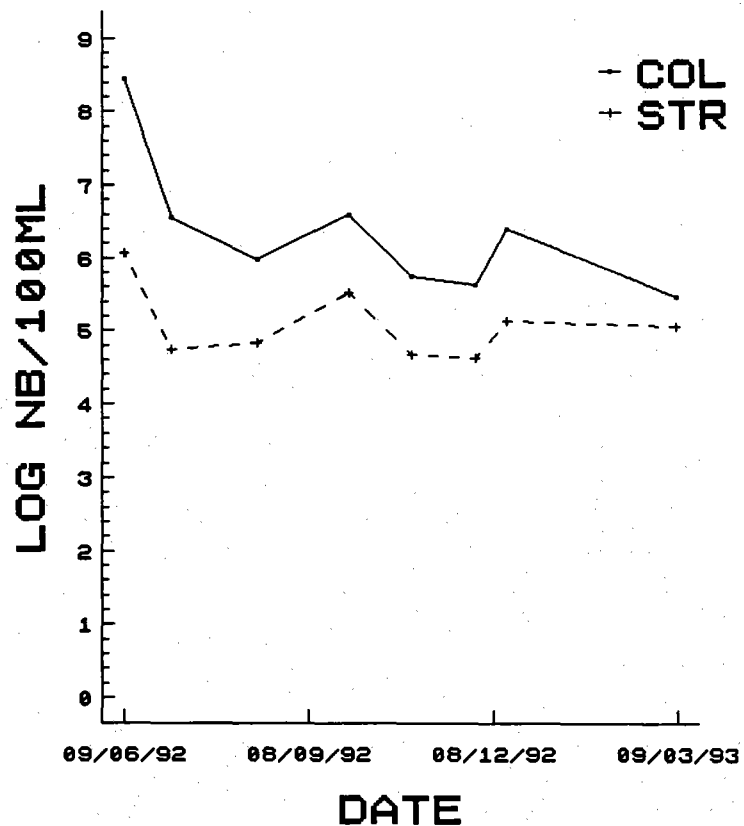
17 RIVIERE AVAL
PETIT BOURG



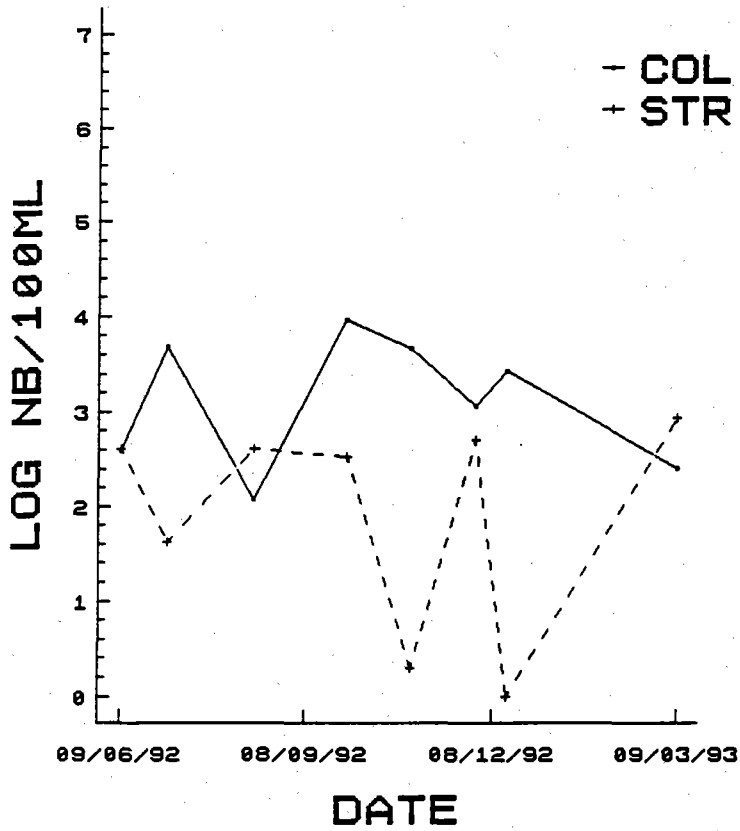
18 STATION EPURATION
RIVIERE COULISSES



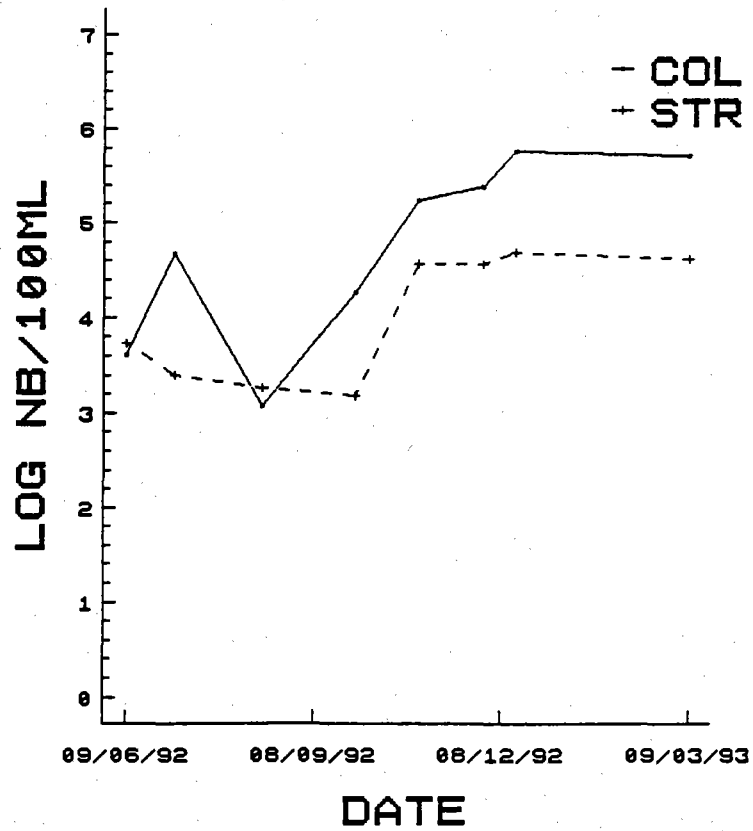
19 AVAL STATION
LES 3 ILETS



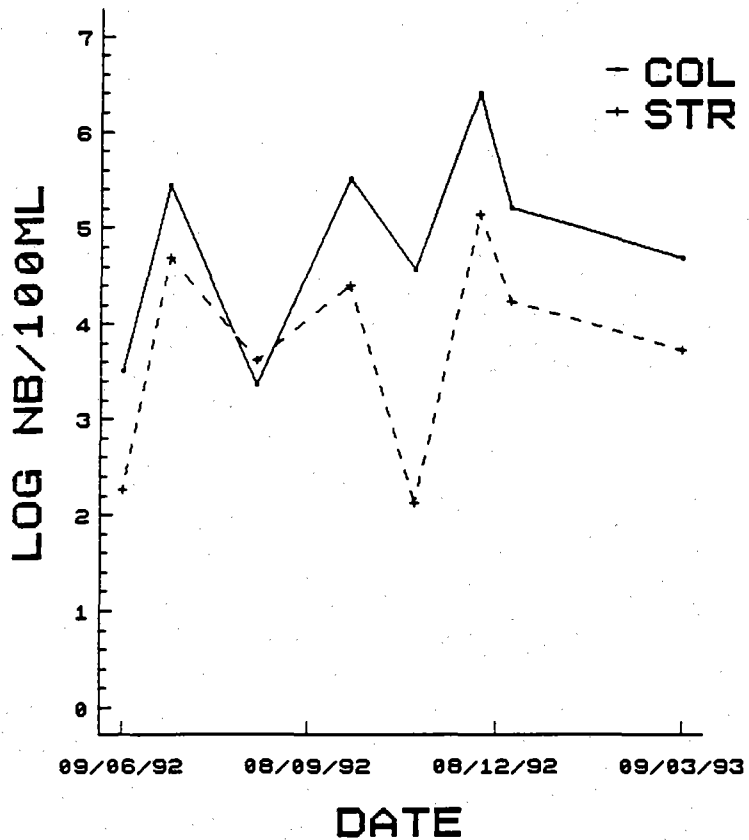
20 RIVIERE PAJERIE



21 STATION EPURATION ANSE MITAN



22 REJET MARIGOT ANSE A L'ANE



ANNEXE II

MESURES DES TEMPS DE SURVIE

ETUDE DU DEVENIR DES BACTERIES EN MER DANS DES CHAMBRES A DIFFUSION

Légende des tableaux :

Résultats des numérations bactériennes sur milieu Drigalski à 37 °C.

Tableaux 1 et 2 : nombre de bactéries/100 ml

Tableaux 3 à 12 : nombre de bactéries/ml

- Temps : heures

- LQUA : Log_{10} Nb bactéries/100 ml (tableaux 1 et 2)

Log_{10} Nb bactéries/ml (tableaux 3 à 12)

LPLE QUA = quartz

LNOIR PLE = Plexi

NOIR = Noire

. EPQUA : Nb bactéries totales/ml (Epifluorescence)

. MOYQUA : Moyenne logarithmique du Nb de bactéries

. ETQUA : Ecart type

Tableau 1 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie de Fort de France le 3.6.1992 : Quartz 1 et 2 à 2 m ; Plexi clair 1 et 2 à 3,5 m ; Plexi opaque 3 et 4 à 5 m.

| TEMPS | QUARTZ1 | QUARTZ2 | PLEXI1 | PLEXI2 | PLEXI3 | PLEXI4 | NOIRE | LQUA1 | LQUA2 | LPLE1 | LPLE2 | LPLE3 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 28000000 | 23900000 | 27600000 | 30000000 | 28000000 | 40000000 | 28000000 | 7.46 | 7.39 | 7.45 | 7.49 | 7.46 |
| 3 | 6200000 | 10300000 | 15600000 | 6500000 | 9900000 | 7000000 | 7000000 | 6.80 | 7.02 | 7.20 | 6.82 | 7.00 |
| 5 | 550000 | 910000 | 1270000 | 1670000 | 5100000 | 5000000 | 2000000 | 5.75 | 5.97 | 6.11 | 6.23 | 6.72 |
| 7 | 16000 | 70000 | 390000 | 610000 | 300000 | 1800000 | 700000 | 4.21 | 4.85 | 5.60 | 5.79 | 5.48 |
| 9 | 1000 | 8000 | 180000 | 246000 | 520000 | 560000 | 1040000 | 3.00 | 3.91 | 5.26 | 5.40 | 5.72 |
| 11 | 500 | 3700 | 89000 | 85000 | 430000 | 360000 | 250000 | 2.70 | 3.57 | 4.95 | 4.93 | 5.64 |
| 14 | | 200 | 47000 | 45000 | 240000 | 300000 | 200000 | | 2.30 | 4.68 | 4.66 | 5.39 |
| 23 | | 20 | 7000 | 4000 | 103000 | 160000 | 24000 | | 1.30 | 3.85 | 3.61 | 5.02 |
| 25 | | 10 | 400 | 700 | 12000 | 180000 | 28000 | | 1.00 | 2.60 | 2.85 | 4.08 |
| 28 | | 10 | 60 | 150 | 2200 | 60000 | 2800 | | 1.00 | 1.78 | 2.18 | 3.35 |
| 31 | 1 | 1 | 20 | 2 | 300 | 10000 | 800 | 0.00 | 0.00 | 1.30 | 0.30 | 2.48 |

| LPLE4 | LNOIR | MOYQUA | MOYP1P2 | MOYP3P4 | ETP1P2 | ETQUA | ETP3P4 |
|-------|-------|--------|---------|---------|--------|-------|--------|
| 7.61 | 7.46 | 7.42 | 7.47 | 7.53 | 0.028 | 0.049 | 0.106 |
| 6.85 | 6.85 | 6.91 | 7.01 | 6.93 | 0.268 | 0.155 | 0.106 |
| 6.71 | 6.31 | 5.86 | 6.17 | 6.72 | 0.084 | 0.155 | 0.007 |
| 6.26 | 5.85 | 4.53 | 5.70 | 5.87 | 0.134 | 0.452 | 0.551 |
| 5.75 | 6.02 | 3.45 | 5.33 | 5.74 | 0.098 | 0.643 | 0.021 |
| 5.56 | 5.40 | 3.14 | 4.94 | 5.60 | 0.014 | 0.615 | 0.056 |
| 5.48 | 5.31 | 2.50 | 4.67 | 5.44 | 0.014 | 0.282 | 0.063 |
| 5.21 | 4.39 | 1.30 | 3.73 | 5.12 | 0.169 | | 0.134 |
| 5.26 | 4.45 | 1.00 | 2.73 | 4.67 | 0.176 | | 0.834 |
| 4.78 | 3.45 | 1.00 | 1.98 | 4.06 | 0.282 | | 1.011 |
| 4.00 | 2.91 | 0.00 | 0.80 | 3.24 | 0.707 | | 1.074 |

Tableau 2 : Survie d'*E. coli* H 10407 à l'anse d'Arlet le 9.6.1992 : Quartz à 2 m ; Plexi clair 1 et 2 à 5 m ; Plexi opaque 3 et 4 à 10 m.

| TEMPS | QUARTZ1 | QUARTZ2 | PLEXI1 | PLEXI2 | PLEXI3 | PLEXI4 | NOIRE | LQUA1 | LQUA2 | LPLE1 | LPLE2 | LPLE3 | LPLE4 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 2900000 | 3100000 | 1200000 | 5000000 | 2700000 | 2200000 | 2200000 | 6.47 | 6.50 | 6.09 | 6.71 | 6.44 | 6.35 |
| 3 | | | 200000 | 200000 | 1300000 | 200000 | 1000000 | | | 5.31 | 5.31 | 6.12 | 5.31 |
| 6 | | | | | 1200000 | 130000 | 670000 | | | | | 6.09 | 5.12 |
| 7 | | | | | 40000 | 30000 | 160000 | | | | | 4.61 | 4.48 |
| 9 | | | | | 18000 | 49000 | 180000 | | | | | 4.26 | 4.70 |
| 12 | 1 | 1 | | | 4000 | 16000 | 12000 | 0.00 | 0.00 | | | 3.61 | 4.21 |
| 21 | | | | | 4000 | 2000 | 20000 | | | | | 3.61 | 3.30 |
| 24 | | | 1500 | 60 | 1600 | 100 | 25000 | | | 3.18 | 1.78 | 3.21 | 2.00 |
| 25 | | | 1 | 20 | 20 | 70 | 22000 | | | 0.00 | 1.30 | 1.30 | 1.85 |
| 27 | | | | | 1 | 2 | 100 | | | | | 0.00 | 0.30 |
| 29 | | | | | | | 10 | | | | | | |

| LNOIR | MOYQUA | MOYP1P | MOYP3P | ETP1P2 | ETP3P4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6.35 | 6.48 | 6.40 | 6.39 | 0.438 | 0.063 |
| 6.01 | | 5.31 | 5.71 | 0.000 | 0.572 |
| 5.83 | | | 5.60 | | 0.685 |
| 5.21 | | | 4.54 | | 0.091 |
| 5.26 | | | 4.48 | | 0.311 |
| 4.08 | 0.00 | | 3.91 | | 0.424 |
| 4.31 | | | 3.45 | | 0.219 |
| 4.40 | | 2.48 | 2.61 | 0.989 | 0.855 |
| 4.35 | | 0.65 | 1.57 | 0.919 | 0.388 |
| 2.00 | | | 0.15 | | 0.212 |
| 1.00 | | | | | |

Tableau 3 : Survie de *S. typhimurium* le 12.12.1992 en baie du Robert. Chambres quartz et plexi à 1,5 m.

| TEMPS | QUARTZ | PLEXI | NOIRE | LQUA | LPLEXI | LNOIR |
|-------|--------|--------|---------|------|--------|-------|
| 0.00 | 930000 | 660000 | 1600000 | 5.98 | 5.83 | 6.21 |
| 1.00 | 870000 | 860000 | 1200000 | 5.95 | 5.94 | 6.09 |
| 2.00 | 710000 | 520000 | 730000 | 5.86 | 5.72 | 5.87 |
| 3.16 | 620000 | 430000 | 1200000 | 5.80 | 5.64 | 6.09 |
| 4.16 | 210000 | 180000 | 1100000 | 5.33 | 5.26 | 6.05 |
| 5.16 | 28000 | 70000 | 1000000 | 4.45 | 4.85 | 6.01 |
| 6.33 | 5200 | 30000 | 800000 | 3.72 | 4.48 | 5.91 |
| 7.25 | 5300 | 27000 | 720000 | 3.73 | 4.44 | 5.86 |
| 8.16 | 4000 | 13000 | 520000 | 3.61 | 4.12 | 5.72 |
| 23.83 | 600 | 1500 | 500000 | 2.78 | 3.18 | 5.71 |
| 26.58 | 100 | 120 | 220000 | 2.00 | 2.08 | 5.35 |

Tableau 4 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert le 15.12.1992 : Chambres à 1,50 m.

| TEMPS | QUARTZ | PLEXI | NOIRE | LQUA | LPLE | LNOIR |
|-------|--------|---------|--------|------|------|-------|
| 0.00 | 520000 | 1160000 | 790000 | 5.72 | 6.07 | 5.90 |
| 1.08 | 620000 | 300000 | 920000 | 5.80 | 5.48 | 5.97 |
| 2.00 | 140000 | 690000 | 560000 | 5.15 | 5.85 | 5.75 |
| 3.00 | 320000 | 270000 | 560000 | 5.51 | 5.44 | 5.75 |
| 3.50 | 360000 | 220000 | | 5.56 | 5.35 | |
| 4.00 | 130000 | 270000 | 580000 | 5.12 | 5.44 | 5.77 |
| 4.50 | 140000 | 17000 | | 5.15 | 4.24 | |
| 5.00 | 119000 | 170000 | 400000 | 5.08 | 5.24 | 5.61 |
| 6.08 | 14000 | 8000 | 206000 | 4.15 | 3.91 | 5.32 |
| 7.00 | 2300 | 8000 | 340000 | 3.37 | 3.91 | 5.54 |
| 8.00 | 1070 | 5760 | 504000 | 3.03 | 3.76 | 5.71 |
| 9.50 | 440 | 660 | 165000 | 2.65 | 2.82 | 5.22 |
| 24.00 | 3 | 12 | 17000 | 0.48 | 1.08 | 4.24 |
| 28.16 | 0 | 1 | 24000 | 0.00 | 0.00 | 4.39 |

Tableau 5 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert le 16.12.1992 : Chambres plexi à 1,50 m.

| TEMPS | PLEXI1 | PLEXI2 | NOIRE | LPLE1 | LPLE2 | LNOIR | MOYP1P2 | ECP1P2 |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|--------|
| 0.00 | 660000 | 500000 | 770000 | 5.83 | 5.71 | 5.89 | 5.77 | 0.085 |
| 3.84 | 640000 | 560000 | 880000 | 5.81 | 5.75 | 5.95 | 5.78 | 0.041 |
| 8.33 | 35000 | 91000 | 264000 | 4.55 | 4.96 | 5.43 | 4.76 | 0.293 |

Tableau 6 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 2.03.1993 : Chambres à 1,50 m.

| TEMPS | QUARTZ | PLEXI1 | PLEXI2 | PLEXI3 | NOIRE | LQUA | LPLE1 | LPLE2 | LPLE3 | LNOIR | MOYPLE | ETPLE |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 0.00 | 68000 | 80000 | 150000 | 70000 | 130000 | 4.84 | 4.91 | 5.18 | 4.85 | 5.12 | 4.98 | 0.175 |
| 2.33 | 20000 | 60000 | 84000 | 40000 | 80000 | 4.31 | 4.78 | 4.93 | 4.61 | 4.91 | 4.77 | 0.160 |
| 4.16 | 1000 | 34000 | 16000 | 24000 | 45000 | 3.00 | 4.54 | 4.21 | 4.39 | 4.66 | 4.38 | 0.165 |
| 6.08 | | 10000 | 7700 | 4000 | 32000 | | 4.00 | 3.89 | 3.61 | 4.51 | 3.83 | 0.201 |
| 7.41 | 8 | 6200 | 4000 | 5500 | 62000 | 0.90 | 3.80 | 3.61 | 3.74 | 4.80 | 3.71 | 0.097 |
| 8.84 | | 3000 | 1600 | 900 | 30000 | | 3.48 | 3.21 | 2.96 | 4.48 | 3.22 | 0.260 |
| 10.41 | | 900 | 460 | 400 | 17000 | | 2.96 | 2.67 | 2.60 | 4.24 | 2.74 | 0.190 |
| 12.00 | 1 | 730 | 600 | 300 | 22000 | 0.00 | 2.87 | 2.78 | 2.48 | 4.35 | 2.71 | 0.204 |
| 24.00 | | 2 | 5 | 12 | 4000 | | 0.30 | 0.70 | 1.08 | 3.61 | 0.69 | 0.390 |

