

EPURATION D'EAUX USEES URBAINES PAR LAGUNAGE :
ETUDE EXPERIMENTALE DE L'IMPORTANCE DES HELOPHYTES

par

BLOCK J.C.
RICHARD J.F.

CENTRE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT (METZ. FR.)

et

RADOUX M.
KEMP D.

STATION EXPERIMENTALE DE VIVILLE - F.U.L. (ARLON. B.)

JUIN 1981

CENTRE DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

1, rue des Récollets
57000 - METZ - France

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>MATERIEL ET METHODES</u>	
I - <u>LA STATION DE LAGUNAGE</u>	3
II - <u>ECHANTILLONNAGE</u>	8
III - <u>ANALYSE BACTERIOLOGIQUE</u>	9
a - Numération totale	9
b - Bactéries chromogènes	10
c - Coliformes thermorésistants à 44° C	10
IV - <u>DOSAGE DE LA CHLOROPHYLLE a</u>	10
V - <u>ANALYSES ENZYMOLOGIQUES DES SEDIMENTS</u>	11
a - Détermination de l'activité amylasique	12
b - Détermination de l'activité cellobiasique	12
c - Détermination de l'activité phosphatasique	13
VI - <u>ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES</u>	13
<u>RESULTATS</u>	
I - <u>CARACTERISTIQUES DES EAUX BRUTES</u>	15
II - <u>CARACTERISTIQUES DES EAUX TRAITEES</u>	16
III - <u>CINETIQUES D'ELIMINATION DES CONTAMINANTS</u>	21
1°) Evolution des M.E.S. dans les 5 cascades	21
2°) Evolution de la D.C.O. dans les 5 cascades	22
3°) Evolution des phosphates dans les 5 cascades ..	22
4°) Evolution de l'ammoniaque dans les 5 cascades .	25
5°) Evolution des nitrates dans les 5 cascades	25
6°) Devenir des <u>Escherichia coli</u> dans les 5 cascades	25
7°) Evolution des concentrations en chlorophylle dans les 5 cascades	27
IV - <u>ANALYSE DES SEDIMENTS</u>	27

1°) Numération totale des sédiments et pourcentage de bactéries chromogènes	29
2°) Teneur en chlorophylle	29
3°) Activité amylasique	31
4°) Activité cellobiasique	31
5°) Activité phosphatasique	31
V - <u>ANALYSES DES TIGES</u>	35
VI - <u>MESURES DE CROISSANCE DES PLANTES</u>	38
<u>CONCLUSION</u>	40
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	43
<u>ANNEXE</u>	45

INTRODUCTION

L'épuration des eaux usées des petites collectivités par lagunage a fait l'objet ces dernières années d'une attention plus particulière. Depuis les premières expériences de SEIDEL (10), de nombreuses investigations ont été conduites en pilote ou sur le terrain (1, 4, 6, 9, 11, 12, 13) pour tenter de démontrer non seulement l'efficacité du lagunage, mais surtout l'intérêt des plantes aquatiques à tige aérienne (hélophytes). Sur ce dernier point une analyse bibliographique critique de ces différents rapports montre cependant que l'enthousiasme des chercheurs a souvent trahit l'expérimentation scientifique. Ainsi, des témoins corrects n'ont été que rarement faits.

A notre connaissance seuls LAKSHMAN (4) et SPANGLER et coll. (11) ont prévu des bassins de lagunage sans plantes parfaitement comparables à ceux avec plantes. Même les essais de SEIDEL (10) dont les résultats sont si enthousiasmants, sont critiquables quant aux témoins utilisés (le paramètre "rôle filtrant" des racines n'ayant pas été pris en compte).

Dans bien des cas le rôle des plantes a été considéré très favorablement, ce qui a priori ne laisse pas de surprendre. En effet, il semble que dans un traitement d'eaux usées la quantité de polluants circulant dépasse largement les besoins des plantes pour leur croissance.

Le but de ce travail a donc été de vérifier sur un système expérimental de terrain l'importance des plantes dans un système de lagune plus proche en fait d'un marais reconstitué.

Dans cette expérimentation, les plantes choisies l'ont été à partir de l'étude préliminaire de RADOUX (8) et trois témoins ont été utilisés :

- Une mini-lagune à plusieurs bassins sans plantes.
- Une mini-lagune à plusieurs bassins plantée de tiges artificielles pour tenter d'apprécier l'effet mécanique des tiges.
- Une mini-lagune à plusieurs bassins plantée depuis deux ans (au lieu de 1) et non faucardée pour tenter d'apprécier le "vieillissement" du système.

Parallèlement deux lagunes expérimentales ont été testées, toutes deux plantées, mais avec une circulation d'eau différente.

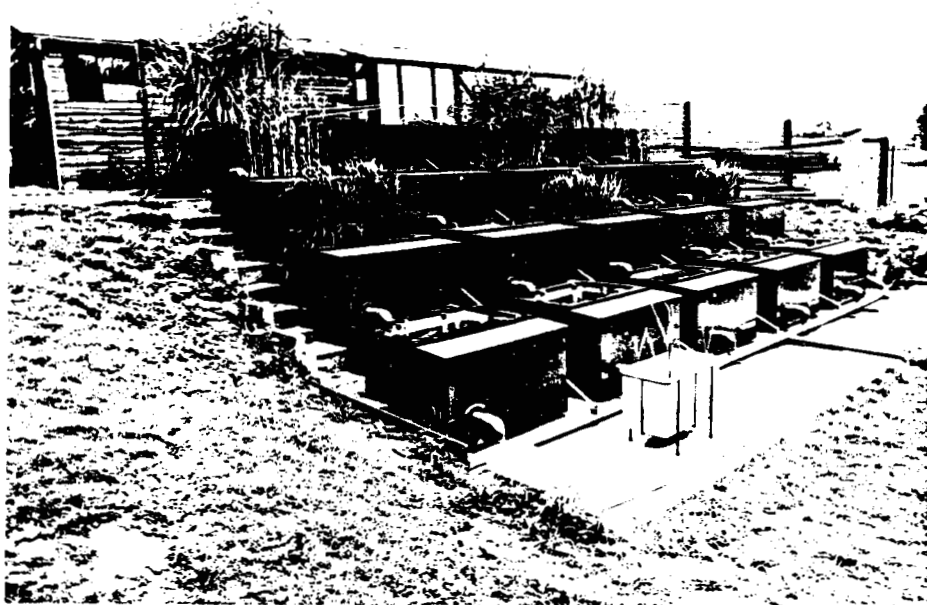
MATÉRIEL ET MÉTHODES

I - LA STATION DE LAGUNAGE

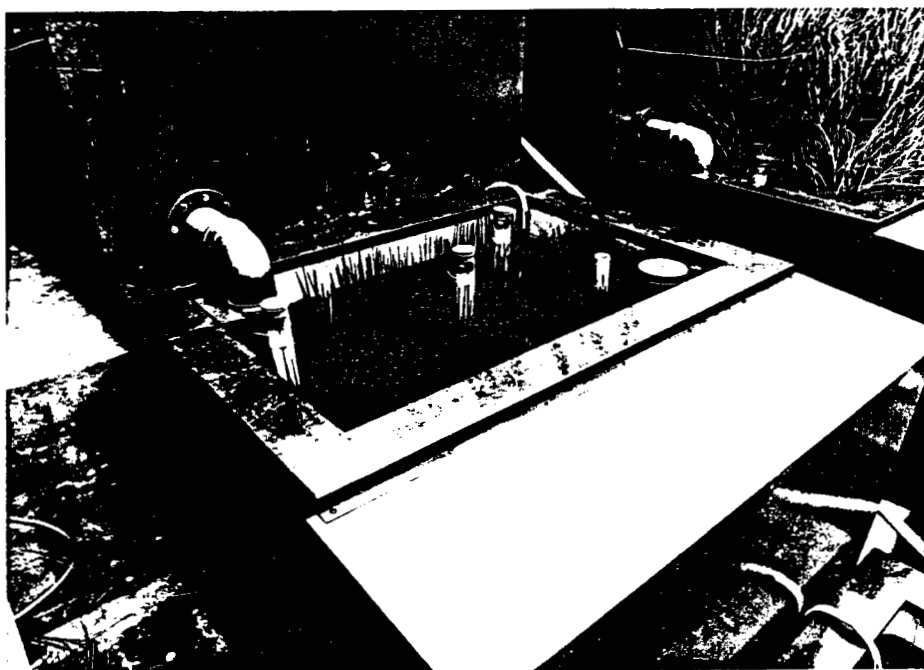
Les eaux usées de la ville d'ARLON (Belgique) (environ 14 000 habitants) après un court trajet dans la rivière la Semois, ont été utilisées pour être traitées dans une station expérimentale de lagunage. Cette station a été pensée et entièrement construite par M. RADOUX et ses collaborateurs (Fondation Universitaire Luxembourgeoise). Ce système est composé de cinq séries de quatre bassins (Photographie N°1 et Figure 1) placés en cascade et permettant à l'eau de s'écouler de l'un dans l'autre par simple gravité à partir du point supérieur d'alimentation (les cascades sont repérées par les lettres a, b, c, d et e). Les trois bassins de chaque cascade sont constitués d'un bac de volume de 672 dm^3 (0,80 m x 1,20 m x 0,70 m) rempli de quartz pur sur une hauteur de 45 cm. Le dernier bac a exactement les mêmes proportions, mais n'étant pas rempli de quartz. L'eau usée amenée à la partie supérieure de chaque cascade circule dans celles-ci sous une épaisseur de 7 cm, soit en s'infiltrant au travers du quartz (cascades dites par percolation : a et c), soit en coulant sur le quartz (cascades dites par translation : b, d et e). Les quantités d'eau apportées pour chaque cascade (grâce à un système de pompes commandées par un mécanisme électronique) ont été calculées de façon à ce que le temps de séjour de l'eau soit de 8 jours environ quel que soit le mode d'écoulement de l'eau.

Les trois premiers bassins de trois cascades (a, c et e) ont été plantés avec des hélophytes respectivement : Typha, Phragmites ou Carex (fi-

gure 2) choisis à la suite d'expériences et d'observations préalables (RA-DOUX - 1979). Pour les cascades a et e les plantes collectées ont été mises en place au printemps 1980 (plantes d'un an), tandis que celles de la cascade c ont été plantées au printemps 1979 (plantes de deux ans). Le quatrième bac de toutes les cascades contenait des Elodées (Figure N°1). La cascade b était exempte de toute végétation (pour servir de témoin eau), tandis que les bacs de la cascade d ont reçu des tiges artificielles de taille et de densité proches des plantes d'un an (tubes de polychlorure de vinyle pour le premier bac, et bâtons de soudure plastique pour les bacs 2 et 3) (photographie N°2). Ces cascades plantées de supports artificiels devant servir de témoins tiges.



