

FONDATION OcéANOGRAPHIQUE RICARD
Ile des Embiez
83140 SIX FOURS LES PLAGES

CETE MEDITERRANEE
13290 LES MILLES

Contrat CNEXO n° 83/7134

F.A.E.R. 1.50.014

QUALITE DES EAUX LITTORALES

Etude expérimentale dans un pilote à flux continu
de l'évolution des bactéries d'un effluent
urbain en milieu marin. Données préliminaires.

MARTIN Y. (1)
BALEUX B. (2)
BONNEFONT J.L. (3)
EQUEL J.C. (3)
GOT P. (2)
LELONG P. (1)
TANGUY B. (4)
TROUSSELIER M. (2)

- (1) Fondation océanographique Ricard. Ile des Embiez. 83140 Six Fours
- (2) USTL Labo. d'Hydrobiologie marine. 34060 Montpellier Cédex
- (3) CETE 13290 Les Milles
- (4) Faculté des Sciences et Techniques de St Jérôme. Lab. Biologie marine
13397 Marseille Cédex 4

S O M M A I R E

	Page
RESUME	
I - OBJECTIFS	1
II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL	3
A. Description du pilote à flux continu	3
B. Protocole général des essais	3
C. Analyses réalisées	7
1) Paramètres physiques et chimiques	7
2) Analyses bactériologiques	7
III - RESULTATS	8
<i>Campagne MEZE 1 : 4-7 juillet 1983</i>	8
A. Objet	8
1) Etude du comportement général du dispositif expérimental	8
2) Evolution du comportement des constituants....	8
B. Résultats	8
1) Homogénéité du mélange	8
2) Comportement des constituants du mélange	12
<i>Campagne MEZE 2 : 7-11 novembre 1983</i>	16
A. Etude du comportement général du système	16
1) Injection ponctuelle d'un marqueur bactérien et échantillonnage	18
a- Echantillonnage : analyse de variance	21
b- Comparaison des données numériques obtenues aux résultats des simulations	22
2) Seconde expérience de marquage	24
3) Discussion	26
B. Comportement des constituants du mélange....	27
1) Protocole	27
2) Résultats	28
IV - CONCLUSION	36

- RESUME -

Des expériences antérieures effectuées dans un pilote expérimental clos avaient permis d'évaluer la vitesse de disparition (T_{90}) des entérobactéries d'un effluent urbain dans l'eau de mer.

Afin de se rapprocher des conditions du milieu naturel, il convenait de vérifier les résultats obtenus dans un modèle à flux continu de grand volume permettant entre autre d'estimer les effets de l'apport continu d'effluent et d'eau de mer et de faire varier la dilution et la vitesse de passage des germes dans des zones de dilutions successives. Un tel pilote constitué par trois bassins pouvant être utilisés séparément ou en cascade a été mis en place sur le site du lagunage de Mèze et nous rapportons ici les résultats des premières expériences effectuées dans ce dispositif (homogénéité du système, suivi de l'évolution d'un mélange effluent/eau de mer injecté en continu avec différents temps de séjour, effet de la cascade...).

Ces données préliminaires montrent que ce pilote à flux continu semble bien adapté pour la réalisation des objectifs de cette étude. En particulier, nous avons pu obtenir des résultats en accord avec les prévisions des simulations numériques réalisées à partir des données des expérimentations en pilote clos. Nous avons également observé l'effet dû au passage des bactéries dans des zones de dilutions successives et qui conduit à une élévation de leur temps de survie pour une dilution donnée (par rapport au système clos).

QUALITE DES EAUX LITTORALES

"Etude expérimentale dans un pilote à flux continu de l'évolution des bactéries d'un effluent urbain en milieu marin. Données préliminaires".

I - OBJECTIFS

Les travaux réalisés au cours de plusieurs expériences sur un pilote clos de 2 m³ installé à Aix-en-Provence nous ont permis d'obtenir différentes informations sur le devenir des coliformes fécaux d'un effluent urbain en eau de mer et en particulier :

- de quantifier la vitesse de disparition de ces germes due à des phénomènes biologiques (T_{90} dépendant de la mortalité "biologique", quantifié en fonction de la saison et de la dilution initiale de l'effluent par l'eau de mer)

- de mettre en évidence certaines variables explicatives de ce phénomène à l'aide d'expériences annexes et du traitement statistique des données recueillies qui montrent que ce " T_{90} biologique" dépend notamment de la qualité de l'effluent (matières organiques particulières et dissoutes...) et donc de l'efficacité de la filière d'épuration. Ces résultats nous ont conduit à l'élaboration d'un modèle mathématique des processus biologiques intervenant dans cette dynamique des bactéries, autorisant des simulations numériques du comportement des germes en différentes situations.

Cependant, dans les conditions naturelles, les phénomènes sont plus complexes et la vitesse de disparition peut être caractérisée par un " T_{90} global" intégrant à la fois les effets de la dilution et de la diffusion des bactéries, de la sédimentation des particules de l'effluent sur lesquelles les germes sont généralement adsorbés, de la mortalité biologique et de l'apport continu des constituants de l'effluent dans la zone concernée par le rejet.

L'application du modèle mathématique cité à un système à flux continu (rejet théorique) met en évidence différents points qu'il conviendrait de vérifier expérimentalement :

1. que le coefficient d'abattement des bactéries à la sortie d'une zone de dilution fixée dépend du temps de séjour dans cette zone.

2. que les quantités de bactéries subsistant en sortie sont supérieures à celles estimées à partir du T_{90} obtenu en modèle clos (effets de l'apport continu).

3. que la sédimentation des particules de l'effluent sur lesquelles sont le plus souvent adsorbées les bactéries joue un rôle probablement important dans la disparition des germes de la zone considérée.

4. que la survie de ces germes sur ces particules plus ou moins organiques devrait être plus longue dans la zone de sédimentation (accumulation de matériel organique et de bactéries) d'où un danger potentiel de pollution.

De même, on peut se demander quel serait l'effet du passage successif des germes dans différentes zones de dilution sur leur temps de survie.

Pour tenter d'éclaircir ces différents points, il apparaissait important de conduire des recherches dans un dispositif à flux continu de grand volume plus proche par ailleurs de la réalité du milieu marin. Une telle étude a été engagée en 1983 dans un pilote expérimental installé sur le centre de recherche du laguna-ge de Mèze (Hérault) en collaboration avec le laboratoire d'Hydrobiologie marine et continentale de l'USTL et le CETE d'Aix-en-Provence.

Nous présentons ici les résultats obtenus lors des premières expériences effectuées dans ce pilote.

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

A. Description du pilote à flux continu

Le pilote est constitué par trois bassins d'un volume utile de 6,5 m³ pouvant être alimentés soit séparément, soit en cascade (selon schémas et photos ci-joint) permettant de moduler les volumes respectifs d'effluent et d'eau de mer admis dans chaque composant (différentes dilutions) et les temps de séjour dans les trois bacs.

Ce modèle expérimental devrait permettre de simuler un flux permanent d'effluent à un point de rejet et d'analyser les effets de cet apport constant et de la dilution continue dans trois zones de mélanges différents par les rapports respectifs des constituants initiaux, mais également par les modifications subies par le système depuis la sortie de l'émissaire jusqu'au point étudié, lesquelles dépendront du temps de séjour dans chaque zone (ici chaque bac).

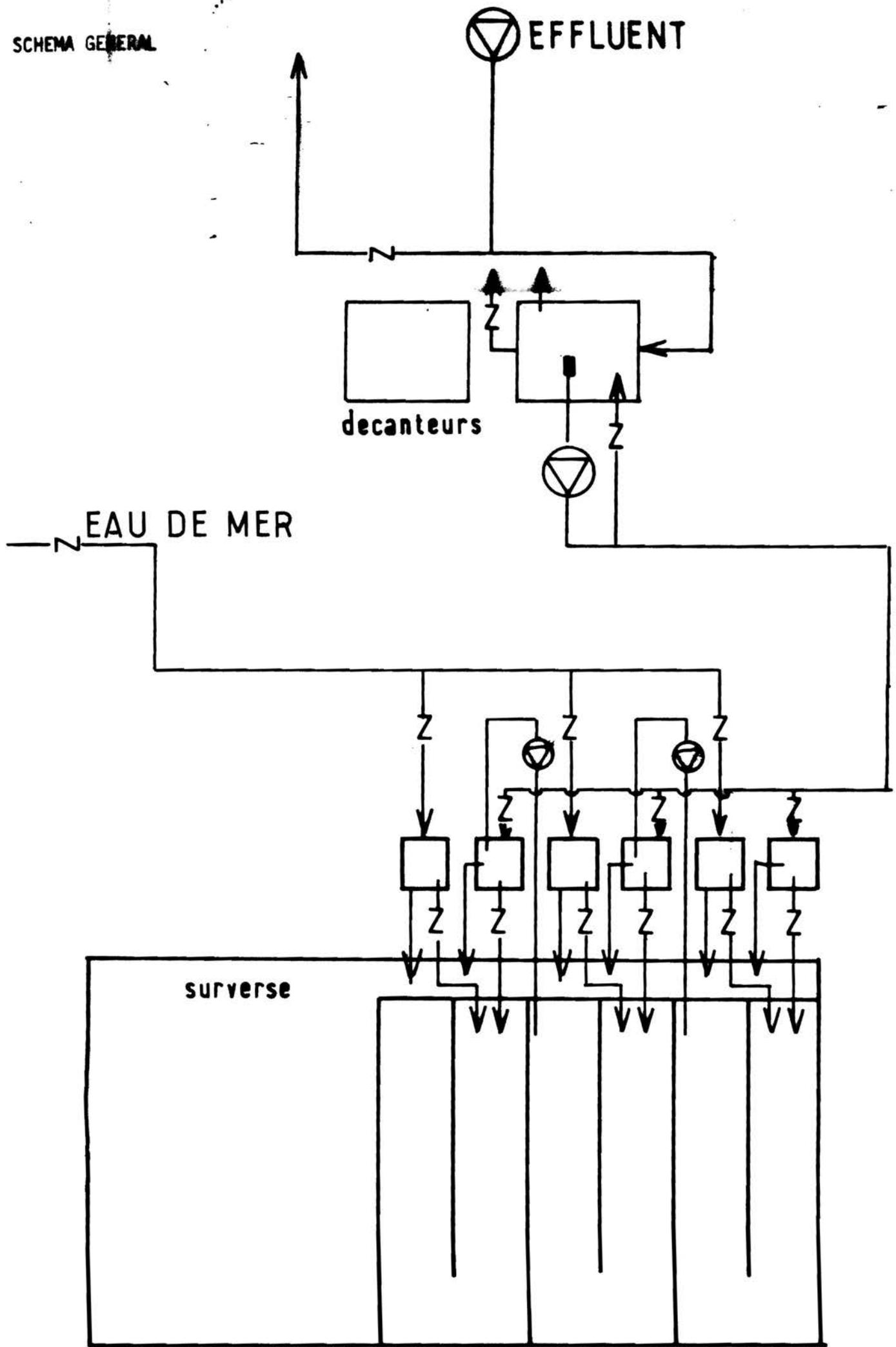
B. Protocole général des essais

Deux campagnes ont été réalisées. Il s'agissait tout d'abord d'évaluer le comportement hydraulique du système par des expériences de marquage et d'échantillonnage :

- utilisation d'un traceur chimique, la rhodamine
- utilisation d'un traceur bactérien : injection d'une culture de *Serratia marcescens*, aisément reconnaissable sur les plaques de gélose grâce à sa couleur rouge et le suivi de sa distribution spatio-temporelle
- évaluation par échantillonnage de la distribution des groupes bactériens choisis à différents points des bassins dans les conditions réelles d'expérimentation (différentes dilutions du mélange effluent-eau de mer, différents temps de séjour).