Tableau 7 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 6.03.1993 : Chambres plexi à 1 m.

| TEMPS | PLEXI1 | PLEXI2 | NOIRE | LPLE1 | LPLE2 | LNOIR | EPPLE1 | EPPLE2 | EPNOIR |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|
| 0.00 | 500000 | 700000 | 500000 | 5.71 | 5.85 | 5.71 | 754000. | 71600. | 313000. |
| 3.16 | 30000 | 33000 | 260000 | 4.48 | 4.52 | 5.42 | | | |
| 5.84 | 40000 | 28000 | 160000 | 4.61 | 4.45 | 5.21 | | | |
| 7.41 | 6600 | 2200 | 150000 | 3.82 | 3.35 | 5.18 | | | |
| 8.84 | 1100 | 300 | 150000 | 3.04 | 2.48 | 5.18 | | | |
| 10.16 | 1000 | 20 | 88000 | 3.00 | 1.30 | 4.95 | | | |
| 11.66 | 90 | 5 | | 1.96 | 0.70 | | | | |
| 23.59 | 3 | 1 | | 0.48 | 0.00 | | 394000. | 274000. | 734000. |

| LEPPL1 | LEPPL2 | LEPNOI | ETPLEX | MOYPLE | MOYEPPL | ETEPPL |
|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 5.87 | 4.85 | 5.49 | 0.098 | 5.78 | 5.36 | 0.720 |
| | | | 0.028 | 4.50 | | |
| | | | 0.113 | 4.53 | | |
| | | | 0.332 | 3.58 | | |
| | | | 0.395 | 2.76 | | |
| | | | 1.200 | 2.15 | | |
| | | | 0.890 | 1.33 | | |
| 5.59 | 5.43 | 5.86 | 0.339 | 0.24 | 5.51 | 0.113 |

Tableau 8 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 6 et 7.03.1993.

| TEMPS | T0 à 19 h 00 : Chambres à 1 m. | | | | | |
|-------|--------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | PLEXI3 | PLEXI4 | NOIRE | LPLE3 | LPLE4 | LNOIR |
| 0. | 350000 | 770000 | 440000 | 5.55 | 5.89 | 5.65 |
| 12. | 380000 | 870000 | 340000 | 5.59 | 5.95 | 5.54 |
| 16. | 25000 | 290000 | 211000 | 4.40 | 5.47 | 5.33 |
| 17. | 21400 | 16000 | 204000 | 4.34 | 4.21 | 5.32 |
| 19. | 16800 | 1800 | 176000 | 4.23 | 3.26 | 5.25 |
| 21. | 2400 | 420 | 148000 | 3.38 | 2.63 | 5.18 |
| 23. | 3500 | | 138000 | 3.55 | | 5.15 |

Tableau 9 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 7.03.1993. T0 à 6 h 45 : Chambres à 1 m.

| TEMPS | QUARTZ | PLEXI5 | LQUA | LPLE5 | EPQUA | EPPLE5 | LEPQUA | LEPPL5 |
|-------|---------|--------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0.00 | 1000000 | 640000 | 6.01 | 5.81 | 487000 | 413000 | 5.68 | 5.61 |
| 3.83 | 50000 | 40000 | 4.70 | 4.61 | | | | |
| 5.75 | 3000 | 47000 | 3.48 | 4.68 | | | | |
| 7.33 | 180 | 4900 | 2.26 | 3.69 | | | | |
| 8.83 | | 1800 | | 3.26 | | | | |
| 11.28 | 18 | 130 | 1.26 | 2.12 | 297000 | 76000 | 5.47 | 4.88 |

Tableau 10 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 7.03.1993. T0 à 12 h 20 : Chambres à 1 m.

| TEMPS | PLEXI6 | PLEXI7 | LPLE6 | LPLE7 | EPPLE6 | EPPLE7 | LEPPL6 | LEPPL7 |
|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0.00 | 570000 | 380000 | 5.76 | 5.59 | 160000 | 153000 | 5.20 | 5.18 |
| 1.92 | 28800 | 40000 | 4.46 | 4.61 | | | | |
| 3.25 | 1200 | 16000 | 3.08 | 4.21 | | | | |
| 5.66 | 170 | 3200 | 2.23 | 3.51 | 329000 | | 5.51 | |

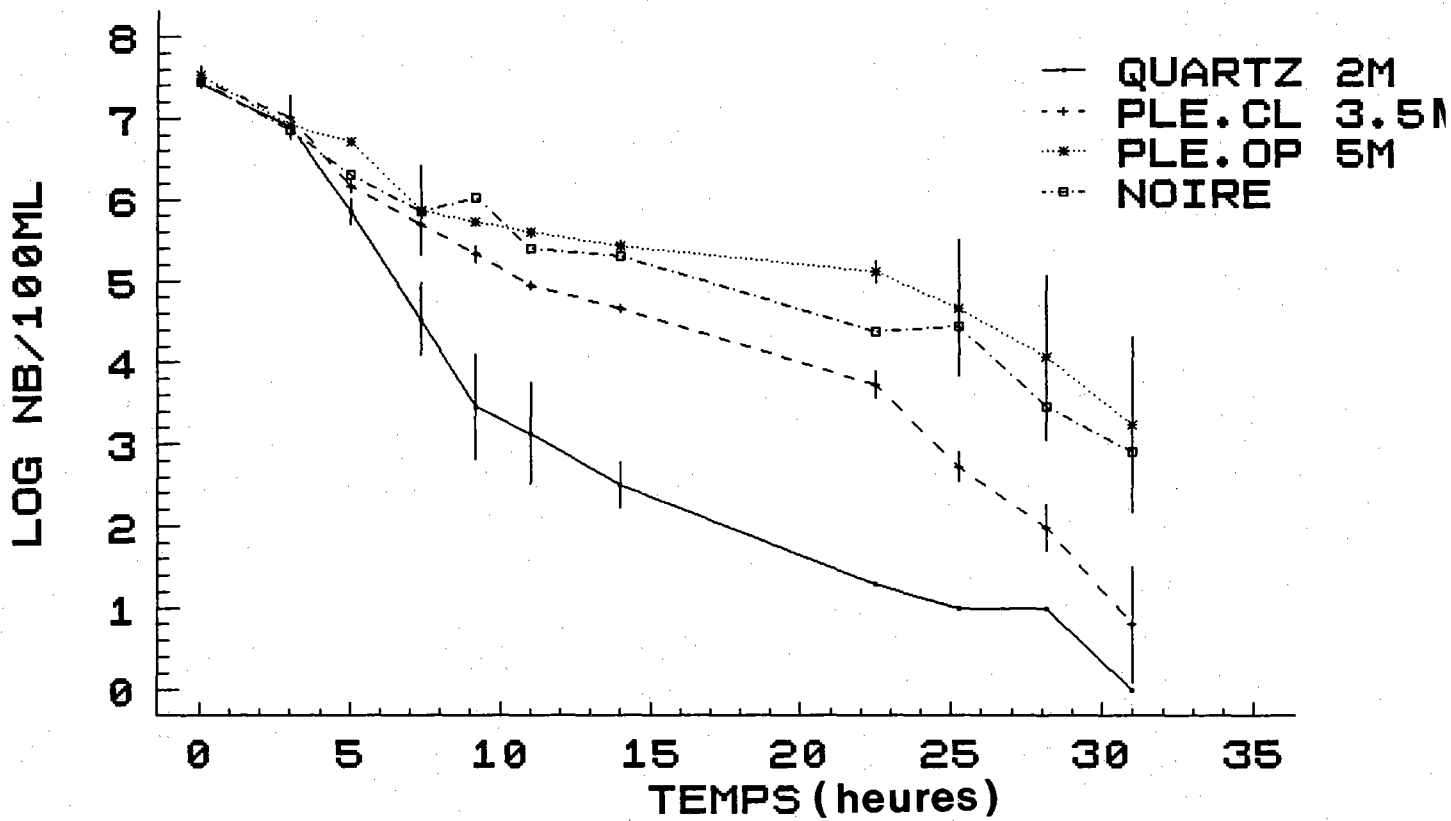
Tableau 11 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 10.03.1993. T0 à 6 h 55 : Chambres à 1 m.

| TEMPS | PLEXI1 | PLEXI2 | LPLE1 | LPLE2 | EPPLE1 | EPPLE2 | LEPPL1 | LEPPL2 | ETP1P2 | MOYEPI | ETEPI | MOYPI |
|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 0.00 | 420000 | 560000 | 5.63 | 5.75 | 144000 | 70000 | 5.16 | 4.84 | 0.088 | 5.00 | 0.226 | 5.6 |
| 5.16 | 7000 | 7000 | 3.85 | 3.85 | | | | | 0.000 | | | 3.8 |
| 7.66 | 400 | 270 | 2.61 | 2.44 | | | | | 0.121 | | | 2.5 |
| 10.75 | 11 | 6 | 1.08 | 0.85 | | | | | 0.165 | | | 0.9 |
| 15.75 | 25 | 1 | 1.42 | 0.30 | | | | | 0.788 | | | 0.8 |
| 25.08 | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 | 121000 | 155000 | 5.08 | 5.19 | 0.000 | 5.14 | 0.077 | 0.0 |

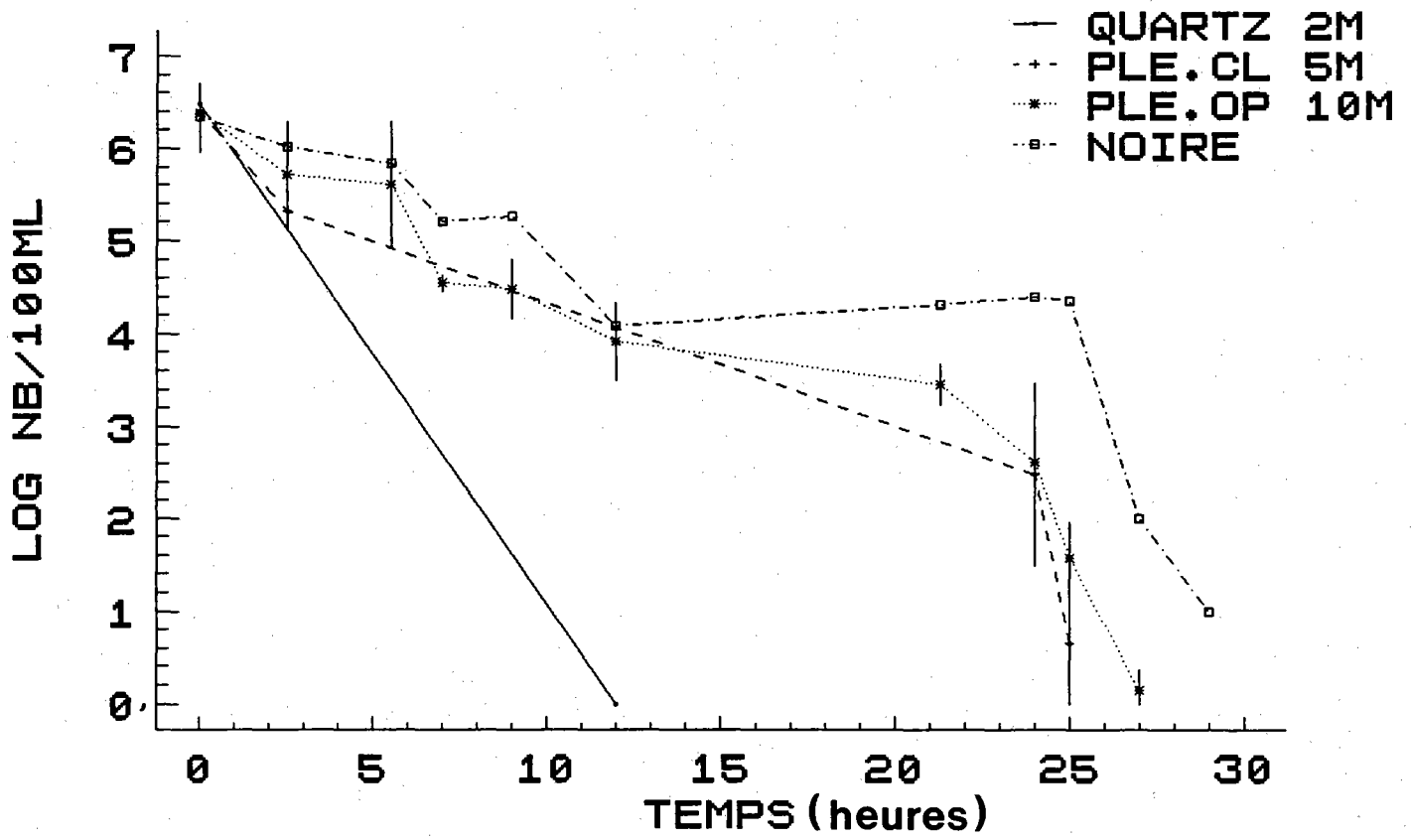
Tableau 12 : Survie d'*E. coli* H 10407 en baie du Robert (Ilet aux Rats) le 10.03.1993. T0 à 12 h 15 : Chambres à 1 m.

| TEMPS | QUARTZ | PLEXI | LQUA | LPLE | EPQUA | EPPLE | LEPQUA | LEPPL |
|-------|--------|--------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| 0.00 | 750000 | 570000 | 5.88 | 5.76 | 71000 | 488000 | 4.85 | 5.69 |
| 2.25 | 2900 | 110000 | 3.47 | 5.05 | | | | |
| 5.50 | 1 | 28000 | 0.30 | 4.45 | | | | |
| 10.42 | 0 | 5200 | 0.11 | 3.72 | | | | |
| 19.75 | 0 | 65 | 0.00 | 1.82 | 249000 | 274000 | 5.39 | 5.43 |

