

Cette communication ne peut être citée sans autorisation de l'auteur.

Conseil International pour
l'Exploration de la Mer

ICES 1989 EMEM/No. 60

MODELISATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE
DANS LE BASSIN CONCHYLICOLE DE MARENNES-OLÉRON (FRANCE)

par

Alain MENESGUEN

IFREMER - Centre de Brest - B.P. 70 - 29263 Plouzané - France

ABSTRACT.

Previous in situ studies, as well as a numerical model of oyster growth clearly demonstrated the major role played by the phytoplanktonic primary production in the global oyster yield in the Marennes-Oléron basin. This phytoplanktonic forage is partially locally produced, and results from nutrient enrichment by the plume of the Charente river. A simple model of the nitrogen cycle without any oyster stock has been coupled with a rough box-model of advection-dispersion. First simulations show a rather weak stimulation of the primary production in the plume itself, due to a high turbidity and a short residence time. During the later southwards drift of the water, the model shows a small nutrient depletion linked to a phytoplankton biomass enhancement. A simulation without any nitrogen load by the Charente river allows a first appraisal of the fertility induced by the river in the southern basin. Next step will be the simulation of the grazing by oyster stocks and the subsequent sustainable yield.

RESUME.

De nombreuses études in situ ainsi qu'un modèle numérique de la croissance des huîtres dans le bassin de Marennes-Oléron ont montré le rôle primordial du flux de matière phytoplanctonique dans le rendement de croissance du stock conchylicole. Une part de cette nourriture planctonique est produite dans le bassin grâce aux apports de sels nutritifs du panache de dilution de la Charente. Un modèle simple du cycle de l'azote sans compartiment huître a été couplé à un modèle d'advection-dispersion en boîtes. Les premiers résultats montrent que la stimulation de la production primaire serait relativement faible dans le panache lui-même, en raison de la forte turbidité et du court temps de résidence. Par contre, au cours de leur dérive ultérieure, les masses d'eau pourraient s'enrichir en phytoplancton par utilisation des sels nutritifs présents. Une simulation où tout apport d'azote minéral par la Charente a été supprimé permet une première estimation du rôle fertilisant de la Charente. L'étape suivante consistera à simuler parallèlement la consommation de phytoplancton par les huîtres et la croissance de ces dernières, dans le but d'estimer le rendement ostréicole optimal de ce bassin.

INTRODUCTION.

L'ostréiculture traditionnelle s'est développée dans des baies côtières naturellement abritées, où le temps de résidence des masses d'eau atteint plusieurs jours. Leur fertilité biologique est naturellement assurée par les apports d'éléments nutritifs d'une ou plusieurs rivières. La capacité biotique de ces milieux a cependant ses limites, et l'augmentation croissante des cheptels en élevage y cause une baisse de la croissance individuelle de l'huître, ce qui entraîne globalement une stagnation de la production ostréicole. Il apparaît donc opportun aujourd'hui de réaliser un modèle quantitatif du phénomène de production ostréicole, dans lequel on réunira les lois régissant les principaux mécanismes aboutissant à la croissance de l'huître. Ce modèle numérique doit d'abord être capable de simuler correctement les faits actuellement observés, mais son principal intérêt pratique sera de fournir ensuite des recommandations visant à optimiser la production ostréicole. Le modèle préliminaire ici présenté s'insère dans l'étude approfondie du premier bassin ostréicole français (Marennes-Oléron, voir figure 1), menée depuis une dizaine d'années par

l'IFREMER. Il ne concerne que le mécanisme de production primaire phytoplanctonique et sera couplé par la suite au modèle de croissance de l'huître déjà mis au point (BACHER, 1989).

MATERIELS ET METHODES.

1. Données utilisées.

En ce qui concerne le déplacement des masses d'eau, le modèle hydrodynamique réalisé en 1979 par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (Anon., 1979) fournit en vives-eaux et en mortes-eaux les courants de marée instantanés toutes les 15 minutes et sur une grille régulière dont la maille fait 600 m de côté. Pour les premiers essais de calibration du modèle de production primaire, ces champs instantanés ont été intégrés au point fixe sur une période de marée, fournissant un champ de courants résiduels eulériens en mortes-eaux et un autre en vives-eaux. Les champs résiduels pour les marées de coefficients intermédiaires sont obtenus par simple interpolation linéaire entre ces deux champs de base (BACHER, 1989). La figure 2 donne le champ résiduel de vives-eaux.