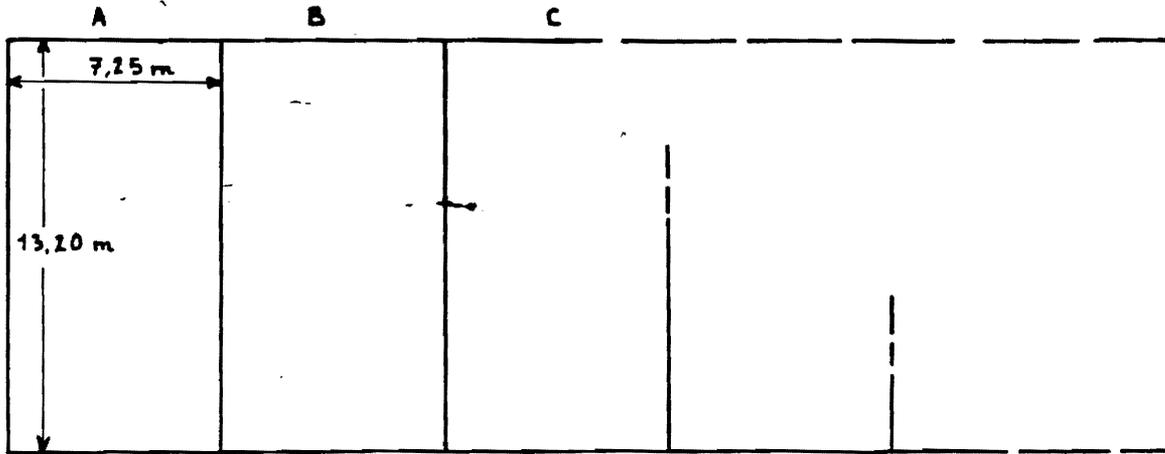
Cet échantillonnage a pu être réalisé grâce à un dispositif original (photo 3) permettant le prélèvement simultané de neuf échantillons dans une même tranche d'eau (3 en surface, 3 à demi profondeur, 3 au fond).

SCHEMA GENERAL

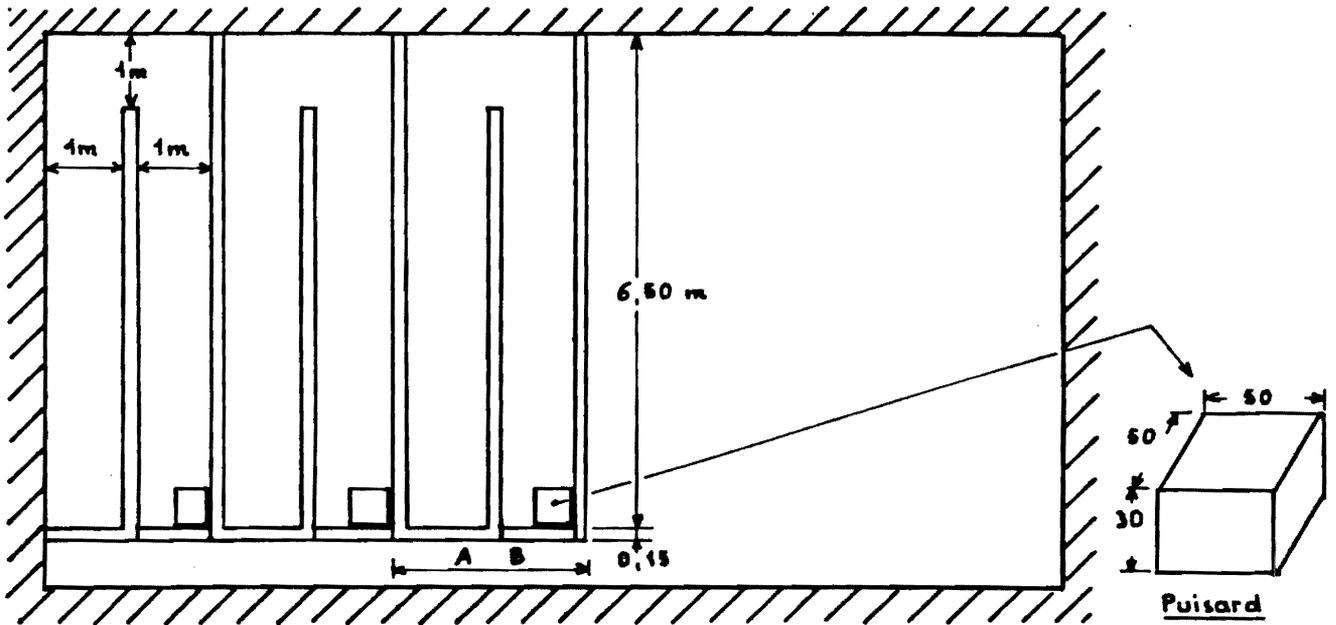


BASSIN EXPERIMENTAL

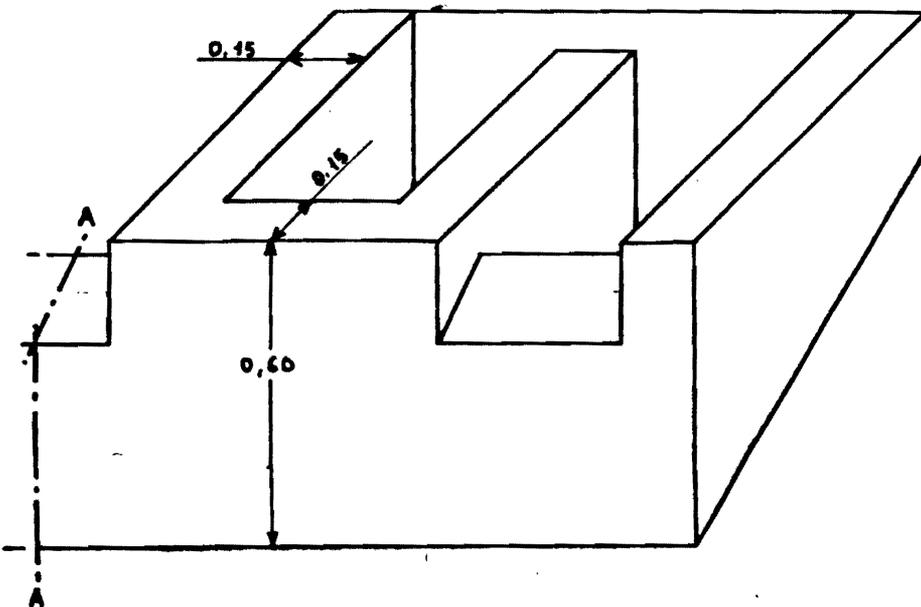
VUE D'ENSEMBLE



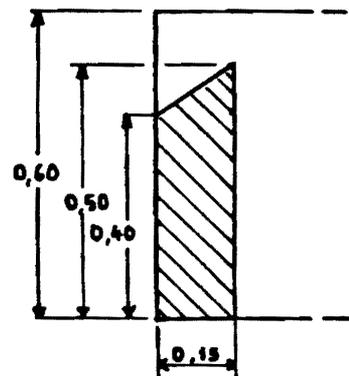
DESCRIPTIF DU BASSIN A



VUE EN PERSPECTIVE AB



1/2 COUPE AA



Il s'agissait d'autre part d'évaluer le comportement des bactéries choisies, en fonction des conditions expérimentales imposées : rapport de volume Effluent/Eau de mer, temps de séjour dans les bassins, utilisation de dispositifs en cascade.

C. Analyses réalisées

Les analyses suivantes ont été effectuées dans l'effluent, dans l'eau de mer et dans le mélange selon un rythme particulier pour chaque protocole expérimental choisi.

1) Paramètres physiques et chimiques

- température, salinité, oxygène dissous, pH, MST
- DCO de l'effluent
- sels nutritifs (ammonium, nitrites, nitrates, phosphates) et urée
- azote total Kjeldhal
- chlorophylle a

2) Analyses bactériologiques

- estimation quantitative de la microflore hétérotrophe viable sur gélose nutritive (N.A.) et sur "marine agar" Difco incubé à 20°C (M.A.)
- dénombrement des coliformes fécaux sur gélose TTC au tergitol (IPP) incubée à 44,5°C et des streptocoques fécaux sur gélose D-coccosel (BioMérieux) incubée à 37°C.
- recherche et dénombrement éventuel de certaines bactéries pathogènes présentes dans l'effluent :

- . *Pseudomonas aeruginosa* sur milieu Institut Pasteur
- . *Aeromonas hydrophila* sur un milieu PXA à 37°C
- . *Serratia marcescens* sur gélose nutritive

III - RESULTATS

Campagne MEZE 1 : 4-7 juillet 1983

A. Objet

1) Etude du comportement général du dispositif expérimental :

- alimentation en eau de mer et en effluent décanté : régularité des débits
- possibilités de réglage des flux ; fiabilité dans le temps en fonction de la dilution choisie ou des temps de séjour
- homogénéité du mélange dans les bassins (1 bassin isolé ; trois bacs en cascade avec différentes dilutions de l'effluent par l'eau de mer)
 - . répartition de traceurs chimiques ou bactériens dans les bassins (marquage)
 - . expérience d'échantillonnage

2) Evolution du comportement des constituants du mélange Effluent/Eau de mer lors du passage dans un bassin pour une dilution et un temps de séjour donné au cours d'un cycle de 24 h.

B. Résultats

1) Homogénéité du mélange

- marquage

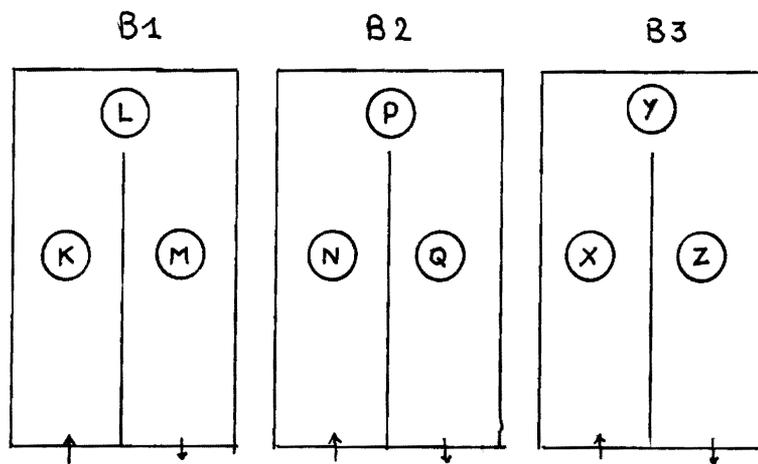
Les expériences de marquage n'ont pas permis d'obtenir de résultats satisfaisant : diffusion immédiate de la Rhodamine dans la totalité du bassin avec écoulement préférentiel en surface ; erreur systématique sur l'estimation des dilutions à utiliser pour dénombrer *Serratia*.