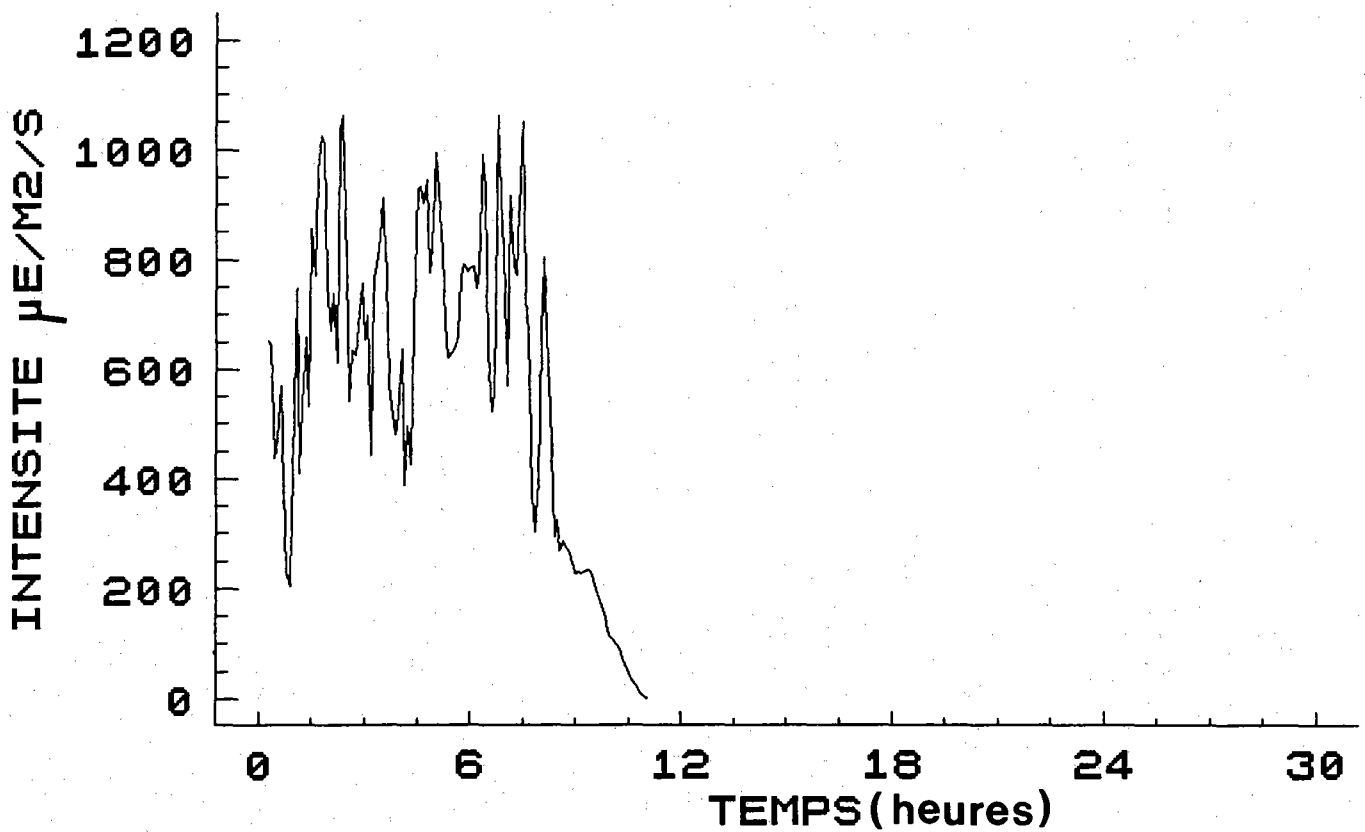
BAIE DE FORT DE FRANCE
E. COLI 3.06.92



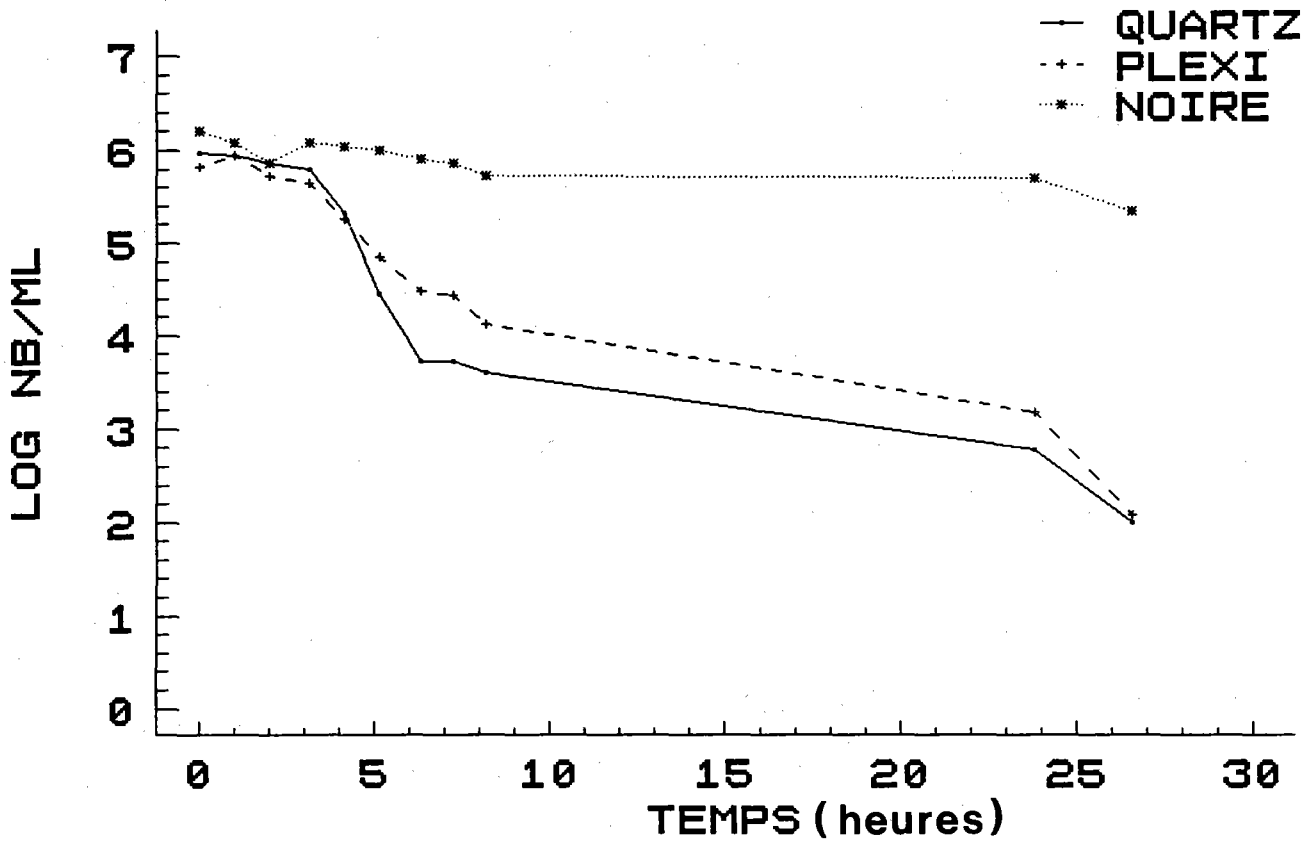
ANSE D'ARLET E. COLI
9.06.92



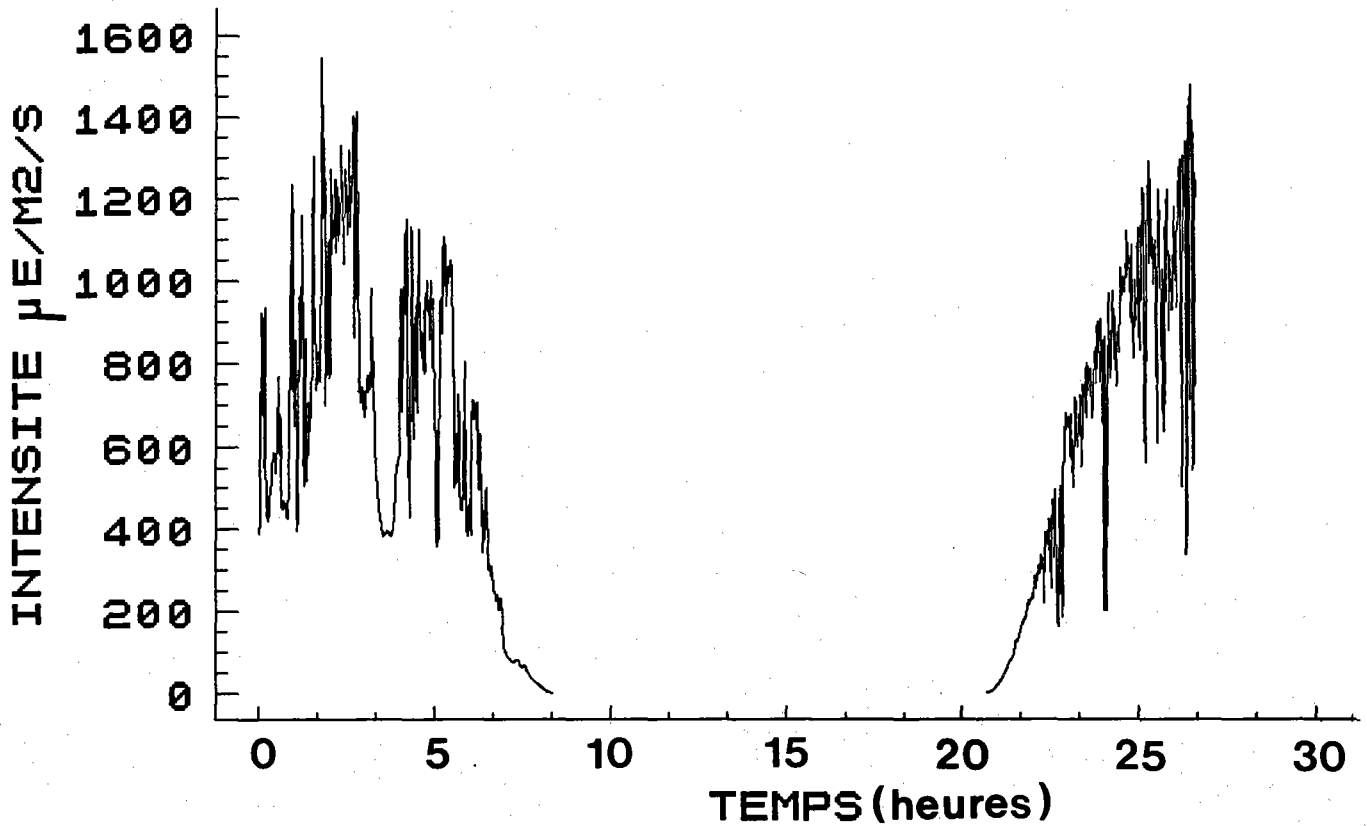
INTENSITE LUMINEUSE
ANSE D'ARLET



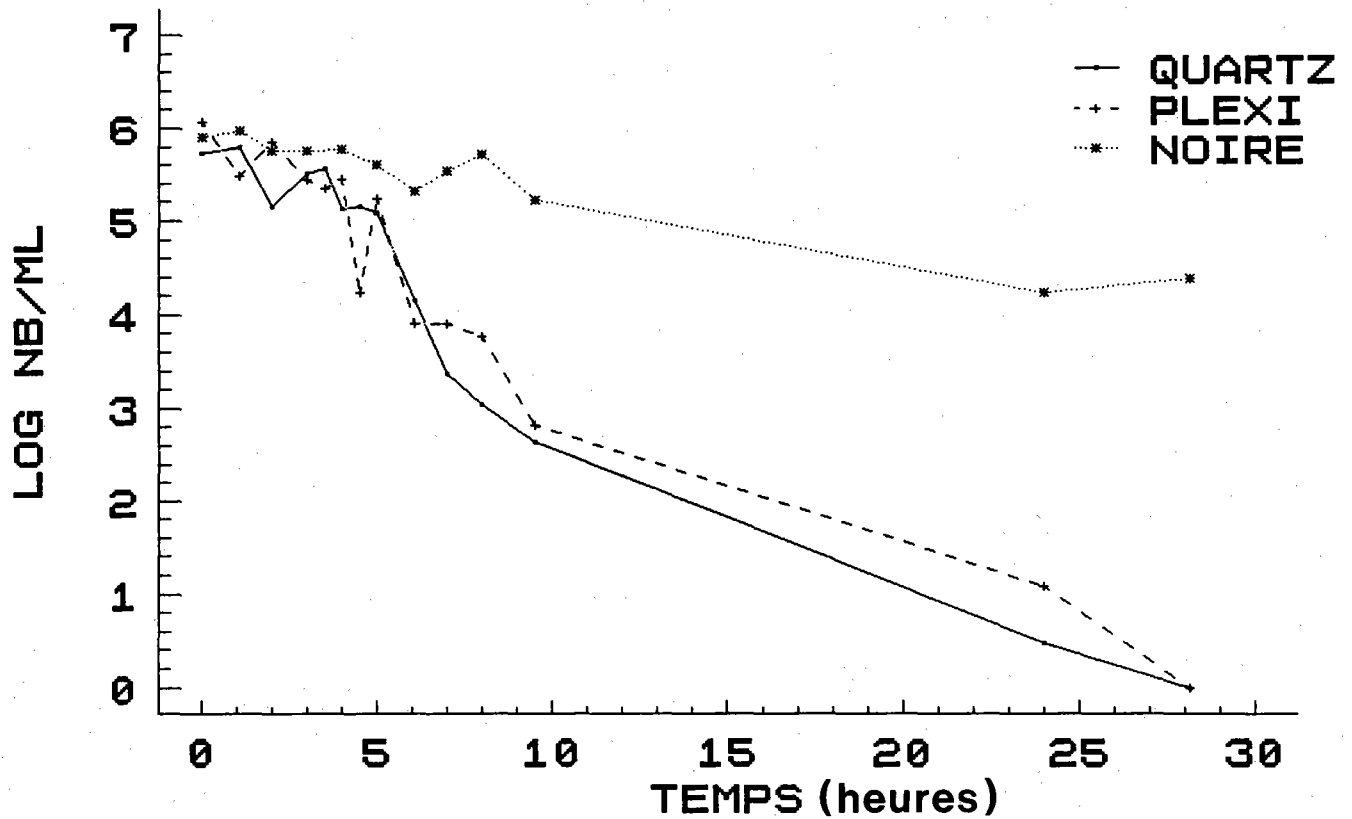
BAIE DU ROBERT SALMONELLE 12.12.92



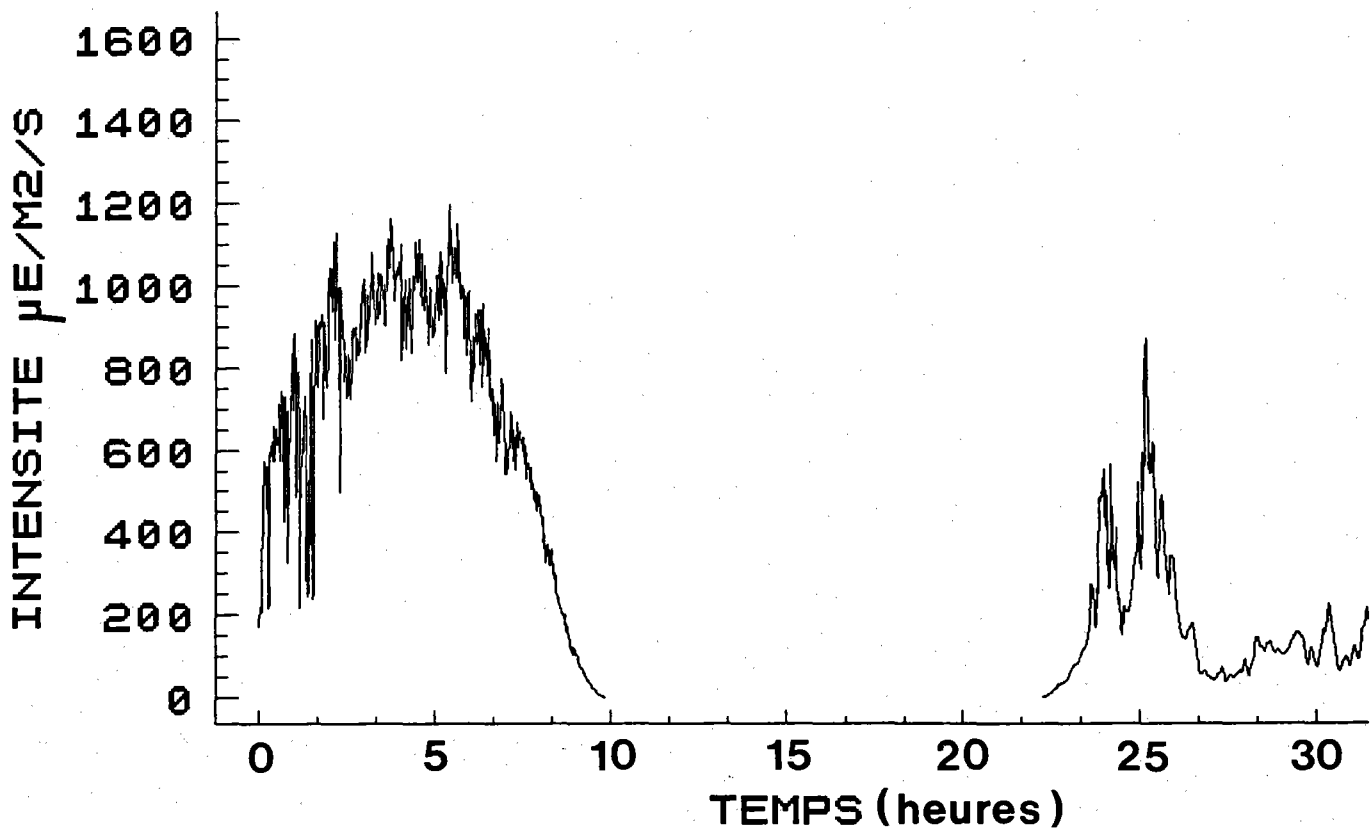
INTENSITE LUMINEUSE 12.12.92



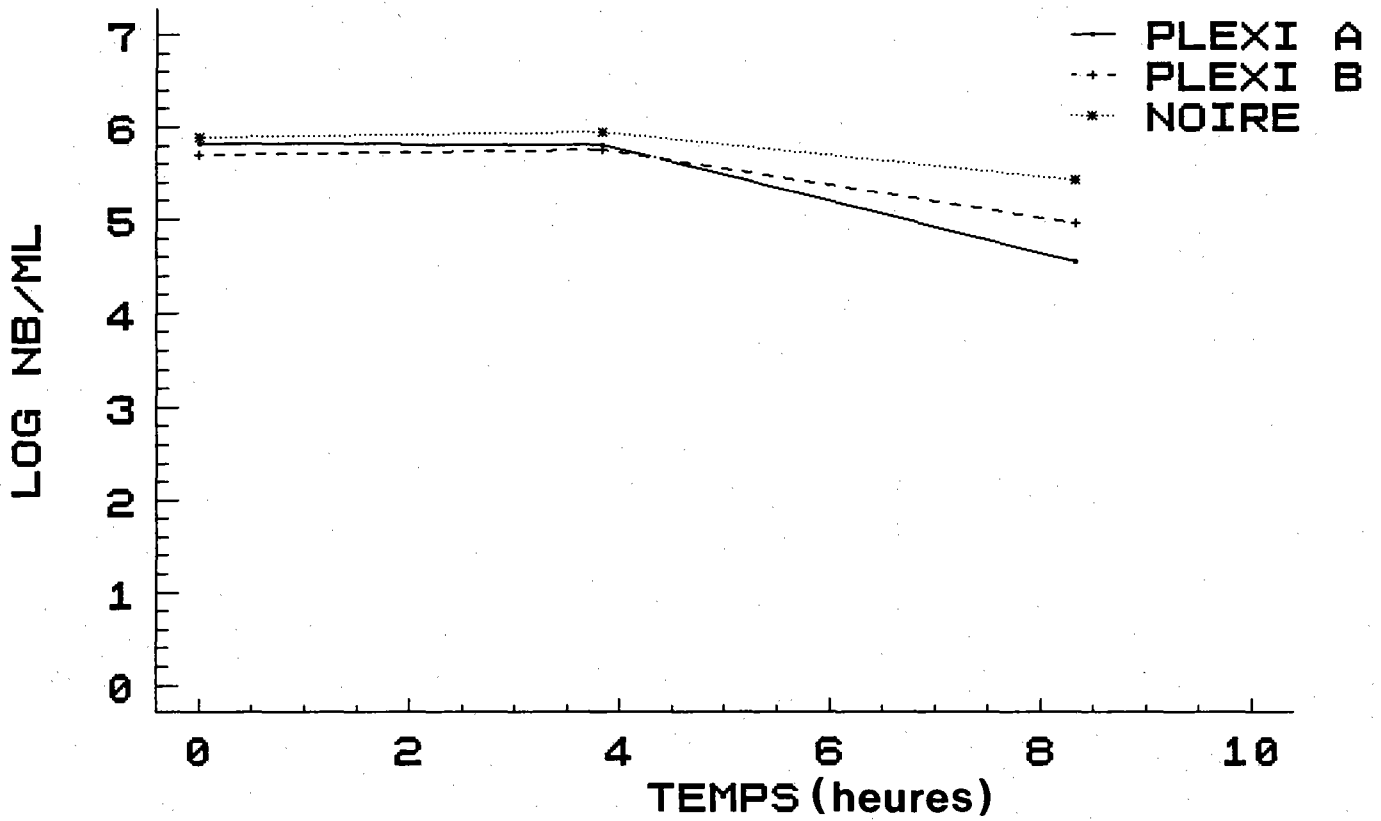
BAIE DU ROBERT
E. COLI 15.12.92



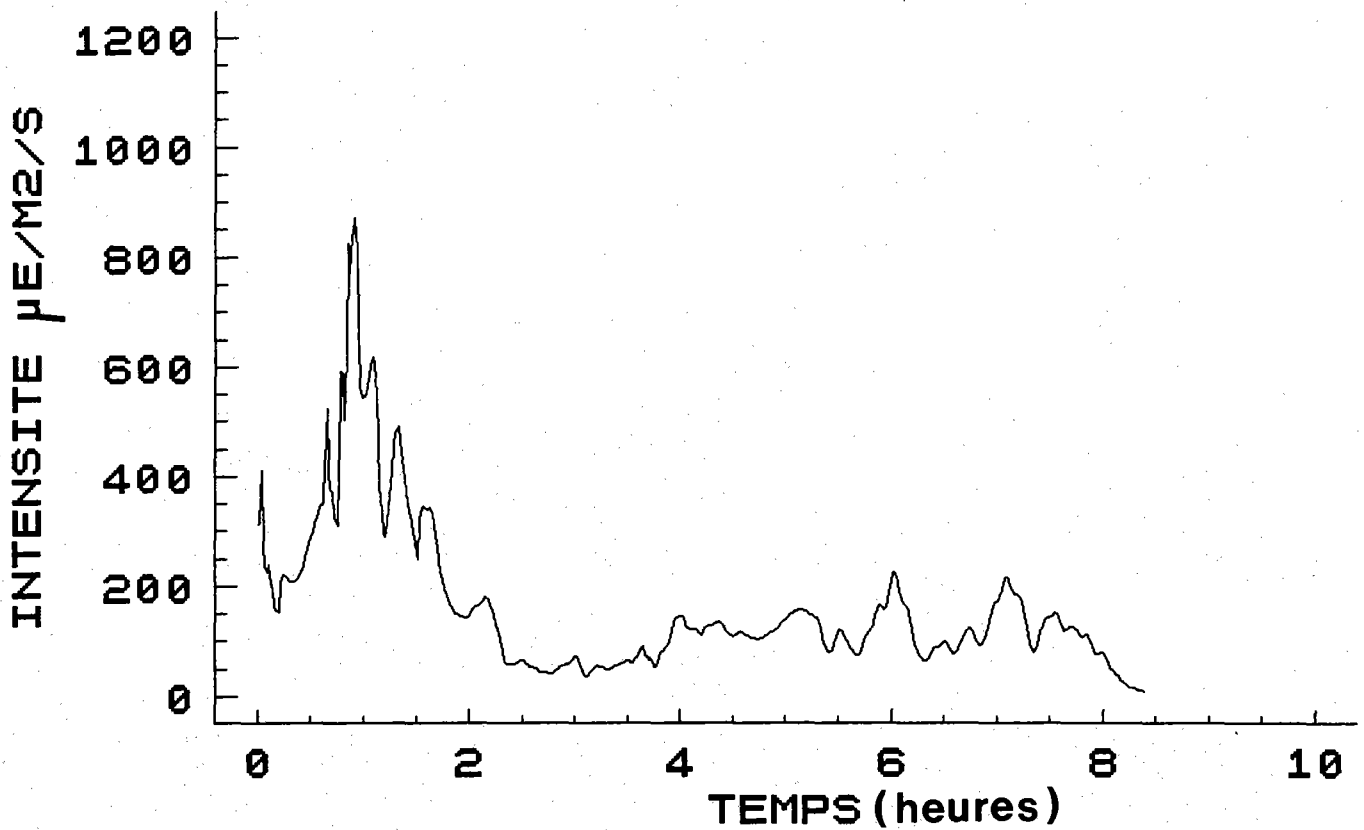
INTENSITE LUMINEUSE
15.12.92



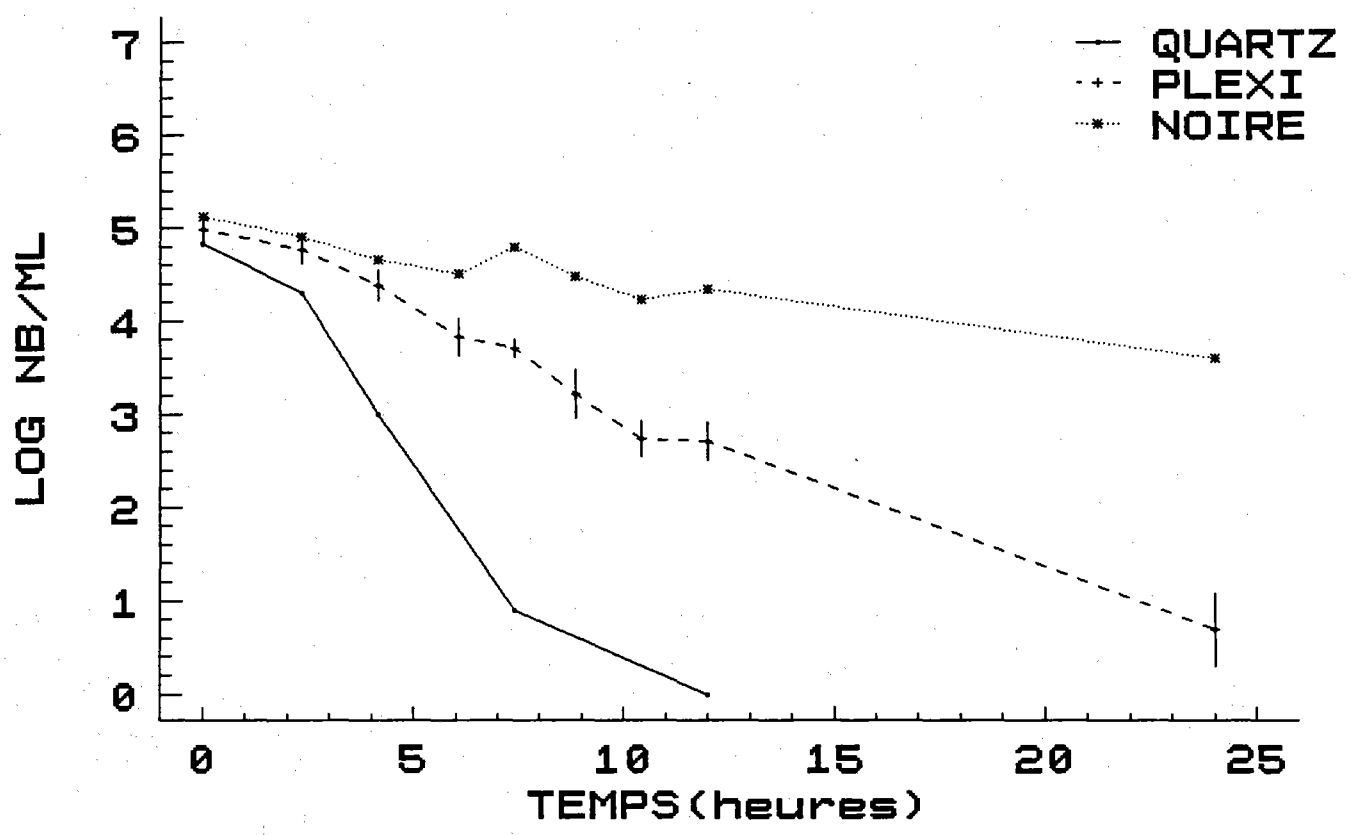
BAIE DU ROBERT
E. COLI 16.12.92



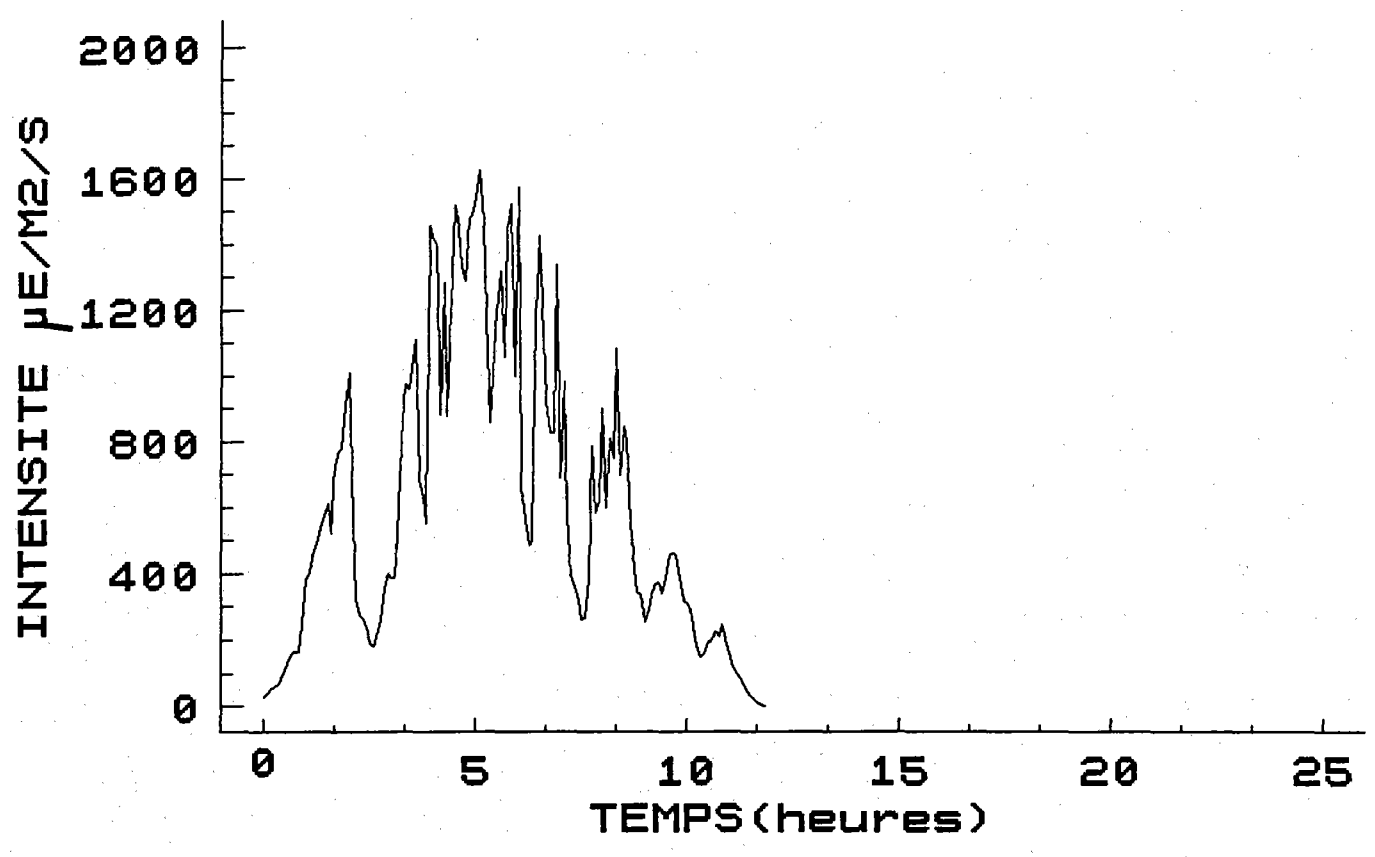
INTENSITE LUMINEUSE
16.12.92



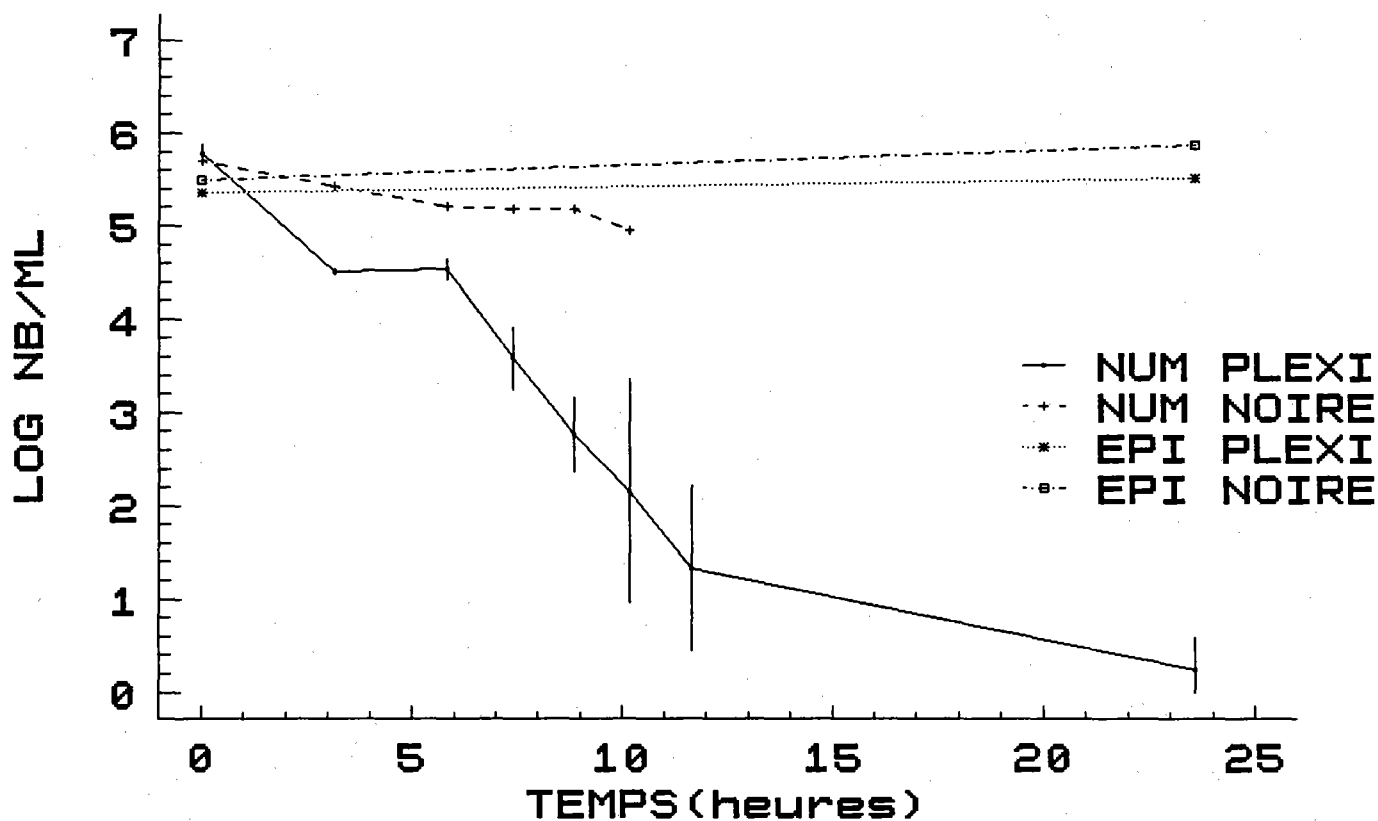
BAIE DU ROBERT E. COLI 2.03.93



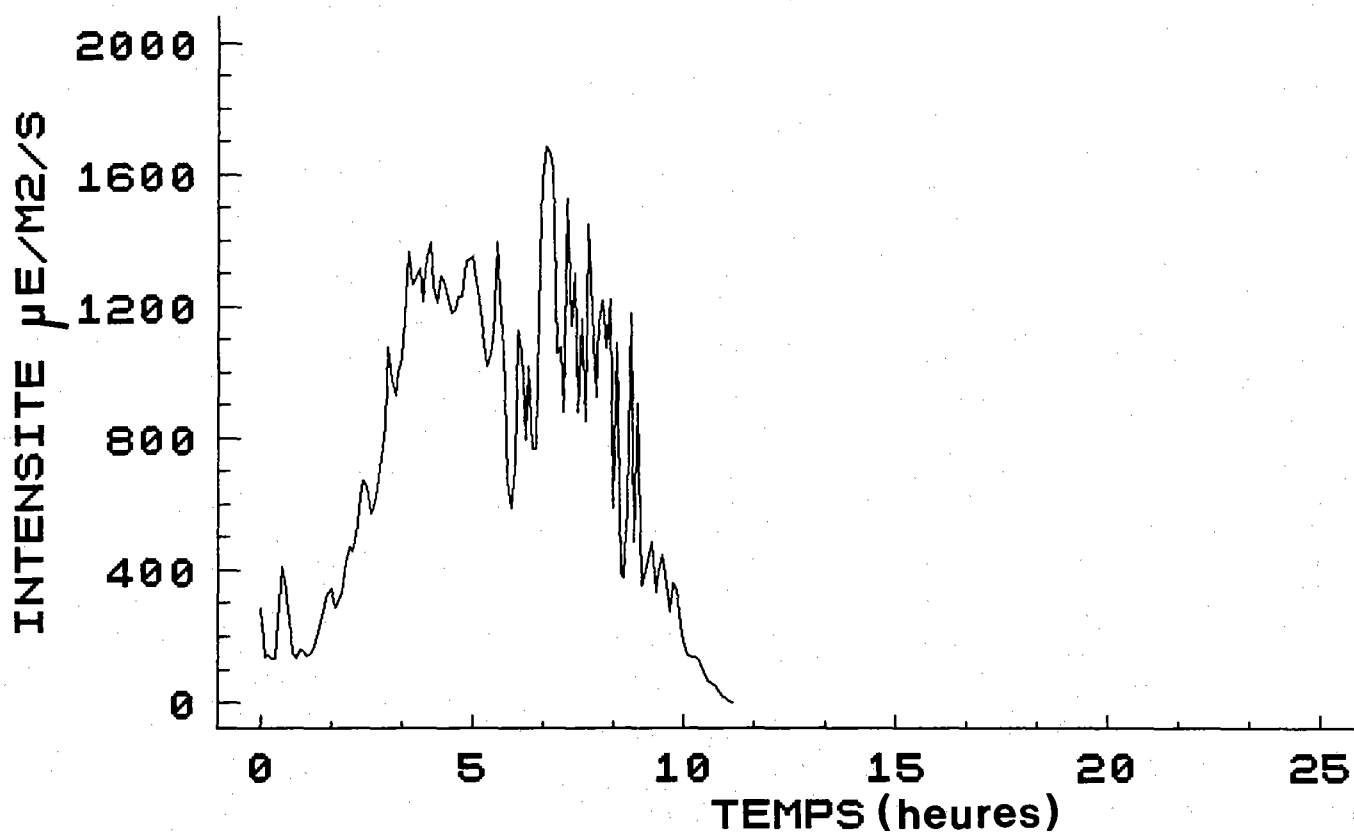
INTENSITE LUMINEUSE 2.03.93



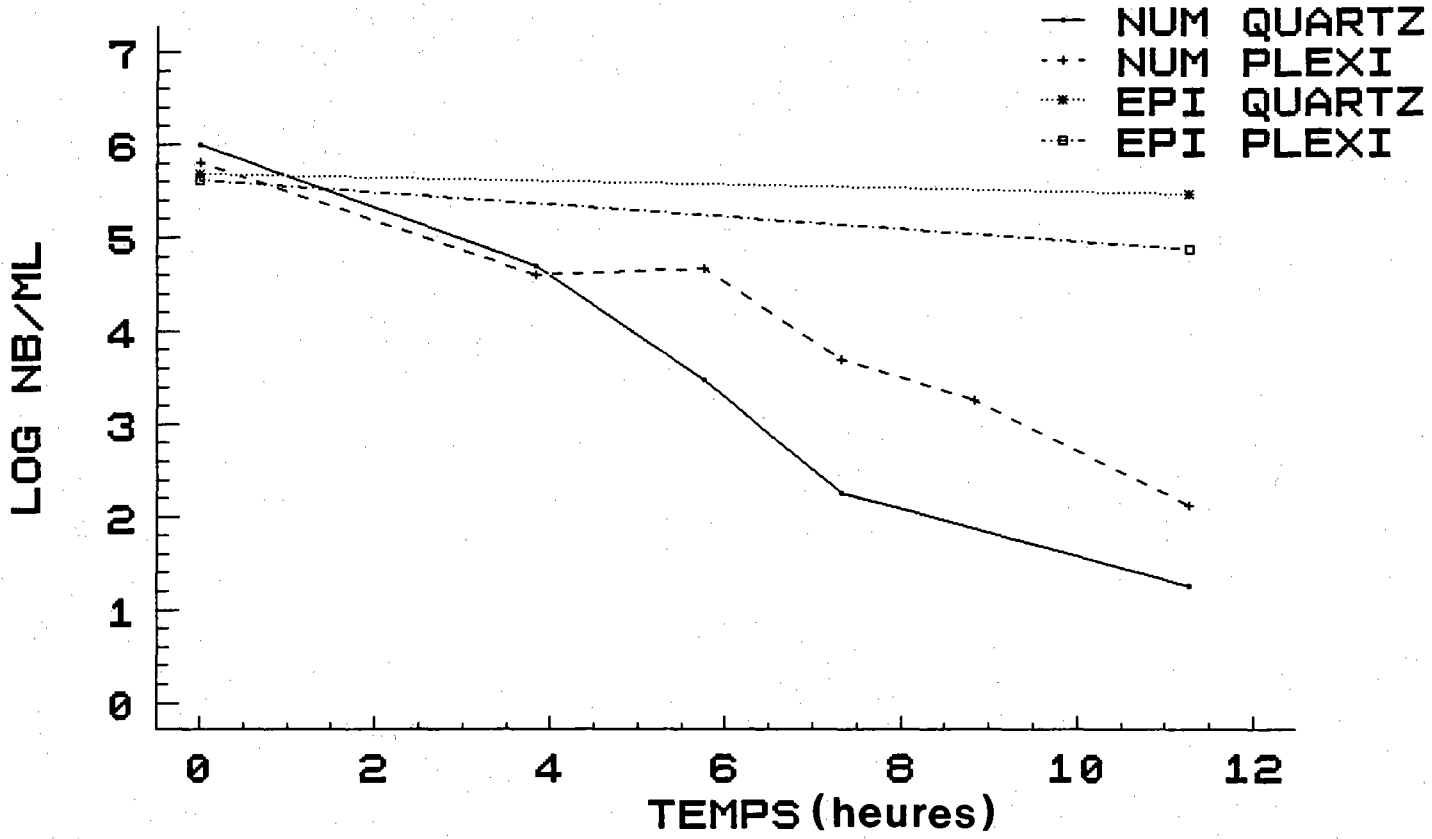
BAIE DU ROBERT E. COLI
6.03.93 TO:7.00h



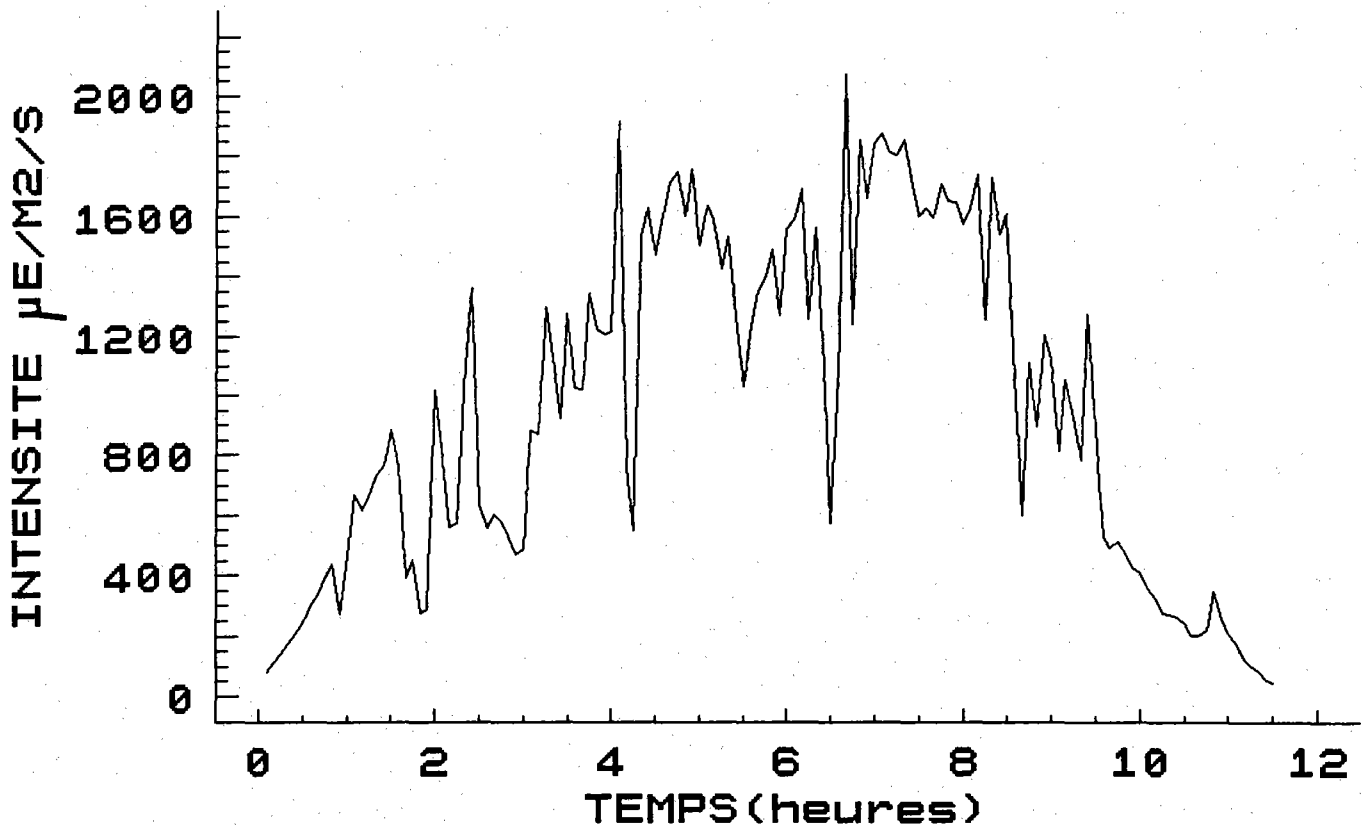
INTENSITE LUMINEUSE
6.03.93



BAIE DU ROBERT E. COLI 7.03.93



INTENSITE LUMINEUSE 7.03.93



ANNEXE III

MICROBIAL WATER QUALITY ON A CARRIBEAN ISLAND (MARTINIQUE)

**M. Pommepuy, A. Derrien, F. Le Guyader, D. Menard, M.P. Caprais, E. Dubois, E. Dupray
and M. Gourmelon**

Small Island Oceanography Coastal and Estuaries studies (accepté pour publication)

17

Microbial Water Quality on a Caribbean Island (Martinique)

M. Pommeputy, A. Derrien, F. Le Guyader, D. Menard, M. P. Caprais, E. Dubois, E. Dupray, and M. Gourmelon

Abstract