Photographie N°1



Photographie N°2

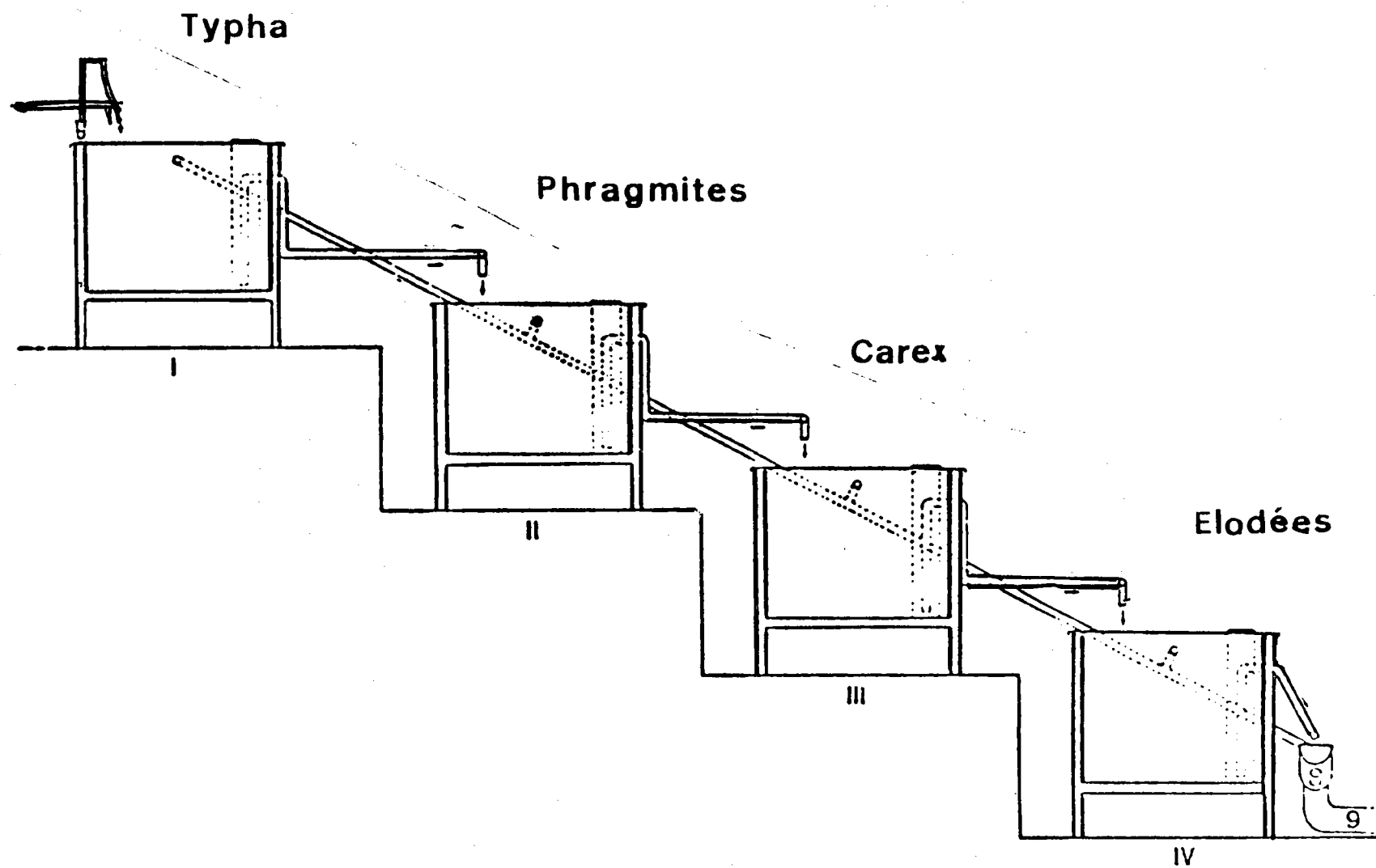
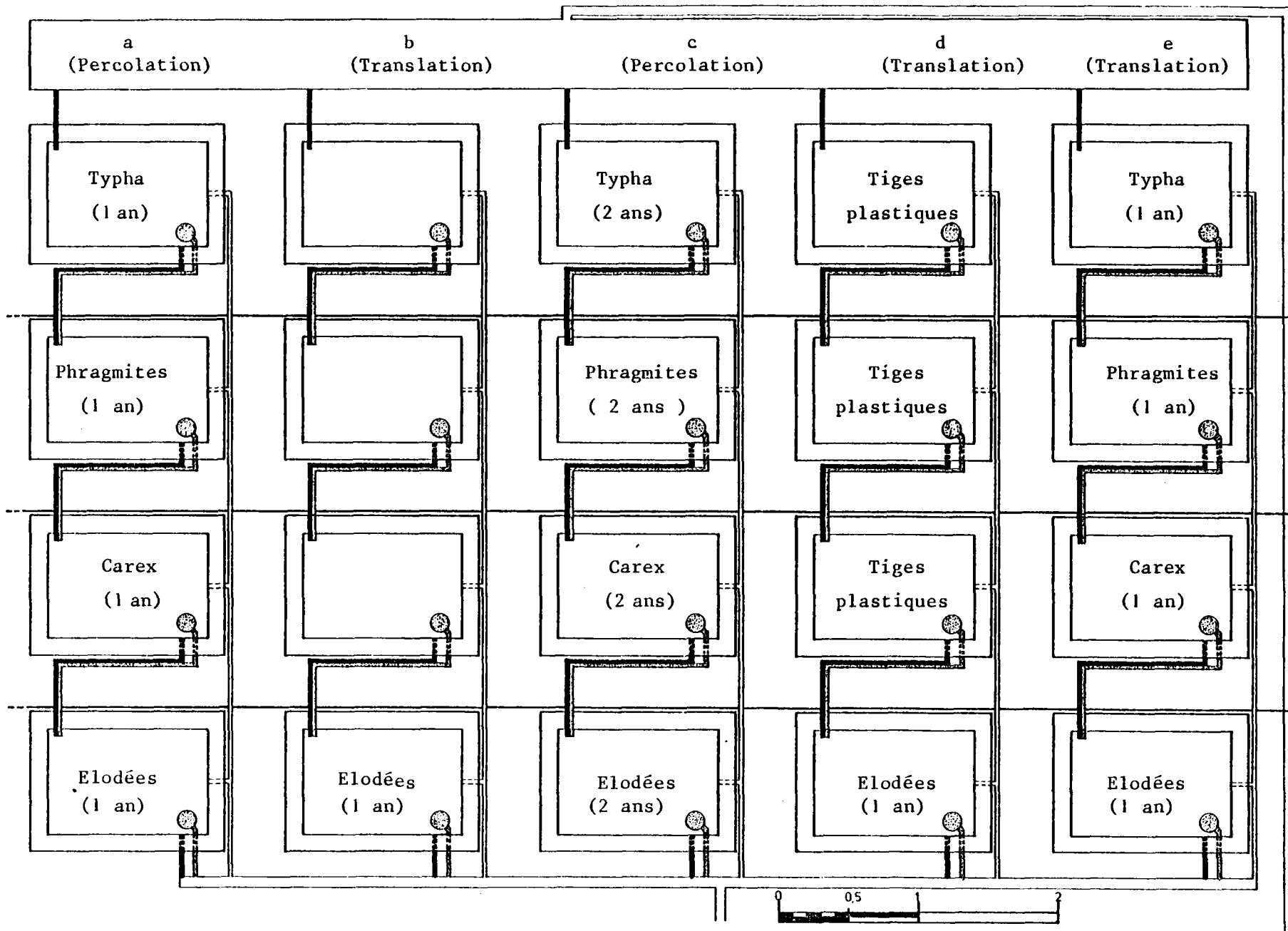


Figure N°2 - SUCCESSION DES DIFFERENTES ESPECES VEGETALES DANS LES BACS PLANTES



SCHEMA DES 5 MINI-LAGUNES EXPERIMENTALES

Figure N°1

II - ECHANTILLONNAGE

a) Le temps de circulation dans chaque bassin étant en moyenne de deux jours, des échantillons d'eau destinés à l'analyse bactériologique ont été prélevés aux différents niveaux à deux jours d'intervalle. Soit à Jo à l'entrée des bassins n°1, à Jo + 2 jours à la sortie des bassins N°1, à Jo + 4 jours à la sortie des bassins N°2, à Jo + 6 jours à la sortie des bassins N°3, à Jo + 8 jours à la sortie des bassins N°4. Parallèlement au prélèvement d'eau à la sortie des bassins, des sédiments et des tiges ont été prélevés. Six campagnes de prélèvement ont été réalisées en Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre 1980.

b) L'eau a été prélevée dans un bocal de 2 litres préalablement stérilisé à l'autoclave. La collecte de ces échantillons a duré environ 40 minutes, puis après agitation mécanique par trois renversements successifs du bocal, l'eau a été répartie dans quatre flacons :

- Flacon 1, stérilisé, en verre coloré (500 ml), destiné à l'analyse de la chlorophylle a.

- Flacon 2, stérilisé, en verre blanc (500 ml), contenant 1 ml d'une solution de chlorure mercurique à 8% et 1 ml de chloroforme pur, pour la mesure du pH, des matières en suspension, des nitrates, de l'ammoniac et des phosphates.

- Flacon 3, en plastique propre (250 ml), contenant 5 gouttes d'acide sulfurique technique, pour la mesure de la demande chimique en oxygène.

- Flacon 4 stérilisé, en verre blanc (125 ml), destiné à l'analyse microbiologique.

c) Pour chaque bassin, trois échantillons de sédiment ont été prélevés pour respectivement la numération des germes totaux, l'extraction des enzymes, le dosage de la chlorophylle a. A cet effet, trois tubes de 20 mm de diamètre, débouchés aseptiquement puis retournés ont été plongés dans les bacs et enfoncés dans le sédiment sur une hauteur de 5 cm. Ils ont été alors retirés sans perdre de sédiment, et bouchés aseptiquement avant transport au laboratoire.

d) Les tiges ont été prélevées aseptiquement en les coupant au ras du sédiment et quelques centimètres au-dessus du niveau de l'eau, puis en les plaçant dans des tubes à essai stériles avant transport au laboratoire. Pour chaque bassin, et pour chaque campagne deux tiges ont été prélevées, l'une destinée à la numération totale des bactéries, l'autre au dosage de la chlorophylle a.

e) Le transport des échantillons a été réalisé en glacière à $+ 4^{\circ} \text{C} + 6^{\circ} \text{C}$. A l'arrivée au laboratoire, les flacons destinés à la mesure de la D.C.O. ont été congelés à $- 26^{\circ} \text{C}$. Les autres flacons ont été stockés à $+ 4^{\circ} \text{C}$ en chambre froide avant leur analyse en moins de 24 heures après prélèvement (sauf pour l'analyse des chlorophylles a, celles-ci étant extraites au plus six heures après prélèvement).

III - ANALYSES BACTERIOLOGIQUES

Trois types d'analyses bactériologiques ont été réalisés :

- Numération totale.
- Estimation des chromogènes.
- Numération des coliformes thermorésistants à 44°C .

a - Numération totale

La numération des bactéries a été menée directement sur les eaux ou après élution des micro-organismes fixés sur les tiges ou les sédiments. L'élution a été réalisée (après mesure de la surface externe des tiges) par lavage mécanique à $+ 4^{\circ} \text{C}$ deux fois de suite avec 10 ml de tampon Sørensen pH 7. Les liquides d'élution ou l'eau brute ont été dilués de 10 en 10 dans de l'eau physiologique stérile. Chaque dilution a été inoculée par étalement sur gélose pour dénombrement (Pasteur) à raison de 0,1 ml par boîte de Pétri. Après incubation à $22^{\circ} \text{C} \pm 0,5^{\circ} \text{C}$ pendant 72 heures, les colonies bactériennes apparues ont été comptées et rapportées au millilitre d'eau brute analysée, ou au centimètre carré de surface de tige et de sédiment.

b - Bactéries chromogènes

Les boîtes de Pétri utilisées pour le dénombrement des germes totaux ont été exposées pendant 48 heures à la lumière et à la température du laboratoire. Après ces 48 heures, les colonies colorées ont été comptées et exprimées en pourcentage du nombre total de germes.

c - Coliformes thermorésistants à 44° C

Les coliformes thermorésistants à 44° C représentés à plus de 95% par Escherichia coli ont été numérés dans les eaux.

Des échantillons de 100 ml ou leur dilution ont été filtrés au travers de membranes stériles (Millipore) de 0,45 μ m de porosité. Les membranes ont été déposées sur milieu gélosé lactosé T.T.C. et incubées pendant 24 heures à 44° C \pm 0,5° C. Après incubation, les colonies orangées avec un halo jaune sous-jacent sont comptées et rapportées à 100 ml d'eau analysée.

IV - DOSAGE DE LA CHLOROPHYLLE a

De 200 ml à 500 ml des échantillons d'eau conservés à l'obscurité, et à + 4° C ont été filtrés sur filtre Millipore en acétate de cellulose (réf. RAWP) de 1,2 μ m de porosité.

Les filtrations ont été opérées en moyenne en 5 à 10 minutes à température du laboratoire. Après filtration les filtres ont été transférés dans des petites flacons de verre, et recouverts avec 10 ml d'acétone à 92% (réf. Codes) pour les dissoudre et extraire les pigments chlorophylliens. Bouchés hermétiquement, les flacons ont été stockés pendant 24 h à + 4° c, et à l'obscurité (flacons enveloppés dans du papier aluminium).

Parallèlement, les sédiments et les tiges ont été lavés deux fois avec 10 ml d'acétone à 92% selon le même protocole que celui utilisé pour l'élution des bactéries (chapitre IIIa). Les 20 ml de liquide acétonique ré-

récupérés ont été stockés 24 h à + 4° C à l'obscurité.

Dans tous les cas, après 24 h de stockage, les extraits acétoniques ont été centrifugés à 3 000 tours/minute (5 000 g) pendant 10 minutes. Les surnageants dont les volumes avaient été préalablement notés ont été soumis à une lecture spectrophotométrique contre l'acétone pure à 750 nm, 665 nm, 645 nm et 630 nm. Les résultats ont été exprimés en mg de chlorophylle a par m³ d'eau ou m² de surface de tige ou de sédiments après calcul respectivement selon les formules (a) et (b) (in"Scor-Unesco").

$$(a) \text{ Chlorophylle a mg/m}^3 = \frac{A}{x} \times \frac{v}{V}$$

où A = 11,65 (DO 665 - DO 750) - 2,16 (DO 645 - DO 750)
- 0,10 (DO 630 - DO 750).

x = trajet optique en centimètres.

v = volume de l'extrait acétonique en millilitres.

V = volume d'eau filtrée.

$$(b) \text{ Chlorophylle a mg/m}^2 = \frac{A}{10 S} \times \frac{v'}{S}$$

où v' = volume de l'extrait acétonique en millilitres.

S = surface de la tige ou des sédiments (toujours constante dans ce dernier cas et égale à 3,14 cm²).

V - ANALYSES ENZYMOLOGIQUES DES SEDIMENTS

Les sédiments collectés dans des tubes à essai ont été transvasés au laboratoire, dans un petit flacon de verre par entraînement avec du tampon phosphate de Sørensen pH 7 (3 fois 10 ml).

Le mélange sédiment tampon a été soumis aux ultrasons. Pour cela une sonde reliée à un appareil à ultrasons (réf. Bioblock) réglé

sur le niveau 4 a été plongée directement dans le mélange sédiment - tampon lui-même maintenu à + 4° C dans un bain de glace fondante. Après une application des ultrasons (3 fois 30 secondes à des intervalles de 1 minute pour éviter un échauffement du mélange), l'appareil a été réglé sur le niveau 2 et la sonde placée seulement dans le tampon au-dessus des sédiments. Les ultrasons ont été alors appliqués pendant 3 fois 5 minutes à des intervalles de 5 minutes pour éviter un échauffement du tampon. Cette double manipulation devant permettre de décrocher le maximum de micro-organismes du sédiment, puis les casser pour en libérer le contenu enzymatique.