L'évolution saisonnière moyenne des débits journaliers (fig. 3a) ainsi que des concentrations en nitrates (fig. 3b) de la Charente a été calculée à partir de plusieurs années de mesure du SRAE (HERAL, 1989).

Le cycle annuel moyen des nitrates aussi bien que de la chlorophylle a été estimé d'après les mesures de RAVAIL et al. (1988). Le contenu des eaux marines entrant dans le système par sa frontière nord a été estimé par les mesures disponibles en vives-eaux au niveau du Fort Boyard (fig. 4a et 4b). Dans cette région en limite du panache de dilution de la Charente, l'influence de ce dernier est en effet minimisée en vives-eaux.

Le cycle annuel moyen de la salinité a également été mesuré en plusieurs points du bassin par RAVAIL et al. (1988). L'évolution spatio-temporelle de ce traceur permettra ultérieurement de déterminer empiriquement les valeurs à donner aux coefficients de dispersion K_x et K_y (voir tableau I). Les mesures en vives-eaux à Fort Boyard ont là encore fourni la condition de salinité aux limites nord (fig. 4c).

Le cycle annuel moyen de la température de l'eau, mesuré par RAVAIL et al. (1988) a été ici simplement approché par sa première harmonique (fig. 5a), selon l'équation (1) :

$$(Eq. 1) \quad \theta = 14 + 5 \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{365} \cdot (t - 140) \right] \quad t \text{ en jours}$$

L'évolution saisonnière du flux lumineux journalier moyen, dans la bande 400-700 nm (Photosynthetically Active Radiations) a été estimée selon l'algorithme de BROCK (1981) d'après les insolation journalières mesurées à la station météorologique de La Rochelle entre 1964 et 1984 (fig. 5b).

2. Modèle d'advection-dispersion.

Il s'agit d'un classique modèle en boîtes entre lesquelles l'eau circule par advection (ici dûe au courant résiduel) et par dispersion (ici liée essentiellement à l'alternance des courants de marée). Dans chaque boîte peuvent également intervenir une prise d'eau (qui sort du système simulé) et des rejets (qui entrent dans le système simulé). L'évolution purement physique de la concentration X_{ij} de la substance i contenue dans la boîte j sera donc gouvernée par l'équation différentielle (2) :

$$(Eq. 2) \quad \frac{dX_{ij}}{dt} = \sum_{k=1}^R d_{jk} \cdot X_{ijk} - O_j \cdot X_{ij} + \sum_{k=1}^P \lambda \cdot A_{jk} \cdot X_{ik} \\ + \sum_{k=1}^P \mu \cdot A_{jk} \cdot X_{ij} - \sum_{k=1}^P D_{jk} \cdot (X_{ij} - X_{ik})$$

d_{jk} : débit du k -ième rejet dans la boîte j (R rejets dans cette boîte).

X_{ijk} : concentration de la substance i dans le k -ième rejet de la boîte j .

O_j : débit de la prise d'eau dans la boîte j .

A_{jk} : débit advectif de la boîte k vers la boîte j .

$\lambda = 1$ $\mu = 0$ si $A_{jk} > 0$

$\lambda = 0$ $\mu = 1$ si $A_{jk} < 0$

D_{jk} : débit dispersif entre les boîtes j et k .

p : nombre total de boîtes.

La figure 2 montre le découpage du bassin en 13 boîtes allant de la surface au fond. Le calcul des flux advectifs ou des rejets/prises d'eau de mer est effectué automatiquement à partir du champ de courant et la matrice des flux est corrigée automatiquement pour respecter l'équation de continuité pour chaque situation de débit de la Charente.

3. Modèle de production primaire.

L'azote ayant été clairement identifié comme l'élément nutritif limitant pour la production primaire, particulièrement en été (HERAL et al., 1982), seul le cycle de l'azote sera simulé dans ce premier modèle. Le modèle biologique comprendra donc les 4 variables d'état suivantes : azote minéral, chlorophylle a, azote organique détritique dans l'eau, azote organique benthique. Une cinquième variable d'état, la salinité, permettra de calibrer le terme dispersif de l'équation (2).

Les processus biologiques retenus dans ce premier modèle sont très classiques, ainsi que leur formulation mathématique :

- effet exponentiel de la température sur les vitesses de processus (loi d'Arrhénius)
 - effet de type Steele du flux lumineux
 - effet michaelien de l'azote minéral dissous
 - loi du 1er ordre pour la reminéralisation de la matière organique détritique.
- } sur la croissance
} du phytoplancton.

