

Impact du vieillissement d'une installation de traitement des eaux usées par lagunage sur le milieu récepteur

Moulay Abdellah BAHLAOUI¹, Moulay Abdellah FROUJI¹,
Christian DRAKIDES² & Daniel BONDON³

(Reçu le 09/04/1997; Révisé le 02/02/1998 ; Accepté le 08/06/1998)

أثر قدم محطة معالجة المياه المستعملة ببحيرة فوق وسط قابض

يعرض هذا البحث حصيلة من الملاحظات جمعت ما بين سنة 1981 و 1992 بخصوص فيزيوكيميائية البحيرة التقليدية (Mèze). من بين مجموع التحليلات المختلفة البسيطة، لم ندخل سوى التحليل المركب الأساسي كطريقة للتقديم، واستعمل في مجموع الملاحظات المحصل عليها في عين المكان. بين التحليل الزمني لبنية المعطيات، على أن التغييرات الفصلية أهم بكثير من التغييرات السنوية، وأظهر التحليل الدقيق لبنية المعطيات على أن الإستطالة في التصفية النقية للمياه المستعملة بالبحيرة لا يمكن أن يعتبر كنقطة الفرق الحاصل بين عاليه و سافلة البحيرة من التلوث. بصفة خاصة، فإن الفوسفور المداب يكون فائضا عند مخرج الحوض الثالث للبحيرة بالنسبة إلى مدخل بعض المراحل، وترجع هذه الظاهرة لنشاط الفلور البكتيري.

الكلمات المفتاحية : بحيرة - التغييرات الفيزوكيماوية - زمنية البنات - المناخ المتوسطي - التحليل بالمركبات الأساسية - التحليل الثلاثي - ميز - فرنسا

Impact du vieillissement d'une installation de traitement des eaux usées par lagunage sur le milieu récepteur

Le présent article propose une synthèse d'observations recueillies de 1981 à 1992 sur la physico-chimie du lagunage traditionnel de Mèze. Des analyses multivariées simples ne faisant intervenir que l'analyse en composantes principales comme méthode de représentation ont été appliquées à l'ensemble des observations recueillies *in situ*. L'analyse de la structure temporelle des données a montré que la variabilité saisonnière est beaucoup plus importante que la variabilité annuelle. L'analyse fine de la structure spatiale des données a montré que le processus de l'auto-épuration des eaux usées par lagunage ne peut pas être considéré comme un simple gradient amont-aval de pollution. En particulier le phosphore sous forme dissoute est largement excédentaire en sortie du troisième bassin du lagunage par rapport à l'entrée pour certaines périodes, phénomène qui pourrait être dû à l'activité de la flore bactérienne. L'impact du vieillissement de l'installation sur la qualité du rejet a été discuté.

Mots clés : Lagunage - Variables physico-chimiques - Structures spatio-temporelles - Climat méditerranéen - Analyse en composantes principales - Analyse triadique - Mèze - France

The impact of the ageing of the lagoon wastewater treatment

The analysis of the fine structure of the spatial data shows that the process of wastewater purification can not be considered as a simple upstream-downstream gradient of pollution. In fact, interactions between summer (July) and winter (October) pollutions occurs. Especially, the dissolved phosphorus is largely excessive at the outflow of the wastewater treatment lagoon in comparison to the inflow. The impact of the "ageing" of the lagoon wastewater treatment system on the quality of the effluent discharge has been discussed.

Key words : Lagoon system - Physico-chemical variables - Spatio-temporal structures - Mediterranean climate - Principal component analysis - Triadic analysis - Mèze - France

¹Département Génie des Procédés et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques de Mohammedia, BP 146-Mohammedia, Maroc.

²Département ISTEEM. J.E. 499, Génie des procédés-Traitement des eaux., Université Montpellier II, Case courrier 056. Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier Cedex 05, France

³CEREMHER -BP 118- F-34140 Mèze, France

□ Auteur correspondant

INTRODUCTION

Les études menées sur le lagunage de Mèze depuis sa mise en eau en mai 1980 ont eu pour but la définition et l'explication du fonctionnement de cet écosystème à partir de son comportement physico-chimique et/ou bactériologique dans le temps et/ou dans l'espace. À travers une meilleure gestion de ses composantes, l'objectif à terme est la protection du milieu récepteur, l'étang de Thau, source de production aquacole importante dans le littoral languedocien.

Les nombreuses études réalisées sur le lagunage des eaux usées pourraient laisser espérer que ce procédé est maintenant bien connu. Or ce sujet reste encore l'objet de recherches pour tenter d'expliquer les mécanismes sous-jacents. En effet, sous l'apparence de sa simplicité, le lagunage est le résultat d'interactions entre facteurs physiques, chimiques et biologiques qui se conjuguent de façon complexe dans le temps et dans l'espace. Comme la plupart de ces facteurs échappent aux possibilités d'intervention humaine, seules l'observation du comportement des lagunes réalisées et la détermination de leur réaction face à l'évolution d'un ou plusieurs paramètres peuvent fournir des renseignements quant à leur évolution et à leur adaptabilité aux différentes pressions auxquelles elles sont soumises. Ceci ne peut être obtenu qu'au prix d'observations sur de longues périodes. Dans ce contexte, le lagunage de Mèze offre un cadre exceptionnel à l'étude de ces problèmes, en particulier grâce à la masse importante de données recueillies.

Dans cet article, on se propose de faire une synthèse de 12 ans de suivi physico-chimique du lagunage (1981-1992) et de dégager les principales modifications des caractéristiques physico-chimiques et des structures spatio-temporelles des données au cours de l'épuration des eaux usées.

De par leur nature numérique, les données physico-chimiques se prêtent à des études numériques utilisant une métrique simple, euclidienne ou ordinale. La richesse du contenu des tableaux d'analyses physico-chimiques impose un recours aux méthodes d'analyses multidimensionnelles des données, et la disparité des gammes de concentrations, l'utilisation de données centrées et réduites. L'analyse en composantes principales s'est donc révélée une méthode parfaitement adaptée à ce type de données.

MATÉRIELS & MÉTHODES

1. Description du site de l'étude

Le lagunage se situe dans le Centre de Recherches Pluridisciplinaire de Mèze (03° 35' 06" E, 43° 25' 10" N) localisé sur la bordure du bassin de Thau, ouvert sur la méditerranée, dans la région du Languedoc-Roussillon au sud de la France. Il s'agit d'une succession de trois bassins de lagunage recevant les eaux usées de la commune de Mèze. Ces trois bassins sont précédés d'une installation sommaire de dégrillage, dessablage et de déshuilage et représentent une superficie de huit hectares: premier bassin quatre hectares; deuxième et troisième bassin : deux hectares chacun. Dans de tels systèmes, les actions de la photosynthèse algale et de l'oxydation bactérienne se conjuguent pour traiter les eaux usées (Oswald, 1977). La profondeur moyenne d'eau varie de 1,40 m (premier bassin) à 1,10 m (troisième bassin), ce qui permet un écoulement gravitaire des eaux. Les débits d'entrée sont compris entre 1200 m³ par jour en hiver et 2000 m³ par jour en été et le temps de séjour total varie entre 70 jours en période hivernale et 40 jours en période estivale (Baleux & Troussellier, 1983 ; Legendre *et al.*, 1984). Ce lagunage est opérationnel depuis 1980. Les eaux usées épurées en sortie du troisième bassin sont collectées par un petit chenal qui les draine jusqu'à l'étang de Thau au niveau d'un endroit appelé la Conque.