Les échantillons ainsi traités ont été congelés à - 26° C jusqu'au moment de l'analyse enzymologique (entre 5 jours et 1 mois). L'analyse a été conduite sur les surnageants après décongélation lente, centrifugation à 5 000 tours/mn (7000 g) pendant 10 minutes et ultra-centrifugation réfrigérée, à 30 000 g pendant 20 minutes. Trois activités enzymatiques ont été analysées : activité amylasique, activité cellobiasique, activité phosphatase.

a - Détermination de l'activité amylasique

Deux millilitres d'extrait enzymatique ont été mis en présence de 10 ml d'une solution étalon d'amidon (MERCK, N.4510). Après quatre heures d'incubation à 37° C, la réaction de dégradation de l'amidon en sucres réducteurs a été stoppée par ajout de 2 ml de soude 0,5 N. Ont été ensuite ajoutés 10 ml d'eau distillée et 10 ml d'une solution de ferricyanure de potassium 0,05 N, et l'ensemble a été placé dans un bain-marie bouillant pendant 20 minutes. Après refroidissement à température ambiante, l'échantillon a été additionné de 25 ml d'acide acétique à 20% et 1 ml d'une solution d'iodure de potassium à 50%. L'iode libéré a été dosé en présence de thiodène par une solution de thiosulfate. Un témoin a été titré en parallèle. Le calcul de l'activité amylasique a été réalisé par la formule de THIEL et HATTINGH, et les résultats ont été exprimés nombre de groupements réducteurs type glucose/cm²/24 h.

b - Détermination de l'activité cellobiasique

Deux millilitres de l'extrait enzymatique ont été mis à réagir

avec 10 millilitres d'une solution de cellobiase à 2% (MERCK, pure) au bain-marie à 30° C pendant 4 heures. Le glucose formé par la dégradation de la cellobiase a été dosé par la méthode à l'hexokinase (kit test-combination gluco-quant de BOEHRINGER MANNEHEM ref. 62 730). La réaction colorimétrique obtenue a été lue au spectrophotomètre à 340 nm contre un témoin. L'activité cellobiasique a été calculée à l'aide de la formule de THIEL et HATTINGH et exprimée en moles de glucose formées par cm² par 24 heures.

c - Détermination de l'activité phosphatasique

Un millilitre d'extrait enzymatique a été ajouté à 5 ml d'une solution de paranitrophényl orthophosphate disodique (P.N.P.O.D.) préalablement portés à 30° C. La réaction d'hydrolyse de la solution de P.N.P.O.D. conduisant à la formation de paranitrophénol coloré en jaune susceptible d'un dosage colorimétrique. La lecture spectrophotométrique a été réalisée à 410 nm contre un blanc pour lequel le substrat était remplacé par une solution tampon de carbonate. Les résultats ont été reportés sur une gamme étalon préalablement construite pour exprimer la quantité de paranitrophénol formé. L'activité phosphatasique a été calculée par la formule de THIEL et HATTINGH modifiée et exprimée en micromoles d'orthophosphates formées/cm²/24 h.

VI - ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Les mesures de pH, matières en suspension M.E.S. (par filtration sur filtres en fibre de verre de 20 μ m de porosité), les nitrates (méthode au salicylate de sodium), les nitrites (méthode au réactif de ZAMBELLI), l'azote ammoniacal (méthode de NESSLER) après traitement par la solution de SEIGNETTE, et les phosphates (méthode au réactif phosphomolybdéique) ont été réalisées par le Laboratoire Départemental de Bactériologie de METZ (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} ont été dosés sur les eaux filtrées).

Les résultats obtenus pour les nitrites n'ont pas été retenus dans la discussion des résultats, vu leur vitesse de disparition au cours de la filtration des eaux au laboratoire ou du stockage des échantillons.

L'azote total a été dosé par le Laboratoire d'Hygiène et de Santé Publique durant les trois premières campagnes seulement, du fait de l'incohérence des résultats liés sans doute au problème de transport et de stockage des résultats.

La demande chimique en oxygène a été mesurée au laboratoire avec la trousse Hach.

RÉSULTATS

Les résultats bruts sont rassemblés dans les tableaux de l'annexe : du N°1 à 11 en ce qui concerne les analyses d'eau, du N° 12 à 17. en ce qui concerne les analyses de sédiment, et du N °18 à 20 en ce qui concerne les analyses de tiges.

Les résultats sont discutés en 6 points :

- 1 - Les caractéristiques des eaux brutes.
- 2 - Les caractéristiques des eaux traitées.
- 3 - Les cinétiques d'élimination des contaminants.
- 4 - Les résultats des analyses réalisées sur les sédiments.
- 5 - L'analyse des tiges.
- 6 - Les mesures de croissance des plantes.

I - CARACTERISTIQUES DES EAUX BRUTES

Pour chaque campagne, les eaux brutes ont été analysées cinq fois lors de la première visite (prélèvements réalisés à l'entrée des cinq cascades). Les valeurs moyennes des analyses de ces eaux pour chaque campagne sont

rassemblées dans le tableau 21. Pour la plupart des paramètres, des variations importantes ont pu être observées au cours des six mois de prélèvement: d'un facteur 3 à 4 pour la D.C.O, les M.E.S. et les NO_3^- ; d'un facteur 9 pour les phosphates, l'ammoniaque ; d'un facteur 20 pour Escherichia coli . Les plus hautes valeurs ont généralement été observées en août et septembre, tandis que les valeurs les plus faibles ont été mesurées en juin liées sans doute aux fortes pluies. Les valeurs trouvées caractérisent des eaux usées peu chargées, consécutivement à une certaine dilution des rejets de la ville d'Arlon dans la rivière Semois.

II - CARACTERISTIQUES DES EAUX TRAITÉES

Les eaux usées après avoir circulé pendant huit jours sur ou au travers du matériau support, en présence ou en absence de plantes présentent des caractéristiques traduisant une diminution nette de la valeur de la plupart des paramètres considérés. Pour simplifier la présentation, la moyenne des cinq dernières campagnes a été calculée pour chaque cascade (la première campagne n'a pas été prise en compte ; l'observation des résultats laissant apparaître un non fonctionnement de la capacité d'épuration lors de la mise en eau). Le tableau 22 rassemble les valeurs moyennes des caractéristiques des eaux traitées, calculées pour chaque cascade. Dans l'ensemble, les eaux ainsi traitées par lagunage répondent aux normes des rejets. En ce qui concerne les valeurs de D.C.O., il n'apparaît pas de variation significative entre les cinq cascades. Une différence significative peut être notée pour les matières en suspension entre les cascades a et c où l'eau circule par percolation à travers la masse de quartz (5 et 8 mg de M.E.S.), et les cascades b et d où l'eau circule par translation (22 et 18 mg/l de M.E.S.). Par contre, il est surprenant que les valeurs des M.E.S. (10 mg/l) de la cascade e avoisinent celles des cascades où l'eau circule par percolation. Les valeurs des phosphates à la sortie des cascades se situent en moyenne entre 1,5 et 2 mg/l sauf pour la cascade c plantée depuis deux ans, et où les hélophytes n'ont pas été faucardés (une accumulation des débris végétaux et une anoxie quasi-totale à l'interface sédiment-eau peuvent expliquer ce passage et relargage des phosphates). Une observation parallèle peut être rapportée pour l'am-

TABLEAU N° 21

VALEURS MOYENNES DES EAUX BRUTES A L'ENTREE DE CHAQUE CASCADE

	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Chlorophylle mg/m ³	1	8	5	2	3	8
D.C.O. mg/l	311	195	96	120	174	212
M.E.S. mg/l	187	44	-	42	56	133
PO ₄ ³⁻ mg/l	7	10,8	1,4	11,1	2,6	12,1
NH ₄ ⁺ mg/l	20,3	21,5	2,8	10,1	19,3	22
NO ₃ ⁻ mg/l	16,4	17,4	7,8	20,8	15,7	18,6
NO ₂ ⁻ mg/l	0,44	1,13	0,25	1,11	0,93	1,07
pH	7,7	8,0	8,2	8,0	8,2	7,6
N.T. x 10 ⁵ /ml	27	79	14	38	92	82
<u>Escherichia coli</u> x 10 ⁵ /100 ml	140	33	7,1	22	42	40
Chromogènes %	20	9	23	11	17	11

Chaque chiffre donné représente la moyenne de cinq analyses sauf pour le mois de septembre (moyenne sur quatre analyses)

N.T. : Numération totale des bactéries.

(-) : Non déterminé.

moniaque (en moyenne de 0,3 à 0,5 mg/l sauf pour la cascade c avec en sortie 3 mg/l).

Les valeurs des nitrates après lagunage se situent en moyenne entre 1 et 3 mg/l, mais avec pour certaines campagnes de prélèvement des valeurs nulles. La numération totale bactérienne de ces eaux après lagunage se situe pour les cascades où l'eau circule par percolation entre 12 000 et 31 000 germes/ml, et pour les cascades où l'eau circule par translation entre 72 000 et 150 000 germes/ml. La proportion de germes chromogènes (de 56 à 88%) est totalement inversée par rapport à celle des eaux brutes traduisant bien une diminution de la pollution organique due au traitement. Les micro-organismes indicateurs de contamination fécale (coliformes thermorésistants à 44° C comme Escherichia coli) sont présents à des concentrations exceptionnellement faibles après lagunage. Une fois encore, la circulation des eaux par percolation retient plus de germes (0 à 3 Escherichia coli/100 ml en moyenne à la sortie des cascades a et c) que la circulation par translation (15 à 129 Escherichia coli/100 ml en moyenne à la sortie des cascades b, d et e. L'apparition des algues dans les bassins de lagunage se traduit par une augmentation de la chlorophylle dans les eaux de sortie : augmentation faible pour les cascades a et c où l'eau circule par percolation (1 à 2 mg/m³) augmentation forte pour la cascade d où l'eau circule par translation, et où des tiges artificielles supportent un développement algal (70 mg/m³) ; augmentation moyenne dans la cascade b où il n'y a pas de tiges (27 mg/m³) ou dans la cascade e avec plantes dont l'ombre doit limiter cette croissance algale (10 mg/m³).

Le tableau 23 rassemble les valeurs des pourcentages moyens d'élimination des différents paramètres physico-chimiques calculés sur les cinq dernières campagnes à la sortie des quatre bassins de lagunage de chaque cascade.

N'ont pas été pris en compte le pH dont la signification des variations est faible, ni le pourcentage des bactéries chromogènes et la concentration en chlorophylle qui augmentent, ni les numérations totales qui même si elles diminuaient n'ont pas de signification dans la mesure où la flore bac-

TABLEAU 22

VALEURS MOYENNES DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DES EAUX TRAITÉES PAR LAGUNAGE (MOYENNE DES CINQ DERNIERES CAMPAGNES)

	D.C.O. (mg/l)	M.E.S. (mg /l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	pH	Numé- ration to- tale/ml	Chromo- gènes %	<u>E. coli</u> / 100 ml	Chloro- phyllé mg/m3
Cascade a (Plantes d'un an-percola- tion)	66	5	1,5	0,5	≠ 1,0	7,9	12 000	72	0	1
Cascade b (Ni plantes ni tiges - translation)	92	22	1,8	0,3	≠ 2	9	72 000*	76	82	27
Cascade c (Plantes de deux ans - percolation)	66	8	6,5	3	≠ 2,5	7,9	31 000	66	3	2
Cascade d (Tiges artificielles - translation)	110	18	2	0,3	≠ 2,8	9,3	134 000	88	15	70
Cascade e (Plantes d'un an - translation)	61	10	2	0,3	≠ 2,8	8,7	150 000	56	129	10

* Les résultats de la campagne de prélèvement du mois de juin n'ont pas été retenus, tant leur valeur apparaissait trop différente.

	D.C.O.	M.E.S.	PO ₄ ³⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
Cascade a (Plantes d'un an - percolation)	59% (29-91)	92% (76-99)	80% (60-94)	96% (90-98)	93% (73->97)
Cascade b (Ni plantes, ni tiges - translation)	42% (8-76)	67% (46-82)	76% (0-81)	98% (89-99)	87% (64->97)
Cascade c (Plantes de 2 ans - percolation)	59% (0-91)	88% (86-97)	14% (0-60)	80% (17-93)	84% (52->97)
Cascade d (Tiges artificielles - translation)	45% (0-64)	73% (38-93)	74% (60-82)	98% (82-99)	83% (42->97)
Cascade e (Plantes d'un an - translation)	61% (35-88)	85% (5-98)	74% (20-79)	98% (89-99)	83% (42->97)

TABLEAU 23

POURCENTAGES MOYENS D'ELIMINATION DES DIFFERENTS PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES A LA SORTIE DU SYSTEME DE LAGUNAGE

(Sont donnés dans le tableau les pourcentages moyens calculés sur les cinq dernières campagnes et entre parenthèses les valeurs extrêmes)

térienne sortant du système de lagune est totalement différente de celle des eaux brutes ; ni les valeurs de Escherichi coli dont l'abattement est toujours supérieur à 99,99%, et ni les nitrites dont la valeur des résultats pouvait être discutée.