Le taux de mortalité du phytoplancton est censé englober la mortalité naturelle ainsi que le broutage par le zooplancton, mais ne tient pas compte de la consommation par les bivalves. La simulation ici présentée représente donc une situation théorique en l'absence de conchyliculture, et n'est donc pas directement comparable aux données observées. Le taux de mortalité du phytoplancton a été asservi au degré de limitation de croissance rencontré par le phytoplancton. Les équations (3) à (5) gouvernent donc la part non advective ou dispersive de l'évolution des variables pélagiques, et l'équation (6) donne l'évolution de la variable benthique. Les valeurs numériques utilisées pour les paramètres de ces équations sont fournies dans le tableau I.

Azote minéral :

$$(Eq. 3) \quad dX_1/dt = -\mu \cdot \beta \cdot X_2 + r_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta) \cdot X_3$$

Chlorophylle :

$$(Eq. 4) \quad dX_2/dt = (\mu - m) \cdot X_2$$

Azote organique détritique dans l'eau :

$$(Eq. 5) \quad dX_3/dt = m \cdot \beta \cdot X_2 + \rho \cdot X_4 - (v/h + r_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta)) \cdot X_3$$

Azote organique benthique :

$$(Eq. 6) \quad dX_4/dt = v/h \cdot X_3 - \rho \cdot X_4$$

avec :

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \theta) \cdot \text{Min}(I_{lim}, N_{lim})$$

$$N_{lim} = X_1 / (K_N + X_1)$$

$$I_{lim} = \frac{1}{h} \cdot \int_0^h \int_0^{24} (I_{z,t}/I_{opt}) \cdot \exp(1 - I_{z,t}/I_{opt}) \cdot dt \cdot dz$$

$$I_{z,t} = I_{0,t} \cdot \exp(-kz)$$

$$m = m_{inf} \cdot \text{Min}(N_{lim}, I_{lim}) + m_{sup} \cdot (1 - \text{Min}(N_{lim}, I_{lim}))$$

RESULTATS.

1. Simulation nominale.

La figure 6 montre la comparaison du modèle avec les mesures en deux points : Fort Boyard (situé en boîte 7) et Le Chapus (situé en boîte 13). Ces premiers résultats obtenus sans calibration particulière des paramètres montrent qu'à partir de conditions aux limites ne possédant pas de cycle vives-eaux/mortes-eaux, le modèle génère des signaux ayant bien cette composante périodique dans le bassin, mais de manière amortie par rapport à la réalité. Pour chaque variable, les oscillations induites par les différences de mélange en mortes-eaux et en vives-eaux ne sont réellement sensibles que lorsqu'il se passe une modification significative de la dite variable à l'intérieur du bassin. Ainsi la salinité oscille-t-elle en période de crues de la Charente, tandis que la chlorophylle n'oscille qu'au printemps et en été, quand il en est produit dans le bassin.

La rapidité du transit entre la limite-nord de la boîte 2 et la boîte 7, ainsi que la faible influence du panache de la Charente font qu'on

retrouve, peu altérées à Fort Boyard, les conditions aux limites nord. Par contre, au sud du bassin, le modèle sans huîtres prévoit une concentration printanière et surtout estivale en chlorophylle nettement plus élevée qu'en réalité. Le modèle en son état actuel produit donc de la biomasse phytoplanctonique au cours du transit nord-sud, mais sans épuiser pour cela les nitrates. Le fait qu'au Chapus la salinité simulée soit toujours trop basse par rapport à la réalité prouve cependant que des processus physiques sont soit ignorés (la remontée d'eaux salées par le pertuis de Maumusson) soit mal modélisés (les débits de la Charente pourraient avoir été surestimés par exemple). La seule correction future de ce biais pourra également entraîner des modifications notables sur les variables biologiques au sud du bassin, ce qui interdit pour l'instant de conclure.

2. Simulation avec suppression de tout apport azoté par la Charente.

La figure 7 montre que si l'on supprime durant toute l'année tout apport de nitrate par la Charente, l'effet perçu est faible à Fort Boyard, car la boîte 7 est essentiellement sous contrôle de la limite marine du nord. Par contre, au Chapus, les nitrates simulés sont constamment moins abondants qu'en situation nominale, alors que le phytoplancton ne semble guère souffrir de cette baisse des nitrates, sauf légèrement en été. Ceci s'explique par la valeur de la constante de Michaelis prise en moyenne pour des diatomées, qui se trouve être faible par rapport aux concentrations atteintes dans l'eau, sauf en été.