To assess microbial water quality, bacterial and viral studies were carried out in Fort de France Bay from 1992 to 1993. The objectives were to evaluate fecal contamination of rivers and sewage discharged into the bay and the behavior of fecal bacteria in seawater. In this study, molecular techniques such as the polymerase chain reaction (PCR) were used to detect the main pathogenic viruses encountered in hydric environments, *i.e.*, Hepatitis A virus (HAV), rotaviruses (RV), and enteroviruses (EV), while bacterial contamination was evaluated by β -galactosidase activity using 4-methyl-umbelliferyl-B-D-galactoside (MUGal) and conventional techniques. Results showed that rapid techniques are successful in evaluating microbial contamination. In less than an hour bacterial analyses of fecal coliforms can be assessed; only two days are required for viral results by PCR. Martinique's rivers were found to be more often highly contaminated by urban sewage. Viral RNAs were detected in 50% of the rivers, but no correlation between viral and bacterial contamination was noted in this study. An indication of the impact of sewage discharge in coastal areas was provided by fecal bacterial die-off rate studies. T90 was found to be less than 4 h in sunny weather and less than 30 h during the night or cloudy weather. The die-off rates found in Martinique are often shorter than in Europe, especially at night. This result can be attributed to local water conditions such as temperature, oligotrophic water, and quality of sunlight intensity.