Les pourcentages présentés dans ce tableau objectivent un peu mieux les valeurs des paramètres présentés dans le tableau 22 et montrent au moins deux faits :

a) La D.C.O. est le paramètre le moins bien éliminé, peut-être du fait d'une importante activité bactérienne et algale (micro-organismes qui rejettent jusqu'à 30% du carbone assimilé).

b) La classification des cascades entre elles au vu de leur efficacité de dépollution sera difficile à réaliser car celle-ci peut varier d'un paramètre à l'autre.

III - CINETIQUES D'ELIMINATION DES CONTAMINANTS

Les caractéristiques des eaux après lagunage résultent du passage et de l'auto-épuration de l'eau dans quatre bassins dont l'action se complète. Il est possible de tracer des courbes d'élimination des contaminants en fonction du bassin ou du temps (2 jours/bassin), et de les exprimer comme des cinétiques. Sept paramètres ont été pris en considération :

- Les M.E.S. et la D.C.O. dosées sur l'eau totale.
- PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ dosés sur l'eau filtrée.
- Escherichia coli et la chlorophylle quantifiés sur l'eau totale.

1°) Evolution des M.E.S. dans les 5 cascades

Les résultats sont présentés en pourcentage de M.E.S. restantes par rapport aux eaux brutes sous forme de graphique (Figure 3). Ils ont été

obtenus en calculant la moyenne des résultats des six campagnes par un souci de simplification qui peut cependant être discutable étant donné les variations mensuelles (cf. Tableau 2 en annexe).

Au vu de la figure 3, on peut noter que trois cascades fonctionnent d'une manière similaire (les deux où l'eau circule par percolation a et c et où la masse de quartz joue le rôle de masse filtrante ; et la cascade e plantée où l'eau circule par translation). La cascade plantée de tiges artificielles retient les M.E.S. moins efficacement que la cascade témoin sans plantes, ni tiges artificielles. Pour les cascades avec circulation de l'eau par translation, le bassin N°1 retient en moyenne 50 et 60% des M.E.S. respectivement pour le terrain b et la cascade plantée e.

2°) Evolution de la D.C.O. dans les cinq cascades

Les résultats sont présentés en pourcentage de D.C.O. restante à la sortie de chaque bassin par rapport aux eaux brutes. Bien que la D.C.O. ne soit pas éliminée dans un rapport aussi favorable que les M.E.S., l'évolution de ce paramètre est similaire. Les deux cascades où l'eau circule par percolation (a et c) peuvent être rapprochées ; elles retiennent le maximum de D.C.O., le quartz jouant alors le rôle de filtre. Les trois cascades (b, d et e) peuvent être classées comme précédemment à savoir e plus efficace que b plus efficace que d. La présence d'hélophytes améliore donc la capacité de rétention du système vis-à-vis des M.E.S. et de la D.C.O. Le bassin N°1 pour la cascade e (avec plantes) où l'eau circule par translation retient 50% de la D.C.O.

3°) Evolution des phosphates dans les cinq cascades

Les résultats sont présents dans la figure 5. Les dosages ont été réalisés sur des eaux préalablement filtrées pour le dosage des M.E.S., et ils ne concernent donc que les phosphates solubles. Ce sont les cascades b et d (eau en translation) sans plantes qui retiennent le mieux les phos-

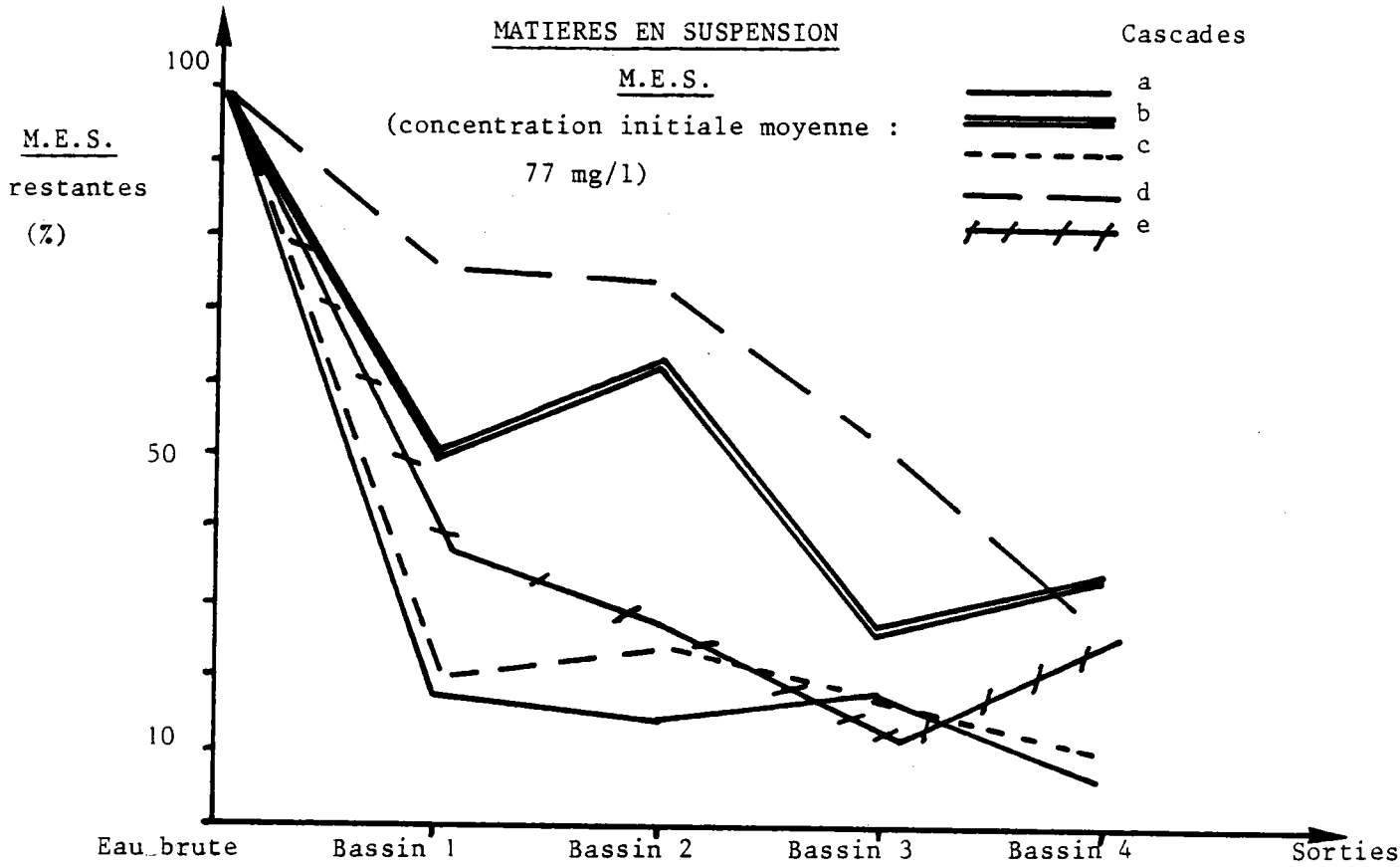


Figure 3 : CINETIQUE D'ELIMINATION DES MATIERES EN SUSPENSION AU COURS DE LAGUNAGE

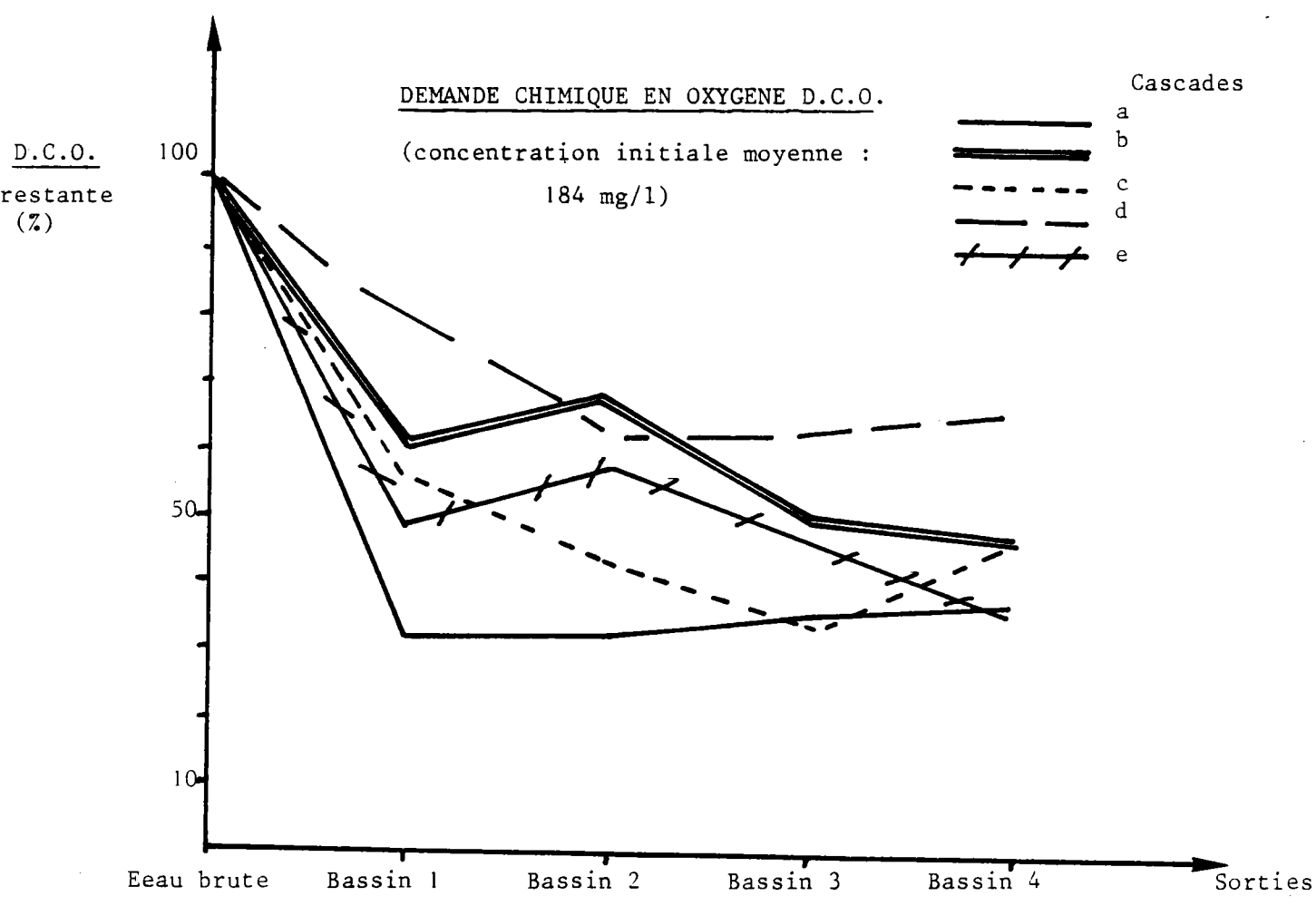


Figure 4 : CINETIQUE D'ELIMINATION DE LA DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE AU COURS DE LAGUNAGE