2. Situation des points de prélèvement et fréquence d'échantillonnage

Les quatre stations de prélèvement retenues pour apprécier les évolutions spatio-temporelles des variables physico-chimiques dans le lagunage sont représentées sur la figure 1. Ces stations sont implantées à l'entrée du premier bassin (E1) et en sortie de chacun des bassins S1 (premier bassin), S2 (deuxième bassin) et S3 (troisième bassin). Le choix de ces quatre stations a été largement motivé par les résultats obtenus par Baleux *et al.* (1984) sur ces mêmes bassins.

Les quatre stations sont échantillonnées simultanément tous les mois, de janvier 1981 à janvier 1992 (12 ans de suivi). Les échantillons d'eau (1 par station et par date de prélèvement) ont été collectés dans des flacons de polyéthylène, transportés en glacière à l'abri de la lumière et analysés dans un délai maximum de 3 heures.

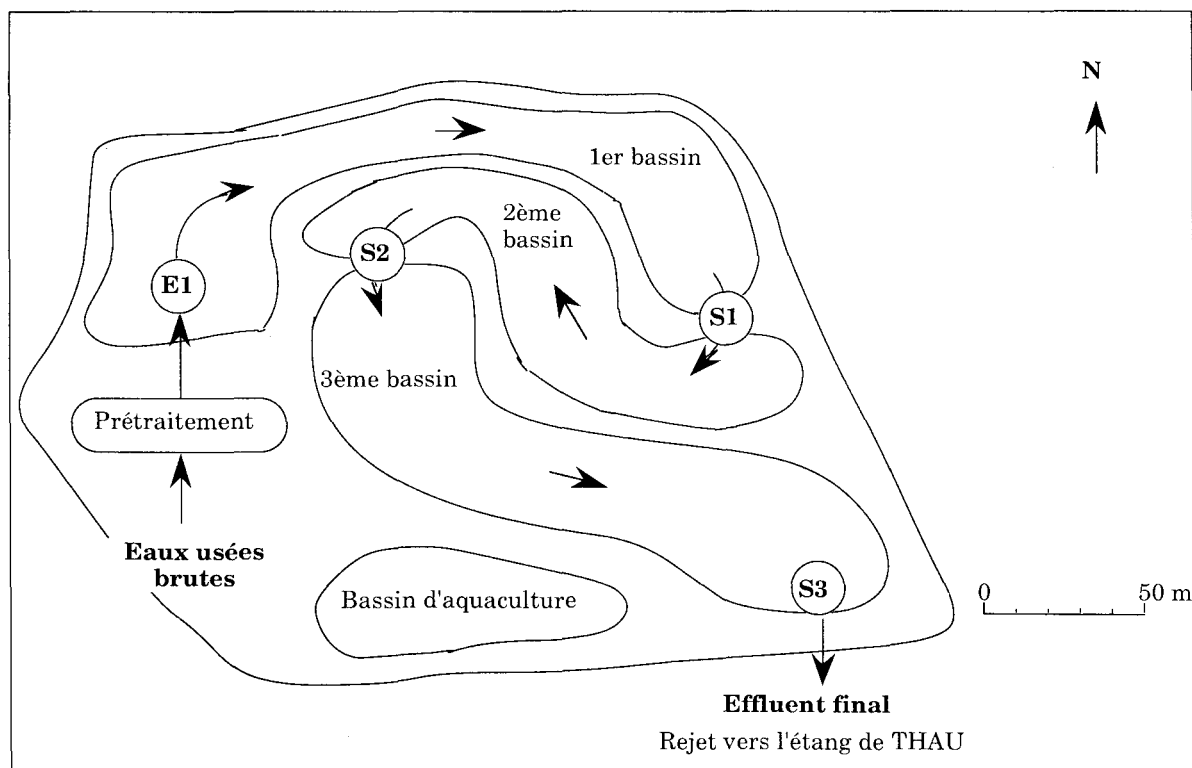


Figure 1. Schéma du lagunage traditionnel de Mèze et situation des stations de prélèvement (E1, S1, S2, S3)

3. Variables physico-chimiques mesurées

La température de l'eau (T_{eau} , °C), le pH et la concentration en oxygène dissous (OD, mg/l) sont mesurées directement dans la colonne d'eau à 20 cm de profondeur à l'aide d'électrodes.

Les données relatives à la température de l'air (T_{air} , °C), à la vitesse du vent (Vent, m/s) et au rayonnement solaire (Ray, $J/cm^2.j$) sont fournies par la station météorologique de Montpellier-Fréjorgues située à une trentaine de kilomètres de la commune de Mèze.

La demande chimique en oxygène (DCO, mg O_2/l) et les concentrations en azote ammoniacal (N- NH_4 , mg/l), en azote nitrique (N- NO_3 , mg/l) et en orthophosphates (P- PO_4 , mg/l) sont déterminées selon les normes expérimentales AFNOR.

4. Méthodes d'analyse des données

• Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (Hotelling, 1933 ; Legendre & Legendre, 1984) a été utilisée dans le but d'établir, d'une part, un bilan de ressemblance entre individus (prélèvements) et, d'autre part, un bilan de liaisons entre variables.

Cette méthode permet de réduire les variables initiales qui consistent en trois paramètres climatiques et sept paramètres physico-chimiques, en un petit nombre de facteurs incorporant l'essentiel de la variabilité présente dans les données initiales.

La discrimination entre les ans a été réalisée par la projection du nuage de points, extrait par l'analyse, sur le plan formé par les deux premiers facteurs de l'analyse (Doledec & Chessel, 1987). La comparaison de la variabilité saisonnière et annuelle a été réalisée par une analyse "inter-classes" proposée par Dolédec & Chessel (1989). La figure 2 donne la méthodologie adoptée. La matrice initiale de données brutes, organisée en douze séries annuelles a été réorganisée de façon à obtenir une matrice représentant les moyennes mensuelles sur les douze ans de suivi (ACP "inter-mensuelle") ou les moyennes annuelles sur les douze mois (ACP "inter-annuelle").