Introduction

Martinique island in the lesser Antilles archipelago is reputed for tourism and its exceptional tropical climate. The development of air service has considerably increased

Small Island Oceanography
Coastal and Estuarine Studies, Volume ____
Copyright 1994 by the American Geophysical Union

the tourist population (Europeans and North Americans), while the native population tends to go to the beach more and more. Thus, new problems have appeared, such as disrespect of the environment and increasing pollution. Sewage treatment plants (secondary treatment) have been set up, but sewers are not always connected and raw waters are discharged directly. Hence, microbial contamination of surface waters is becoming an important problem, along with the sanitary impact of enteric bacteria behavior in the environment. The enteric bacteria dispersed in coastal marine areas depends completely on physical-chemical parameters such as temperature, salinity, nutrient concentrations, and turbidity. Depending on the water quality, these microorganisms can behave in completely different ways. Studies must be conducted in view of the economic impact of tourism on tropical coasts and purification difficulties. Bacterial water quality is routinely assessed using bacterial indicators, most frequently that of the fecal coliform test. However, current microbial standards may not always indicate viral pathogens.

In this study, molecular techniques such as the polymerase chain reaction were used to detect the main pathogenic viruses encountered in hydric environments, *i.e.*, Hepatitis A virus (HAV), rotaviruses (RV), and enteroviruses (EV), while bacterial contamination was evaluated by β -galactosidase activity using 4-methyl-umbelliferyl-B-D-galactoside (MUGal) and conventional techniques. The die-off rates of fecal bacteria were studied in seawater to evaluate the impact of sewage outfall on coastal water quality.

Materials and Methods

River and Sewage Contamination

Samples

Water samples (50 ml) were collected from 22 different rivers and wastewater sewage sites in Fort de France Bay (Figure 1). Samples were immediately shipped on ice to the laboratory. Each river was sampled nine times from June 1992 to March 1993. For the last sampling date (March 1993), points from 2 to 11 were collected on March 5, 1993 and points from 12 to 22 were collected on March 8, 1993.

Bacterial analyses

Fecal coliforms were enumerated at the river sites by the MPN MUG microplaque technique [Hernandez *et al.*, 1991] using standard membrane filter techniques (Millipore HAWG 0.22 μm) with incubation on Mac Conkey agar (OXOID). Colony-forming units (CFU) were counted after 24 h of incubation at 44.5°C.

Fecal streptococci counts (D. group, Lancefield classification) were performed according to standard techniques (AFNOR no. 90411).

β -D-galactosidase (MU galactosidase) assay was used as a rapid technique to detect fecal coliforms as described by Berg and Fiksdal [1988] and slightly modified by Pommepuy *et al.* [submitted]. Water samples were filtered through 0.22 μ m filter Nuclepore (PC). The filter was then aseptically placed in a 250 ml flask containing 13.5 ml sterile 0.05 M phosphate buffer (pH 7.9) and 0.05% sodium lauryl sulfate (SLS) (Sigma Chemical Co.); 9 ml was added to each flask and to a sterile control flask, incubated in a shaking water bath at 44.5°C. Fluorescence intensity of sample aliquots was measured every 5 min for 25 min with a Sequoia Turner (excitation at 360 nm, emission at 450 nm) after addition of 100 μ l 10 M NaOH to 2.5 ml samples in the kyvette. The enzymatic activity measured as production rate of MU ($M \text{ min}^{-1}$) was determined by least squares linear regression.

MUGAL (Sigma
Chemical Co)

Viral analysis

Extraction of viral RNAs: Water samples (400 μ l) or DEPC water (distilled sterile water treated by diethyl pyrocarbonate) used as negative extraction control (400 μ l) were treated as previously described [Le Guyader *et al.*, in press]. After ethanol precipitation, the pellet was resuspended in 10 μ l of DEPC water.

Primers: For virus detection after reverse transcriptase (RT), two rounds of PCR (one of them semi-nested) were realized.

For enterovirus, the primers used were derived from a conserved sequence in the 5' non-coding region of the Poliovirus type 1 [Chapman *et al.*, 1990; Rotbart, 1990]. Using the primer combination E1 (623-640) and E2 (446-465), PCR resulted in a 194 bp product; using primer combination E1 and E3 (584-603), in a 157 bp product.

For HAV detection, the primers amplified the VP1 region [Robertson *et al.*, 1989]. With the first round of PCR using primers H1 (2167-2192) and H2 (2389-2251), the product obtained was a 247 bp fragment; with the second round, primers H1 and H3 (2232-2251) yielded a 210 bp product.

For rotavirus detection, primers were specifically synthesized for gene segment 9 which encodes VP7 [Gouvea *et al.*, 1990; Flores *et al.*, 1990]: R1 (1-28) and R2 (376-392) were used to amplify a 392 bp fragment during the first round PCR and R2 used with R3 (51-71) amplified a 342 bp product for the second round.

RT PCR: for EV or HAV detection, 2 μ l of each extract were used for cDNA synthesis in a 10 μ l reaction with the downstream primer (E2 or H2) and a reverse transcriptase MMuLV (Stratagene) under conditions recommended by the manufacturer. For RV detection the transcription was realized in the same conditions but with 10 μ M of methylmercury hydroxide (CH_3HgOH) (STREMCHEMICAL).

Enzymatic amplification was performed with 3 μ l of cDNA in 25 μ l of PCR mix, according to Perkin Elmer conditions in a Perkin Elmer 9600 apparatus (Cetus). After denaturation for 2 min at 95°C, 30 cycles were performed as follows: 94°C for 30 s, 50°C

for 30 s, 72°C for 30 s. The temperature was then maintained at 72°C for 3 min before being lowered to 10°C.

For the second round of PCR, 1 µl of the first amplification product (samples and controls) was further amplified under the same conditions as for the first PCR. The negative extraction control, a RT negative control, and a positive control were included in each amplification series.

PCR products were analyzed by 9% polyacrylamide gel electrophoresis and ethidium bromide staining. Controls were performed to ensure no contamination occurred during any of the experiments.

Survival Experiments

Survival trials were carried out in the field to determine the die-off rate (T90) of fecal coliforms. Culture preparation: The strain used was *Escherichia coli* H10407 from Evans isolated, provided by Pr Joly (Clermont-Ferrand, France). Cells were washed and the suspension was introduced in sterilized diffusion chambers. Survival experiments were carried out as described by Salomon and Pommepuy [1990]; chambers were immersed at depths of 0.50 m, 1 m or more depending on location, and supported by floating buoys; a dark chamber was also used as a control. Aliquots were periodically withdrawn in sterile tubes and reserved in cold boxes. Culturable bacteria were recovered on Drigalski agar (OXOID) incubated overnight at 37°C.

Light intensities were measured at different depths with a submersible quantum sensor (LICOR) in wavelength bands from 400 to 700 nm. Vertical attenuation coefficients were then calculated. Light intensities were recorded at 1 m under the surface during all experiments. Decay coefficient T90 (time needed for 90% of the bacteria to be uncultivable) was calculated from bacterial results.

Results

Rivers and Sewage Contamination

Water samples were collected from 22 main rivers and wastewater sewage sites located around the bay. Fecal coliform and streptococci analyses are presented in Table 1. Annual contamination variations of a polluted river (urban sewage--Trois Ilets, No. 19) and a slightly contaminated river (agricultural slope basin--Petit Bourg, No. 17) are shown in Figure 2. Fecal coliforms are often more numerous than fecal streptococci (10 to 100 times). Seasonal variations can be observed (Table 1, mean and standard deviations). Bacterial counts allowed the 22 rivers to be classified in three groups:

1. 10^5 - 10^7 FC/100 ml: sewage treatment plant and rivers situated in the northern part of the bay (industrial area).
2. 10^3 FC/100 ml $\leq 10^5$: most rivers.
3. $<10^3$ FC/100 ml: only two rivers located in the southern part of the bay.

In the first category cited, the ratio between the number of FC and FS was very high (>100), whereas in slightly polluted rivers this ratio was very low (<10).

To evaluate the interest of using rapid techniques, water samples were collected in March 1993. Fecal coliforms were investigated using enzyme activities of MU galactosidase. Logarithms of activities ranged from $-3.70 \mu\text{M MU min}^{-1}$ in non-contaminated waters to $0.04 \mu\text{M MU min}^{-1}$ in polluted waters while fecal coliform counts by conventional techniques varied from $5 \cdot 10^2$ CFU/100 ml to $6.7 \cdot 10^7$ CFU/100 ml. Viral analyses of the same rivers were realized by RT nested PCR and showed eight positive water samples for HAV RNA, and seven for EV RNA and RV RNA. Among these samples, five were found to be positive for all viral RNA types tested, two contained RV and EV RNAs, two contained HAV and RV RNAs, one contained only EV RNA, and one contained only HAV RNA (Table 1).

Survival Experiments

Experiments were carried out in three areas: Fort de France Bay, close to the Lamentin river outfall (June 1993, turbidity: 4.6 mg/l, salinity: 35.2‰); Arlet Bay (June 1993, turbidity: 3.9 mg/l, salinity 34.75‰); and Le Robert Bay (December 1992, turbidity: 0.7 mg/l, salinity: 32‰ and March 1993, turbidity: 4.85 mg/l, salinity: 35.8‰).

Figure 3 shows an example of bacterial counts and light intensities. In the quartz chamber (UV light receptive) bacterial counts decrease very quickly, while in Plexiglas chambers (UV light blocked) counts decrease more slowly during the day, but continue decreasing through the night. Black chambers (protected from sunlight) show a very low count evolution due to local physical chemical conditions (salinity, temperature, nutrients). Sunlight intensities received by bacteria in chambers were calculated from light recording taking into account light attenuation due to chambers (quartz or Plexiglas) and depth of immersion. A simple first order model was used to estimate the bacterial die off (T90) which is the time (in hours) needed for 90% of the bacteria to lose their culturability. As results show in Table 3, we observed low T90 (1.85 or 2.5 h) depending on light intensity ($10^6 \mu\text{E m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Variations of T90 were observed depending on depth of immersion, location, *etc.* Dark chambers indicate that T90 is 7 h higher and more (29 h) can be found when bacteria are protected from sunlight.

Discussion

Martinique island, with a surface area of 1090 km², is the second archipelago of the Lesser Antilles. Numerous beaches and bays are crowded during weekends and the tourist season. Adrover [1993] indicated that some of the beaches were of poor bacterial quality. Significant and affirmative action was taken by the administration to improve water quality.

Bacterial water quality is usually assessed using conventional techniques to detect indicators (fecal coliforms and fecal streptococci). New techniques based on molecular detection (PCR) and on fluorescent substrate have been proposed recently [Kopecka *et al.*, 1993; Tsai *et al.*, 1993; Berg and Fiksdal, 1988; Augoustinos *et al.*, 1993].

In this study both new and conventional assays were investigated. Standard methods are inexpensive and easy to use for the monitoring of bacterial quality. However, 24 hours or more are needed to obtain results with these methods. Using enzymatic assays, contamination can be evaluated in less than 1 hour. In our study a fairly good relationship can be found between fecal coliform counts and enzymatic activity: $\log \text{MUG} = 0.87 \cdot \log \text{FC} - 7.73$ ($n=15$ and $r=0.89$). Similar results were indicated by Fiksdal *et al.* [submitted] in European coastal waters. Relationship coefficients in Martinique differ from those in Europe because of different water quality (temperature, salinity, *etc.*). However, rapid techniques present some limits for routine use since their analyses have not been automated yet and threshold values remain slightly higher (about 100 FC/100 ml).

The current microbial standards used as safety criteria for water are bacteria counts. It is well known that the presence of fecal bacteria can be linked to the presence of pathogenic microorganisms. In our study viral RNAs were found in numerous analyses of rivers using semi-nested PCR. Our results showed that over 50% (10/20) of river samples contained viral RNA. They were positive for a sample volume as small as 400 μl which agrees with the findings of Kopecka *et al.* [1993] who reported EV RNA in 5 μl of polluted surface water. These authors demonstrated that concentration steps not only led to enrichment of viruses but also to the introduction of impurities and humic acids. Most urban sewage in Martinique is not deputed, which may explain why contamination levels for certain rivers were as high as those of the sewage treatment plant.

No correlation between viral and bacterial contamination was noted except for two rivers with low bacterial counts and without viral RNA. However, some river samples with fecal coliform counts as high as 10^7 CFU/100 ml were negative for all the three viral RNAs. This does not necessarily mean that the sample was free from human viruses but that inhibitors may have been present. In this respect, Abbaszadegan *et al.* [1993] consider that more purification steps are required. Lack of correlation between bacterial and viral contamination has been shown previously in wild shellfish [Le Guyader *et al.*, 1993] and in waters [Berg and Metcalf, 1978].

The impact of contaminated river water from sewage on the quality of coastal areas was investigated through survival trials and T90 studies. Various die-off rates were observed

for different ambient conditions. For sunny weather, T90 values correspond to those cited in the literature (2 h or less) [Bellair *et al.*, 1977; Martin and Bonnefont, 1986]. Slightly longer T90 was measured in cloudy weather by Salomon and Pommepuy [1990]. In light-proof chambers the die-off rate of bacteria ranges from 7 to 30 h. Pommepuy *et al.* [1992] observed that water quality (osmoprotective compounds, nutrients) determines the decrease of culturable bacteria. On European coasts (Mediterranean Sea and English Channel) these authors found very high survival times in the dark (up to 7 or 9 days). The fact that T90 measured in the dark in coastal areas in Martinique is shorter than in Europe can be attributed to temperature and oligotrophic conditions: fecal bacteria would be more stressed than in European estuarine waters. Another difference was noted between these two areas: while bacterial counts stopped decreasing at sunset in Europe, on Caribbean islands they continue to decrease. We can hypothesize that high light intensity or certain wavelengths may be more efficient. On the other hand, the osmotic shock of oligotrophic waters added to sunlight stress can provoke drastic effects on culturable bacteria. These results were provided by Gourmelon *et al.* [1992] who observed that organic matter protects bacteria from the bactericidal effect of sunlight.

For engineers in charge of impact studies and coastal management, the T90 must be chosen carefully. The specific island climate features frequent cloudy weather with brief, intense periods of sunlight (12 h from sunrise to sunset but only about 8 h of effective and efficient illumination). Thus, T90 of several hours used by Lazure *et al.* [submitted] seems to be a realistic value for this part of the world. Our approach of assessing the impact of fecal bacterial river loads on survival rates presents a number of limitations. Some authors indicate that sunlight provokes the appearance of viable but non-culturable bacteria [Barcina *et al.*, 1990; Dupray *et al.*, 1993] but with no evidence that membrane fatty acids should be destroyed [Gourmelon *et al.*, submitted]. These stressed bacteria remain in seawater with a very low metabolism [Rosack and Colwell, 1987]. Their behavior and remaining pathogenic power is currently unknown. Another limitation of our study is due to the fact that the behavior of viruses in the environment is very different from that of bacteria. Moreover, Le Guyader *et al.* [submitted], using polymerase chain reaction, demonstrated that in sterile seawater viral RNA was detectable for a long period (140 days) while Tsai *et al.* [1993] proved that, in the presence of natural seawater, viral RNA can not be detected after 7 days. T90 viral die-off rates must be interpreted with caution.

Conclusions

Rapid techniques such as bacterial enzymatic activity or polymerase chain reaction have proven to be successful in evaluating microbial contamination. In less than 1 h bacterial analyses of fecal coliforms can be assessed; only 2 days are required for viral results by PCR.

Martinique's rivers were found to be more often highly contaminated by urban sewage. Viral RNAs were detected in 50% of the rivers, with Hepatitis A viruses, rotaviruses, and

enteroviruses being representative of human fecal contamination. World-wide rotavirus is the major agent of severe diarrhea in children. While cases in Europe mainly occur during winter, on Caribbean islands pathological cases are reported throughout the year. The prevalence of seropositivity for HAV observed on Martinique, as for example in Venezuela [Pujol, 1990], can be correlated with social and economical standards, while in Europe a decline of seropositivity has been observed.

An indication of the impact of sewage discharge on coastal areas is provided by fecal bacterial die-off rate studies. T90 was found to be lower than in Europe, especially during the night or cloudy weather. However, very little is known about the behavior of pathogenic bacteria, and the fate of viruses is currently unknown. Only an epidemiological study can provide information on the real impact of pathogenic microorganisms discharged in coastal waters on native and foreign populations.

Acknowledgments. We thank local administrations for their help. Financial support was received from the French Research Ministry.