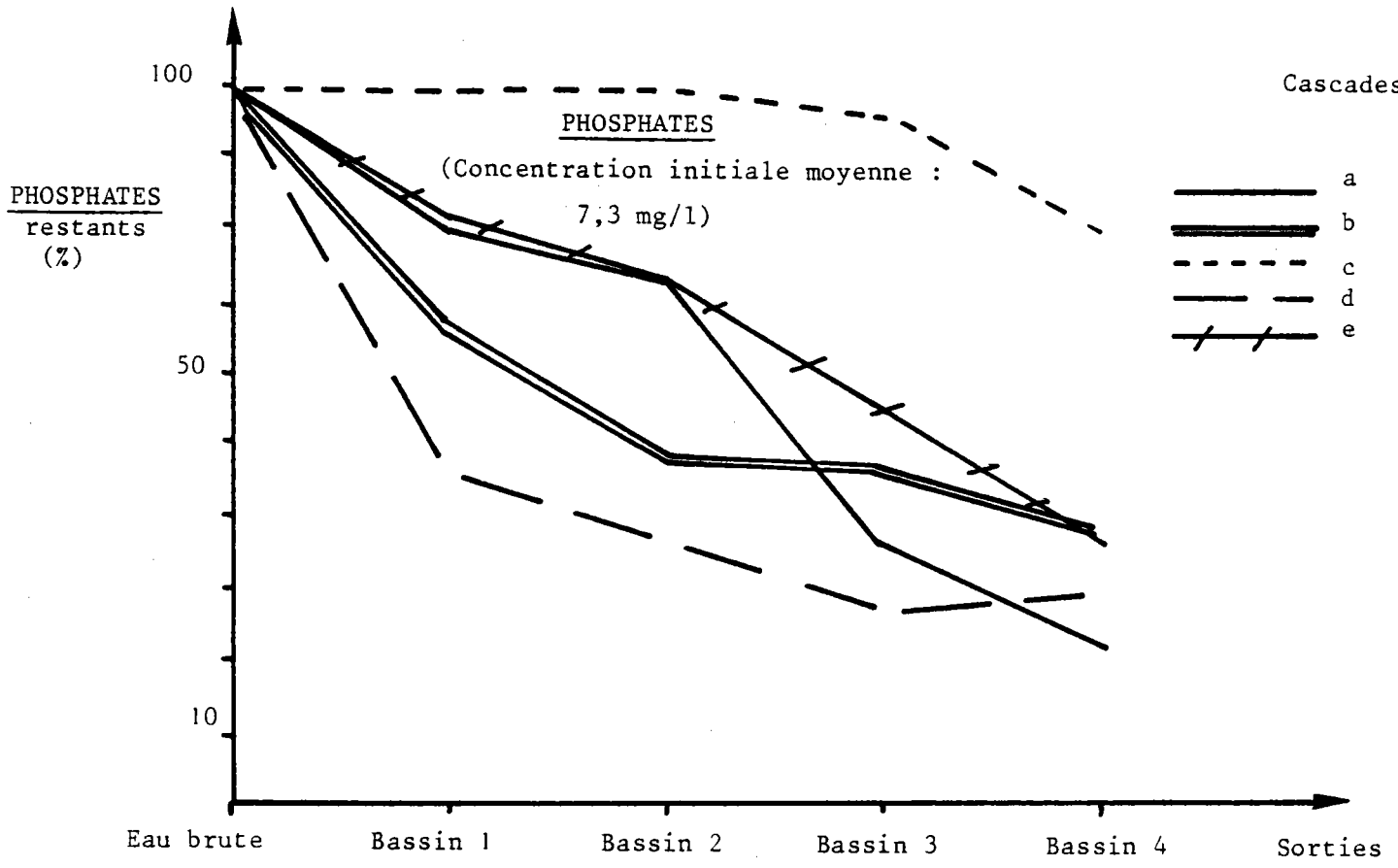


Figure 5 : CINETIQUE D'ELIMINATION DES PHOSPHATES AU COURS DU LAGUNAGE
(DOSAGES SUR EAUX FILTRES)

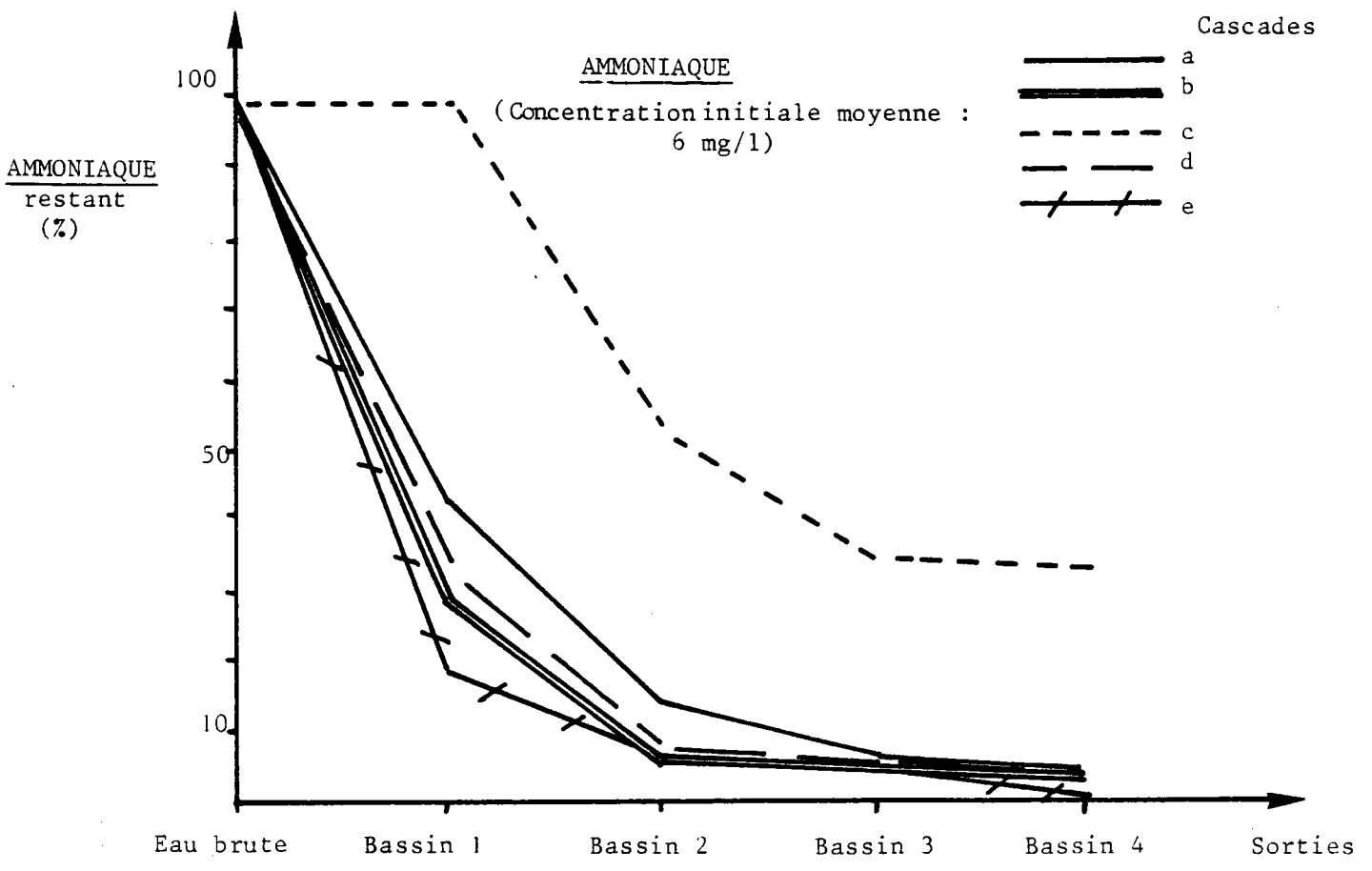


Figure 6 : CINETIQUE D'ELIMINATION DE L'AMMONIAQUE AU COURS DU LAGUNAGE
(DOSAGES SUR EAUX FILTRES)

phates solubles, le bassin n°1 recevant en moyenne de 30 à 50% d'entre eux. La présence de plantes de 1 an dans les cascades a et e (percolation et translation) n'améliore pas cette rétention, mais au contraire la dessert. Enfin, la cascade plantée depuis 2 ans où des résidus végétaux se sont accumulés et où domine une zone d'anoxie relargue souvent des phosphates, et en moyenne ne commence à en retenir que dans le bassin N°4 (avec des Elodées) et seulement pour 20% d'entre-eux.

4°) Evolution de l'ammoniaque dans les cinq cascades

L'élimination de l'ammoniaque au cours du lagunage apparaît constante et importante (plus de 50% dès le bassin N°1) sauf pour la cascade c. Dans celle-ci comme précédemment, l'accumulation de débris végétaux et surtout une zone d'anoxie prononcée peut amener une transformation de l'azote des plantes en ammoniaque, ou en tous cas empêcher l'ammoniaque d'être oxydé en nitrates ou en nitrites. (Figure 6)

5°) Evolution des nitrates dans les cinq cascades

Les résultats présentés sur la figure 7 montrent une chute spectaculaire des nitrates : plus de 60% en moyenne dans le bassin 1, quelle que soit la cascade considérée. Les cinq cascades présentent une cinétique, et une efficacité similaire montrant qu'une zone d'anoxie doit exister, à un niveau non défini ou à un moment donné de la journée, déterminant ainsi une respiration des nitrates.

6°) Devenir des Escherichia coli dans les cinq cascades

Le tableau 24 présente les pourcentages d'Escherichia coli (coliformes thermorésistants à 44° C) à la sortie de chaque bassin par rapport aux eaux brutes. Dès le premier bassin, plus de 90% des Escherichia coli sont éliminés dans tous les cas. Une comparaison conduite à la sortie des bassins N°2 des cinq cascades montre que la cascade a (plantes de 1 an percolation) retient le plus de micro-organismes comme par ailleurs la cascade

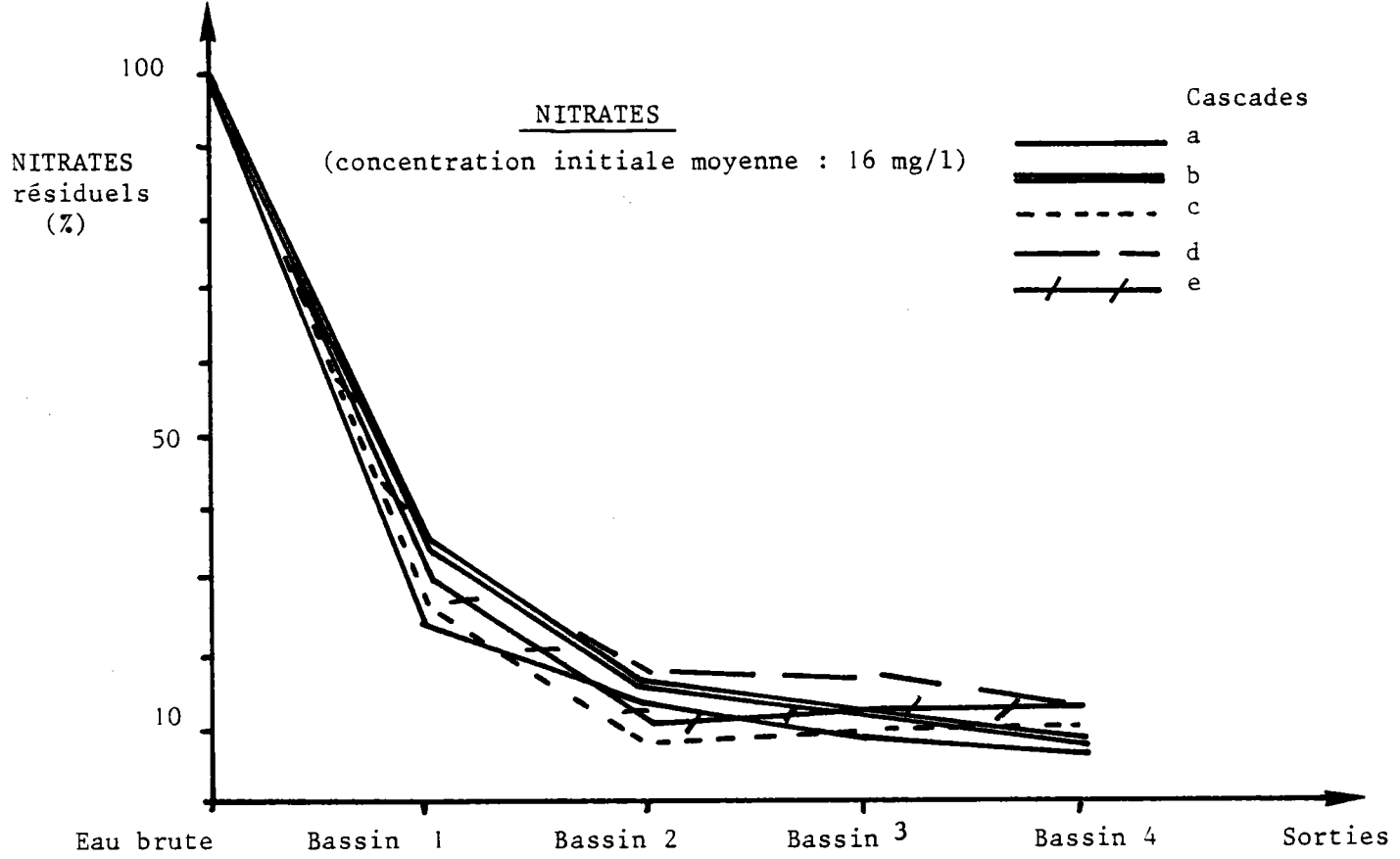


Figure 7 : CINETIQUE D'ELIMINATION DES NITRATES AU COURS DU LAGUNAGE
(DOSAGE SUR EAUX FILTRES)

c, mais qui paraît "encrassée" par deux ans de fonctionnement. Enfin, il n'y a pas de différences entre les cascades d et e (translation, respectivement tiges artificielles et plantes) qui toutes deux éliminent mieux Escherichia coli que la cascade témoin b. Au-delà des bacs n°2, les comparaisons sont difficiles à mener eu égard à l'exceptionnellement faible nombre d'Escherichia coli dans l'eau.

Parallèlement, on peut par ailleurs observer une diminution plus faible du nombre total de bactéries.

7°) Evolution des concentrations en chlorophylle dans les cinq cascades

Les variations des concentrations en chlorophylle n'ont pas été calculées en pourcentage. Une observation des résultats bruts (Tableau 11 de l'annexe) suffit à montrer que dans les cascades où l'eau circule en translation, une multiplication algale abondante apparaît immédiatement (bacs n°1) et d'une manière prépondérante à partir de juin. Cette floraison se traduit par une apparition d'algues benthiques, mais aussi dans l'eau circulante où les teneurs en chlorophylle sont significativement accrues. C'est à la sortie des bassins N°1 que les concentrations en chlorophylle sont les plus importantes pour une diminution sensible peut-être notée à la sortie des bassins N°3. Par ailleurs, comme nous l'avons noté précédemment, la multiplication algale est plus importante dans la cascade d (tiges artificielles), que e (plantes), que b (témoin). Enfin, dans les cascades a et c où l'eau s'écoule par percolation, la multiplication algale est aussi importante, témoin les concentrations en chlorophylle sur les sédiments, mais le gravier joue le rôle de filtre, et retient les cellules algales, ce qui se traduit par une faible concentration de chlorophylle dans les eaux sortant des bassins des cascades a et c.