• Analyse triadique (AT)

Il est fréquent que la série de variables écologiques soit répétée dans le temps, conduisant ainsi à l'obtention de tableaux où chaque élément possède trois indices, x_{ijk} représentant la mesure dans la station i ($i = 1, \dots, n$) de la variable j ($j = 1, \dots, p$) à la date

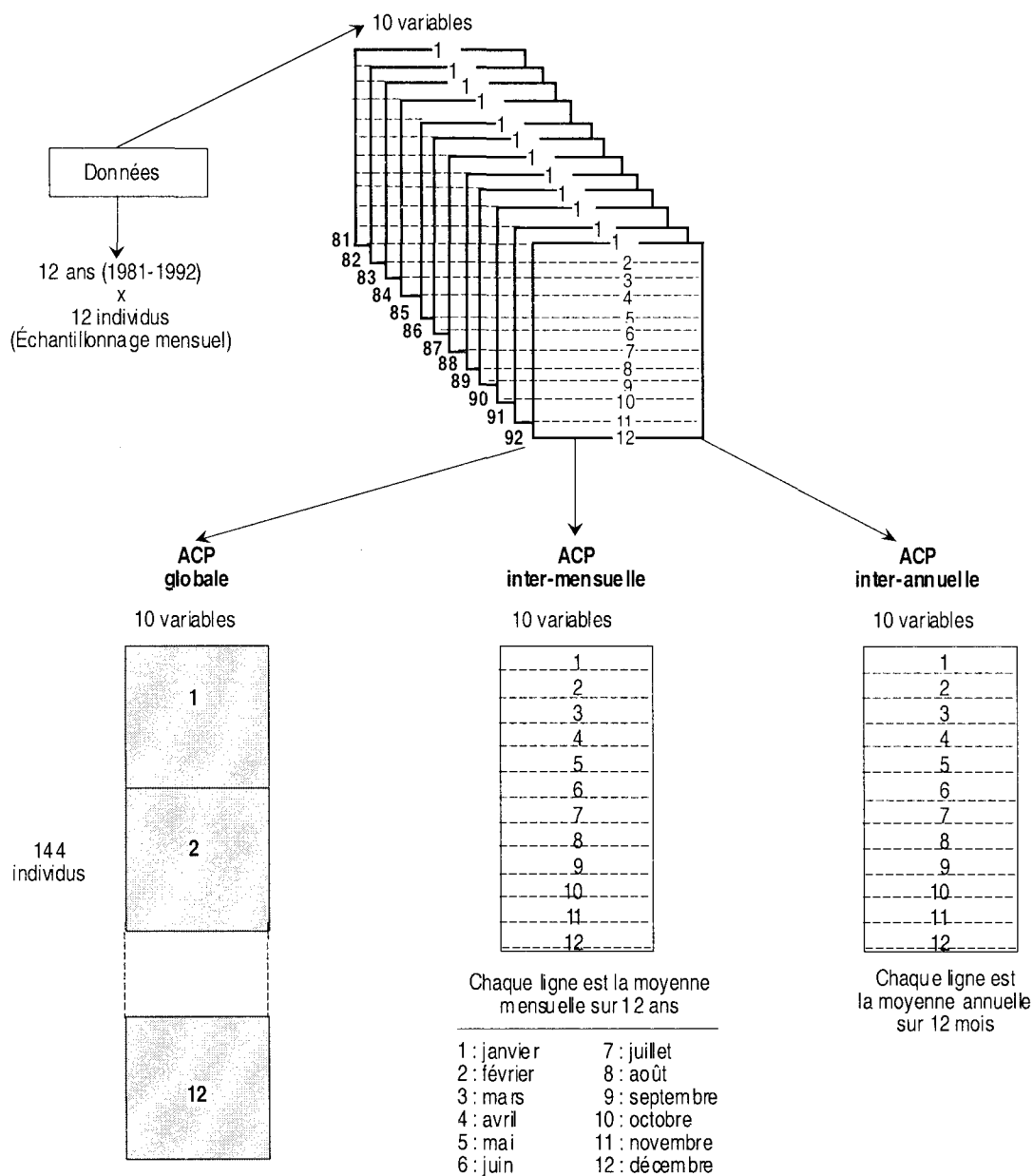


Figure 2. Schéma de l'analyse des données par ACP global et "inter-classes"

k ($k = 1, \dots, t$). L'analyse de tels tableaux soulève alors des problèmes que les méthodes multivariées de base ne permettent pas d'aborder de façon satisfaisante. Pour résoudre ce problème, on a emprunté à Thioulouse & Chessel (1987) une méthode simple basée sur les méthodes d'analyses dites "multitables". Il s'agit de l'analyse triadique (AT). La démarche utilisée permet, par l'intermédiaire d'une procédure de calcul simple ne faisant intervenir que l'analyse en composantes principales, de décomposer l'étude des structures internes des données en trois étapes successives et complémentaires : interstructure, compromis et intrastructure (Thioulouse & Chessel, 1987).

Les analyses multivariées ont été réalisées sur Micro-ordinateur Macintosh IIX à l'aide du logiciel MacMul et GraphMu (Thioulouse, 1989).

RÉSULTATS & DISCUSSION

1. Analyse de la structure temporelle

L'analyse de la structure temporelle des variables physico-chimiques a été réalisée uniquement sur les données recueillies en sortie du troisième bassin (station S3).

L'examen de la matrice de corrélations (Tableau 1) montre que le rayonnement solaire est corrélé avec toutes les variables sauf la DCO. Les corrélations de signe positif indiquent que les concentrations en OD, en sels nutritifs ainsi que le pH augmenteraient en période estivale. La corrélation de signe négatif avec le NH_4 indique que ce dernier augmenterait en période hivernale. On enregistre par ailleurs une bonne corrélation entre le PO_4 et le NO_2 ; ce dernier étant corrélé négativement avec le NH_4 et la DCO. Les variables photo-synthétiques, étroitement liées, jouent un rôle important en sortie du troisième bassin du lagunage.

Les résultats de l'ACP réalisée sur l'ensemble des données recueillies en sortie du troisième bassin du lagunage sont illustrés dans la figure 3.

Le premier axe (37,67 % d'inertie) réunit les variations du rayonnement solaire, de la température de l'air, de la température de l'eau et du pH. Les contributions relatives sont de 76,69%; 70,97%; 75,17% et 27,87% respectivement. Cet axe représente donc les variations du pH induites par l'activité photosynthétique consommatrice de CO_2 (Figure 3a).

L'axe 2 (18,33 % d'inertie) explique les variations de la DCO, d'une part (côté négatif) et celles de l'oxygène dissous (OD) et des orthophosphates (PO_4), d'autre part (côté positif). Les contributions relatives sont de 54,07%; 33,68% et 30,48% respectivement. Cet axe semble donc être un axe de minéralisation. En période estivale, la minéralisation des sels nutritifs par la flore bactérienne active la multiplication du phytoplancton, ceci provoque une diminution de la

DCO dont une partie est aussi utilisée par le phytoplancton comme source carbonée.

Les autres variables sont mal représentées sur ce premier plan factoriel ($F1 \times F2$). C'est le troisième axe (13,53 % d'inertie) qui traduit les variations de NH_4 (côté positif) et de NO_2 (côté négatif). Leur contribution relative sur cet axe est de 50,6 % et 40,6 % respectivement. La meilleure représentation de la vitesse du vent est à chercher au niveau du quatrième axe (9,14 % d'inertie).

La représentation des individus sur le plan formé par les deux premiers axes de l'ACP (56 % d'inertie) (Figure 3b) montre l'opposition des individus se caractérisant par de fortes températures et un pH élevé à ceux caractérisés par des températures et des pH faibles.

• Typologie annuelle

Pour mettre en évidence une dynamique saisonnière dans le fonctionnement physico-chimique en sortie du troisième bassin, une analyse inter-mensuelle et inter-annuelle a été réalisée.