- échantillonnage

Trois bacs en cascade avec apport continu d'effluent et d'eau de mer ont été utilisés. Les rapports de volume Effluent/ Eau de mer (R_V) et les temps de séjour (T_S) étaient :

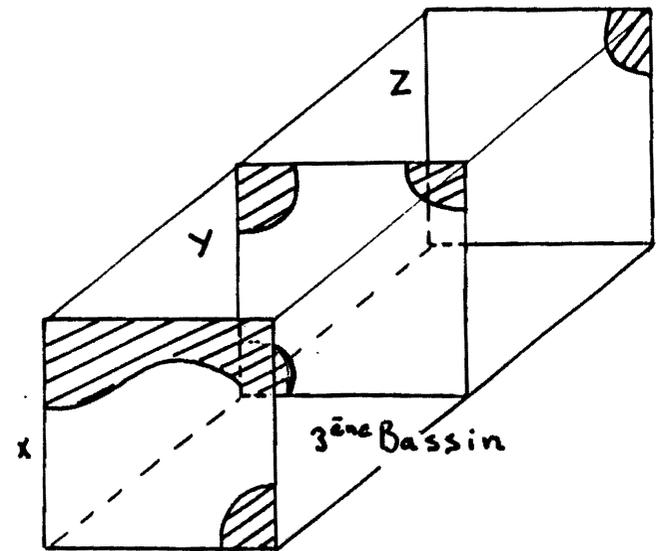
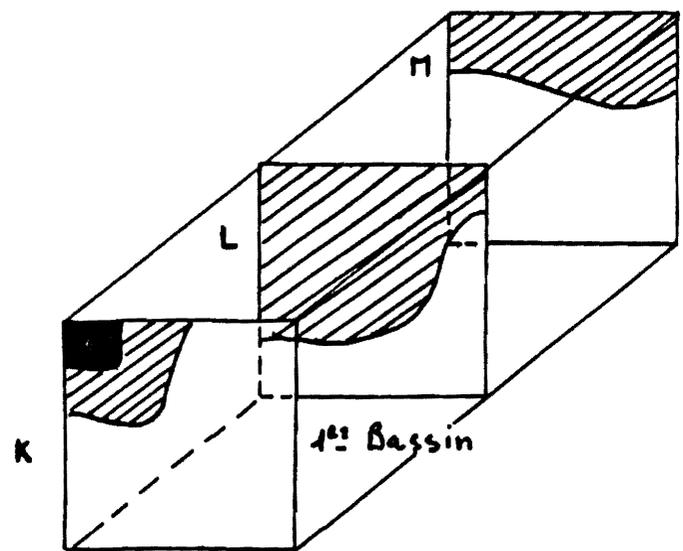
	R_V	T_S
Bac B1	1/7,5	5 h 28
B2	1/75	3 h 57
B3	1/1280	3 h 52

Les prélèvements d'échantillons ont été effectués après 13 h de fonctionnement du système à différents points des bassins. Pour chaque bassin on a choisi neuf points de prélèvement (trois points en surface, trois points médians et trois points au fond) à trois endroits différents des bassins selon le schéma ci-dessous :

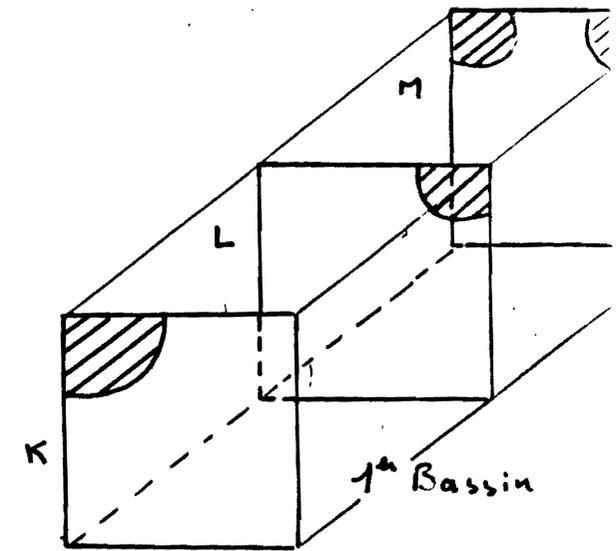


Résultats : La répartition des germes (microflore hétérotrophe sur milieu salé et non salé, coliformes fécaux et streptocoques fécaux, *Pseudomonas aeruginosa* et *Aeromonas hydrophila*) est présentée sur les figures 1 et 2.

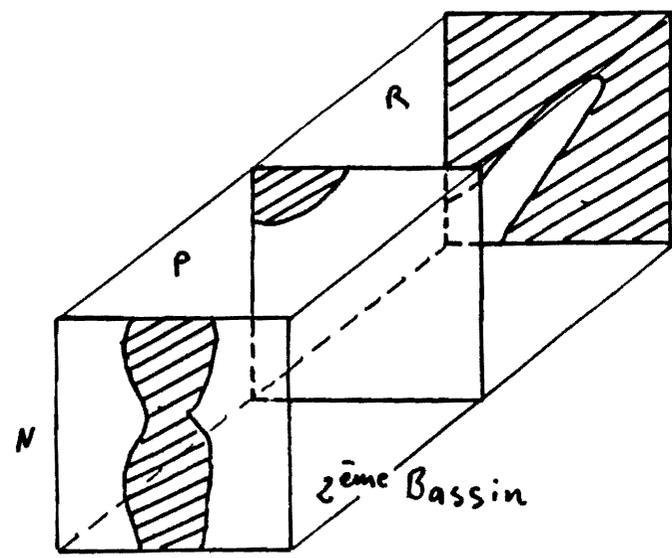
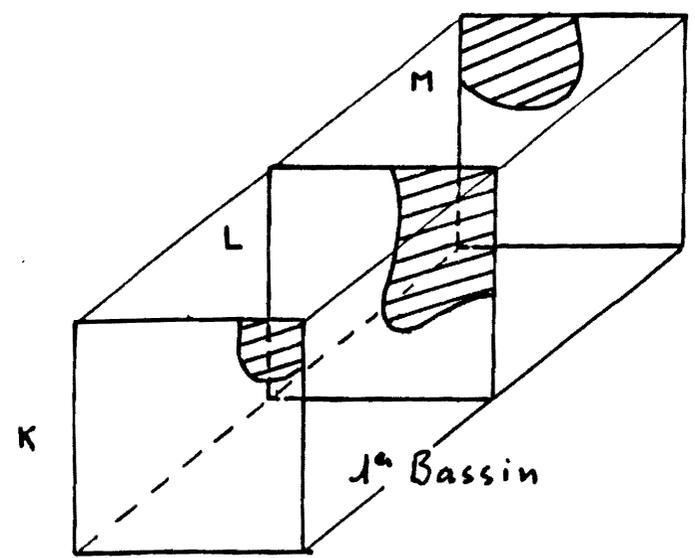
COLIFORMES FÉCAUX



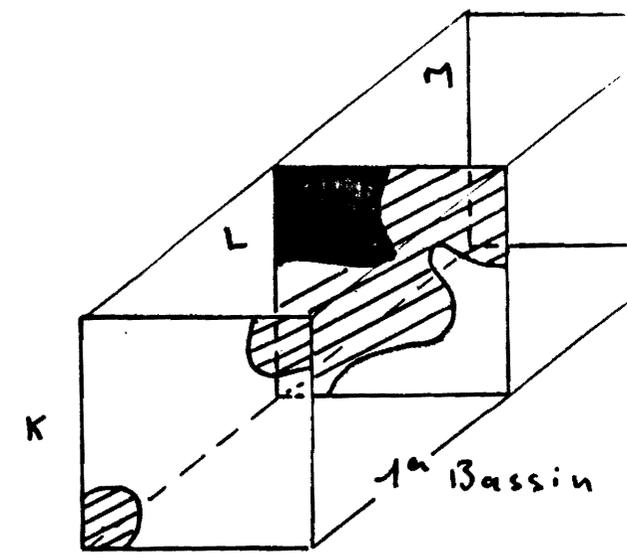
PSEUDOMONAS AERO



STREPTOCOQUES FÉCAUX



AEROMONAS HYDROPHILA



- : < 10 10^2 bact/ml.
- ▨ : $50 < x < 10$
- : > 50

Fig. 1

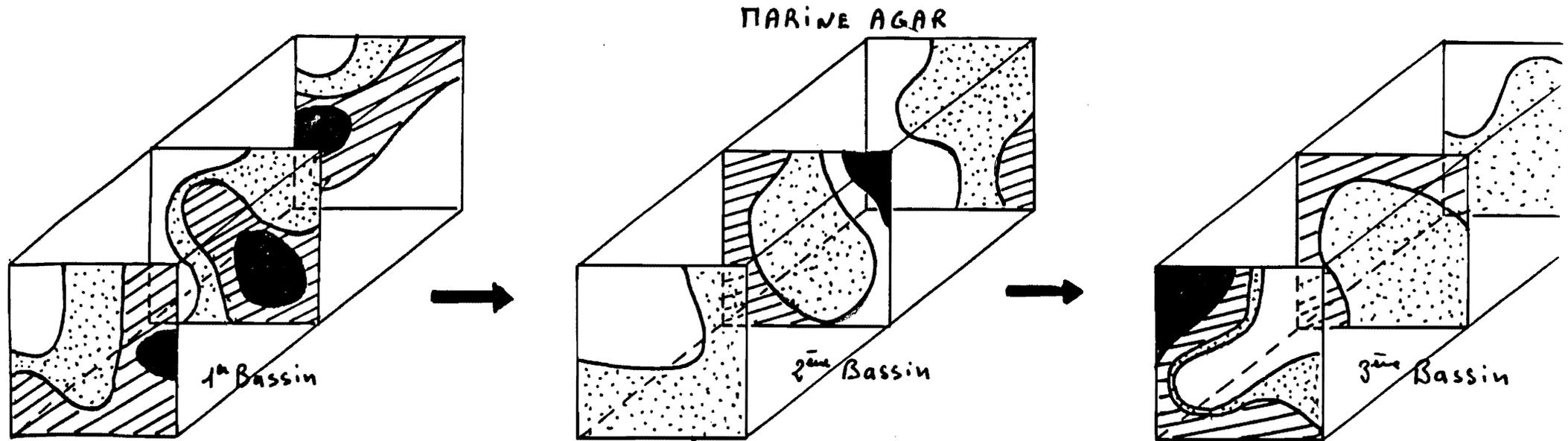
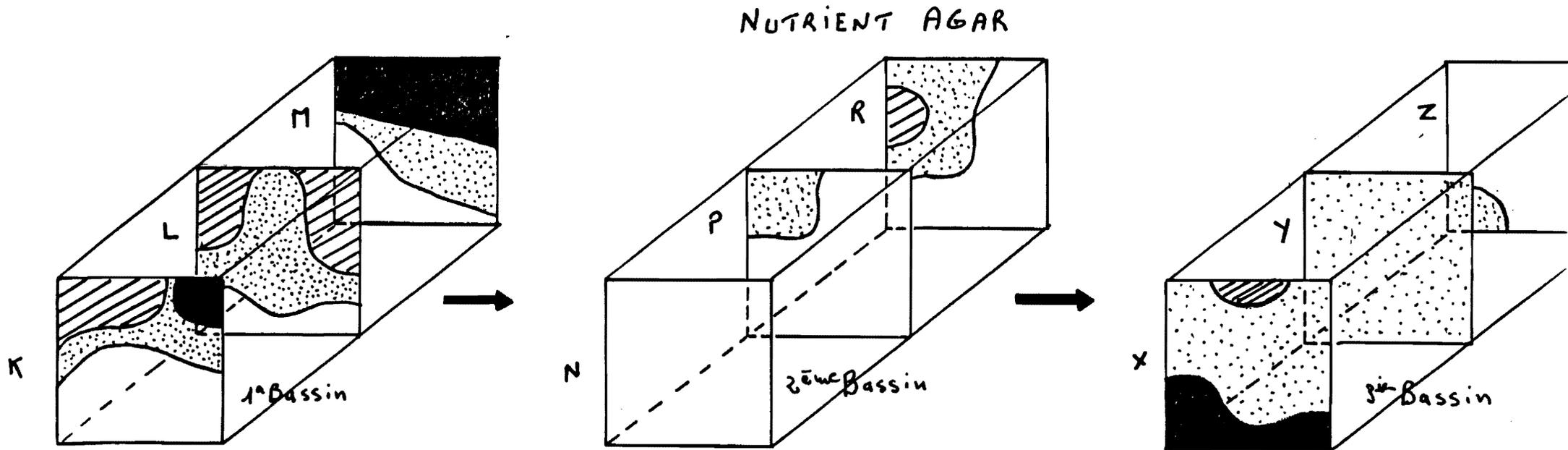
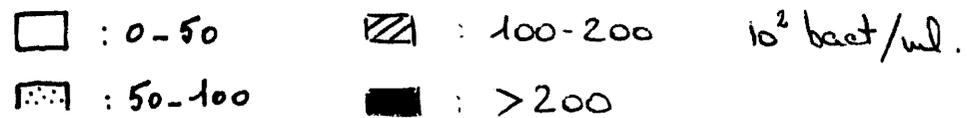