3. Simulation avec suppression de tout apport azoté par la mer.

La figure 8 montre que dans la situation symétrique au cas précédent, les réponses sont très différentes en ce qui concerne les nitrates, alors que la chlorophylle se maintient presque au niveau de la situation nominale. Alors qu'au nord du bassin (Fort Boyard), les nitrates issus de la Charente ne constituent que le quart du stock réellement présent, ils suffisent à rendre compte des concentrations observées au sud (Le Chapus), et donc à assurer l'essentiel de la production phytoplanctonique actuelle, y compris en été où l'on n'observe plus la légère diminution causée précédemment par la suppression des apports de la Charente.

DISCUSSION.

Les résultats présentés ici ne correspondent qu'à la phase de définition d'un type de modèle possible pour l'étude de la production biologique dans le bassin de Marennes-Oléron. L'absence de calibration sur les simples processus physiques à partir des simulations de la salinité interdit a fortiori à l'heure actuelle de pouvoir discuter correctement la validité des formulations retenues pour les processus biologiques. Les premières simulations semblent cependant s'accorder avec les connaissances sur l'origine des masses d'eau dans le bassin de Marennes-Oléron (DECHAMBENOY et al., 1977), montrant nettement l'influence dominante des apports par le pertuis d'Antioche, surtout en automne et hiver, où le panache de la Gironde rentre dans le bassin par le nord après avoir longé la côte ouest de l'île d'Oléron. Le modèle semble d'ores et déjà s'accorder également avec l'idée généralement admise que les apports de sels nutritifs par la Charente seraient surtout "utiles" au bassin pendant l'été (RAVAIL et al., 1988). Mais la prise en compte par le modèle des aspects dynamiques du mélange des eaux de la Charente semble toutefois réduire à peu de chose ce rôle fertilisant estival de la Charente. **Les fortes turbidités et le faible temps de résidence sont les principaux facteurs limitants de la production primaire (HERAL, 1989), et ne permettent pas la pleine utilisation du supplément d'azote apporté en été par la Charente.** Par contre, le rôle de la Charente comme vecteur de phytoplancton d'eau douce a ici été complètement ignoré : le rôle de la Charente en été sera plus exactement cerné par la simulation du devenir de cet apport direct, mis en évidence dans les mesures (RAVAIL et al., 1988).

CONCLUSION.

La productivité conchylicole d'un bassin côtier est directement liée à ses potentialités de production primaire et aux apports de matières organiques qu'il reçoit. L'aspect dynamique du phénomène de production primaire in situ rend quasi-indispensable l'utilisation d'un modèle numérique intégrant les processus d'advection-dispersion et les processus biologiques. Le rôle crucial du temps de résidence des eaux dans telle zone d'enrichissement en sels nutritifs apparaît alors clairement : il s'agit de l'homologue in situ du temps d'éluviation bien connu pour les chémostats des physiologistes. De ce temps de résidence, ainsi que de la turbidité,

dépendra essentiellement l'utilisation qui sera faite des apports de sels nutritifs issus des rivières (ou des eaux marines du large). Les premiers résultats du modèle présenté indiqueraient ainsi, sous réserve d'être dûment validés, une sous-utilisation des apports actuels de nitrates par la Charente dans le bassin de Marennes-Oléron.

Remerciements.

Je remercie Brigitte RAVAIL, du CREMA-L'Houmeau et l'équipe de Maurice HERAL au laboratoire IFREMER-La Tremblade, qui ont bien voulu communiquer leurs données ainsi que leur connaissance du bassin de Marennes Oléron ; je remercie également Olivier RAILLARD (boursier IFREMER) pour son aide au traitement informatique des données.

BIBLIOGRAPHIE.

Anon., 1979.

Dispersion de la pollution dans les pertuis charentais. Rapport technique général. Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 79 p.

BACHER C., 1989.

Etude de la capacité trophique du bassin de Marennes-Oléron : utilisation d'un modèle couplé de transport particulaire et de croissance de l'huître Crassostrea gigas. Thèse d'Océanographie, Université de Bretagne Occidentale, 146 p.

BROCK T.D., 1981.

Calculating solar radiation for ecological studies. Ecol. Modell. 14, 1-19.

DECHAMBENOY C., PONTIER L., SIROU F. et J. VOUVE, 1977.

Apport de la thermographie infrarouge aéroportée à la connaissance de la dynamique superficielle des estuaires (système Charente - Seudre - Anse de l'Aiguillon). C.R. Acad. Sci. Paris, 284, 1269-1272.