IV - ANALYSE DES SEDIMENTS

Six paramètres ont été appréciés : la numération totale des germes, le pourcentage de bactéries chromogènes, la teneur en chlorophylle, les

TABLEAU 24

ESCHERICHIA COLI A LA SORTIE DES BASSINS (EN %)
 (concentration initiale moyenne environ $50 \cdot 10^5$ /100 ml)

	Cascades				
	a	b	c	d	e
Sortie bassin 1	0,3%	7%	3,5%	2%	2%
Sortie bassin 2	0,009%	0,25%	0,02%	0,02%	0,03%
Sortie bassin 3	0,0002%	0,005%	0,01%	0,008%	0,006%
Sortie bassin 4	<0,00001%	0,001%	0,0001%	0,0003%	0,001%

activités amylasique, cellobiasique, et phosphatasique. Ils sont rapportés à l'unité de surface (cm^2 ou m^2). Les tableaux des résultats bruts sont numérotés de 12 à 17 et placés en annexe.

1°) Numération totale des sédiments et pourcentage de bactéries chromogènes (résultats bruts en annexe - Tableaux 12 et 13)

Les variations du nombre de bactéries (numération totale) sont importantes de 1 à 3 log entre mai et septembre pour certains bassins. Ces variations n'ont pas réellement pu être reliées à un phénomène spécifique. Sans doute dans un certain nombre de cas une prédominance a pu être observée en juin, mais par ailleurs, des variations en dents de scie peuvent être dues aussi bien à des variations dans l'efficacité de l'éluion qu'à l'hétérogénéité de la répartition des germes au fond du bassin.

Les moyennes des résultats rapportées dans le tableau 25 n'ont donc qu'une valeur indicative permettant une analyse relative du problème.

La quantité des micro-organismes par unité de surface est significativement plus importante dans les bassins des cascades où l'eau circule par percolation (a et c), et celle plantée où l'eau circule par translation (e). Enfin, la quantité de micro-organismes est significativement plus faible au fond des bassins⁴ qu'au début des cascades. Par contre, au contraire de ce qui a pu être observé dans l'eau le pourcentage de bactéries chromogènes compris entre 14 et 28% dans les bassins N°1 n'augmente que très faiblement, sinon pas. (Tableau 26)

2°) Teneur en chlorophylle (résultats bruts en annexe - Tableau 14)

Les teneurs en chlorophylle rapportées au m^2 de bassin varient dans les bassins N°1 en moyenne de 125 à 361 mg (Tableau 27). Dans un certain nombre de cas, la teneur en chlorophylle augmente depuis la mise en eau jusqu'à un maximum en juillet. La colonisation algale des sédiments de plus, n'était pas régulière, et des îlots de quelques centimètres ont pu être observés à

TABLEAU 25

VALEURS DES NUMERATIONS TOTALES DES SEDIMENTS (NOMBRE DE GERMES
X 10⁶/CM²) (MOYENNE DES 6 CAMPAGNES

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	390	30	120	51	139
bassin 2	65	25	200	22	28
bassin 3	100	30	72	15	14
bassin 4	15	10	21	12	16

TABLEAU 26

POURCENTAGES DE BACTERIES CHROMOGENES (MOYENNE DES SIX CAMPAGNES)

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	25%	28%	15%	17%	14%
bassin 2	28%	18%	41%	15%	20%
bassin 3	28%	35%	39%	14%	19%
bassin 4	7%	15%	29%	17%	15%

partir desquels le fond du bassin était colonisé. En dehors de la cascade c où les teneurs en chlorophylle sont significativement supérieures, et la cascade e où l'ombre des plantes semble limiter la prolifération des algues, les teneurs sont proches pour les autres cascades, et varient légèrement des bassins 1 au 4 dans le sens de la diminution.

3°) Activité amylasique (résultats bruts en annexe - tableau 15)

Le tableau 28 rassemble les moyennes des activités amyliques rapportées à l'unité de surface. L'observation des résultats bruts montre à partir des bassins N°2 une très faible variation saisonnière. Par contre, des maximums significatifs en juin peuvent être notés pour les bassins N°1 des cascades a et c (percolation). Les sédiments de la cascade c (plantes de deux ans - percolation) portent une activité amyliques supérieure aux autres cascades (par exemple 65×10^{-3} groupes réducteurs dans le bassin 1/ $\text{cm}^2/24 \text{ h}$ contre 15 à 24 dans les autres). Pour les cascades a, b, c et d, une diminution constante de l'activité amyliques des bassins 1 à 3 peut être observée.

4°) Activité cellobiasique (résultats bruts en annexe - tableau 16)

Les activités cellobiasiques montrent des variations importantes en fonction des campagnes de prélèvement. Dans tous les bassins une activité maximale a été observée en juillet (soit un décalage d'un mois avec les activités phosphatasiques, mais une correspondance avec certaines variations des concentrations en algues), suivie d'une décroissance en-dessous des activités initialement dosées en mai. De plus, les moyennes des cinq dernières campagnes montrent (sauf pour la cascade e où les activités diminuent régulièrement du bassin 1 au bassin 4 sont de 184 à 10×10^{-5} moles de glucose), une augmentation sensible dans le bassin N°2 puis une diminution. Enfin, les activités des cascades c et a sont les plus élevées. (Tableau 29)

5°) Activité phosphatasique (résultats bruts en annexe, tableau 17)

Au contraire de l'activité cellobiasique, les mesures d'activi-

TABLEAU 27TENEURS EN CHLOROPHYLLE DES SEDIMENTS (MG/M²) (MOYENNE DES SIX CAMPAGNES)

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	220	175	125	210	361
bassin 2	125	165	567	111	62
bassin 3	180	66	224	60	56
bassin 4	125	29	107	60	57

TABLEAU 28

ACTIVITE AMYLASIQUE DES SEDIMENTS (X 10⁻³ GROUPES REDUCTEURS/24H/CM²)
(MOYENNE DES CINQ CAMPAGNES)

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	24	15	65	24	22
bassin 2	17	14	47	20	10
bassin 3	10	13	33	18	17
bassin 4	14	16	16	17	10

TABLEAU 29

ACTIVITE CELLOBIASIQUE DES SEDIMENTS (X 10⁻⁵ MOLES DE GLUCOSE
FORMEES/CM²/24H) (MOYENNE DE CINQ CAMPAGNES)

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	187	132	214	110	184
bassin 2	256	216	297	139	130
bassin 3	122	132	199	125	112
bassin 4	155	109	118	63	103

TABLEAU 30

ACTIVITE PHOSPHATASIQUE DES SEDIMENTS (EN MICROMOLES DE PO₄³⁻/24H/CM²)
(MOYENNE DE CINQ CAMPAGNES)

Sédiments	Cascades				
	a	b	c	d	e
bassin 1	21	10,5	34	8,6	9
bassin 2	8	5,2	19,5	4,6	5
bassin 3	5	5,6	7,9	4	3,6
bassin 4	9	3,5	4,6	2,5	5

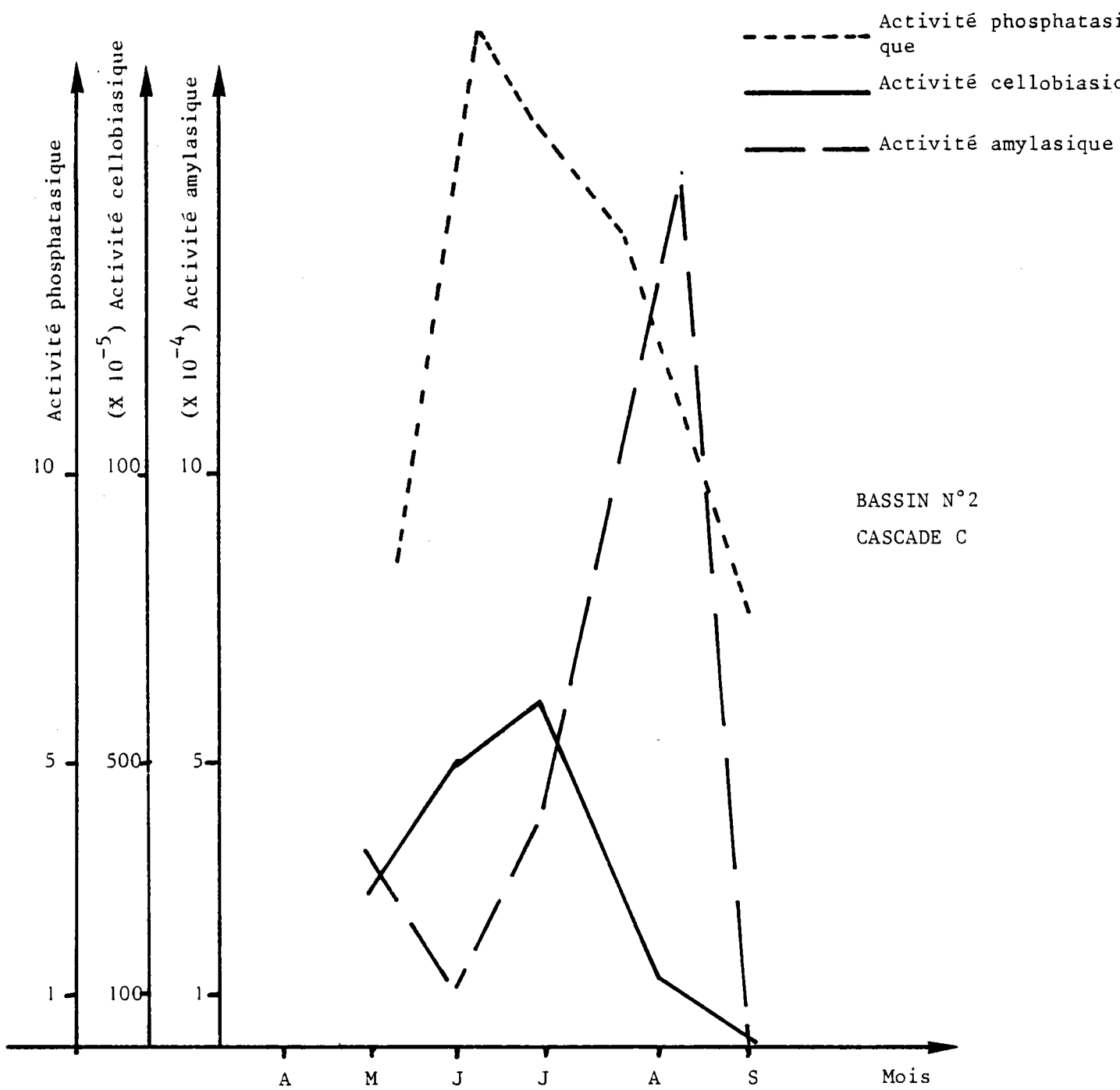
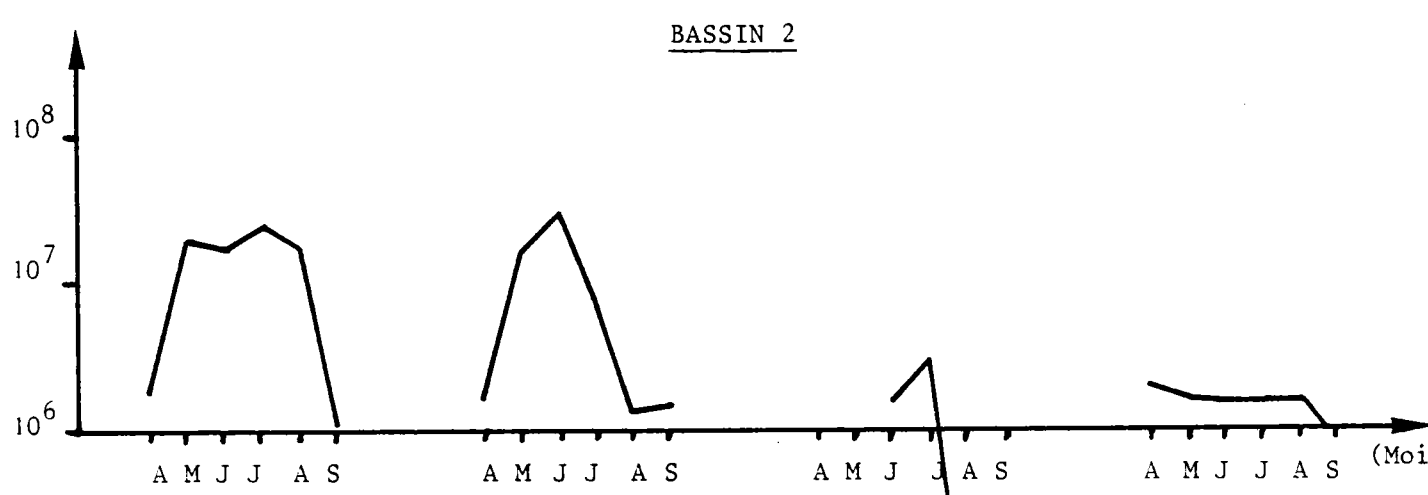
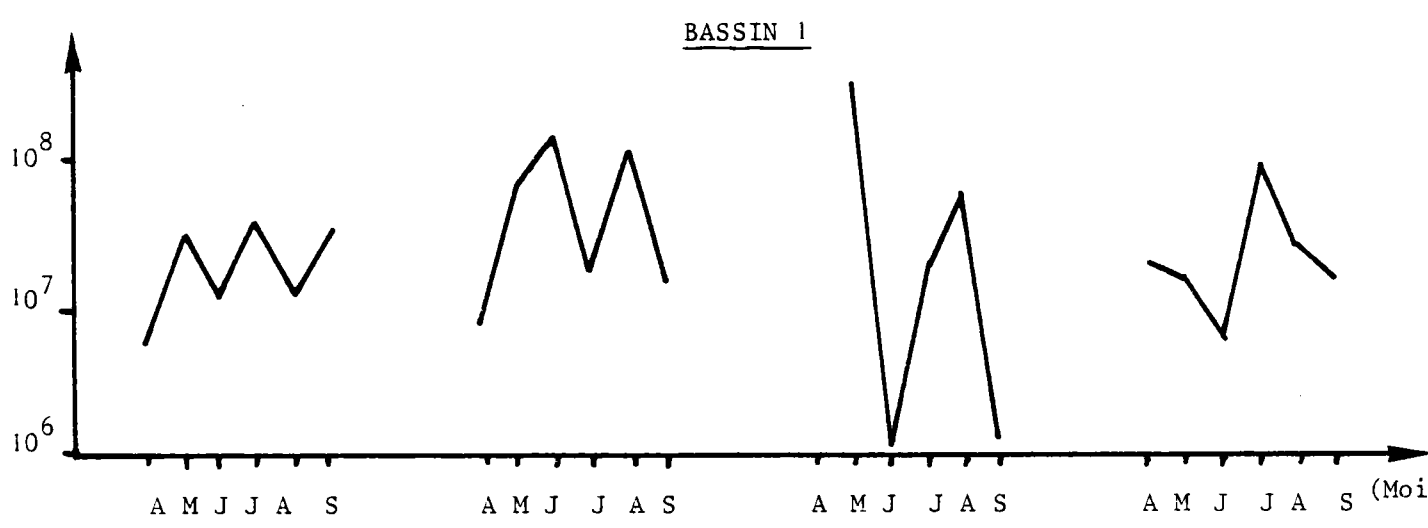
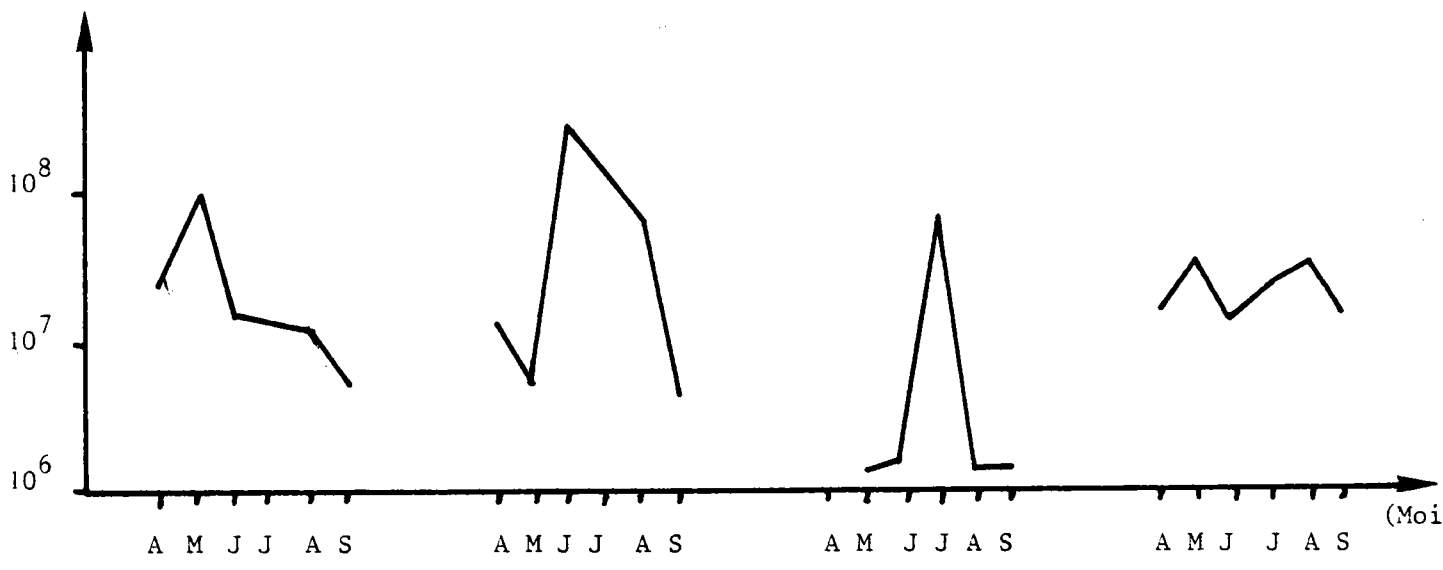