Fig. 2



D'après la répartition des bactéries, on constate un mélange incorrect de l'eau de mer et de l'effluent, en particulier dans le bassin n° 1 où l'effluent reste dans les couches superficielles (cf. figures concernant la microflore hétérotrophe sur milieu doux et salé ; les coliformes fécaux et *Pseudomonas aeruginosa*, où ces phénomènes sont nets). Les deux bacs suivants semblent plus homogènes, ce qui paraît logique car le mélange reçu dépend du mélange initial effectué dans le premier bassin.

Des mesures chimiques effectuées dans les bacs B1 et B2 confortent ces observations :

	$\mu\text{gat.l}^{-1}$	NH_4^+	Urée	PO_4^{--}
Eau de mer		4,9	0,8	29
Effluent		1250	12,8	161
Bac B1	Surface	213	5,3	29
sortie	Fond	11	2,8	4,1
Bac B2	Surface	3,6	2,9	3,8
sortie	Fond	2,4	2,6	3,7

Conclusion : il sera nécessaire d'étudier un nouveau dispositif d'admission de l'effluent dans l'eau de mer pour permettre une homogénéisation du mélange.

2) Comportement des constituants du mélange : bilan entrée-sortie au cours d'un cycle de 24 h

Le bassin utilisé a été alimenté en eau de mer le lundi 4 et l'apport d'effluent a débuté le mardi 5 juillet à 9 h

Caractéristiques : $R_V = 1/7,43$ $T_S = 4 \text{ h } 02$

Les prélèvements ont été effectués depuis le mardi 5 juillet à 9 h jusqu'au mercredi 6 à 15 h avec prise d'échantillons à l'entrée et à la sortie du bac toutes les 3 h.

Les résultats concernant les dénombrements bactériens et les analyses chimiques sont présentés sur les tableaux 1 et 2.

Dans l'ensemble on ne constate pas de différences nettes entre l'entrée et la sortie aussi bien pour les analyses bactériologiques que chimiques. Ce résultat était à attendre, les prélèvements étant effectués près de la surface, les temps de séjour réels et les dilutions dans les bassins étaient différents de ceux prévus à cause du cheminement superficiel de l'effluent.

D'autre part, on peut remarquer les variations de la qualité de l'effluent au cours du temps essentiellement sur les paramètres chimiques, variations liées soit à l'effluent lui-même, soit à sa distribution entre la décantation et l'arrivée aux points de prélèvement.

Si l'on peut observer une diminution des effectifs pour les différents germes dénombrés entre l'entrée et la sortie, ces différences ne sont pas statistiquement significatives (test t). Ceci est probablement lié aux observations précédentes concernant l'homogénéité du mélange et la variabilité de l'effluent.

	C. F.		N. A.		S. F.		P. A.		M. A.
	E	S	E	S	E	S	E	S	S
0 h	4,40		7,88		3,67		1,41		
+3 h	4,55		6,91		4,17		1,43		
+6 h	4,64	3,57	6,73	6,10	3,98	3,40	1,56	0,60	5,49
+9 h	4,59	4,14	7,16	6,70	3,78	3,54	1,49	1,48	5,54
+12 h	4,30	4,19	6,78	6,57	3,56	3,59	1,43	1,54	6,12
+15 h		4,45	6,22	6,22		3,59	1,43	1,46	6,12
+18 h	4,43	4,41	6,36	6,54	3,47	3,43	1,43	1,41	6,26
+21 h	4,24	4,48	6,26	6,04	3,53	3,78	1,13	1,48	6,25
+24 h	4,08	4,10	6,54	5,93	3,33	3,45	0,98	0,48	6,22
+27 h		4,32		6,38		3,60		0,48	5,96
+30 h		4,38		6,30				1,0	6,24
\bar{m}	4,40	4,23	6,76	6,31	3,69	3,55	1,37	1,10	6,02
σ	0,19	0,15			0,28	0,12	0,19	0,46	

Tableau 1 - Dénombrements bactériens lors de l'expérience
MEZE 1 (log bact.ml⁻¹) E = entrée ; S = sortie

C.F. = Coliformes fécaux

S.F. = Streptocoques fécaux

P.A. = *Pseudomonas aeruginosa*

$\mu\text{gat.l}^{-1}$ échantillons	NH_4^+	$-\text{PO}_4$	NO_2	NO_3	Urée	DCO-Eff. mg/l	MST mg/l
Entrée To						397	
+ 3 h	514	35,9	0,61	11,71	14,10	516	246
+ 6 h	362	50,5	0,55	7,04	14,96		165
+ 9 h	319	36,4	0,43	3,55	7,26	657	143
+ 12 h	174	31,1	0,30	3,16	3,21		195
+ 15 h	153	27,7	0,24	4,47	7,26	607	150
+ 18 h	215	27,7	0,43	2,89	4,27	420	140
+ 21 h	191	18,9	0,61	3,29	2,56	229	22
+ 24 h	52	8,64	0,49	1,71	1,71	152	52
EMo	4,86	2,93	0,24	1,45	0,75		
Eff	1250	161	0,37	5,66	12,82		
<hr/>							
Sortie +6 h	185	30,0	0,85	5,39	4,82		
+ 9 h	210	41,9	0,61	3,95	5,30		35
+ 12 h	228	54,1	0,61	2,76	4,70		115
+ 15 h	216	48,9	0,61	2,17	6,32		118
+ 18 h	185	43,2	0,49	1,45	4,53		
+ 21 h	228	35,5	0,55	1,78	4,44		20
+ 24 h	160	27,7	0,73	3,82	4,96		220
+ 27 h	321	38,6	0,49	2,11	10,68		20
+ 30 h	352	46,4	0,73	2,89	8,97		30
B1 Surface	213	29,1	0,61	3,55	5,13		
B1 Fond	10,86	4,09	0,43	1,45	2,82		
B2 Surface	3,58	3,77	0,37	3,68	2,91		
B2 Fond	2,35	3,66	0,37	1,32	2,56		

Tableau 2 - Analyses chimiques lors de l'expérience

MEZE 1

EMo = eau de mer

EFF = effluent

Campagne MEZE 2 : 7-11 novembre 1983

Compte tenu des résultats obtenus lors de la première campagne, nous avons été amenés à modifier le système d'admission de l'effluent dans l'eau de mer. Pour obtenir une meilleure homogénéité du mélange, l'effluent est injecté directement dans le tuyau d'arrivée de l'eau de mer.

Au cours de cette campagne, nous avons étudié le comportement hydraulique des bassins et réalisé une nouvelle expérience sur la survie des germes choisis.

A. Etude du comportement général du système

Compte tenu des caractéristiques des bassins et dans la mesure où l'effet "cheminement superficiel de l'effluent aurait été supprimé par les modifications apportées, le comportement du mélange dès son arrivée dans un bassin devrait permettre de situer le fonctionnement du dispositif dans l'un des deux cas suivants :

1er cas : Le milieu est parfaitement homogène et le bassin peut être assimilé à un fermenteur dans lequel on a imposé un temps de séjour moyen. La concentration bactérienne du réacteur, dans l'ensemble identique en tous ses points, dépend des apports, de la dilution et des phénomènes qui se déroulent dans ce fermenteur.

2ème cas : Le bassin n'est pas homogène et représente un canal d'écoulement. Le système peut alors modéliser un rejet ponctuel et son devenir jusqu'à une certaine distance de la source, en fonction de la dilution, des apports, de la diffusion turbulente, de la sédimentation, des phénomènes biologiques et du temps. On ne peut dans ce cas utiliser les équations de la culture continue pour prévoir le devenir des bactéries et évaluer une vitesse d'abattement biologique. Par contre, on devrait pouvoir suivre une masse d'eau marquée par un moyen quelconque et mesurer le nombre d'individus restant après un certain temps de transfert. Compte tenu des

dilutions successives éventuellement imposées, le temps de survie peut se calculer par simple différence entre l'entrée et la sortie pour le temps de transfert considéré. Cependant, indépendamment de la difficulté technique du suivi d'une telle masse d'eau, le temps de survie trouvé ici ne dépendra plus seulement de la mortalité biologique mais des phénomènes physiques concomitants : diffusion, effet de traînée dû au déplacement de la masse d'eau qui modifiera la distribution d'abondance des germes, sédimentation...

Il était donc nécessaire de savoir dans quel cas de figure placer le dispositif expérimental. Pour cela, on peut choisir *a priori* que le bassin appartient à l'un ou l'autre de ces deux cas et tester la validité de cette hypothèse.

Hypothèse : On admet *a priori* que le dispositif se comporte comme un fermenteur. Dans ces conditions, la concentration bactérienne trouvée en sortie du bassin dépend du temps de séjour moyen (taux de dilution), des apports et des phénomènes biologiques. Le système est par définition homogène c'est-à-dire que la concentration d'un constituant est identique en chacun de ses points et les valeurs trouvées en sortie représentent la concentration moyenne existant dans le fermenteur à l'instant t de la mesure. Il est donc dans ces conditions impossible de suivre le trajet d'une masse d'eau dans le dispositif.

Test de validité

On peut tester cette hypothèse en comparant les valeurs expérimentales trouvées à partir du suivi dans l'espace et dans le temps de l'évolution des concentrations d'un traceur bactérien injecté à un temps $t = 0$ à celles obtenues par le calcul numérique de ces mêmes concentrations dans le cas où le système se comporterait comme un fermenteur. Si tel est le cas, le traceur injecté doit se répartir presque instantanément dans le bassin (homogénéité). La concentration observée et ses variations dans le temps résulteront des apports, de la dilution et éventuellement de la mortalité.

Cette concentration X en un instant quelconque t peut se calculer selon

$$X_{(t)} = X_{(t-1)} + DX_E \Delta t - DX_{(t-1)} \cdot \Delta t$$

ou si l'on fait intervenir la mortalité biologique

$$X_{(t)} = X_{(t-1)} + DX_E \Delta t - DX_{(t-1)} \cdot \Delta t + K_B X_{(t-1)} \cdot \Delta t$$

avec : X = concentration d'un composant

X_E = concentration de ce composant dans le flux entrant
(cette concentration pouvant devenir nulle dans le cas d'une injection ponctuelle)

D = taux de dilution (inverse du temps de séjour)

Δt = intervalle de temps entre t et t-1.