HERAL M. (ed.), 1989.

Modélisation des écosystèmes conchylicoles : bassin de Marennes-Oléron
Rapport de fin du contrat M.E.R.S. 86-JOOJ1, IFREMER/CNRS, 186 p.

HERAL M., RAZET D., DESLOUS-PAOLI J.M., BERTHOME J.P. et J. GARNIER, 1982.

Caractéristiques saisonnières de l'hydrobiologie du complexe estuarien de Marennes-Oléron (France). Rev. Trav. Inst. Pêches marit. 46 (2), 97-119.

RAVAIL B., HERAL M. et S. MAESTRINI, 1988.

Incidence du débit de la Charente sur la capacité biotique du bassin ostréicole de Marennes-Oléron. Rapport intermédiaire du contrat M.E.R.S. 86-JOOJ1, IFREMER/CNRS, 41 p.

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Taux max. de croissance à 0°C	μ_0	j^{-1}	0.5
Taux d'accélération thermique	α	degré C ⁻¹	0.07
Rapport azote/chlorophylle	β	$\mu\text{mole N.}\mu\text{g Chla}^{-1}$	0.7
Constante de Michaelis	K_N	$\mu\text{mole N.l}^{-1}$	1
Flux lumineux optimal	I_{opt}	$W . m^{-2}$	100
Taux de mortalité minimum	m_{inf}	j^{-1}	0.01
Taux de mortalité maximum	m_{sup}	j^{-1}	0.05
Vitesse de sédimentation	v	$m . j^{-1}$	1.5
Taux de remise en suspension	ρ	j^{-1}	0.2
Taux de reminéralisation à 0°C	r_0	j^{-1}	0.018
Coefficients de dispersion :			
. dans le sens du courant	K_x	$m^2 . s^{-1}$	50
. perpendiculairement au courant	K_y	$m^2 . s^{-1}$	5
Coefficients d'extinction :	k	m^{-1}	
. boîtes 1 à 3			.5
. boîte 7			.7
. boîtes 8, 9, 10 & 13			1.0
. boîte 6			1.3
. boîtes 4, 11 & 12			1.5
. boîte 5			2.5

Tableau I : Valeurs des paramètres.