La figure 4a montre que le premier axe (61 % d'inertie) est fortement corrélé d'une part à la vitesse du vent (côté positif) et d'autre part au rayonnement solaire (côté négatif). Cet axe est donc dominé par la climatologie. Le deuxième axe (27 % d'inertie) représente essentiellement les évolutions de la concentration en DCO, c'est donc un axe de pollution. Les autres variables sont parfaitement décrites par l'association des deux premiers axes. À l'évidence, le regroupement inter-mensuel des données améliore la représentation du cycle

Tableau 1. Matrice de corrélations correspondant aux données recueillies pendant 12 ans (1981-1992, 144 individus) en sortie du troisième bassin du lagunage de Mèze

	142 ddl $r_{0,05} = 0,164$									
Ray	1									
Vent	-0,326	1								
Tair	0,828	-0,379	1							
Teau	0,843	-0,389	0,938	1						
OD	0,323	0,043	0,113	0,166	1					
pH	0,463	-0,163	0,337	0,355	0,325	1				
DCO	-0,161	0,003	0,064	-0,027	-0,430	-0,146	1			
NH_4	-0,215	0,043	-0,331	-0,341	-0,261	-0,185	0,126	1		
NO_2	0,306	-0,131	0,320	0,308	0,216	0,140	-0,207	-0,739	1	
PO_4	0,306	-0,118	0,145	0,183	0,349	0,193	-0,507	-0,118	0,287	1
	Ray	Vent	Tair	Teau	OD	pH	DCO	NH_4	NO_2	PO_4

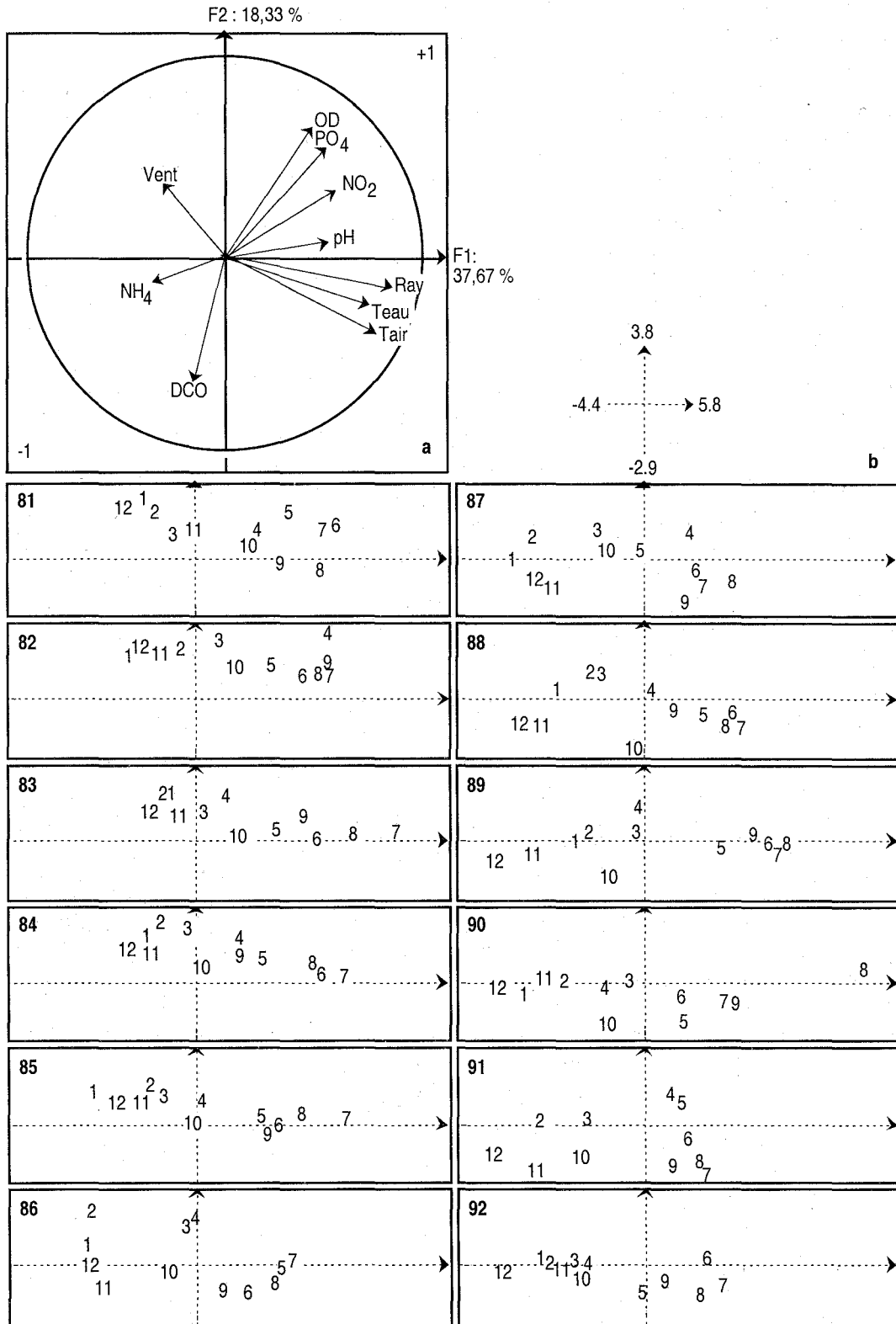


Figure 3. Représentation graphique des variables (a) et des individus (b) sur les deux premiers axes de l'ACP en sortie de lagunage

Ray = rayonnement solaire; Vent = vitesse du vent; Tair = température de l'air; Teau = température de l'eau; OD = oxygène dissous; DCO = demande chimique en oxygène

1 : janvier, 2 : février, 3 : mars, 4 : avril, 5 : mai, 6 : juin, 7 : juillet, 8 : août, 9 : septembre, 10 : octobre, 11 : novembre, 12 : décembre

saisonnier. Par rapport à l'analyse globale, les améliorations constatées portent sur la différenciation de deux phénomènes marqués et indépendants :

- l'un portant sur le métabolisme de l'Azote (les nitrites seuls dosés étant considérés comme un bon indice de l'activité nitrifiante) apparaît ne dépendre que de la température,
- l'autre opposant activité photosynthétique et teneur en phosphates à la DCO brute.

Si le premier phénomène, tout en révélant l'indépendance des phénomènes algaux et bactériens, reste cependant classique, l'interprétation du second est plus délicate (opposition entre deux indices de pollution qui sont la DCO et les phosphates) et nécessite l'étude de la position des individus représentatifs.

La carte factorielle des individus (F1xF2) (Figure 4b) montre en effet que tous les individus ont une

excellente représentation ($\cos^2 q \approx 0,70$). Le cycle saisonnier devient parfaitement visible ainsi que l'opposition des échantillons automnaux (9, 10 et 11, en italique) et printaniers (3, 4 et 5 en gras). L'activité de nitrification oppose simplement les mois froids de janvier, février et mars (1, 2 et 3) aux mois chauds de juillet, août et septembre (7, 8 et 9).