K_B = coefficient d'abattement biologique = $\frac{-2,3}{T_{90}}$
déjà défini par ailleurs

Dans le cas de plusieurs bassins en cascade, on peut aisément appliquer des équations analogues en tenant compte des relations entre les bacs (apports dans le bassin récepteur dépendant des concentrations du bassin précédent, éventuellement corrigées par une dilution par l'eau de mer).

Expérimentations

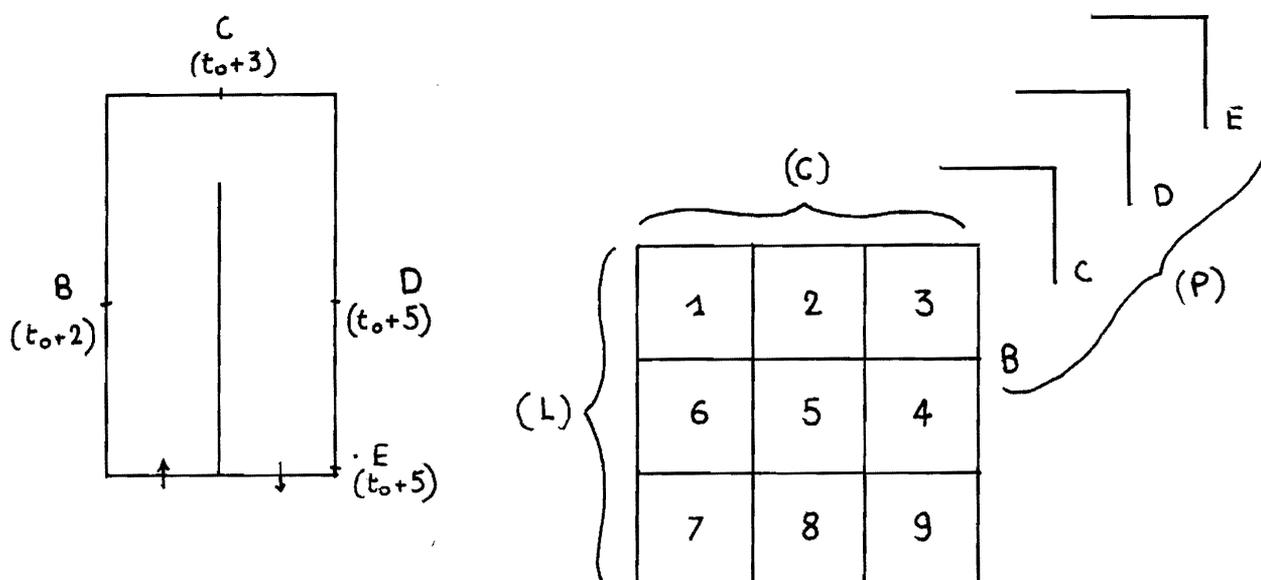
1) Injection ponctuelle d'un marqueur bactérien et échantillonnage

Pour tester l'homogénéité d'un bassin en terme de particules bactériennes, nous avons injecté une suspension concentrée de *Serratia marcescens* à la fin d'une expérience en flux continu détaillée plus loin. A l'instant $t = 0$, 1,5 litre d'une suspension dans l'eau physiologique comportant $2 \cdot 10^8$ cellules/ml a été versée massivement à l'entrée du bac B2 recevant par ailleurs en continu le mélange effluent + eau de mer (rapport des volumes 1/10 ; temps de séjour = 6 h). Pour évaluer la répartition du

marqueur, nous avons utilisé le dispositif permettant le prélèvement simultané de neuf échantillons dans une même tranche d'eau (3 en surface, 3 à demi profondeur, 3 au fond). L'échantillonnage a été effectué à quatre endroits du bassin (B, C, D, E) à des temps différents :

Point B : 2 heures après injection
 Point C : 3 heures après
 Points D et E : 5 heures après

Le schéma général est présenté sur la figure suivante :



Les lettres entre parenthèses désignent les différents facteurs considérés dans l'analyse de variance :

(L) : transects horizontaux
 (C) : transects verticaux
 (P) : "temps" ou "lieux" des prélèvements

Pour chaque prélèvement deux mesures d'abondance des *Serratia* ont été réalisées. Les données brutes sont transformées en \log_{10} avant de réaliser l'analyse de variance.

Lors de cette même expérience, nous avons également effectué des prélèvements d'eau dans les deux autres bassins (aux points B1A, B1 et B3) et compté les *Serratia* 2 h 30 après leur injection.

Moyennes des concentrations bactériennes

	L =	1	2	3	
		4,952	4,917	4,881	
	C =	1	2	3	
		4,914	4,937	4,900	
	P =	B	C	D	E
		5,529	4,877	4,602	4,659
	C =	1	2	3	
L = 1		4,945	4,983	4,929	
L = 2		4,903	4,946	4,903	
L = 3		4,894	4,883	4,868	
	P =	B	C	D	E
L = 1		5,660	4,808	4,655	4,685
L = 2		5,472	4,895	4,612	4,690
L = 3		5,457	4,927	4,540	4,602
	P =	B	C	D	E
C = 1		5,565	4,808	4,583	4,698
C = 2		5,527	4,892	4,648	4,682
C = 3		5,497	4,930	4,575	4,597

Analyse de variance (3 facteurs croisés avec interaction)

Source	D.F.	F	PROB.	Comp.de la var.
L	2	3,35	0,0462 *	0,00088
C	2	0,96	0,3931	-0,00002
P	3	362,45	0,0000 *	0,18031
LC	4	0,22	0,9251	-0,00087
LP	6	3,88	0,0044 *	0,00431
CP	6	1,83	0,1217	0,00123
LCP	12	1,44	0,1919	0,00199
S (LCP)	36			0,00898

Tableau 3 - Analyse de variance, échantillonnage

a- Echantillonnage : analyse de variance

Les résultats de l'analyse de variance (tableau 3) montrent :

- . une variance significative entre les "lieux" ou "temps" de prélèvements (P)
- . une variance à la limite de la signification entre les transects horizontaux (L)
- . pas de variance significative entre les transects verticaux (C)
- . pas d'interaction significative entre L et C (LC) ou (CP)
- . une interaction significative entre L et P (LP)

Pour le tableau de données considéré, il apparaît que l'essentiel de la variance est associé au "temps" ou "lieux" de prélèvement (P) : 90,8 % de la variance totale, ceci étant confirmé par les valeurs moyennes de concentration bactérienne. Pour chaque série de prélèvements (9), globalement il n'apparaît pas de différence significative entre les transects verticaux (C), c'est-à-dire qu'il n'y a pas notamment d'effets de parois discernables et que le bassin apparaît homogène pour la concentration en *Serratia* par rapport à sa largeur. L'on peut également considérer qu'il existe globalement une bonne homogénéité horizontale pour chaque série de prélèvements. La probabilité non nulle, mais très faible qu'il existe une différence entre transects horizontaux (L) n'est pas indépendante du "temps" ou du "lieu" de prélèvement (L, P). L'examen du tableau montre en effet que c'est pour la série B (to + 2 h) que se situe une différence maximum (mais faible) entre les transects horizontaux (L). Les autres séries apparaissent ensuite très homogènes en ce qui concerne la hauteur du bassin.

L'ensemble de ces résultats permet de conclure :

- à une bonne homogénéité des tranches d'eaux du bassin expérimental en terme de la concentration en *Serratia* (plus précisément du logarithme de la concentration en *Serratia*), du moins après 2 h 30
- à l'existence d'une variabilité "temporelle" ou "spatiale" de la concentration bactérienne nettement supérieure à la variabilité instantanée ou locale d'une tranche d'eau.

Ils suggèrent que l'effort d'échantillonnage peut être déplacé vers l'étude de la variabilité "temporelle" ou "spatiale" - ce qui est satisfaisant puisque c'est le support de cette étude. Autrement dit, qu'une estimation satisfaisante de la concentration moyenne en *Serratia* en chaque point (tranche d'eau) du bassin peut être obtenue avec un prélèvement au centre de la tranche d'eau pour les points C, D, E ou un prélèvement au centre et en surface plus un prélèvement au centre et au fond au point B.

b- Comparaison des données numériques obtenues aux résultats des simulations

L'expérience réalisée a été simulée à partir des équations précédentes adaptées selon le dispositif choisi et à partir des valeurs réelles pour les différents paramètres imposés dans les bassins (concentration de *Serratia* injectée à l'instant t_0 dans le bac B2, taux de dilution, rapports de volume effluent/eau de mer...). Pour cette expérience, nous avons réalisé deux séries de simulations en tenant compte ou non de la mortalité biologique des bactéries injectées. Dans la simulation avec mortalité biologique le T_{90} des *Serratia* a été choisi à partir des résultats d'expériences faites en flacons pour lesquelles on a obtenu $T_{90} = 25$ h pour *Serratia* dans un mélange effluent/eau de mer 1/10 et $T_{90} = 12$ h dans de l'eau de mer seule. Compte tenu de ces résultats, on a adopté $T_{90} = 25$ h pour le mélange 1/10 et $T_{90} = 18$ h pour le mélange 1/100e. Les valeurs obtenues en sortie des bassins (log nb bactéries/ml) sont présentées dans le tableau suivant. Les données expérimentales disponibles ont également été rapportées sur ce tableau.

Temps	Données simulées sans mortalité biologique			Données simulées avec mortalité biologique			Données expérimentales		
	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1
0 h	4,71	0	0	4,71	0	0			
+30 '	4,67	2,60	2,00	4,65	2,58	1,98			
+ 1 h	4,63	2,86	2,28	4,59	2,82	2,23			
+ 1 h 30	4,60	3,00	2,43	4,54	2,93	2,36			
+ 2 h	4,56	3,09	2,54	4,48	3,00	2,44	5,53		
+ 2 h 30	4,53	3,15	2,61	4,43	3,03	2,49	4,80	3,55	1,95
+ 3 h	4,49	3,20	2,67	4,37	3,05	2,52	4,88		
+ 3 h 30	4,45	3,23	2,71	4,31	3,06	2,55			
+ 4 h	4,42	3,25	2,75	4,26	3,06	2,56			
+ 4 h 30	4,38	3,26	2,78	4,20	3,05	2,56			
+ 5 h	4,34	3,27	2,80	4,14	3,03	2,56	4,66		
+ 5 h 30	4,31	3,28	2,83	4,09	3,02	2,56			
+ 6 h	4,27	3,28	2,84	4,03	2,99	2,55			

Conformément à l'hypothèse d'homogénéité, on observe une répartition immédiate des bactéries dans le bac B2 alors que les germes injectés apparaissent avec un léger temps de latence dans les autres bacs. La comparaison avec les données réelles disponibles montre une bonne concordance avec les valeurs des simulations, notamment pour les bacs B3 et B1 2 h 30 après l'injection. Par contre, les dénombrements expérimentaux dans B2 sont plus élevés, en particulier au début de l'expérience. Par la suite les écarts entre expérience et simulation se réduisent comme le montre l'évaluation des pourcentages d'abattement des germes obtenue entre différents temps de l'expérience dans ce bassin.