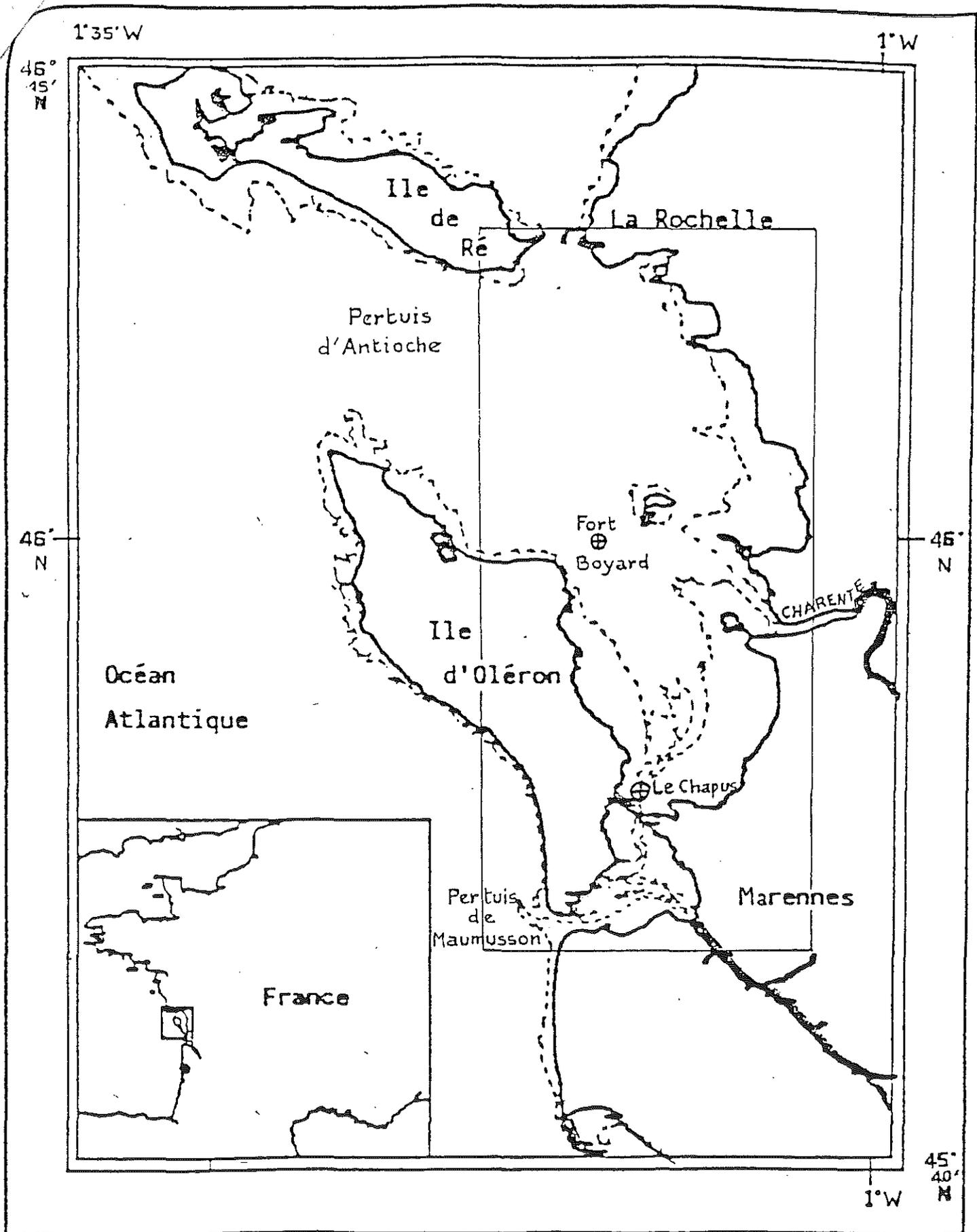
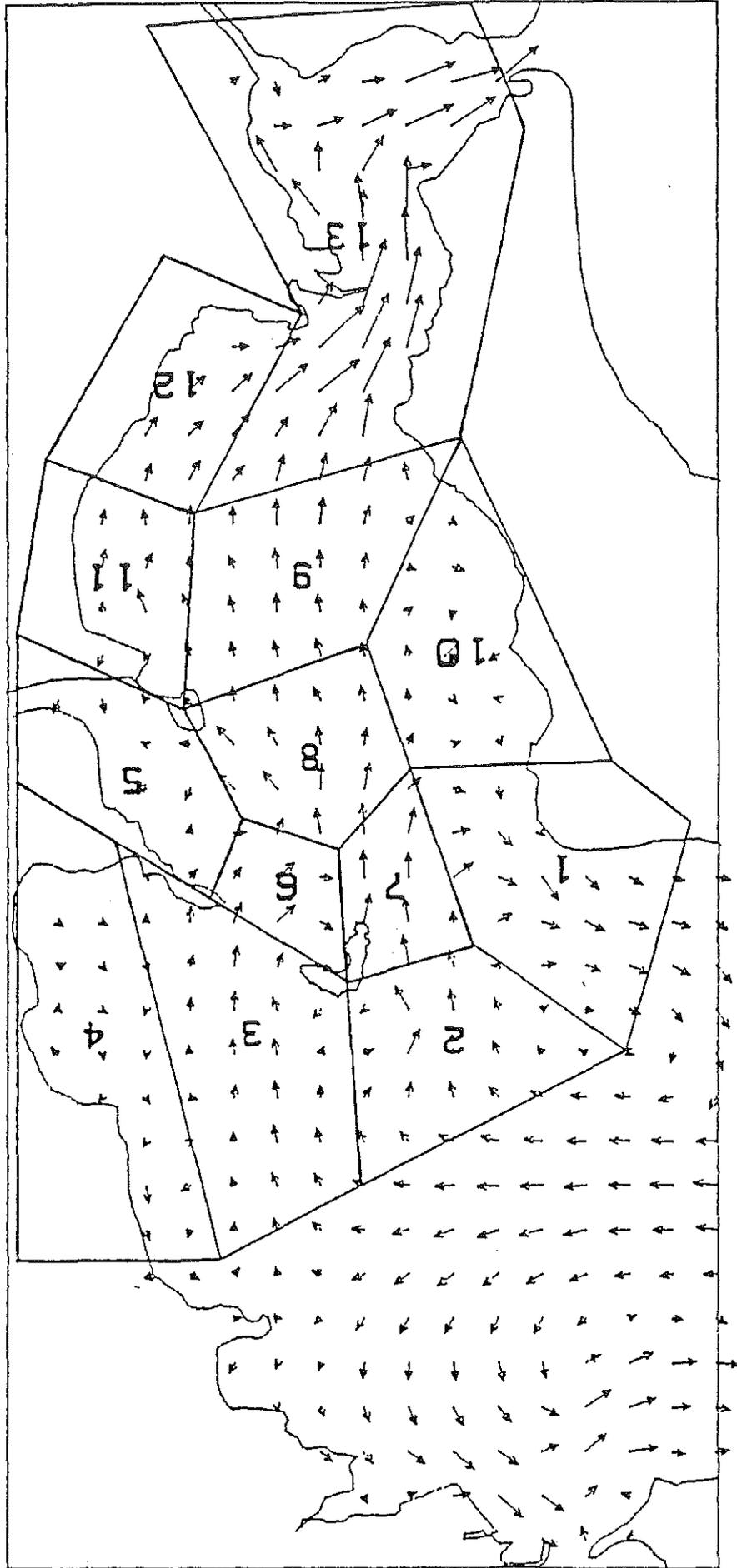