Les mois d'avril, mai et juin (4, 5 et 6) sont caractérisés par de fortes concentrations en oxygène dissous et un pH élevé signes de bonnes conditions de photosynthèse. La DCO, consommée par les bactéries hétérotrophes mais aussi par les algues, est faible ; la teneur élevée en phosphates ne peut s'expliquer que par un relargage à partir des sédiments consécutif à l'augmentation printanière de la température. Les mois d'octobre, novembre et décembre (10, 11 et 12) sont caractérisés par de fortes concentration en DCO et de faibles concentrations en OD et PO_4 . Malgré des

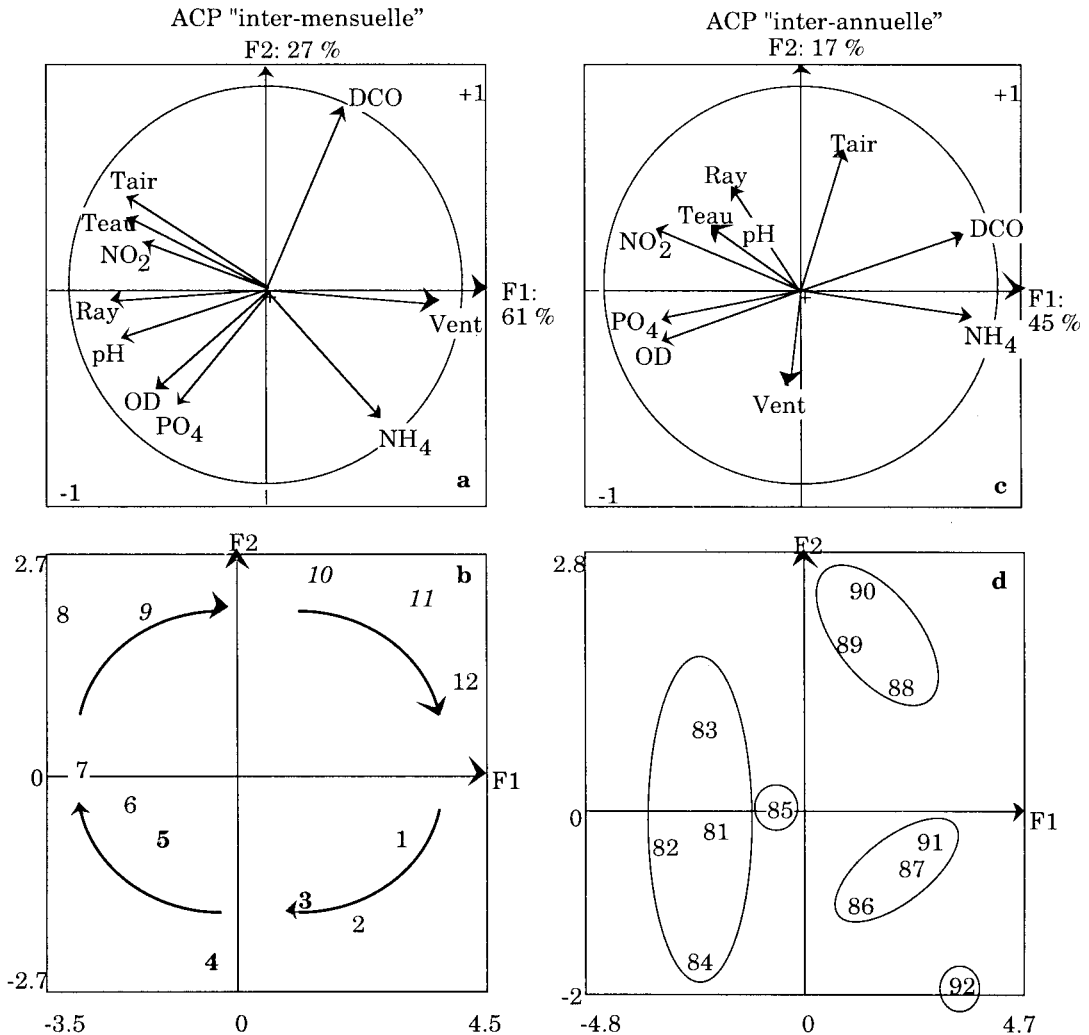


Figure 4. Analyse "inter-mensuelle" et "inter-annuelle". Représentation graphique des variables (a et c) et des individus (b et d) sur les deux premiers axes de l'ACP (voir légende dans la figure 3)

températures encore élevées, l'activité algale est fortement limitée par l'épuisement des phosphates. La baisse du rayonnement n'est pas prépondérante, bien qu'elle aille dans le même sens.

Le fonctionnement du lagunage naturel est fortement influencé par les conditions climatiques. Si le plus mauvais fonctionnement est souvent constaté en période hivernale, la période estivale n'est pas, en revanche, synonyme d'un bon fonctionnement. Les résultats obtenus montrent que le meilleur fonctionnement du lagunage, en termes physico-chimiques, se situe en général au printemps, le mois d'avril étant le mois optimal, alors que le plus mauvais fonctionnement est constaté au mois d'octobre. Cependant, ces paramètres climatiques n'ont de sens que replacés dans un cycle annuel où il apparaît que les phosphates, seuls susceptibles d'un stockage important, ont un rôle limitant.

La discrimination entre les années a été réalisée au moyen d'une ACP inter-annuelle (Figures 4c & 4d). La figure 4c montre que le premier axe (45 % d'inertie) prend en compte, d'une part, les évolutions de la DCO et du NH_4 (côté positif) et d'autre part, celles du NO_2 , du PO_4 et de l'OD (côté négatif). Il s'agit donc d'un axe représentant la charge. Le second axe intéresse la température de l'air (côté positif) et la vitesse du vent (côté négatif), il s'agit donc d'un axe climatique. La représentation des individus sur le plan formé par les deux premiers axes de l'ACP inter-annuelle (62 % d'inertie) (Figure 4d) montre l'opposition sur l'axe 1 des années 1981 à 1985 avec les années 1986 à 1992. L'axe 2 permet de séparer les années 1988-89-90 et l'année 1992 des autres.

Les figures 3b et 4d permettent l'intégration de la variabilité annuelle en quatre types ayant les caractéristiques suivantes :

- Type 1 (1981-82-83-84): années avec de faibles écarts saisonniers de température et de fortes concentrations en phosphates et en nitrites.
- Type 2 (1986-87 et 91): années caractérisées par de fortes concentrations en DCO et NH_4 .
- Type 3 (1988-89 et 90): années toujours "chargées" en DCO, mais moins "chargées" en NH_4 . La température moyenne annuelle est plus forte et favorise l'élimination des NH_4 .
- Type 4 (1992): pour cette année, les concentrations en DCO sont plus faibles par rapport au type 3 mais les concentrations en NH_4 sont plus fortes. L'année 1985, mal représentée sur ce plan, doit

peut-être sa position centrale à ce qu'elle représente une année charnière entre les types 1 et 2.

L'examen des valeurs propres des deux ACP "inter-classes" (données non représentées) montre que la variabilité inter-mensuelle est largement prépondérante par rapport à la variabilité inter-annuelle. Ceci suggère que ce sont les effets saisonniers et leurs pressions multiples et conjuguées qui contrôlent la dynamique de l'écosystème en sortie du troisième bassin du lagunage.