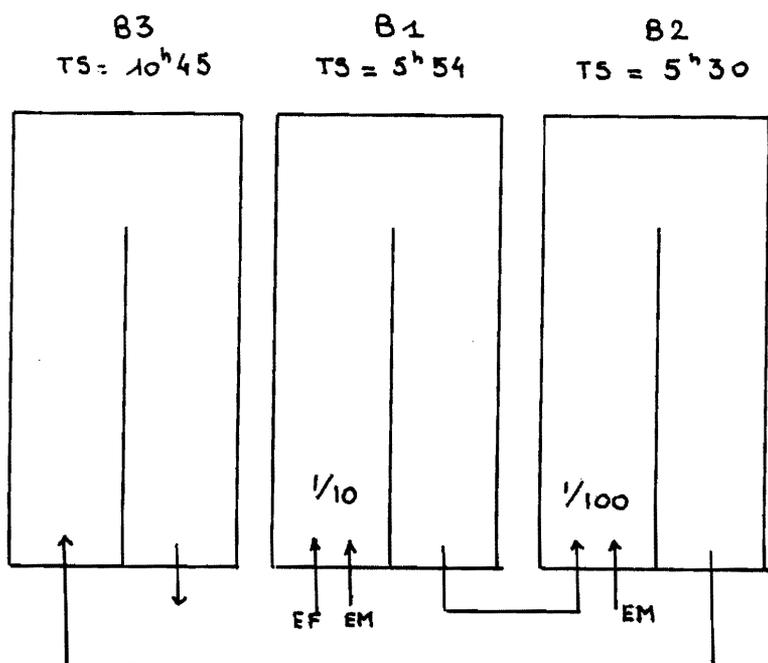
Période	Pourcentage d'abattement dans B2		
	Expérimental	Simulé	Simulé avec T_{90}
2 h - 2 h 30	77 %	8 %	11 %
2 h 30 - 3 h	4 %	6 %	2 %
3 h - 5 h	43 %	29 %	39 %

Commentaires

Dans le cas de la deuxième hypothèse (canal d'écoulement), on pouvait s'attendre à voir apparaître les bactéries à différents points du système en accord avec le temps de transfert de la masse d'eau (par exemple aux environs de 3 h au point B2A, 6 h à B2,...) ce qui est loin d'être le cas puisque cette apparition est très rapide. Ce phénomène est par contre conforme à l'hypothèse n° 1 (fermenteur) comme le montrent bien les résultats des simulations numériques effectuées qui permettent d'observer la rapidité de colonisation des bassins compte tenu des temps de séjour imposés. Toutefois, on observe dans le bac B2 au point B, 2 h après l'injection une très forte densité de *Serratia* qui suggère l'existence d'une répartition incorrecte de ces bactéries dans le bassin. Cet effet semble s'atténuer dès après 2 h 30 où l'on obtient des valeurs analogues aux points C et E de ce bassin (point C : milieu du bassin : 4,90 Bact/ml ; point E : sortie du bassin : 4,80 Bact/ml). Il se pourrait donc que peu après cette injection massive, le bassin récepteur ne soit pas immédiatement homogène mais, par la suite, le comportement du dispositif expérimental apparaît assez proche de celui que l'on pouvait attendre d'un fermenteur.

2) Seconde expérience de marquage

Une autre expérience de ce type a eu lieu plus tard en utilisant un schéma un peu différent :



Après mise en fonctionnement du système hydraulique (24 h pour avoir une stabilisation du mélange), une solution concentrée de *Serratia marcescens* (1000 ml) est injectée au temps T_0 (1.10^8 cellules/ml). Des prélèvements sont effectués en sortie des trois bassins, aussi bien en surface qu'au fond, toutes les 15 minutes :

B1H : sortie du bassin B1 en surface

B1B : sortie du bassin B1 au fond

B2 : sortie du bassin B2

B3 : sortie du bassin B3

Une partie (0,05 ml) de l'eau des échantillons est étalée à la surface d'une gélose nutritive. La présence de colonies rouge foncé à magenta est alors notée et des comptages effectués dans certains cas. De même que pour la première expérience, nous avons effectué des simulations numériques du comportement de ce dispositif.

Résultats

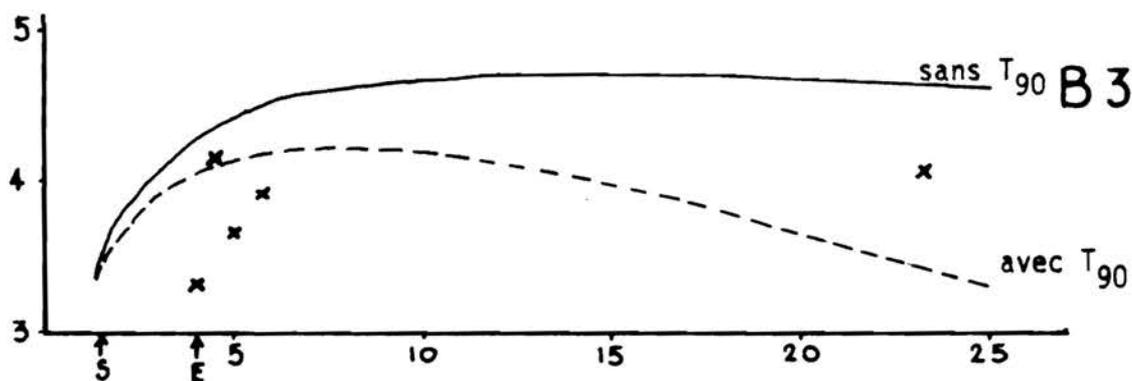
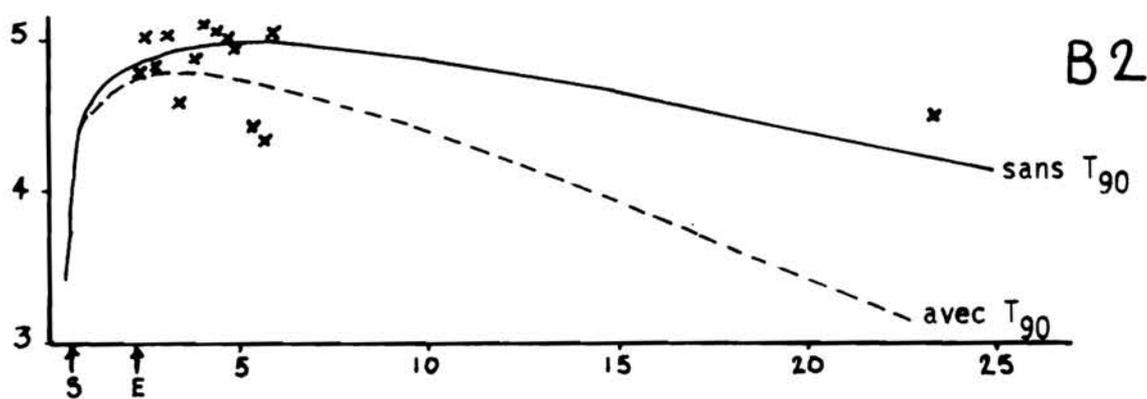
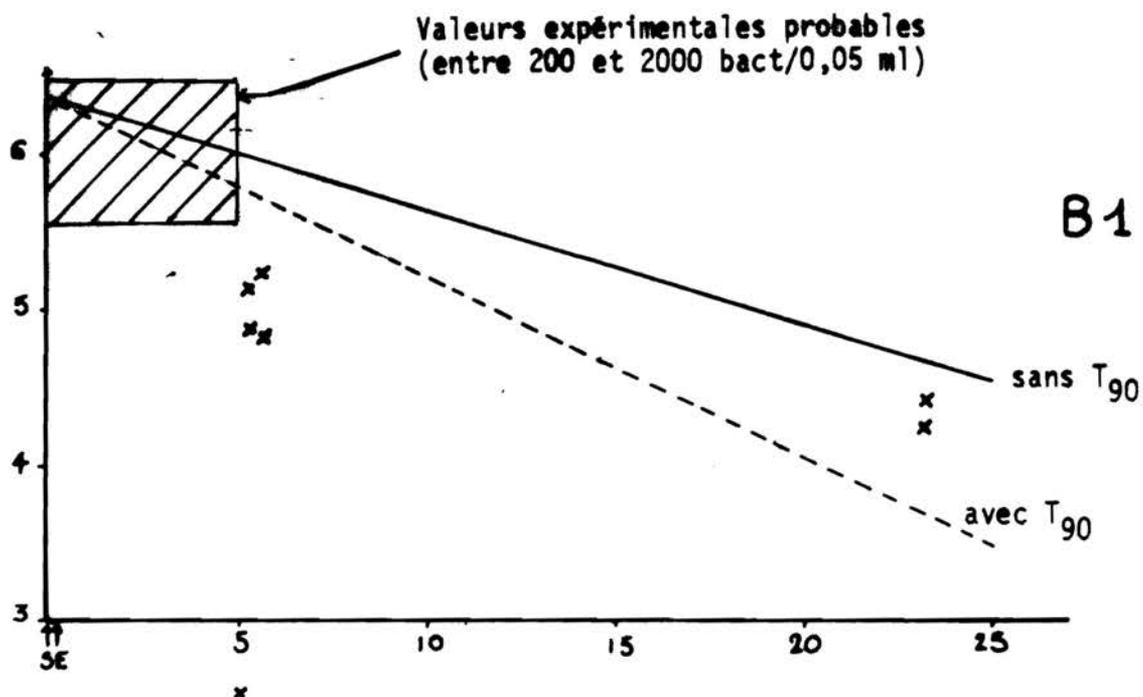
Les résultats des dénombrements sont présentés ci-dessous (nombre de colonies pour 0,05 ml) :

<u>Temps écoulé à partir de T_0</u>	<u>B1H</u>	<u>B1B</u>	<u>B2</u>	<u>B3</u>
15'	-	-	-	-
30'	+	+	-	-
45'	+	+	-	-
1 h	+	+	-	-
1 h 15	+	+	-	-
1 h 30	+	+	-	-
1 h 45	+	+	-	-
2 h	+	+	-	-
2 h 15	+	+	+ 30	-
2 h 30	+	+	+ 58	-
2 h 45	+	+	+ 34	-
3 h	+	+	+ 60	-
3 h 15	+	+	+ 21	-
3 h 30	+	+	+ 1	-
3 h 45	+	+	+ 37	-
4 h	+	+	+ 68	+ 1
4 h 15	+	+	+ 60	+
4 h 30	+	+	+ 52	+ 7
4 h 45	+	+	+ 45	+
5 h	+	+	+165	+ 2
5 h 15	+ 69	+ 40	+ 14	+
5 h 30	+ 32	+ 88	+ 11	+
5 h 45	+	+	+ 53	+ 4
23 h 15	+ 9	+ 12	+ 17	+ 6

(+) : effectif incomptable (>200)

(-) : absence

Fig. 3 - Deuxième expérience de marquage



— Données simulées sans mortalité biologique
 - - - Données simulées avec mortalité biologique
 x Données expérimentales

↑ S Apparition des bactéries (1 bact/0,05 ml) dans les simulations
 ↑ E Apparition des bactéries (1 bact/0,05 ml) dans les prélèvements

Là encore, on observe une colonisation relativement rapide des différents bassins (apparition à la sortie du premier bac entre 15 et 30' ; entre 2 h et 2 h 15 dans le second ; entre 3 h 45 et 4 h dans le troisième) alors que dans l'hypothèse du canal d'écoulement (seconde hypothèse) on aurait dû voir apparaître ces bactéries environ 6 h après l'injection en sortie du Bac 1, 11 h 30 et 22 h pour B2 et B3 respectivement.