Figure 1 : Localisation du bassin de Marennes-Oléron.

Figure 2 : Implantation du système de boîtes et champ de courants résiduels



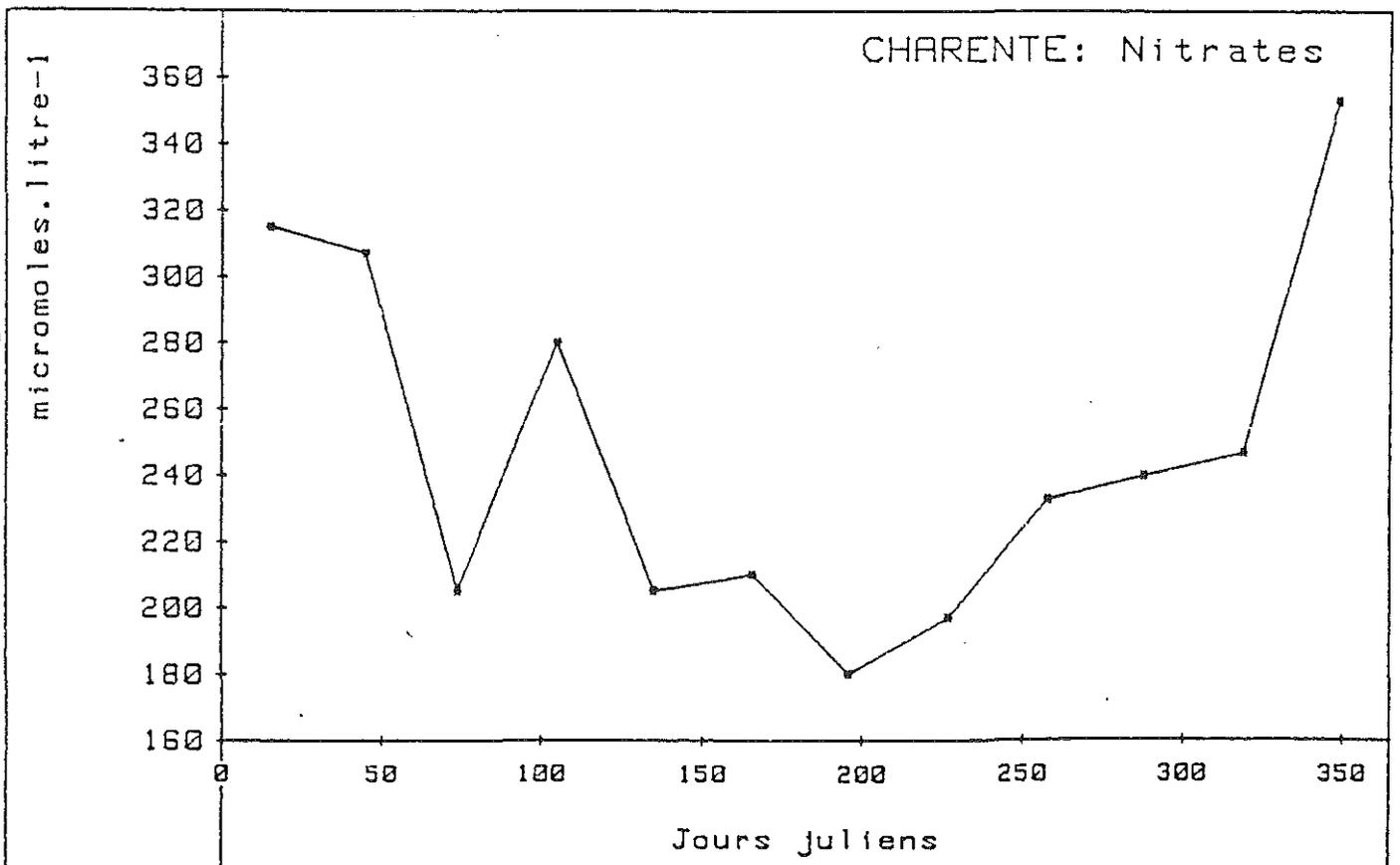