2. Analyse de la structure spatiale

Pour analyser la structure spatiale des données, on a fait appel à l'analyse triadique. La démarche utilisée ici a été empruntée à Thioulouse & Chessel (1987). Cependant seules les analyses de l'interstructure et de l'intrastructure seront développées.

L'étude de la structure temporelle des données a montré que, quelle que soit l'année, le mois d'octobre s'oppose toujours au mois d'avril, et le mois de janvier s'oppose toujours au mois de juillet. Seuls ces quatre mois seront donc retenus ici pour l'étude de la structure spatiale des données. Par ailleurs, parmi les variables physico-chimiques étudiées précédemment, on a retiré le rayonnement solaire, la vitesse du vent et la température de l'air qui présentent les mêmes valeurs pour les mêmes dates à tous les points de prélèvement. Le tableau 2 donne les valeurs moyennes calculées sur 12 ans (1981-1992) pour les sept variables retenues à chaque date et à chaque point de prélèvement. (par exemple la première valeur de 7,58 correspond à la moyenne des valeurs prises par la température de l'eau à l'entrée de tous les mois de janvier de la période 1981-1992.

• Interstructure

Cette analyse consiste à centrer et à réduire les données par variable et par date. On réorganise ensuite les dates et les variables de façon à obtenir un nouveau tableau où les colonnes représentent les quatre dates d'échantillonnage retenues et les lignes les sept variables pour chacun des points de prélèvement. L'ACP (non normée) de ce tableau constitue donc la première étape appelée interstructure. La figure 5 donne le résultat de cette analyse. Le premier axe (79 % d'inertie) prend en compte la structure permanente des données, c'est à dire une pollution maximale au point E1

Tableau 2. Données traitées par l'analyse triadique

Mois	Variables							Point de prélèvement
	Teau	OD	pH	DCO	NH ₄	NO ₂	PO ₄	
Janvier	7,58	0,38	7,73	287,20	35,24	0,03	30,14	Point E1
Avril	14,22	0,47	7,87	292,79	28,57	0,14	29,36	" "
Juillet	23,92	0,78	7,92	362,38	26,89	0,03	18,22	" "
Octobre	16,75	0,27	7,49	402,81	27,02	0,06	19,98	" "
Janvier	7,48	1,00	7,85	261,03	35,16	0,04	29,98	Point S1
Avril	14,34	0,99	8,04	266,00	25,97	0,11	28,57	" "
Juillet	24,08	0,99	8,06	308,69	24,54	0,03	19,63	" "
Octobre	16,54	0,49	7,66	395,98	24,94	0,06	17,70	" "
Janvier	7,30	1,34	7,93	202,81	30,36	0,11	25,05	Point S2
Avril	13,99	1,59	8,00	184,21	23,36	0,19	26,78	" "
Juillet	23,99	3,00	8,29	218,24	23,60	0,19	20,37	" "
Octobre	16,34	0,80	7,84	302,25	21,71	0,11	15,15	" "
Janvier	7,35	2,22	7,95	158,23	28,93	0,19	19,49	Point S3
Avril	14,11	6,49	8,17	127,21	24,42	0,37	25,61	" "
Juillet	24,27	3,86	8,27	158,92	20,24	0,49	22,96	" "
Octobre	16,48	2,16	7,90	231,73	19,12	0,24	16,56	" "

(entrée du premier bassin) qui diminue jusqu'au point S3 (sortie du troisième bassin). C'est donc un axe trivial. Le deuxième axe (16 % d'inertie) rend compte de la spécificité des phénomènes estivaux. La représentation des points de prélèvement pour chaque variable (Figure 5c) permet d'établir une typologie des processus spatio-temporels sous-jacents aux observations. On peut y distinguer trois types de processus différenciés :

- Le premier est celui de la dépollution carbonée, définie ici par la variable DCO et son corollaire, i.e., OD. Le gradient décroissant de pollution du point E1 au point S3 caractérisé par la diminution de la DCO et l'augmentation de l'oxygène dissous est parfaitement représenté par l'axe 1. On peut remarquer que les points E1 et S1 sont très regroupés : l'amélioration de la qualité des effluents n'est sensible qu'à partir du deuxième bassin.
- Le deuxième processus est celui de la dépollution azotée, caractérisé ici par la variable NH₄ et ses corollaires, i.e., pH et NO₂. Ces variables sont également bien représentées sur l'axe 1. Une partie de l'azote peut être éliminée par l'assimilation algale (Drakidès, 1987 ; Picotet *al.*, 1991), l'autre par volatilisation (Shelet *et al.*, 19982 ; Rodriguez *et al.*, 1987). L'augmentation du pH de l'entrée vers la sortie du lagunage déplace l'équilibre NH₃ / NH₄ vers la forme NH₃ qui peut s'échapper dans l'atmosphère par volatilisation. L'apparition de nitrites selon le gradient de dépollution peut être quant à elle interprétée comme un signe de nitrification (forme

intermédiaire), la position écartée du point S3 étant comparable à celle qu'il occupe pour l'oxygène dissous.

- Le troisième processus est celui de l'élimination des phosphates, caractérisé ici par la variable PO₄. Ce processus diffère nettement des précédents par le fait que si l'axe 1 rend toujours compte du processus de dépollution, l'axe 2 souligne les caractéristiques particulières du mois de juillet, qui voit augmenter les concentrations en phosphates des points S2 et S3 par rapport au point S1 (Tableau 2). Ce phénomène est confirmé par le fait que la variable Teau présente un comportement voisin, marquant l'augmentation de température entrée - sortie pour la seule période estivale.

Le processus de l'auto-épuration dans le lagunage ne peut donc pas être considéré comme un simple gradient amont-aval de pollution mais fait intervenir la dynamique propre de l'écosystème, elle-même influencée par les interactions spatio-temporelles entre pollutions estivale et hivernale et l'éloignement des points de prélèvement par rapport à l'arrivée des eaux usées.

• **Intrastructure**

Cette étape d'analyse consiste à représenter simultanément chaque point de prélèvement (station) à toutes les dates et/ou, de façon symétrique, chaque variable à toutes les dates. On se limitera cependant à représenter chaque station à toutes les dates puisqu'on a privilégié l'analyse fine de l'évolution de la typologie des stations plutôt