Figure 8 : VARIATIONS DES ACTIVITES ENZYMATIQUES DANS LES SEDIMENTS EN FONCTION DU MOIS (VALEURS TIREES DES TABLEAUX 15, 16 et 17 DE L'ANNEXE)

phosphatasique sont relativement constantes dans le temps sauf pour la cascade c (plantes de deux ans - percolation) où une activité extrêmement accrue peut être notée en août. Il est d'ailleurs étonnant de rappeler ici, que les trois activités enzymatiques dosées ont montré des maximum décalés dans le temps phosphatasique, amylasique puis cellobiasique comme le montre l'exemple de la figure 8. Les moyennes des résultats obtenus lors des cinq dernières campagnes (tableau 30) montrent dans l'ensemble une décroissance constante de l'activité phosphatasique des bassins 1 à 4. Enfin, comme précédemment, ce sont les sédiments des cascades c et a qui portent l'activité phosphatasique la plus élevée.

V - ANALYSE DES TIGES

Les tiges après transport au laboratoire ont été analysées pour trois paramètres : numération totale, pourcentage de chromogènes et teneur en chlorophylle, rapportés à l'unité de surface (cm²). Les résultats bruts sont rassemblés respectivement dans les tableaux 18, 19 et 20 de l'annexe. Seuls les trois premiers bassins des cascades plantées (plantes ou tiges artificielles) ont été étudiés. Les figures 9 et 10 présentent ces résultats. La numération totale de ces germes varie de part et d'autre de 10⁷/cm² avec un certain nombre de variations saisonnières d'une part, (cependant les pics mensuels sont déplacés selon les bassins étudiés), et des variations par niveau d'autre part (les numérations totales des tiges des bassins 3 des cascades d et e sont en moyenne diminuées d'un facteur 10 par rapport aux précédentes). Les pourcentages de bactéries chromogènes se situent aux environs de 30% (soit trois fois moins que dans les eaux) avec cependant des chiffres avoisinant 80 ou 90% particulièrement en août et septembre (ce qui laisserait penser que l'installation de bactéries de l'épuration serait plus lente pour une biomasse fixée que pour des bactéries libres dans l'eau). Les résultats des chlorophylles rapportés dans la figure 10 montrent des variations du même ordre ; les dosages varient selon le lieu ou le mois entre 1 et 100 mg / cm². Une prédominance saisonnière est difficile à faire ressortir. Les valeurs sont généralement très faibles en avril pour les plantes ou tiges récemment mises en place au contraire des plantes de deux ans. Enfin, les



Cascade a

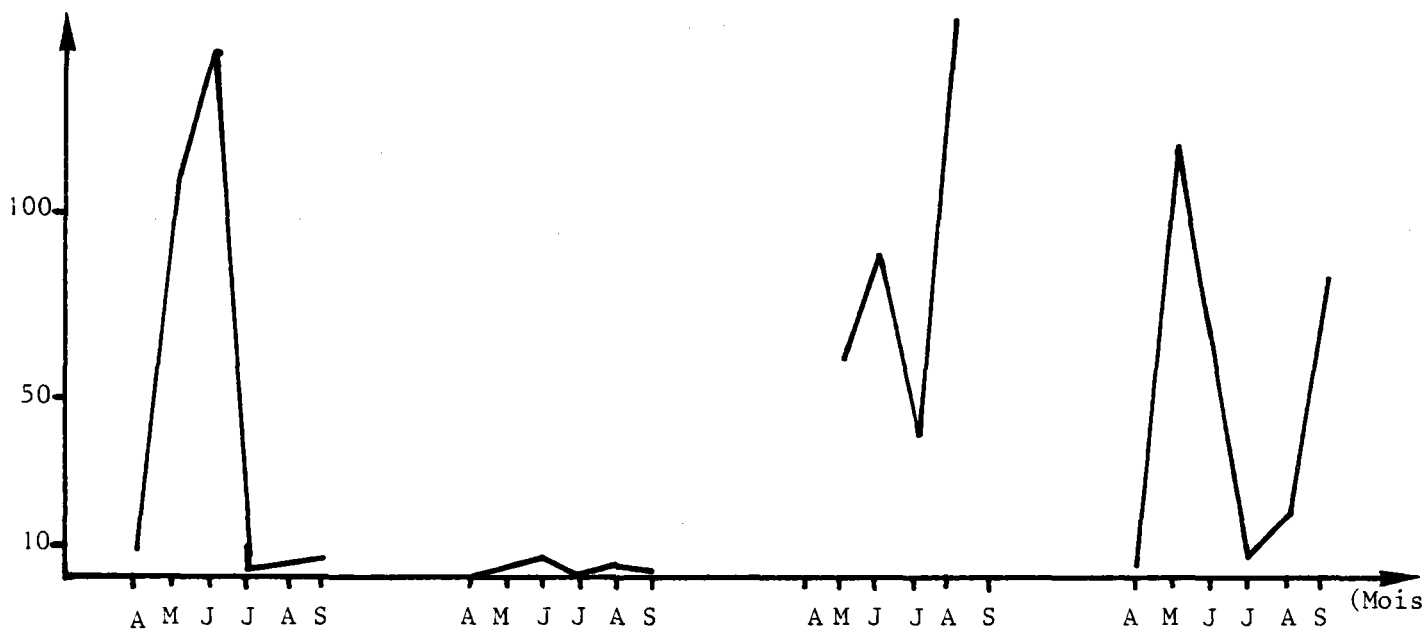
Cascade c

BASSIN 3

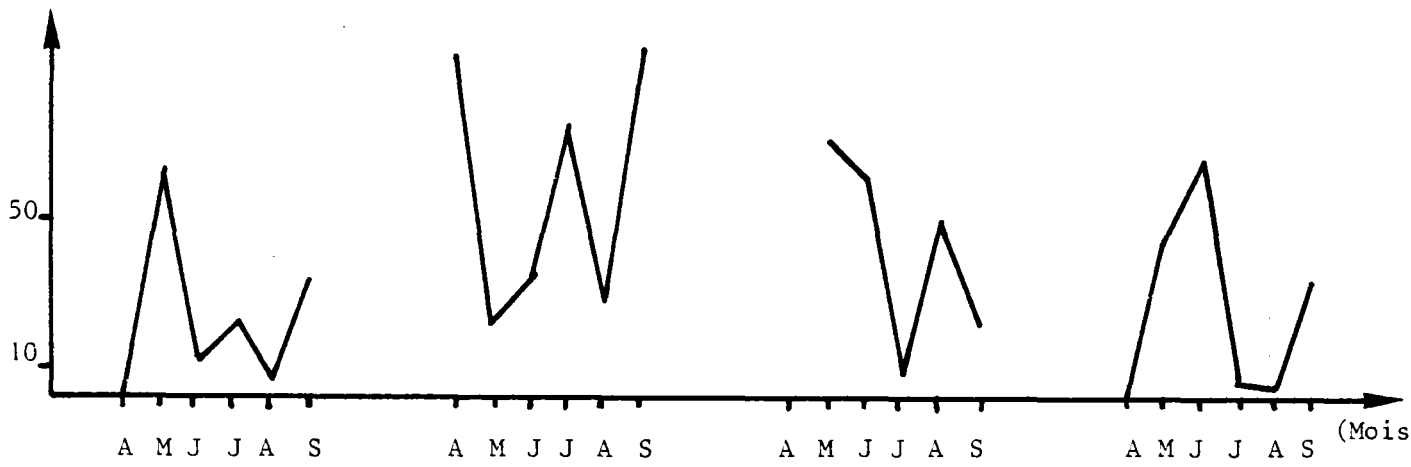
Cascade d

Cascade e

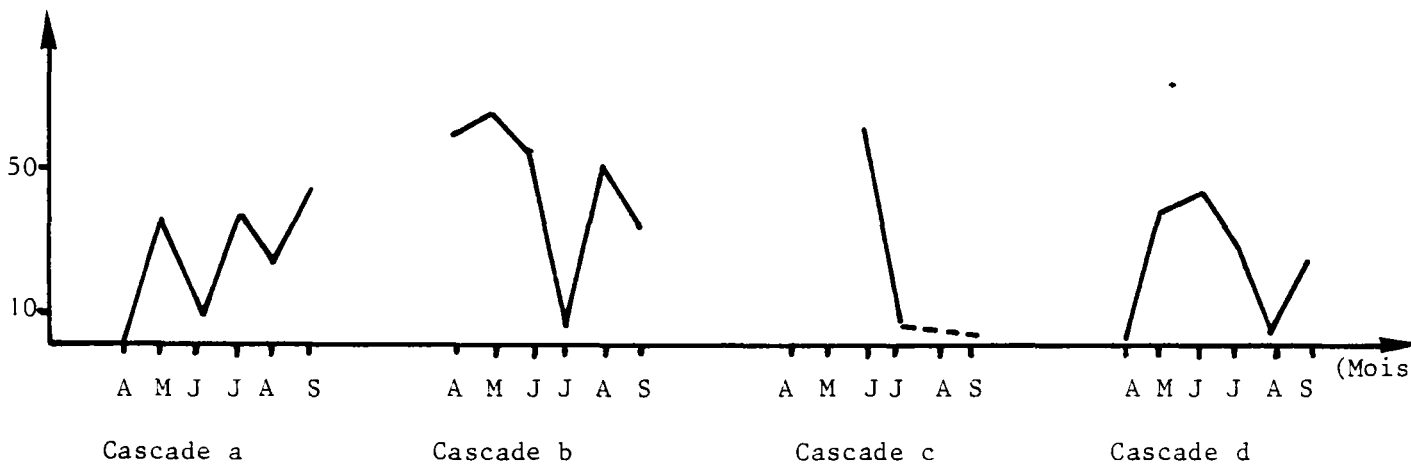
Figure 9 : NUMERATION TOTALE DES GERMES SUR LES TIGES (/CM²)
EN FONCTION DU MOIS