Par contre, cette évolution, comme les valeurs expérimentales, paraît assez proche de celles que l'on obtient en simulations numériques réalisées à partir de l'hypothèse "fermenteur" (fig. 3) malgré un temps de latence plus important dans la réalité que dans ces simulations. On peut également noter les valeurs identiques des dénombrements effectués à la surface et au fond du bac 1, en accord avec l'hypothèse d'homogénéité des tranches d'eau, déjà entrevue lors de l'expérience précédente (Analyse de variance).

3) Discussion

A l'issue de ces essais, il semble que le fonctionnement du système s'apparente plus à celui d'un "fermenteur" qu'à celui d'un canal d'écoulement. Il est bien évident qu'un tel dispositif ne représentera jamais rigoureusement le comportement d'un cheostat, ainsi nous avons pu noter un certain temps de latence avant d'atteindre l'homogénéité dans le premier bassin. S'il paraît illusoire d'espérer une homogénéité parfaite et immédiate dès le point d'injection du mélange dans le bassin, le fait de verser une grande quantité de traceur ponctuellement risque de retarder cette homogénéisation. Ce phénomène devrait être minimisé dans le cas d'une injection continue dans le flux entrant, protocole utilisé à l'occasion des expériences de suivi.

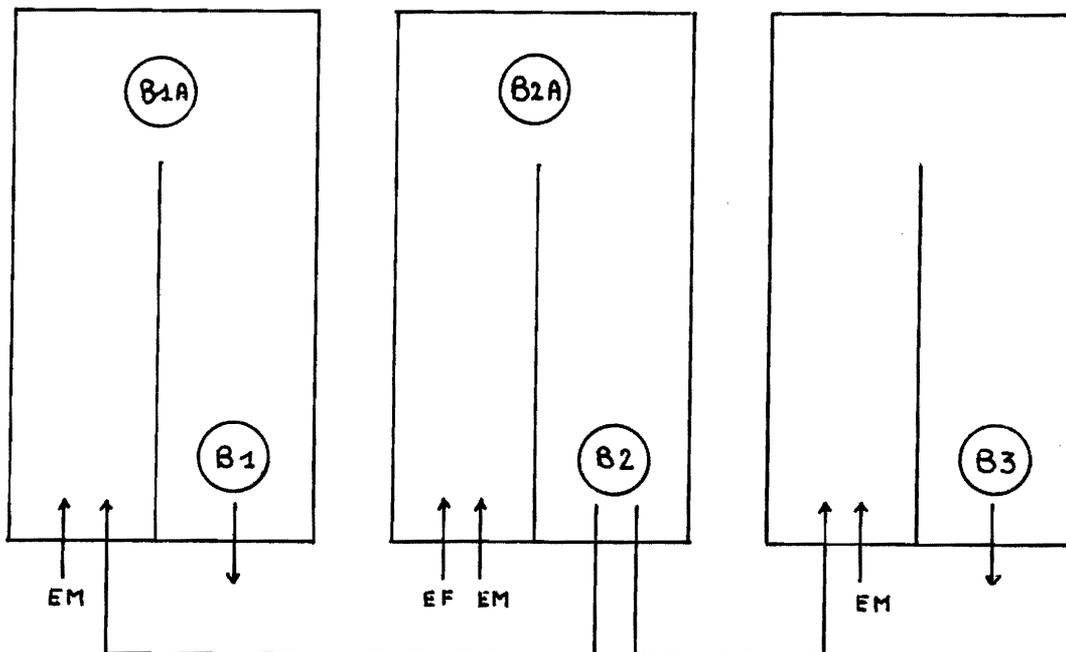
B. Comportement des constituants du mélange dans des bassins en cascade : effet du rapport de volume Effluent/Eau de mer et du temps de séjour

1) Protocole

Les trois bassins expérimentaux sont alimentés en continu et en cascade, selon un débit déterminé, par un mélange d'eau usée et d'eau de mer.

Nous avons suivi pendant 24 h, à raison de prélèvements toutes les trois heures les bactéries (coliformes fécaux, streptocoques fécaux, *Aeromonas hydrophila*, microflore hétérotrophe totale) et différents paramètres chimiques (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 , Urée, MES, DCO dans l'effluent) en différents points du dispositif expérimental en comparaison avec l'eau d'égout d'entrée afin d'apprécier l'évolution de ces constituants en présence d'eau de mer.

Le système utilisé est présenté sur la figure suivante :



Les temps de séjour et les rapports de volume Effluent/
Eau de mer dans les différents bassins en cascade sont :

Bassin B2 :	6 h	$R_v = 1/9,2$
Bassin B3 :	6 h	$R_v = 1/9,8$ (eau du B2) soit $R_v = 1/90$
Bassin B1 :	24 h	$R_v = 1/10$ (eau du B2) soit $R_v = 1/92$

Les points de prélèvements sont définis comme suit :

EM : Eau de mer

EF : Eau usée décantée

Bassin B2 (1/9,2) : point B2A au milieu du bassin
point B2 à la sortie du bassin

Bassin B3 (1/90) : point B3 à la sortie

Bassin B1 (1/92) : point B1A au milieu
point B1 à la sortie

Les trois bassins sont remplis avec le mélange Effluent/
Eau de mer adéquat et les flux mis en route 12 h avant les premiers
prélèvements.

Parallèlement à ceci, nous avons suivi l'évolution des
coliformes fécaux dans des flacons de 5 l comportant un mélange
Effluent/Eau de mer de 1/10 dans le flacon F1 et 1/100 dans F2,
afin d'estimer les T_{90} dûs à la mortalité biologique de ces bacté-
ries.

2) Résultats

Les résultats de cette expérience sont présentés sur le
tableau 4 pour les paramètres chimiques et les tableaux 5, 6, 7,
8 et 9 pour les bactéries (moyennes des dénombrements en triple
sur deux dilutions).

Les caractéristiques chimiques de l'effluent présentent
des valeurs couramment rencontrées dans les eaux usées urbaines.
Cependant, il faut noter les variations relativement importantes
des mesures effectuées dans l'effluent tout au long de l'expé-
rience.

Heure	NH ₄ (µgat.l ⁻¹)					NO ₂ (µgat.l ⁻¹)					Effluent	
	EM	EF	B1	B2	B3	EM	EF	B1	B2	B3	MES mg.l ⁻¹	DCO mg.l ⁻¹
0	5,63	1310	14,4	341	24,1	0,33	0,65	0,43	0,54	0,33	245	900
3			14,4	253	30,3			0,38	0,33	0,43	165	1060
6	3,63	1470	11,6	203	23,8	0,43	0,65	0,33	0,33	0,54	219	500
9			15,6	178	27,2			0,54	0,33	0,33	66	250
12	3,50	653	12,8	172	21,3	0,43	2,17	0,43	0,33	0,43	49	280
15			15,6	147	19,4			0,43	0,65	0,54	196	730
18	2,25	2560	15,9	147	19,4	0,43	0,76	0,49	0,76	0,33	200	995
21			18,8	228	18,8			0,54	0,54	0,33	206	925
24	8,75	2870	12,8	216	18,1	0,43	0,65	0,54	0,54	0,43	145	1110
27			13,4		9,4			0,43		0,33		

	NO ₃ (µgat.l ⁻¹)					PO ₄ (µgat.l ⁻¹)				
0	1,65	5,70	2,71	8,16	1,72	2,46	188	0,35	32,1	3,76
3			2,12	2,41	3,91			0,38	25,0	4,02
6	1,65	6,21	1,06	2,47	1,84	2,29	80	0,36	24,5	3,91
9			5,76	2,70	4,71			0,51	20,1	3,87
12	0,88	5,64	2,47	3,62	6,90	2,06	100	0,38	18,5	3,98
15			2,18	33,33	2,01			0,40	15,8	3,86
18	2,35	29,07	25,29	25,29	14,94	2,17	152	0,43	15,0	3,98
21			64,71	25,0	7,82			0,44	26,9	3,70
24	30,29	63,95	45,88	118,4	23,9	2,31	157	0,38	25,8	4,35
27			48,82		2,6			0,40		3,37

	UREE (µgatN-Urée.l ⁻¹)				
0	1,43	13,69	3,65	27,3	4,27
3			5,77	22,7	4,91
6	1,65	14,95	4,68	10,5	5,27
9			6,94	7,73	3,55
12	3,35	9,91	7,48	6,82	4,18
15			3,87	6,14	2,86
18	1,18	111,26	5,05	6,82	3,27
21			4,23	10,91	2,09
24	2,33	16,40	2,93	6,82	2,27
27			9,28		4,55

Tableau 4 -
Paramètres chimiques - MEZE 2 -

Bactéries hétérotrophes aérobies (log bact.ml⁻¹)Tableau 5

Points de prélèvement	To	To+3h	To+6h	To+9h	To+12h	To+15h	To+18h	To+21h	To+24h
B2A	5,96	5,8	5,74	5,74	5,75	5,49	5,70	5,80	5,52
B2	5,8	5,83		5,66	5,8	5,68	5,55	5,95	6
B1A	4,82	4,8	4,73	4,84	4,76	4,7	4,69	4,65	4,68
B1	5,05	4,6	4,62	4,61	4,8	4,76	4,62	4,77	4,80
B3	4,7	4,8	4,67	4,55	4,74	4,76	4,66	4,52	4,65
EF	6,77	7,1	6,55	6,8	6,3	6,8	6,92	6,95	6,76

Marine Agar (log bact.ml⁻¹)Tableau 6

B2A	5,70	5,74	5,82	6,50	5,84	5,87	6,23	6,31	5,90
B2	5,43	5,88		5,92	5,75	5,98	6,41	6,46	6,65
B1A	6,19	5,97	6,08	6,10	6,06	5,75	5,94	5,99	6,47
B1	6,17	6,22	5,88	5,83	6,01	5,96	6,32	6	6,02
B3	5,58	5,74	5,57	5,67	5,53	5,48	5,48	5,56	6,92
EF	6,54	6,27	6,57	6,87	6,36	6,65	6,74	6,75	6,72

Coliformes fécaux (log bact.ml⁻¹)Tableau 7

B2A	4,53	3,47	4,04	4,30	4,54	3,47	4,15	4,09	3,92
B2	3,98	4,1	3,82	4,15	4,09	4,09	4,14		4,22
B1A	3,02	2,66		2,85	2,97	2,76	2,34		2,74
B1	3,06	2,70	2,90	3,03	3,07	2,52	2,86		2,71
B3	3,17	3,13	2,66	3,38	3,32	3,13	2,76	3	2,77
EF	5,1	5,2	4,9	5,1	5,2		5,2		5,5

Streptocoques fécaux (log bact.ml⁻¹)Tableau 8

Points de prélèvement	To	To+3h	To+6h	To+9h	To+12h	To+15h	To+18h	To+21h	To+24h
B2A	3,98	3,63	3,60	3,63	3,61	3,44	3,47	3,63	3,83
B2	3,73	3,64	3,74	3,41	3,59	3,41	3,41	3,71	3,77
B1A	2,11	2,14	2,03	2,36		1,95	2,11	2,22	2,10
B1	2,13	2,16	2,06	2,60	1,9	1,88	2	2,02	2,01
B3	2,11	2,42	2,48		2,30	2,13		2,14	2,5
EF	4,6	4,5	4,6	4,1	4,3	4,1	4,8	4,8	4,7

Aeromonas hydrophila (log bact.ml⁻¹)Tableau 9

B2A	3,94	3,2	2,52	3,56	3,90	3,81		3,53	3,16
B2	3,80	3,74	4,01		3,96	3,49	2,73	3,47	
B1A	1,47	1,33	1,04	0,85	0,78	1,26		1,11	0,6
B1	1,32	0,95	1	0,48	1,04		0,85	1,45	0,3
B3	1,53	1,35	1,18	1,28	0,90		1,15	1,15	0,6
EF	5,3	5	5,1		5,1	5,05	4,85	4,9	4,2

Ces mêmes variations apparaissent dans les dénombrements bactériens. Toutefois, la dilution par l'eau de mer et l'effet tampon des bassins minimisent leur amplitude aux différents points de prélèvement choisis.