References

- Abbaszadegan, M. S., A. S. Huber, C. P. Gerba, and I. L. Pepper, Detection of enteroviruses in groundwater with the polymerase chain reaction, *Appl. Environ. Microbiol.*, 59, 1318-1324, 1993.
- Adrover, M., Les problèmes de propreté des plages martiniquaises, *TSM, L'eau*, 5, 273-280, 1993.
- Augoustinos, M. T., N. A. Grabow, B. Genthe, and R. Kfir, An improved membrane filtration method for enumeration of fecal coliforms and *E. coli* by a fluorogenic-glucuronidase assay, *Wat. Sci. Tech.*, 27(3-4), 267-270, 1993.
- Barcina, I., J. M. Gonzalez, J. Iriberrri, and L. Egea, Survival strategy of *E. coli* and *E. faecalis* in illuminated fresh and marine systems, *J. Appl. Bacteriol.*, 68, 189-198, 1990.
- Bellair, J. T., G. A. Pair-Smith, and J. G. Wallis, Significance of diurnal variations in fecal coliform die-off rates in the design of ocean outfalls, *J. WPCF*, 77(9), 2022-2030, 1977.
- Berg, G., and T. G. Metcalf, Indicators of viruses in waters, in *Indicators of Viruses in Water and Food*, edited by G. Berg, pp. 267-296, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan, 1978.
- Berg, J. D., and L. Fiksdal, Rapid detection of total and fecal coliforms in water by enzymatic hydrolysis of 4-methylumbelliferone- β -D-galactoside, *Appl. Environ. Microbiol.* 4, 2118-2121, 1988.
- Chapman, N. M., S. Tracy, C. J. Gaunt, and U. Fortmueller, Molecular detection and identification of enteroviruses using enzymatic amplification and nucleic acid hybridization, *J. Clin. Microbiol.*, 28, 843-850, 1990.
- Dupray E., M. Pommepuy, A. Derrien, M. P. Caprais, and M. Cormier, Use of the direct viable count (DVC) for the assessment of the survival of *E. coli* in marine environments, *Wat. Sci. Tech.*, 27(3-4), 395-399, 1993.
- Fiksdal, L., M. Pommepuy, M. P. Caprais, and I. Midttun, Monitoring of fecal pollution in coastal waters by use of rapid enzymatic technique, *Applied Env. Mic.*, 1993, submitted.
- Flores, J., J. Sears, I. P. Schael, L. White, D. Garcia, C. Lanata, and A. Z. Kapikian, Identification of human rotavirus serotype by hybridization to polymerase chain reaction-generated probes

- derived from a hyperdivergent region of the gene encoding outer capsid protein VP7, *J. Virol.*, **64**, 4021-4024, 1990.
- Gourmelon, M., J. Cillard, and M. Pommepuy, Visible light damage on *Escherichia coli* in seawater: Oxidative stress hypothesis, *J. Appl. Bacteriol.*, 1993, submitted.
- Gourmelon, M., J. Cillard, M. Pommepuy, M. P. Caprais, G. Cabet, and M. Cormier, Toxicity of visible light on *Escherichia coli*: Involvement of reactive oxygen species, 6th Internat. Symp. Microbial Ecology, Barcelona, Spain, September 6-11, 1992.
- Gouvea, V., R. I. Glass, P. Woods, K. Taniguchi, H. F. Clark, B. Forrester, and Z. Y. Fang, Polymerase chain reaction amplification and typing of rotavirus nucleic acid from stool specimens, *J. Clin. Microbiol.*, **28**, 276-282, 1990.
- Hernandez, J. F., J. M. Guibert, J. M. Delattre, C. Oger, C. Charrière, B. Hugues, R. Serceau, and F. Singre, Evaluation of a miniaturized procedure for enumeration of *Escherichia coli* in seawater, based upon hydrolysis of 4-methylumbelliferyl- β -D glucuronide, *Wat. Res.*, **9**, 1073-1078, 1991.
- Kopecka, H., S. Dubrou, J. Prevot, J. Marechal, and J. M. Lopez-Pila, Detection of naturally occurring enterovirus in waters by reverse transcription, polymerase chain reaction, and hybridization, *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 1213-1219, 1993.
- Lazure, P., J. C. Salomon, and M. Breton, Subtidal circulation in Fort de France Bay, *Coastal and Estuarine Studies*, 1993, submitted.
- Le Guyader, F., V. Apaire-Marchais, J. Brillet, and S. Billaudel, Use of genomic probes to detect hepatitis A virus and enterovirus RNA in wild shellfish and relationship of viral contamination to bacterial contamination, *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, ____-____, 1993.
- Le Guyader, F., M. L. Dincher, D. Menard, L. Schwartzbrod, and M. Pommepuy, Comparative study of the behavior of poliovirus in sterile seawater using RT-PCR and cell culture, *Let. Appl. Microbiol.*, 1993, submitted.
- Martin, Y., and J. L. Bonnefont, Conditions de décroissance en milieu marin des bactéries fécales des eaux usées urbaines, *Oceanis*, **12**(6), 403-418, 1986.
- Pommepuy, M., J. F. Guillaud, E. Dupray, A. Derrien, F. Le Guyader, and M. Cormier, Enteric bacteria survival factors, *Wat. Sci. Tech.*, **25**(12), 93-103, 1992.
- Pommepuy, M., L. Fiksdal, M. P. Caprais, and M. Cormier, Evaluation of bacterial contamination in an estuary using rapid enzymatic techniques, IAWPC, Budapest 94, submitted.
- Pujol, F. H., I. Rodriguez, C. Borberg, M. O. Favorov, and H. A. Fields, Viral hepatitis serological markers among pregnant women in Caracas, Venezuela, 9th Internat. Congress of Virology, Glasgow, Scotland, August 8-13, 1993.
- Robertson, B. H., V. K. Brown, and B. Khanna, Altered hepatitis A: VP1 protein resulting from cell culture propagation of virus, *Virus Res.*, **13**, 207-212, 1989.
- Rosack, D. B., and R. R. Colwell, Survival strategies of bacteria in the natural environment, *Microbiol. Rev.*, **51**(3), 365-379, 1987.
- Rotbart, H. A., Enzymatic RNA amplification of the enteroviruses, *J. Clin. Microbiol.*, **28**, 438-442, 1990.
- Salomon, J. C., and M. Pommepuy, Mathematical model of bacterial contamination of the Morlaix estuary (France), *Wat. Res.*, **24**, 983-994, 1990.
- Tsai, Y. L., M. D. Sobsey, L. R. Sangermano, and C. J. Palmer, Simple method of concentrating enteroviruses and hepatitis A virus from sewage and ocean water for rapid detection by reverse-transcriptase-polymerase chain reaction, *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 3488-3491, 1993.

Figure Captions

Fig. 1. Location of study area. Survival trials were conducted at (a) Fort de France Bay; (b) Arlet Bay; and (c) Le Robert Bay. River sampling points are indicated by ●.

Fig. 2. Bacterial river contamination at Trois îlets River, point 19 (□ = fecal coliforms; ■ = fecal streptococci) and Petit Bourg River, point 17 (○ = fecal coliforms; ● = fecal streptococci).

Fig. 3. Survival trials in Le Robert Bay, March 1993: (a) Bacterial decay-quartz chamber, plexiglas chamber-dark chamber; and (b) light intensities recorded at 1 m depth.

TABLE 1. Bacterial River Contaminations for Fort de France Bay

| Samples | Fecal Coliform (/100 ml) | | Fecal Streptococci (/100 ml) | |
|---------|--------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|
| | Mean | Standard Deviation | Mean | Standard Deviation |
| 1 | $4.80 \cdot 10^4$ | $1.01 \cdot 10^5$ | $9.51 \cdot 10^3$ | $1.55 \cdot 10^4$ |
| 2 | $2.08 \cdot 10^4$ | $3.32 \cdot 10^4$ | $5.51 \cdot 10^3$ | $1.00 \cdot 10^4$ |
| 3* | $7.28 \cdot 10^5$ | $1.12 \cdot 10^6$ | $3.29 \cdot 10^4$ | $2.58 \cdot 10^4$ |
| 4 | $2.95 \cdot 10^4$ | $5.52 \cdot 10^4$ | $1.27 \cdot 10^4$ | $1.82 \cdot 10^4$ |
| 5* | $4.20 \cdot 10^5$ | $7.19 \cdot 10^5$ | $9.00 \cdot 10^4$ | $1.54 \cdot 10^5$ |
| 6* | $2.60 \cdot 10^6$ | $5.51 \cdot 10^6$ | $3.00 \cdot 10^5$ | $6.51 \cdot 10^5$ |
| 7 | $3.32 \cdot 10^3$ | $6.43 \cdot 10^3$ | $2.81 \cdot 10^4$ | $3.65 \cdot 10^4$ |
| 8* | $1.04 \cdot 10^5$ | $1.76 \cdot 10^5$ | $1.11 \cdot 10^4$ | $1.66 \cdot 10^4$ |
| 9* | $8.41 \cdot 10^4$ | $7.15 \cdot 10^4$ | $3.47 \cdot 10^4$ | $6.17 \cdot 10^4$ |
| 10* | $8.43 \cdot 10^4$ | $8.31 \cdot 10^4$ | $3.32 \cdot 10^4$ | $5.64 \cdot 10^4$ |
| 11 | $1.92 \cdot 10^4$ | $1.80 \cdot 10^4$ | $4.42 \cdot 10^3$ | $3.20 \cdot 10^3$ |
| 12 | $3.89 \cdot 10^4$ | $7.72 \cdot 10^4$ | $4.97 \cdot 10^3$ | $1.10 \cdot 10^4$ |
| 13* | $8.52 \cdot 10^5$ | $1.12 \cdot 10^6$ | $3.77 \cdot 10^4$ | $4.76 \cdot 10^4$ |
| 14 | $1.03 \cdot 10^2$ | $1.29 \cdot 10^2$ | $2.89 \cdot 10^2$ | $2.28 \cdot 10^2$ |
| 15* | $7.08 \cdot 10^6$ | $1.88 \cdot 10^7$ | $1.01 \cdot 10^5$ | $1.73 \cdot 10^5$ |
| 16 | $4.80 \cdot 10^6$ | $1.24 \cdot 10^7$ | $4.40 \cdot 10^5$ | $1.12 \cdot 10^6$ |
| 17 | $4.86 \cdot 10^3$ | $6.31 \cdot 10^3$ | $6.76 \cdot 10^2$ | $3.15 \cdot 10^2$ |
| 18* | $1.70 \cdot 10^5$ | $2.82 \cdot 10^5$ | $1.42 \cdot 10^5$ | $1.73 \cdot 10^5$ |
| 19* | $3.50 \cdot 10^7$ | $9.42 \cdot 10^7$ | $2.40 \cdot 10^5$ | $3.77 \cdot 10^5$ |
| 20 | $2.92 \cdot 10^3$ | $3.17 \cdot 10^3$ | $3.22 \cdot 10^2$ | $3.03 \cdot 10^2$ |
| 21* | $1.99 \cdot 10^5$ | $2.36 \cdot 10^5$ | $2.16 \cdot 10^4$ | $2.05 \cdot 10^4$ |
| 22* | $4.15 \cdot 10^5$ | $8.43 \cdot 10^5$ | $2.94 \cdot 10^5$ | $4.57 \cdot 10^4$ |

*Sewage treatment plant.

TABLE 2. Microbiological results for river sampling points in Fort de France Bay (March 1993)

| Sample | Polymerase Chain Reaction | | | β gal (log) | FC (/100 ml) |
|--------|---------------------------|----|----|----------------------|------------------|
| | HAV | EV | RV | | |
| 2 | + | + | + | -3.58 | $3.5 \cdot 10^3$ |
| 4 | + | + | + | -3.23 | $7 \cdot 10^4$ |
| 5* | - | - | - | -3.07 | $6 \cdot 10^4$ |
| 6* | - | + | - | -0.02 | $3 \cdot 10^7$ |
| 7 | + | + | + | -1.10 | $3 \cdot 10^5$ |
| 8* | + | + | + | -2.01 | $2.6 \cdot 10^6$ |
| 9* | + | - | + | -2.36 | $4.8 \cdot 10^5$ |
| 10* | + | - | + | -1.64 | $8 \cdot 10^5$ |
| 11 | + | - | - | -2.17 | $1 \cdot 10^5$ |
| 12 | - | - | - | -3.72 | $1 \cdot 10^4$ |
| 13* | - | + | + | -1.49 | $1.8 \cdot 10^6$ |
| 14 | - | - | - | nd | $6 \cdot 10^2$ |
| 15* | - | - | - | -1.12 | $6.7 \cdot 10^7$ |
| 16 | - | - | - | -2.83 | $5 \cdot 10^4$ |
| 17 | - | - | - | -3.11 | $4.4 \cdot 10^4$ |
| 19* | - | - | - | -0.04 | $1.8 \cdot 10^6$ |
| 20 | - | - | - | nd | $5 \cdot 10^2$ |
| 21* | - | - | - | -0.29 | $3 \cdot 10^4$ |
| 22* | + | + | + | -1.74 | $2 \cdot 10^5$ |

HAV = hepatitis A virus; EV = enterovirus; RV = rotavirus; β gal = galactosidase assay ($\log \cdot \mu\text{Mol.l}^{-1}$); FC = fecal coliforms; * = sewage treatment plant; +(-) = sample found positive (negative) after RT-nested-PCR.

TABLE 3. Examples of T90 of *Escherichia Coli* in Three Locations

| Date | Location | T° (°C) | Depth (m) | Chambers | Light | T90 (hours) | Salinity (‰) | Turbidity (mg/l) |
|------------|----------|------------|--------------|----------|---|----------------|-----------------|---------------------|
| | | | | | Intensity $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ | | | |
| June 1992 | A | 27.7 | 2 | Light | nd | 2.50 | 35.20 | 4.6 |
| | | 28.0 | 5 | Light | nd | 9.50 | 35.60 | 4.6 |
| | | 28.0 | 5 | Light | nd | 6.40 | 35.60 | 4.6 |
| | | 28.2 | 6.50 | Dark | <10 ⁴ | 7.80 | 35.70 | nd |
| June 1992 | B | 28.0 | 2 | Light | 1.38 10 ⁶ | 1.85 | 34.70 | 3.9 |
| | | 28.0 | 10 | Light | 5.13 10 ⁵ | 7.10 | 34.75 | nd |
| | | 28.0 | 10 | Light | 3.65 10 ⁵ | 4.80 | 34.75 | nd |
| | | 28.0 | 13 | Dark | <10 ⁴ | 6.50 | 34.75 | nd |
| Dec. 1992 | C | 26.8 | 1 | Light | 1.73 10 ⁶ | 1.85 | 32.00 | 0.7 |
| | | 26.8 | 1 | Light | 8.44 10 ⁵ | 4.50 | 32.00 | 0.7 |
| | | 26.8 | 1 | Light | 2.00 10 ⁴ | 8.30 | 32.00 | 0.7 |
| | | nd | 3 | Dark | <10 ⁴ | 16.30 | nd | nd |
| March 1993 | C | 27.0 | 0.5 | Light | 3.82 10 ⁶ | 1.55 | 35.80 | 4.85 |
| | | 27.0 | 1 | Light | 1.01 10 ⁶ | 5.10 | 35.80 | 4.85 |
| | | nd | 3 | Dark | <10 ⁴ | 29.00 | nd | nd |
| | | nd | 3 | Dark | <10 ⁴ | 15.35 | nd | nd |

A = Fort de France Bay; B = Arlet Bay; C = Le Robert Bay.

Fig 1

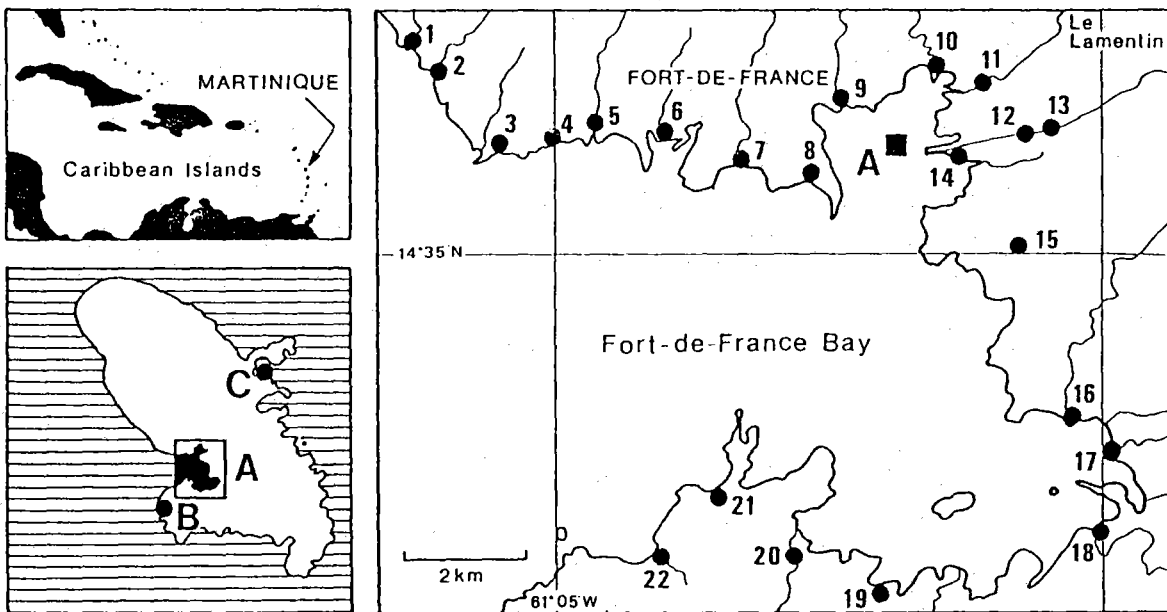
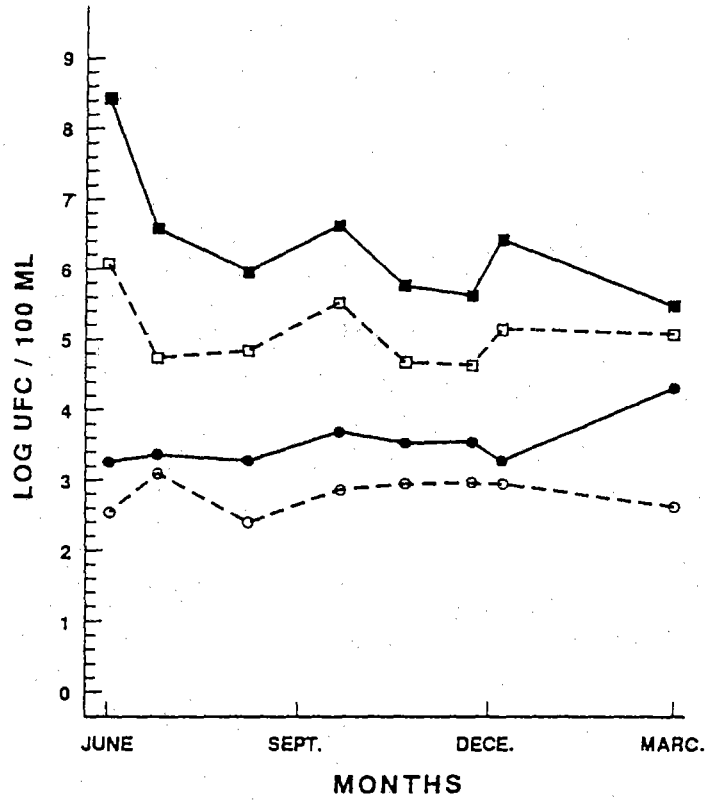
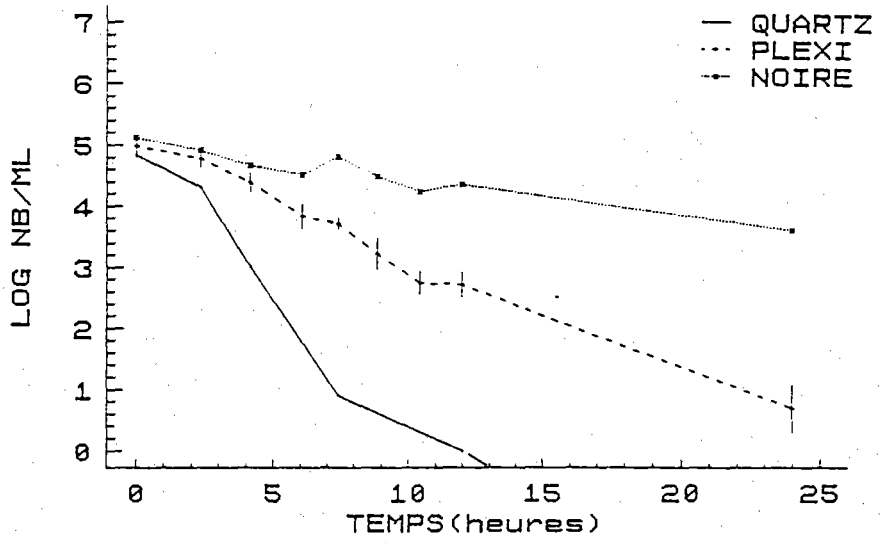


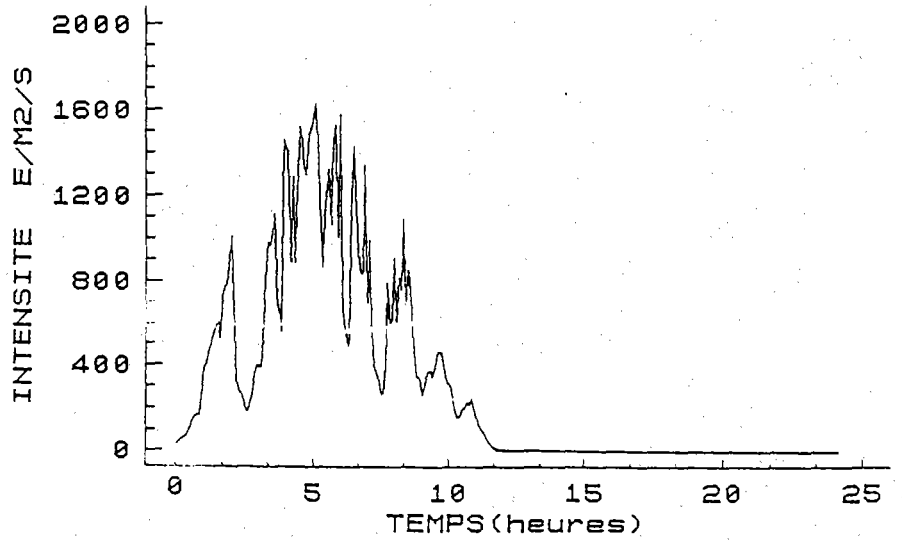
Fig 2



BAIE DU ROBERT
E. COLI 2.03.93



INTENSITE LUMINEUSE
2.03.93



ANNEXE IV

Subtidal circulation in Fort de France Bay.

Lazure P., Salomon J.C., Breton M.