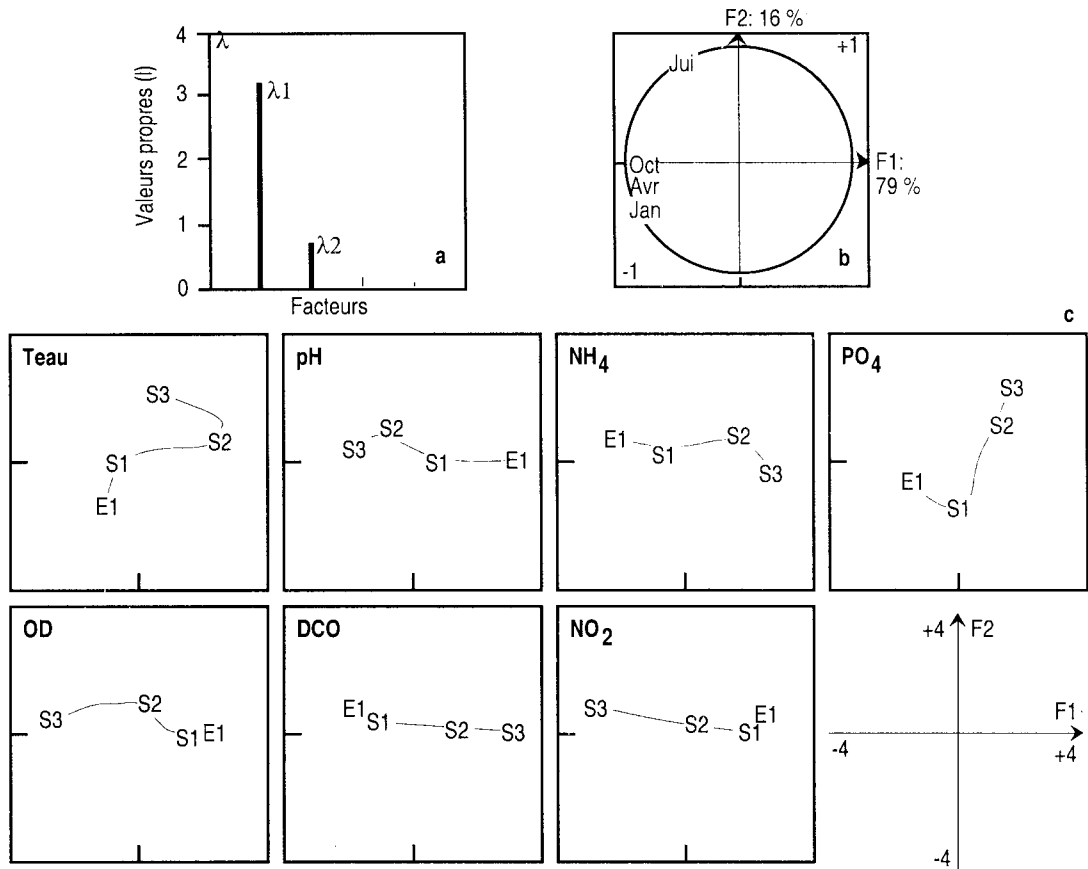


Figure 5. Analyse de l'interstructure

a = répartition de l'inertie entre les axes (graphe des valeurs propres); b = cercle des corrélations; c = plan factoriel des individus F1xF2. Jui: juillet; Oct: octobre; Avr: avril; Jan: janvier

que celle des variables. L'intérêt de l'intrastructure réside, à l'évidence, dans la possibilité d'exprimer à une même échelle les relations inter-stationnelles aux quatre dates précédemment choisies, tout en maximisant l'inertie du nuage global. La figure 6 donne le résultat de cette analyse, qui peut être interprétée de la manière suivante :

- En janvier les stations E1 et S1 sont largement polluées par rapport aux stations S2 et S3. L'amélioration de la qualité de l'effluent semble donc atteinte dès la station S2.
- En avril les stations E1 et S1 sont plus polluées qu'en janvier (du moins en ce qui concerne la DCO). Cependant le processus de l'auto-épuration semble bien fonctionner puisqu'il permet un retour rapide à une situation meilleure qu'en janvier pour S2 et S3 (les stations S2 et S3 sont moins polluées en DCO et en NH₄ en avril qu'en janvier) (Tableau 2).
- En juillet les stations E1 et S1 sont toujours aussi polluées qu'en avril, mais cette pollution a, de plus, nettement atteint la station S2 et même S3. En se reportant au tableau 2 on peut remarquer, en effet, que les stations S2 et S3 sont plus

chargées en DCO en juillet qu'en janvier et avril. Il semblerait que la surcharge en DCO à l'entrée du lagunage en période estivale provoque un dysfonctionnement de l'écosystème et empêche le processus d'auto-épuration de se mettre en place.

- En octobre on observe un retour à la situation du mois de janvier

La typologie fine des processus spatiaux proposée par l'intrastructure met donc en évidence l'impact de la période estivale (juillet) sur la dépollution. Pour les quatre mois précédemment décrits, il existe bien tout le long du lagunage un gradient décroissant de pollution (allant de E1 à S3) sur l'axe 1, mais à ce gradient s'ajoute au mois de juillet un gradient, cette fois-ci croissant, des teneurs en orthophosphates (PO₄) allant de E1 à S3 (Tableau 2) porté par l'axe 2.

CONCLUSION

L'analyse de la structure spatio-temporelle des variables physico-chimiques à travers les différents bassins du lagunage de Mèze on a

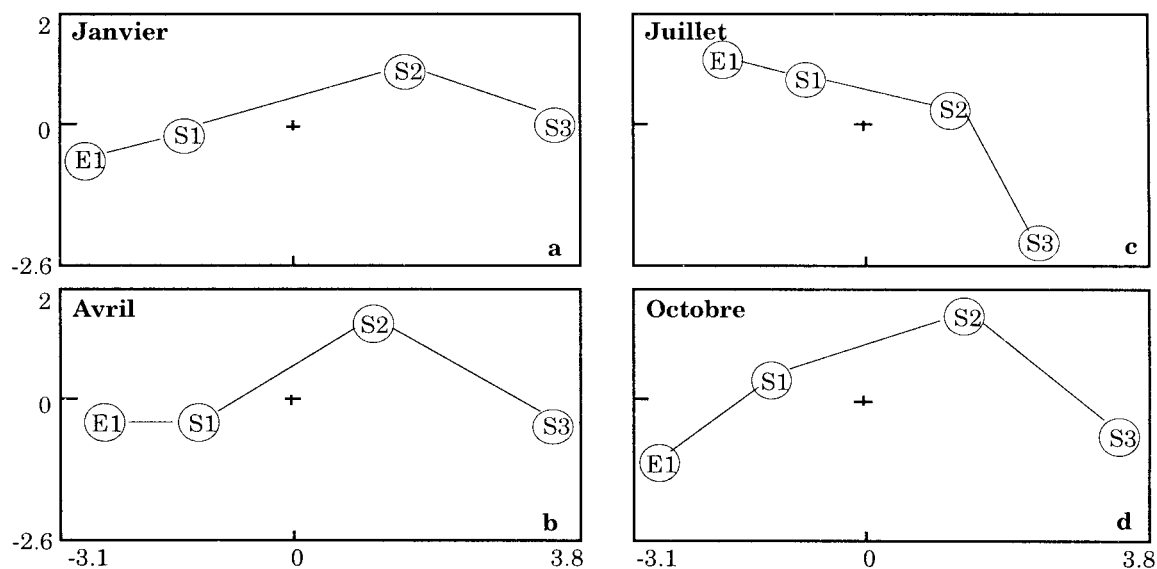


Figure 6. Représentation des quatre points de prélèvement aux quatre dates (intrastructure)

Les points de prélèvement (stations) ont été reliés entre eux afin de souligner les structures inter-stationnelles à chaque date

recueilli des renseignements sur l'évolution de cet écosystème depuis sa mise en eau jusqu'à "l'âge" de 12 ans. L'étude de la structure temporelle des données a confirmé l'existence d'un contrôle saisonnier permanent du fonctionnement de cet écosystème. En effet, 12 ans après sa mise en eau, l'analyse en composantes principales a montré que l'axe 1 est toujours défini par au moins un des paramètres caractérisant la climatologie : rayonnement solaire et/ou température de l'air. Sur ce même axe mais à l'opposé se trouve souvent la vitesse du vent.