BASSIN 1



BASSIN 2



BASSIN 3







Figure 10 : DOSAGE DES CHLOROPHYLLES SUR LES TIGES (MG/CM²) EN FONCTION DU MOIS

teneurs en chlorophylle des tiges du bassin de la cascade c (plantes de deux ans) sont constamment faibles, dues à la grande densité des végétaux limitant la pénétration de la lumière.

VI - MESURES DE CROISSANCE DES PLANTES

Les mesures de biomasse aérienne ont été réalisées par RADOUX et coll. dans les bassins 1 et 2 par mesure des hauteurs des tiges et extrapolation au poids de biomasse sèche par bassin. Les résultats sont présentés sous forme de graphe (Figure 11). La croissance des *Phragmites* (2^o niveau) est significativement plus lente que celle des *Typha*. Ces derniers ont particulièrement souffert dans le bac 1 de la cascade c et se sont mis à dégénérer à partir de fin juin. Dans tous les cas, la période de fin juin à mi-juillet extrêmement pluvieuse a été défavorable à la croissance qui a stagné (courbe en plateau). Des calculs non rapportés ici n'ont pas permis de mettre en évidence de corrélation entre cette croissance et les variations saisonnières dans l'élimination des polluants de l'eau. Cependant sous nos climats le rendement maximum d'épuration se situe sans doute à la fin de Juin qui correspond à la période maximale des populations de *Typha latifolia* et *Phragmites australis* (mais aussi des activités optimales bactériennes et algales).

* Calculs d'après la méthode Tchèque de Dykyjova D., Ondok J.P., and Priban K. Seasonal changes in productivity and vertical structure of reedstands (*Phragmites communis* Trin.). *Photosynthetica*, 1970, 4, 280-287.

Typha 1er niveau {  a 1 (percolation ; 1e année)
 {  c 1 (percolation , 2e année)
 {  e 1 (translation ; 1e année)
 Phragmites 2ème niveau {  a 2 (percolation ; 1e année)
 {  c 2 (percolation ; 2e année)
 {  e 2 (translation ; 1e année)

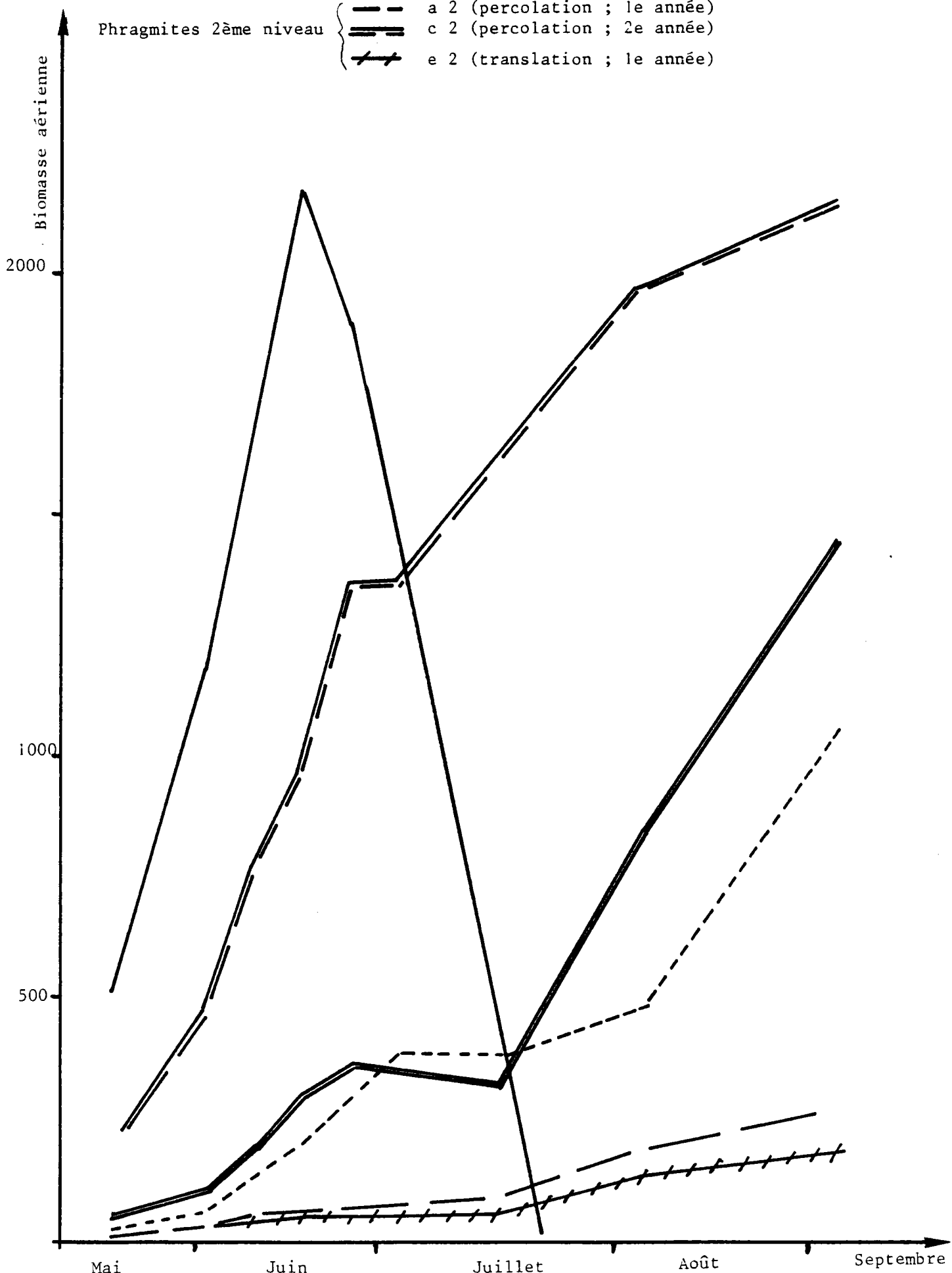


Figure 11 : BIOMASSE AERIEUNE PRODUITE ENTRE MAI ET SEPTEMBRE (EN G DE POIDS SEC PAR BASSIN)

CONCLUSION

Cette étude réalisée d'avril à septembre 1980 a eu pour but de démontrer l'effet des plantes (Typha, Phragmites, Carex ...) sur l'épuration d'eaux usées par lagunage. Cette étude reste particulière à plusieurs égards :

- a - L'année 1980 a été particulièrement pluvieuse en juin et juillet.
- b - Le système étudié est plus proche d'un marais reconstitué que d'une lagune actuelle, et l'eau y circule sous une épaisseur maximum de 10 cm.
- c - Enfin, ces mini-lagunes n'ont reçu qu'une faible charge polluante (environ 60 kg de phosphore total à l'hectare ; environ 180 kg d'azote kjeldhall à l'hectare, ou environ 85 Equivalent-Habitants/hectare pour celles avec circulation en translation, bien qu'elles puissent sans aucun doute accepter beaucoup plus).

Sur les cinq mini-lagunes étudiées (composées chacune de quatre bassins disposés en cascade, et où l'eau circule en deux jours/bassin) deux groupes ont été constitués. L'un (3 cascades) où l'eau coulait sur le sable des bassins (translation) et l'autre (2 cascades) où l'eau circulait en s'infiltrant dans le sable (percolation). Au terme de campagnes mensuelles d'analyses, un certain nombre de conclusions ont pu être dégagées :

- 1 - Pour les cascades où l'eau circule par infiltration dans

le sable (comparaison entre les cascades a et e) la plupart des caractéristiques des eaux de sortie sont améliorées par rétention mécanique des particules dans le sable (matières en suspension, bactéries, algues) ou par rétention des substances liées aux matières en suspension (D.C.O., phosphates).

2 - Le fauchage annuel des plantes apparaît absolument indispensable. Lorsqu'il n'est pas réalisé (cascade c) les substances composant les plantes retournent dans l'eau après pourrissement. Dans cette expérimentation une zone d'anoxie s'est formée (absence d'oxygène dissous, présence d'oxygène des nitrates) avec relargage des phosphates, blocage de la nitrification ... etc ...

3 - Après huit jours de lagunage, l'abattement des polluants calculé sur les concentrations des eaux d'entrée et les concentrations des eaux de sortie est relativement bon. Pour les cascades où l'eau circule en translation, on a pu noter une élimination moyenne de 42 à 61% de la D.C.O., de 67 à 85% des M.E.S, environ 75% des phosphates, environ 98% de l'ammoniaque, environ 85% des nitrates, plus de 99,9% des Escherichia coli (coliformes thermorésistants à 44° C).

4 - Les premiers bassins retiennent en général au moins 50% des charges polluantes (la sédimentation des M.E.S. jouant sans doute un rôle majeur).

5 - La mini-lagune plantée avec des héliophytes d'un an (cascade e) améliore l'épuration des M.E.S. et de la D.C.O. par rapport au témoin (cascade b). Par ailleurs, ces plantes limitent la prolifération des algues par l'ombre qu'elles créent dans les bassins, et diminuent du même coup les quantités de phytoplanctons rejetées avec l'eau sortant de la lagune (au moins trois fois moins que dans la cascade témoin).

6 - L'abattement des germes indicateurs de contamination fécale (Escherichia coli) est spectaculaire (en moyenne 1 log/bassin).

7 - Les bactéries participant à l'épuration ne sont pas celles véhiculées par l'eau usée, mais des bactéries adaptées à cet environnement comme le montre l'inversion complète de la proportion de germes chromogènes.

8 - L'estimation des quantités de phosphore calculée par RADOUX (8) à partir des flux moyens d'entrée et de sortie du 3ème bassin après 135 jours de végétation montre que la cascade témoin b (translation - pas de plantes) retient 57% du phosphore, alors que la cascade plantée e retient 66% du phosphore dont 17% se retrouvent dans les plantes (ils seraient donc éliminables en partie par fauchage).

Dans les mêmes conditions de calcul, il peut être noté que la cascade témoin b retient (ou transforme en N_2 ?) 63% de l'azote Kjeldhall alors que la cascade plantée e retient 85% de cet azote, dont 38% se retrouvent dans les plantes, et peuvent alors être éliminés en partie après fauchage. La production de biomasse aérienne a été estimée par cascade et pour 123 jours de période de végétation à 500 kg par hectare.

9 - Les sédiments et les tiges sont porteurs d'une flore bactérienne et algale importantes, pouvant participer à l'épuration, mais dont les fluctuations quantitatives limitent cependant l'interprétation sinon l'intérêt de leur analyse.

10 - Au contraire, l'analyse enzymologique des sédiments apparaît plus spécifique et apporte une information modulée dans le temps (les activités amylasiques, cellobiasiques et phosphatasiques ayant montré des maximum à des mois différents) ou dans les cascades (activité enzymatique bien corrélée avec la quantité de substances organiques).

En résumé, cette étude confirme en partie l'intérêt des plantes dans l'amélioration de certaines caractéristiques des eaux épurées au cours du lagunage. L'effet mécanique (rétention des matières en suspension et de la matière organique qui y est liée) et l'effet d'ombre (limitant la multiplication algale) sont sans doute les premiers mécanismes à mettre en cause. Cependant cet intérêt n'est réel qu'à condition d'assurer un fauchage régulier des tiges pour exporter les polluants retirés de l'eau pour la croissance de ces plantes. Enfin, nos conclusions nécessitent absolument d'être confirmées en modifiant deux paramètres :

- a - Augmenter la charge polluante dans le système.
- b - Augmenter la profondeur de l'eau d'au moins 50 centimètres.