Small Island Oceanography Coastal and Estuaries studies (accepté pour publication)

5

Subtidal Circulation in Fort De France Bay

Pascal Lazure, J. C. Salomon, and M. Breton

Abstract

Two numerical models have been used to study coastal circulation around Martinique and Fort de France Bay. The last three-dimensional model is more advanced than the global study because the bay is partly isolated from external influences. After a review of past studies, the first results of the global model and the three-dimensional model used for the study of the bay are briefly presented. The main aspects of the circulation are then outlined and an application to the bacteria transport is presented.

Introduction

Industrial and tourist activities in Martinique need more and more local studies in order to expand with limited impacts on the environment. To answer questions that may arise in coastal management, IFREMER has begun a program to model the main aspects of coastal circulation around Martinique. Due to the high population concentration in Fort de France, special attention to its bay has been planned.

The bay (Figure 1) is the largest along the Caribbean coast of Martinique. The northern side is greatly urbanized, and most industries stand near Cohe du Lamentin. Inversely, the southern part of the bay is sparsely populated, with the exception of Pointe du Bout, which has numerous touristic activities.

Physical Background

Three main dynamical processes have been considered for the study of coastal circulation. The first is the large-scale circulation which seemed able to act near the coast because the continental shelf may be very narrow, especially along the Caribbean. The island of

Small Island Oceanography
Coastal and Estuarine Studies, Volume __
Copyright 1994 by the American Geophysical Union

Martinique is a part of the Lesser Antilles. These islands interrupt the North Equatorial Current; some of this flow enters the Caribbean Sea through passages and continues westward as the Caribbean Current. Stalcup and Metcalf [1972] have estimated the flow through the St. Lucie passage (south of Martinique) at 6 Sv (1 Sv = 10^6 m³/s), whereas Brooks [1976] has measured one-third of this. Both noted that this flow is highly variable. The flow through St. Dominique passage (north of Martinique) has been less investigated. Stalcup and Metcalf [1972] estimated it at 1 Sv but highly variable with the tide.

The tide is the other dynamical process. The Caribbean Sea has a micro-tidal range, and the tidal type shows great variation. In Martinique it is of mixed mainly diurnal type [Kjerfve, 1981], and the mean tidal range varies from 10 to 30 cm. Tidal currents in the St. Lucie passage are able to reverse the flow [Stalcup and Metcalf, 1972]. Near the coast, tidal currents of around 20 cm/s have been measured at the mouth of Fort de France Bay in the north [Castaing *et al.*, 1986] and in the south [Breton *et al.*, 1993]. However, inside the bay tidal currents are very weak [Castaing *et al.*, 1986].

The last dynamical process is the circulation induced by local winds. According to Castaing *et al.* [1986], it is the main circulation process in Fort de France Bay. The winds in Martinique are fairly constant in direction: 86% of the time they blow from northeast to east, their speed varies during the year, and the maximum occurs in June.

The main aspects of the circulation (Figure 2) issued from drifter trajectories and local current measurements have been summarized by Castaing *et al.* [1986]. Due to the prevailing wind, the surface currents are directed toward the west. This outflow is compensated by an inflow near the bottom where the currents are topographically guided and follow channels. Near the coast, in the eastern part of the bay, this circulation is likely to give rise to vertical movement. At the entrance, a southward general flow prevails, and the currents are uniform from the surface to the bottom.

Other processes which act occasionally like cyclone-induced circulation or massive freshwater input may be temporarily of greater importance.

Global Model

The global model of the whole of Martinique has been built by Salomon [personal communication]. This model is vertically integrated. The large-scale westward current has been reproduced by applying a sea level slope at the boundaries and a uniform wind stress. In addition to this pressure gradient and wind force, tidal oscillation extracted from tidal charts [Schwidorsky, 1981] has been imposed. Figure 3 shows an extracted current field. The main results may be summarized as follows:

1. Under wind and pressure gradient forcings only, the model shows that the island acts as an obstacle and that currents diverge near the southeast extremity of the island. A first vein goes north along the coast accelerating over shallows. A second vein creates a gyre along the southern coast. Along the Caribbean coast, the velocities decrease

considerably and Fort de France Bay becomes mainly sheltered from oceanic influences.

2. The tide being added into the computation gives correct elevation, but current intensities are generally three to five times lower than measurements. It seems to show that tidal currents are not a unique barotropic mechanism.

For this reason and because previous studies have shown that the tide is very weak inside Fort de France Bay, this forcing has been neglected in the following computations.

Model of the Bay

The numerical model employed is three-dimensional and assumes hydrostaticity [Lazure and Salomon, 1991].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{\partial P}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Nz \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{\partial P}{\partial y} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Nz \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

where u , v , and w are velocities, f is the Coriolis parameter, ε is the horizontal viscosity, g is gravity, P is pressure, ρ is density, and Nz is the vertical eddy viscosity. It has free surface and includes a sigma coordinate system. The equations are solved on a traditional staggered grid in the horizontal by using a mode-splitting technique [Blumberg and Mellor, 1981a]. The vertical turbulent viscosity is calculated according to the Prandtl [1925] mixing length model. This model is simple and economical, and many successful calculations have been obtained for boundary layer type flows [Rodi, 1987]. The mixing length formulation is attributed to Sauvaget [1985].

$$Nz = \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad 1/\ell = \frac{1}{0.4(z)} + \frac{1}{0.7(H-z)} \quad (\ell = \text{mixing length})$$

The open boundary condition is a simple radiation condition for the velocity, and the levels have been calculated by the global model. Because of the previously mentioned

problems, the tide has been removed. The wind stress at the surface have been taken as uniform over the entire bay due to the lack of data about the possible effects of the local topography.

A grid size of 125 m has been chosen because a good spatial resolution may be reached, whereas the computing time remains reasonable. The vertical discretization consists of 10 levels equally spaced from the surface to the bottom.

Results

The bay is supposed initially at rest and an east-northeast 7 m/s wind is suddenly imposed at the surface. A seiche is generated and oscillates for a few hours. However, its influence is very weak on the sea level (the amplitude of the oscillation is less than 1 cm), as well as on the currents (less than 1 cm/s). After 20 hours of simulation, the permanent state is almost achieved, and the computed surface and bottom currents are presented in Figure 4.

Comparison of the results with Figure 2 shows that the model is able to reproduce the main features of the circulation. It also provides interesting information that could not be obtained by measurements.

The surface currents may reach 20 cm/s north of Ilet à Ramiers. In general, it is directed toward the west or the south. Most of the variability may be attributed to topographical effects. The strength of the current increases as the depth decreases.

Near the bottom, the circulation is very different and often inverted. A general flow enters the bay from the northwest by the central channel. North of Pointe du Bout, it separates into two branches: one directed toward Cohe du Lamentin and the other toward Genipa Bay.

In the shallow parts of the bay, the vertical shear prevent the flow from reversing near the bottom. This can be observed south of Genipa Bay, for example. However, over most of the bay, the current depends on the depth. Below the surface, the influence of the wind stress decreases with the depth.

Between the surface and the bottom, currents vary differently. Figure 5 presents a vertical profile from Pointe du Bout to Fort de France. One may observe the diversity of the vertical structures of the currents. In the north, the current reverses near the bottom. Over the shallow depths, the speed slightly decreases from the surface to the bottom. In the channel, the surface current is very weak because the pressure gradient and wind stress act in opposite directions. Below, the countercurrent increases until a maximum is reached at 3 m above the bottom.

When the wind direction is slightly shifted to the north or to the east, the main features of the circulation remain the same.

Application

The transport and mixing of bacteria in the bay have been calculated by adding to the numerical model the three-dimensional, advection-dispersion model:

$$\frac{\partial HC}{\partial t} + \frac{\partial H \left(UC - K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial H \left(VC - K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial H \left(WC - K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial z} = I - M$$

where K_x and K_y are horizontal diffusivities, K_z is the vertical diffusivity, I represents the input fluxes, and M is the mortality rate. The horizontal advection terms are calculated with the Takacs [1986] scheme, which is very efficient and produces small numerical dispersion. All vertical derivations are treated implicitly. In the absence of stratification, vertical diffusivity has been taken to equal the vertical viscosity.

Most of the bacteria inputs are located in the northern part of the bay, in Fort de France and its suburb. Tourist activities, including many ships mooring near Pointe du Bout, also produce a significant input. In the absence of measurements, each flux has been roughly estimated at 10^9 fc/s (fc: fecal coliform). Finally, north of Anse à l'Ane, a new sewage treatment plant will be built; the predicted flux is $1.7 \cdot 10^9$ fc/s. As long as the spreading plume doesn't interact with other plumes, it has been simulated.

Bacteria cannot be considered as a conservative dissolved matter since they die when they enter the sea. This mortality may be partly explained by the light effect; mortality increases with the light. The T90 quantifies the mortality rate and represents the time needed for a decrease of one log (90%) of a population of bacteria. According to recent measurements in the bay, this time has been estimated at three hours during most times of the day (10 hours) and at 20 hours otherwise [Pommepey *et al.*, 1993].

The concentrations are shown (Figure 6) for the end of the night and at midday. The depth at which these results are presented is not important, since the water is well-mixed and the concentrations are the same from the surface to the bottom.

At the end of the night, before the sun becomes efficient, the concentrations are the greatest over the entire bay. However, one may observe that most of the bay remains clean from a bacteriological point of view. As expected, in regard to the input locations, the most important concentrations are found near Fort de France and do not extend for more than 1 km to the south, the mean transport being directed to the west along the northern coast. The eastern part of Cohe du Lamentin is not affected by the three inputs.

In the south, according to the mean currents, the plume which originates at Pointe du Bout extends eastward, whereas the plume which will originate from the new sewage treatment plant will spread to the west. Because of the strong currents in this part of the bay, its extension will be the greatest and probably affect the Anse à l'Ane beach during east-

northeast wind.

As the sun begins to shine, bacteria die and, after a few hours, concentrations are constant and reduced by more than a factor of 10. All the bacteria are located within a radius of about 1 km from the input.

Conclusions and Perspectives

The three-dimensional model presented shows that it may be a useful and economical tool in coastal management. The main aspects of the circulation have been reproduced. However, more comparisons with measurements are needed to ensure that it is correctly calibrated. An acoustic Doppler current profile (ADCP) survey has been planned in 1994 in order to provide a large set of data at different depths.

In order to improve the global model, the density structure which has been taken as constant over the whole ocean will be schematically taken into account and a three-dimensional calculation will be tested. It is expected that baroclinic effects will notably increase the speed of tidal currents near the coast.

However, many uncertainties will remain in modelling both mechanisms and many measurements near the coast and farther seem indispensable. At the moment, reasonable confidence can be put into a local study of a semi-closed area which is apparently protected from large-scale circulation influence. The study of the Fort de France Bay is an example.

References

- Blumberg, A. F., and G. L. Mellor, A numerical calculation of the circulation in the Gulf Mexico, Rep. 66, pp. 153, Princeton N.J., 1981a.
- Breton, M., P. Douillet, P. Lazure, and J. C. Salomon, Compilation de mesures de courantologie sur le littoral occidental de la Martinique, Rapport IFREMER, 1993 (in press).
- Brooks, I. H., Transport and velocity measurements in St. Lucia Passage in the Lesser Antilles (abstract), *Eos Trans. AGU*, 59, 1109, 1978.
- Castaing, P., A. de Resseguier, C. Julius, M. Parra, J. C. Pons, M. Pujos, and O. Weber, Qualité des eaux et des sédiments dans la baie de Fort de France (Martinique): Compte-rendu de fin d'étude, Action concertée, CORDET, 1986.
- Kjerfve, 1981.
- Lazure, P., and J. C. Salomon, Coupled two-dimensional and three-dimensional modelling of coastal hydrodynamics, *Oceanologica Acta*, 14(2), 173-180, 1991.
- Pommepuy, M., A. Derrien, F. Le Guyader, D. Menard, M. P. Caprais, E. Dubois, E. Dupray, and M. Gourmelon, Microbial water quality on a Caribbean island (Martinique) (submitted).
- Prandtl, L., Über die ausgebildete Turbulenz, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, 5, 136, 1925.
- Roberts, H. H., S. P. Murray, and J. N. Suhayda, Physical processes in a fringing reef system, *J. Mar. Res.*, 33, 233-260, 1975.
- Rodi, W., Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *J. Geophys. Res.*, 92(C5), 5305-5328, 1987.

Kjerfve, B., 1981. Tides of the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 86(C5): 4243-4247.

SCHWIDERSKI, 1983.

Atlas of ocean tidal charts and maps, Part I : the semi diurnal principal lunar tide M2. *Marine Geodesy*, vol. 6, n° 3-3, 219-265.

- Sauvaget, P., A numerical model for stratified flows in estuaries and reservoir, M.A. thesis, University of Iowa, 1985.
- Schwidersky, 1981,
- Stalcup, M. C., and W. G. Metcalf, Current measurements in the passages of the Lesser Antilles, *J. Geophys. Res.*, 77, 1032-1049, 1972.
- Takacs, L.L., A two-step scheme for the advection equation with minimized dissipation and dispersion errors, *Mon. Weath. Rev.*, 1050-1065, 1985.

Figure Captions

Fig. 1. Location and bathymetry of Fort de France Bay.

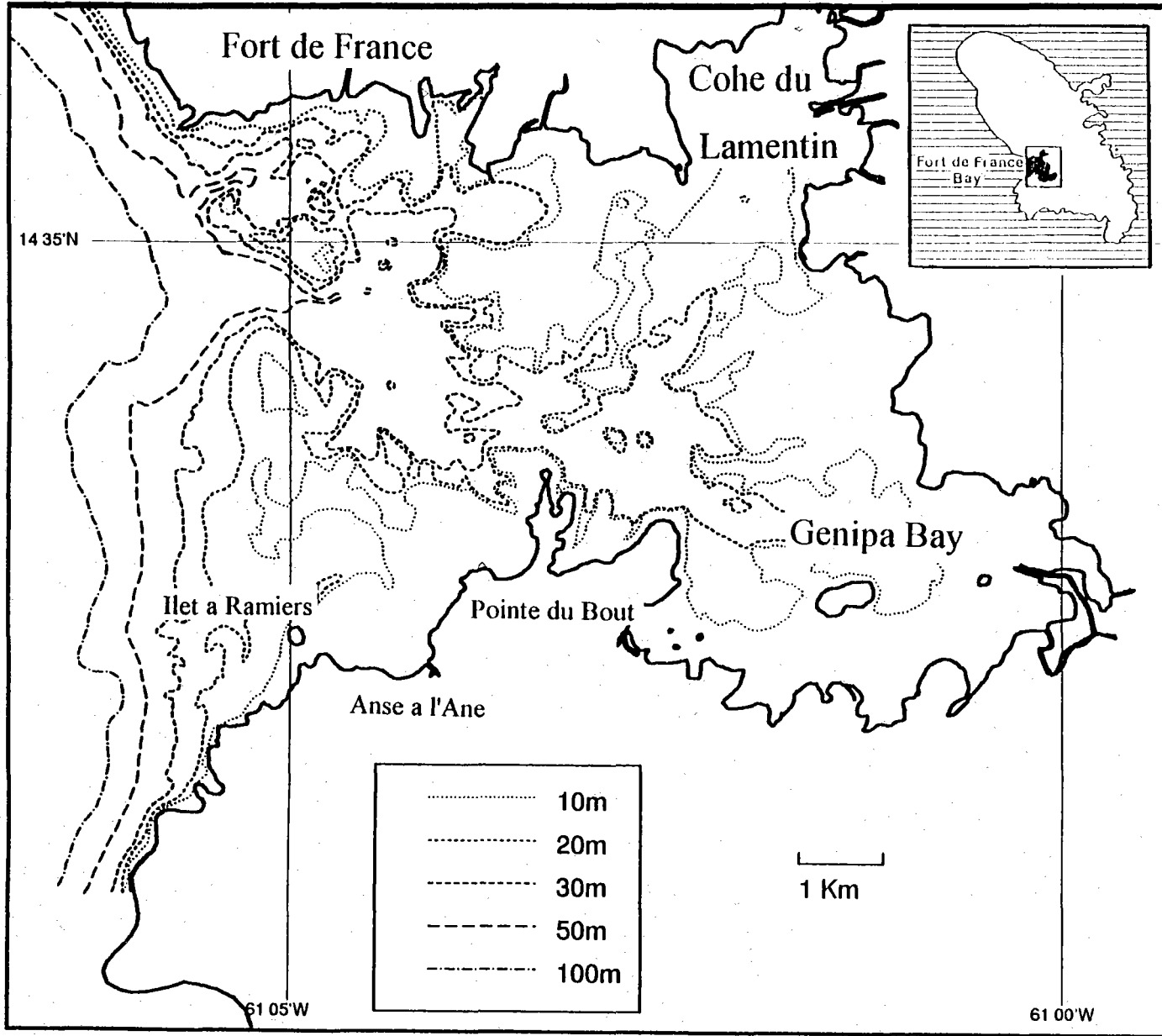
Fig. 2. Mean circulation in the bay [from Castaing *et al.*, 1986].

Fig. 3. Velocity field calculated by the global model.

Fig. 4. Velocity field near the surface (top) and near the bottom.

Fig. 5. Vertical current profile. Contour lines are at 0.02 cm/s. The dotted line is the zero velocity. The pattern lightens when the current is westward. At the opposite, it darkens when it is eastward.

Fig. 6. Concentration of fecal coliform/100 ml at the end of the night (bottom) and at midday. The arrows show inputs. Contour lines are at 50 fc/100 ml intervals.