Sur le second axe de l'ACP, c'est souvent la DCO, paramètre caractérisant l'intensité de la pollution apportée par les eaux usées qui ressort. À l'opposé de ce second axe ou bien sur le troisième axe se trouvent l'oxygène dissous et/ou le pH dont l'intensité est une caractéristique de l'activité photosynthétique.

Les analyses inter-mensuelles ont montré que c'est par rapport au degré de dépollution des eaux que s'organisent les différents prélèvements et leurs regroupements saisonniers. Cette saisonnalité est, par ailleurs, très nette et bien plus marquée au niveau du troisième bassin.

Les analyses inter-annuelles ont mis en évidence un fonctionnement différentiel très net du lagunage. Schématiquement, on sépare sur l'axe 1 les années 1981 à 1985 plus riches en oxygène dissous et en nitrites (NO_2) et les années 1986 à 1992 plus chargées en NH_4 et en DCO.

L'analyse fine de la structure spatiale des données a montré que le processus de l'auto-épuration des eaux usées par lagunage ne peut pas être considéré comme un simple gradient amont-aval de pollution mais fait intervenir la dynamique propre à l'écosystème, elle-même influencée en retour par les interactions spatio-temporelles entre pollutions estivale et hivernale. En effet, le calcul des rendements épuratoires de l'écosystème en terme physico-chimique (données non reportées ici) a montré une très nette dégradation des capacités épuratoires à partir de l'année 1986. Cette dégradation est principalement attribuée à l'augmentation des charges reçues en tête du système épurateur (479 kg/j en 1981; 942 kg/j en 1992). Si les MES et la DCO sont éliminés en proportions acceptables (64 et 50 % respectivement), les sels nutritifs sont, par contre, faiblement éliminés.

Par ailleurs, le phosphore, en grande partie sous forme dissoute, est largement excédentaire en été en sortie du troisième bassin par rapport à l'entrée. Ces différents résultats montrent que le procédé de traitement des eaux usées par lagunage naturel est un procédé qui vieillit et qui peut, en fonction des objectifs qui lui sont assignés au moment de sa construction et de sa mise en opération, vieillir mal si une surveillance et une gestion optimale des bassins n'est pas mise en place.

Au moment de sa construction (mai 1980), le lagunage de Mèze a été conçu pour recevoir et traiter :

- en période estivale des débits de $2600 \text{ m}^3/\text{j}$ et des

charges de 700 kg DBO₅
- en période hivernale des débits de 1700 m³/j et des
charges de 350 kg DBO₅

L'augmentation des charges en DCO, qui s'élève à 49 % entre 1981 et 1992, est principalement attribuée à l'augmentation des débits d'entrée. Le raccordement récent de la commune de Loupian (2000 éq. habitants) au réseau ne justifie pas à lui seul une telle augmentation du débit. Peut être faut-il y voir là un phénomène d'infiltration des eaux parasites? Mais dans ce cas, les concentrations en DCO d'entrée en 1992 auraient été plus faibles à cause de la dilution par les eaux claires.

Une étude réalisée par Triboulet (1991) sur ces mêmes bassins a montré l'importance du compartiment "sédiment" dans le fonctionnement des bassins. En effet, l'accumulation de solides, qui s'effectue préférentiellement dans la zone d'entrée des eaux brutes, peut affecter les rendements épuratoires de l'écosystème en réduisant son volume et, par conséquent, le temps de séjour hydraulique. L'efficacité du traitement peut être rétabli en procédant à un curage des bassins. C'est ce que le CEREMHER (Centre d'Etudes et de Recherches de Mèze, Hérault) a réalisé durant le mois de mai 1996. L'impact du curage des bassins sur la qualité des eaux de sortie et sur le fonctionnement global du lagunage est en cours d'évaluation. Les premiers résultats indiquent une nette amélioration des performances épuratoires.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien financier du Plan Etat-Région Languedoc-Roussillon.

RÉFÉRENCES CITÉES

- Baleux B. & Troussellier M. (1983) Évolution des bactéries témoins de contamination fécale et de *Pseudomonas aeruginosa* et *Aeromonas hydrophila* dans un ouvrage d'épuration des eaux usées par lagunage (Mèze). *Tech. Sci. Mun.*, 78 (7), 361-370
- Baleux B., Troussellier M. & Sabatier R. (1984) Lagunage de Mèze : évolution de la pollution et optimisation du suivi du fonctionnement. Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Lyon, 148 p
- Dolédéc S. & Chessel D. (1987) Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. I- Description d'un plan d'observation complet par projection de variables. *Acta Œcologica, Œcol. Gener.* 8 (3) : 403-426
- Dolédéc S. & Chessel D. (1989) Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. II- Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Œcologica, Œcol. Gener.* 10 (3) : 207-232
- Drakidès C. (1987) Le lagunage naturel, mécanismes et performances. In Wastewater treatment in waste stabilization ponds and aerated lagoons. P. Vander Borgh & J.L. Vasel (ed.). Proc. Interuniversity Seminar. Arlon, november 16-19, p. 1-24
- Hotelling H. (1933) Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J. Educ. Psychol.* 24: 417-441
- Legendre L. & Legendre P. (1984) Ecologie numérique. Tome 2. La structure des données écologiques. Collection d'Ecologie 13. Masson (éd.), Paris, 254 p
- Legendre P., Baleux B. & Troussellier M. (1984) Dynamics of pollution-indicator and heterotrophic bacteria in sewage treatment lagoons. *Appl. Environ. Microbiol.* 48 (3) : 586-593
- Oswald W.J. (1977) A syllabus on "waste pond fundamentals." Biomedical and Environmental Health Science, School of Public Health, University of California, Berkeley, 247 p
- Picot B., El Halouani H., Casellas C., Moersidick S. & Bontoux J. (1991) Nutrient removal by high rate pond system in a mediterranean climate (France). *Wat. Sci. Tech.* (Kyoto) (23): 1535-1541
- Rodrigues A.M. & Santo oliveira J.F. (1987). Treatment of wastewater from the tomato concentrate industry in high rate algal ponds. *Wat. Sci. Tech.* 19 (12):43-49
- Shelf G., Azov Y. & Moraine R. (1982) Nutrients removal and recovery in a two-stage high rate algal wastewater treatment system. *Wat. Sci. Tech.* (Capetown) (14) : 87-100
- Thioulouse J. (1989) Statistical analysis and graphical display of multivariate data on the Macintosh. Computer applications in the biosciences. *Biosciences* 5 (4): 287-292
- Thioulouse J. & Chessel D. (1987) Les analyses multitableaux en écologie factorielle. I- De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Œcologica, Œcol. Gener.* 8 (4): 463-480
- Triboulet B. (1991) Influence de l'accumulation et de l'évolution des sédiments sur le fonctionnement d'un lagunage naturel. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 295 p.