Le fonctionnement des systèmes à flux continu conduit à un état stable (chemostat) des principaux constituants. Ceci permet de travailler non pas point par point, mais sur les moyennes des mesures effectuées à l'entrée et à la sortie du système.

Les moyennes et les intervalles de confiance des germes de contamination de l'effluent sont présentées sur le tableau suivant où l'on peut constater qu'il n'y a pas de différences significatives entre les points médians et la sortie des bacs B2 et B1 pour tous les germes dénombrés ce qui confirme à nouveau l'homogénéité des bacs au bout d'un certain temps.

		<u>Coliformes fécaux</u>	<u>Streptocoques fécaux</u>	<u><i>Aeromonas hydrophila</i></u>
Dilution	Effluent	5,13 ± 0,09	4,52 ± 0,12	5,07 ± 0,11
1/9,2	Entrée B2	4,17 ± 0,08	3,56 ± 0,12	4,11 ± 0,11
	B2A	4,04 ± 0,16	3,62 ± 0,07	3,31 ± 0,34
	B2	4,04 ± 0,10	3,60 ± 0,08	3,50 ± 0,26
	B2A = B2	4,04 ± 0,09	3,61 ± 0,05	3,41 ± 0,20
1/90	Entrée B3	3,05 ± 0,10	2,61 ± 0,08	2,51 ± 0,26
	B3	3,07 ± 0,12	2,33 ± 0,12	1,24 ± 0,15
	Entrée B1	3,04 ± 0,10	2,60 ± 0,08	2,50 ± 0,26
	B1A	2,80 ± 0,08	2,19 ± 0,09	1,18 ± 0,20
	B1	2,80 ± 0,16	2,10 ± 0,13	1,04 ± 0,23
	B1A + B1	2,80 ± 0,09	2,15 ± 0,08	1,11 ± 0,14

On remarque dans certains cas un abattement indépendant de celui dû à la dilution. On peut ainsi calculer des T_{90} à partir des moyennes des mesures faites à l'entrée et à la sortie des

bassins selon les équations déjà développées par ailleurs (Martin *et al*, 1984)*. En particulier, si la variation d'un constituant est :

$$\frac{dx}{dt} = K_B X - DX + DX_E \quad (\text{avec } K_B = \frac{-2,3}{T_{90}} \text{ représentant le coefficient d'abattement horaire dû à la mortalité ; } D : \text{ taux de dilution } X_E : \text{ concentration dans le flux entrant}), \text{ à l'équilibre on a :}$$

à l'équilibre on a :

$$\frac{dx}{dt} = 0 \text{ d'où } K_B = -D \frac{X_E - X}{X}$$

On trouve ainsi un T_{90} de l'ordre de 30 h à la dilution 1/100 pour les streptocoques fécaux et de quelques heures pour *Aéromonas hydrophila*.

De la même façon, pour les coliformes fécaux, on obtient un T_{90} voisin de 40 h dans le bassin B2 (dilution = 1/9,2) et voisin de 75 h dans B1 (1/92). Les mesures faites en flacons donnent un résultat comparable pour la dilution 1/10 : $T_{90} = 29,7$ h ($22,7 < T_{90} < 42,9$). Par contre, à la dilution 1/100, le T_{90} est très nettement inférieur : 17,8 h ($13,8 < T_{90} < 24,9$).

Si on applique les valeurs de ces T_{90} obtenus en système clos dans un modèle en flux continu, on obtient des nombres de bactéries cadrant avec la réalité dans le bassin B2 : 4,01 au lieu de 4,04 mesuré ; mais pas pour les bassins B3 et B1 : 2,77 et 2,40 au lieu de 3,07 (B3) et 2,80 (B1). (fig. 4, p. 34).

Ces chiffres inférieurs à ceux obtenus réellement pourraient s'expliquer par une mauvaise homogénéisation de l'eau, une trajectoire préférentielle dans le bassin aurait pour effet de diminuer le temps de séjour réel et donc d'obtenir en sortie un nombre de bactéries supérieur à celui prévu. Mais ce phénomène ne se

* MARTIN, LELONG, TANGUY, MAGURNO, BONNEFONT, EQUÉL, 1984. Qualité des eaux littorales. Disparition des coliformes fécaux d'un effluent urbain en milieu marin. Etude expérimentale. *Vie Marine*, hors série n° 4 : 81 pp.

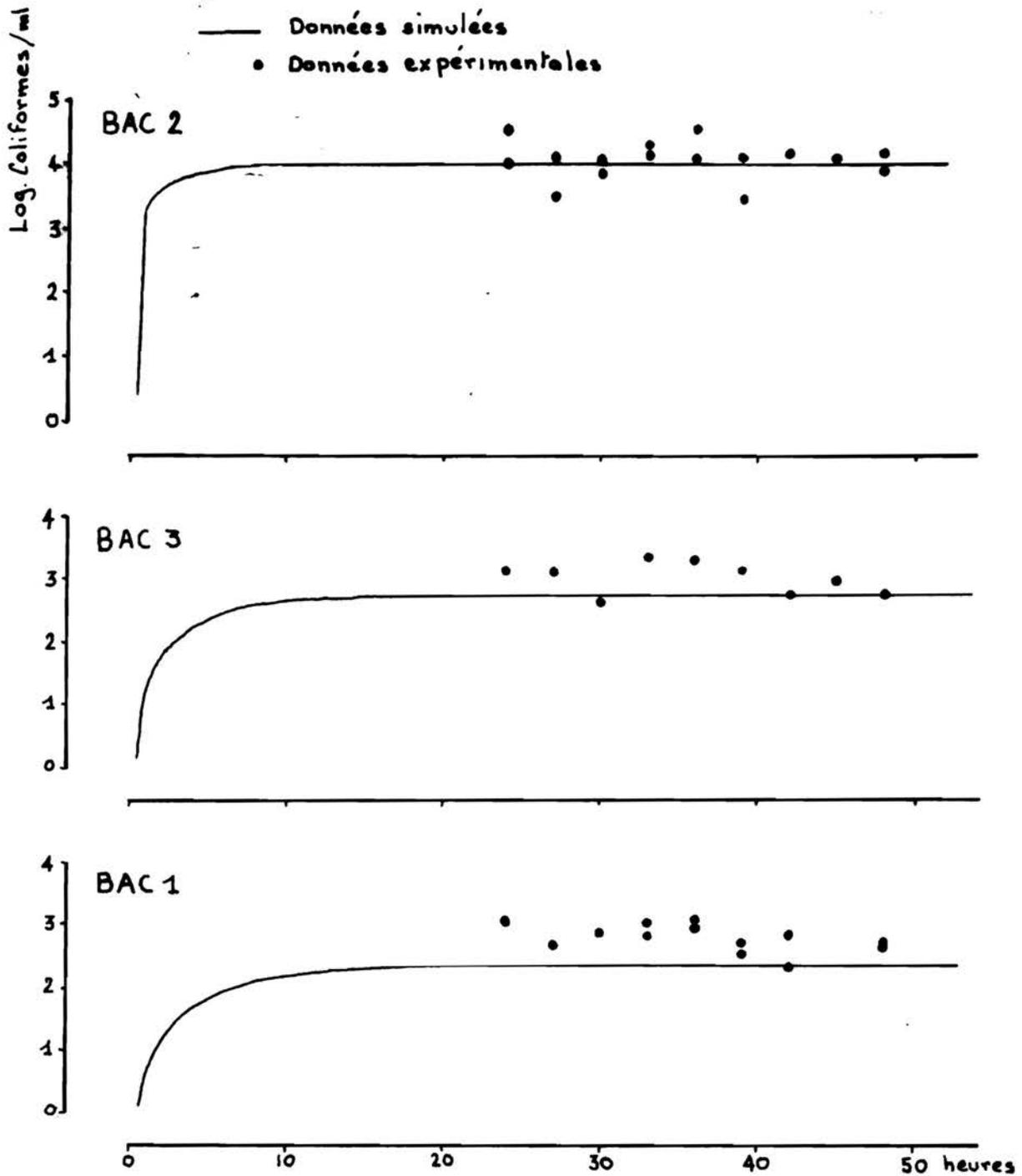


Fig. 4 - Survie des coliformes fécaux dans le dispositif à flux continu : résultats expérimentaux et simulation numérique.

produit pas dans le bassin B2 où l'on a concordance entre les simulations et la réalité. De plus, les expériences effectuées avec *Serratia* ne militent pas en faveur de cette hypothèse.

Une autre hypothèse peut être avancée : lorsqu'on réalise un mélange effluent/eau de mer, les bactéries entériques se retrouvent dans un milieu hostile où elles entrent en compétition avec les bactéries marines. Les moins résistantes ou celles qui sont incapables de s'adapter disparaissent de façon exponentielle au cours du temps ce qui permet, à partir de la pente de la droite de régression \log concentration bactérienne = f (temps), de calculer un T_{90} représentant le temps nécessaire à la disparition de 90 % des bactéries. Plus le rapport de volume effluent/eau de mer est petit, plus les germes entériques sont soumis à des conditions difficiles et donc plus leur temps de survie diminue.

Dans le système à flux continu que nous avons utilisé ici, il se passe le même phénomène dans le bassin B2 où est réalisé le mélange initial. Ensuite l'eau de sortie de ce bassin sert à effectuer un nouveau mélange avec l'eau de mer. Cependant, dans ce cas là, nous n'avons plus l'ensemble des bactéries entériques présentes dans l'effluent, mais uniquement la fraction d'entre elles qui ont survécu au passage dans le premier bassin, donc les plus résistantes. Le fait de leur imposer à nouveau les contraintes dues au mélange avec l'eau de mer en fait disparaître une partie, mais le temps de survie de ces bactéries "plus résistantes" se trouve rallongé. Cette hypothèse semble concorder avec les résultats obtenus précédemment concernant l'influence du rapport de volume effluent/eau de mer sur le T_{90} des coliformes : en effet, nous avons constaté une diminution du temps de survie en fonction du rapport de volume effluent/eau de mer initial avec une stabilisation du T_{90} lorsque ce rapport devient très faible.

Si cette hypothèse semble confortée par la comparaison données simulées-données expérimentales, il conviendra de la vérifier par des expérimentations permettant de tester l'effet de la "cascade".

IV - CONCLUSION

Malgré quelques imperfections techniques, ces essais préliminaires ont donné des résultats relativement concordant avec les prévisions obtenues à partir des simulations numériques résultant des expérimentations en pilote clos. De plus, ces expériences laissent entrevoir des effets inattendus du passage des bactéries entériques dans différentes zones de dilutions successives, effets qui se manifestent par une modification de leur temps de survie pour une dilution donnée.

Bien entendu, ces observations ne concernent qu'une série de mesures et il conviendra d'en vérifier la validité lors des expériences futures. Toutefois, il serait souhaitable de stabiliser les fluctuations de l'effluent d'entrée afin d'atténuer la dispersion de certains résultats et, compte tenu de la faible amplitude de variation des dénombrements bactériens entre l'entrée et la sortie des bassins, d'utiliser les rapports de volume effluent/eau de mer plus importants et/ou des temps de séjour plus longs.