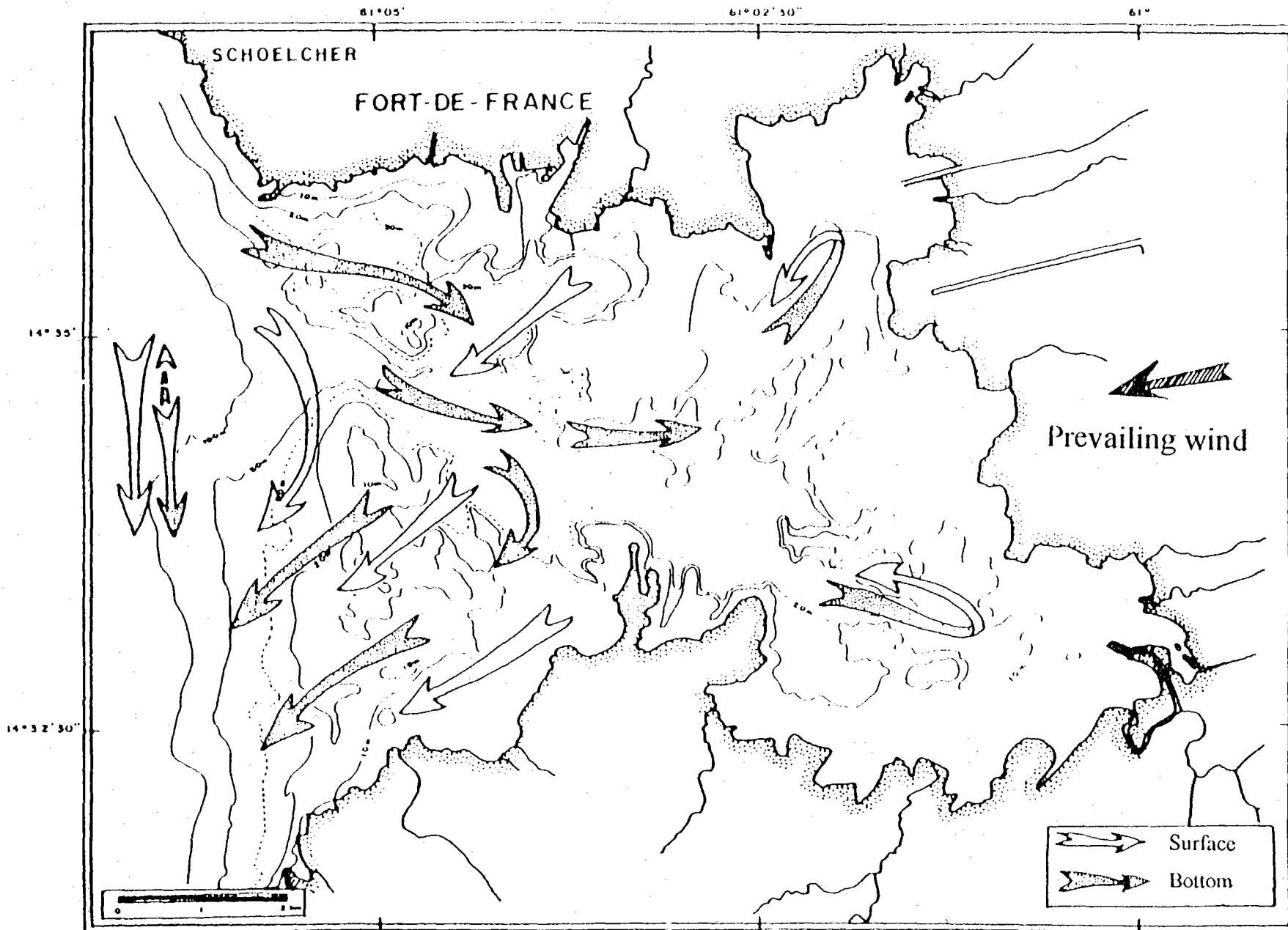


Fig. 2

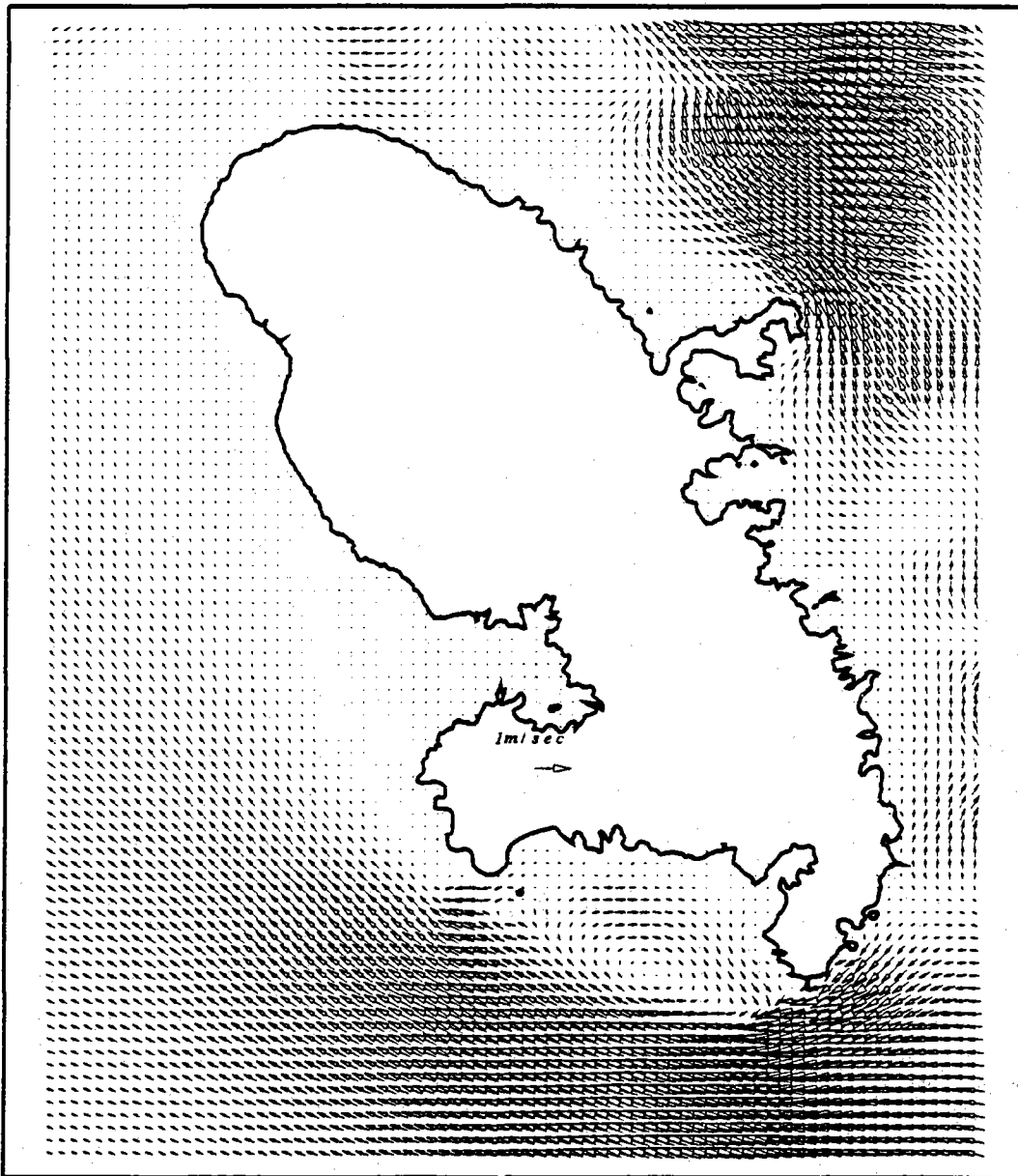
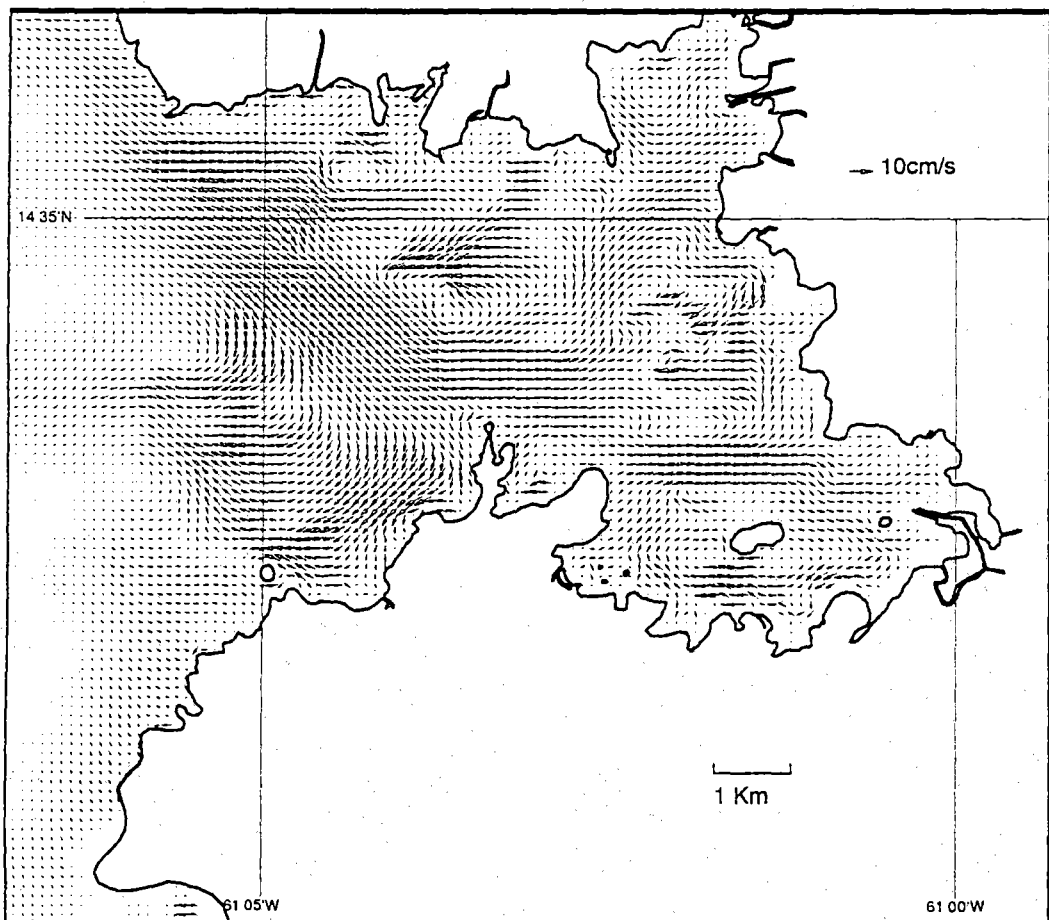
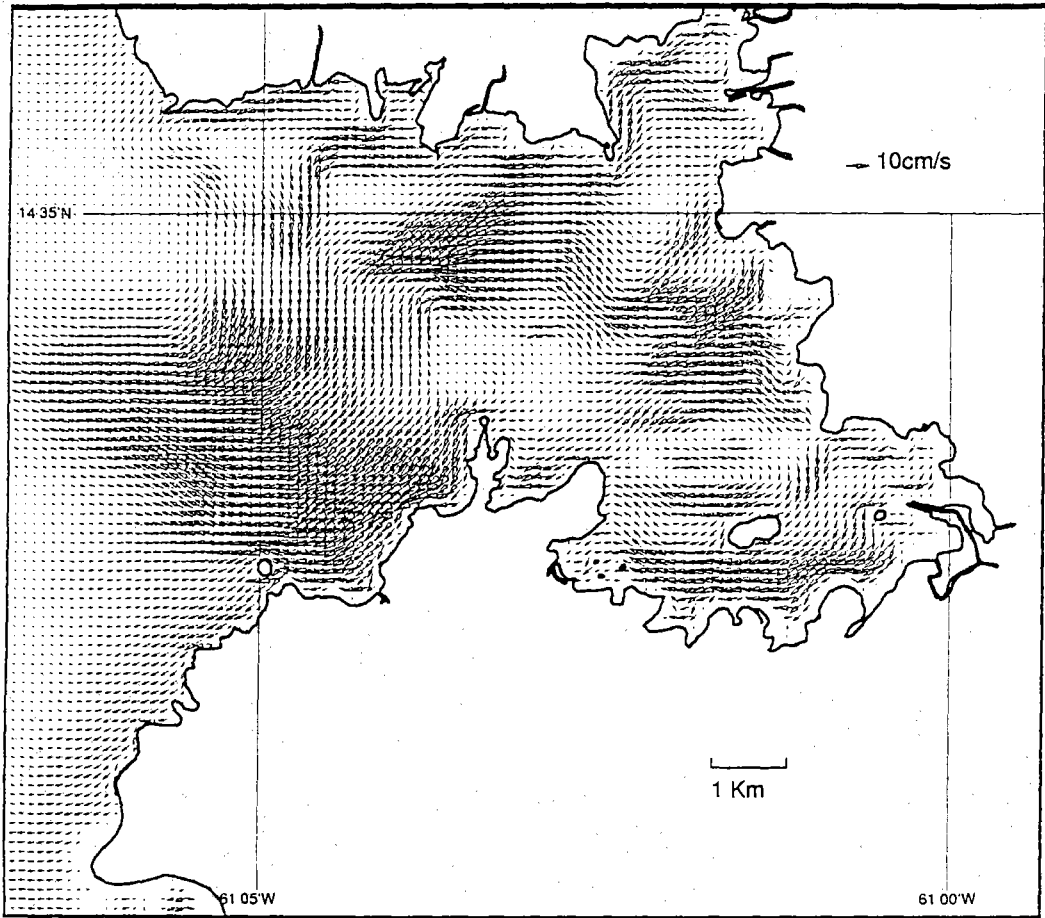


Fig. 3



D. fig. 1

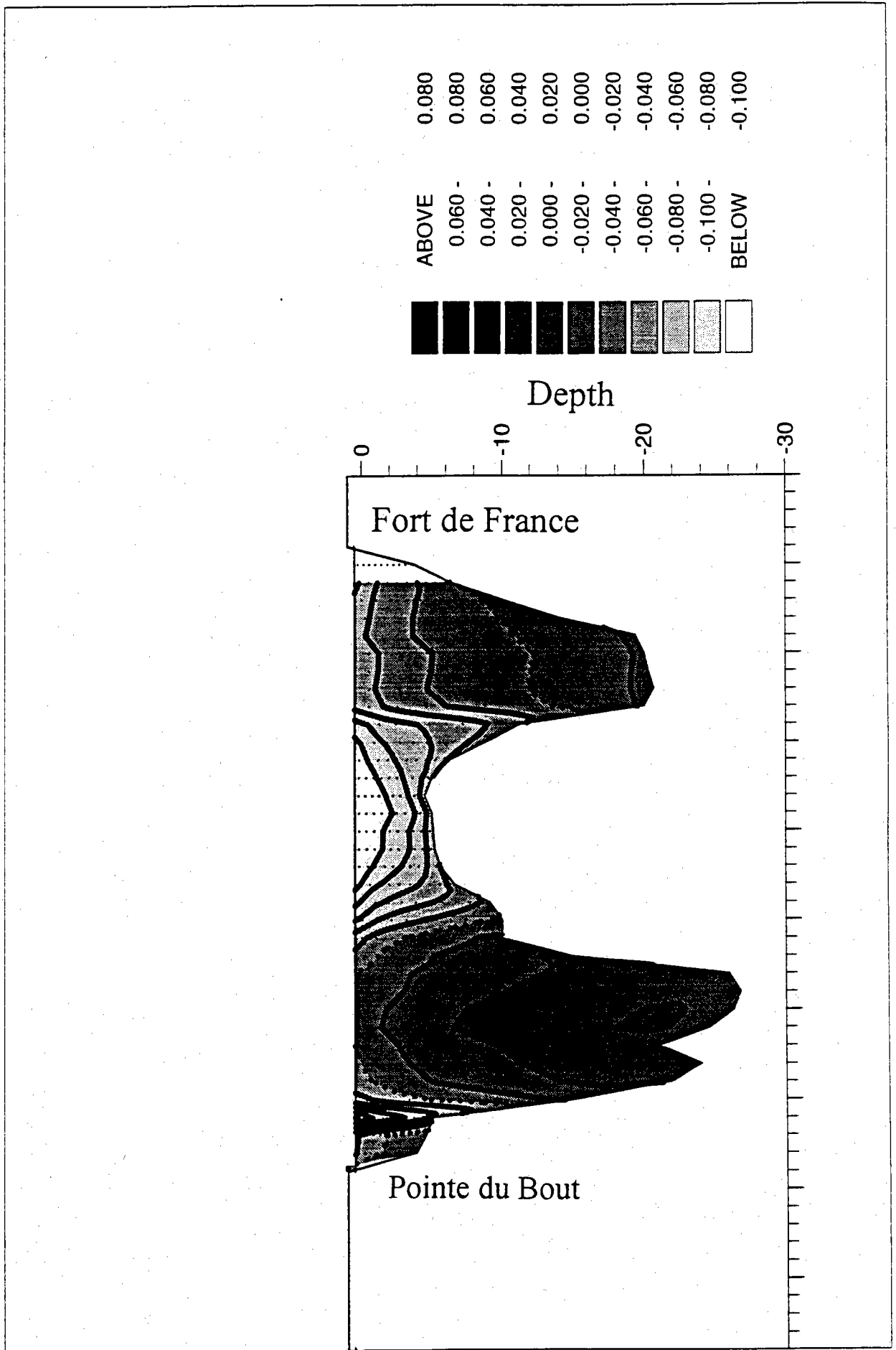


Fig 5

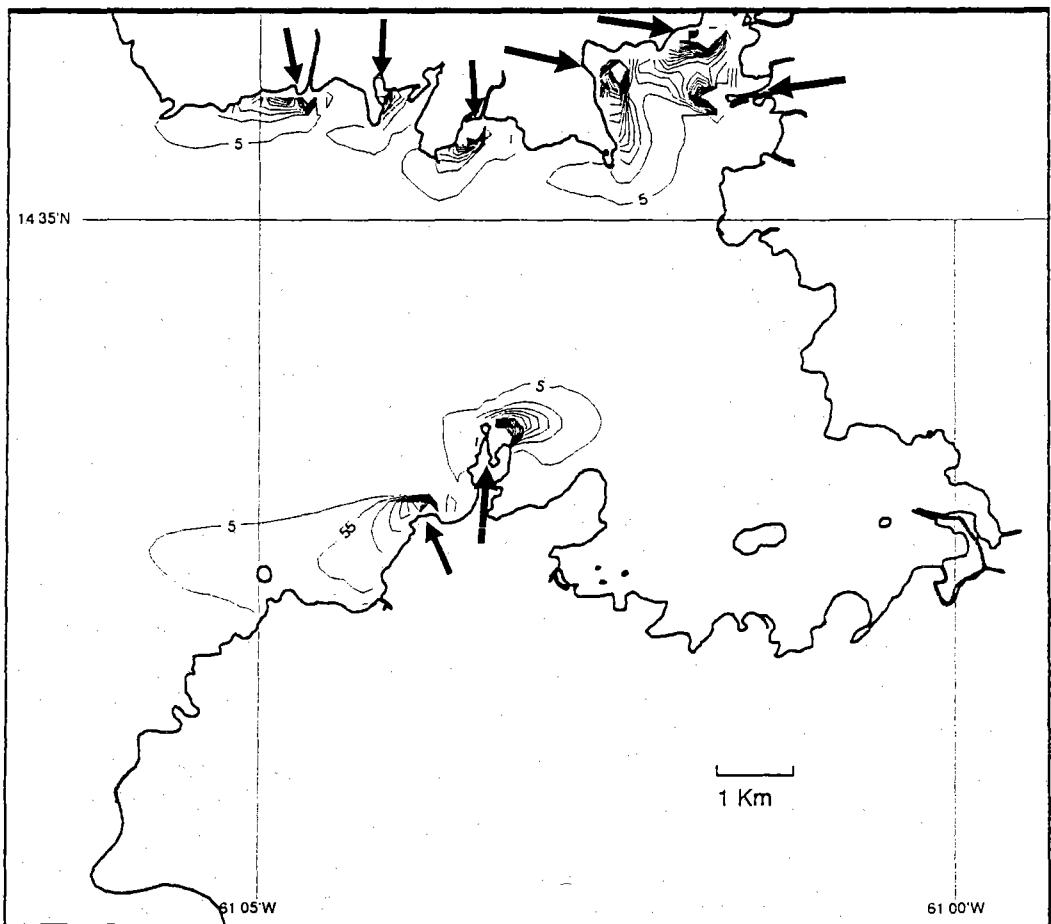
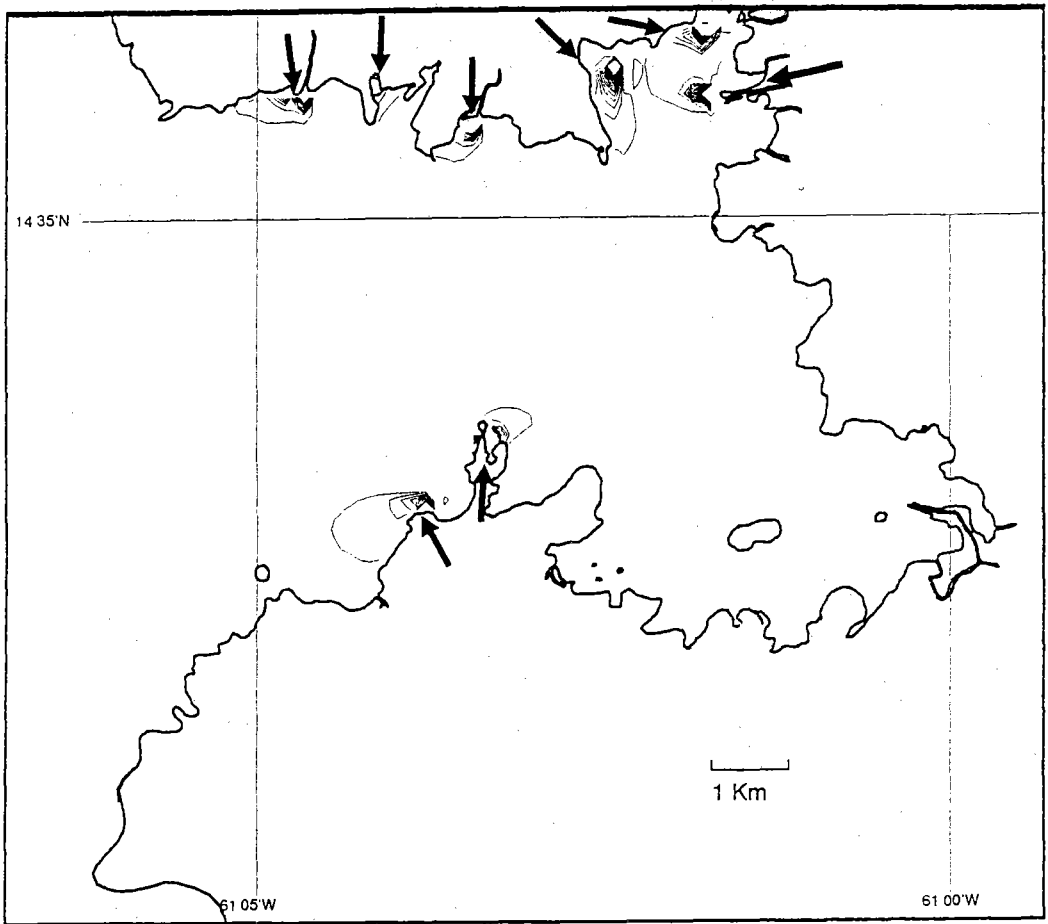


Fig 6