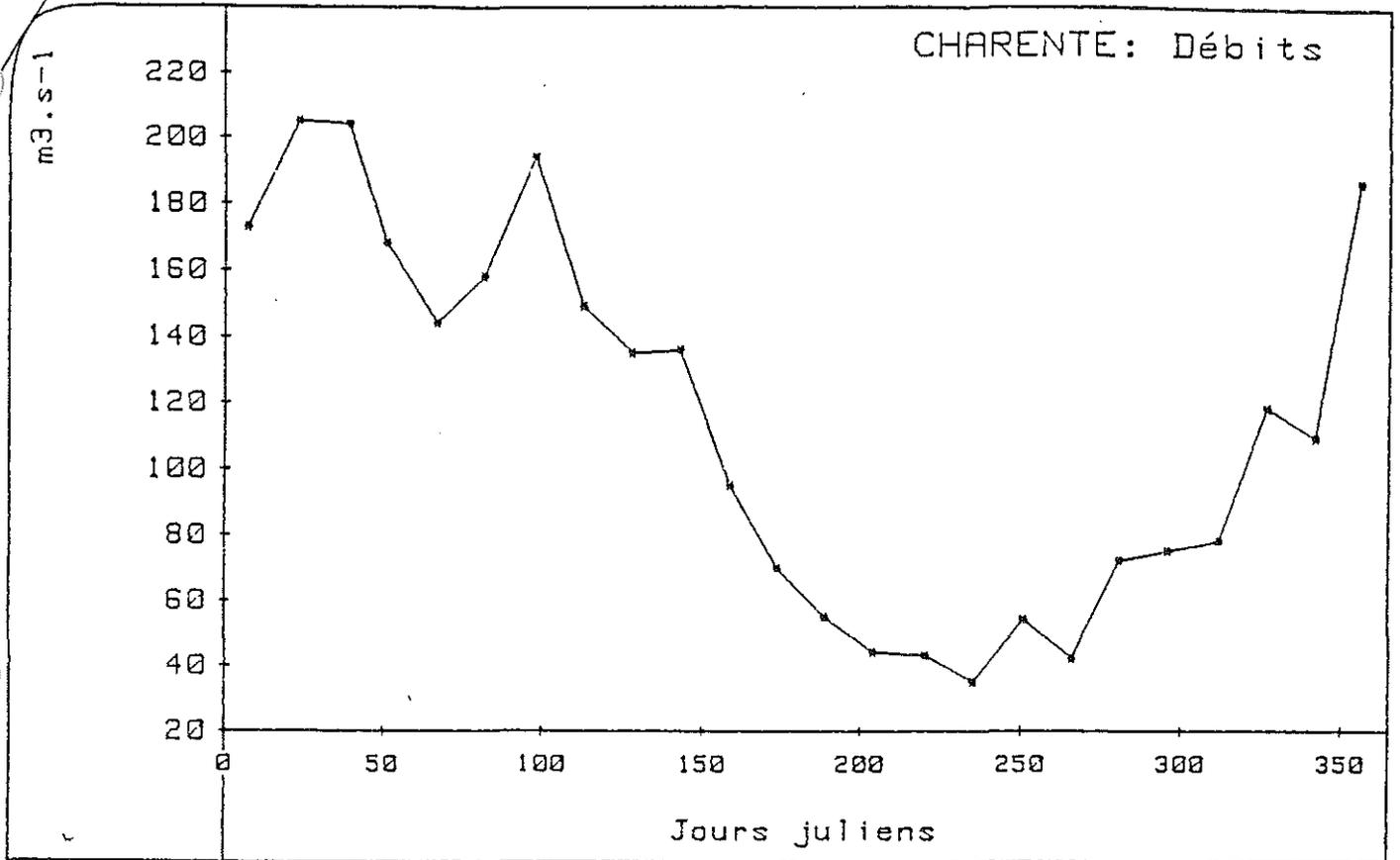


Figure 3 : Conditions à la limite "Charente".
 3.a : débits journaliers (moyennes bi-hebdomadaires).
 3.b : concentrations en nitrates (moyennes mensuelles).

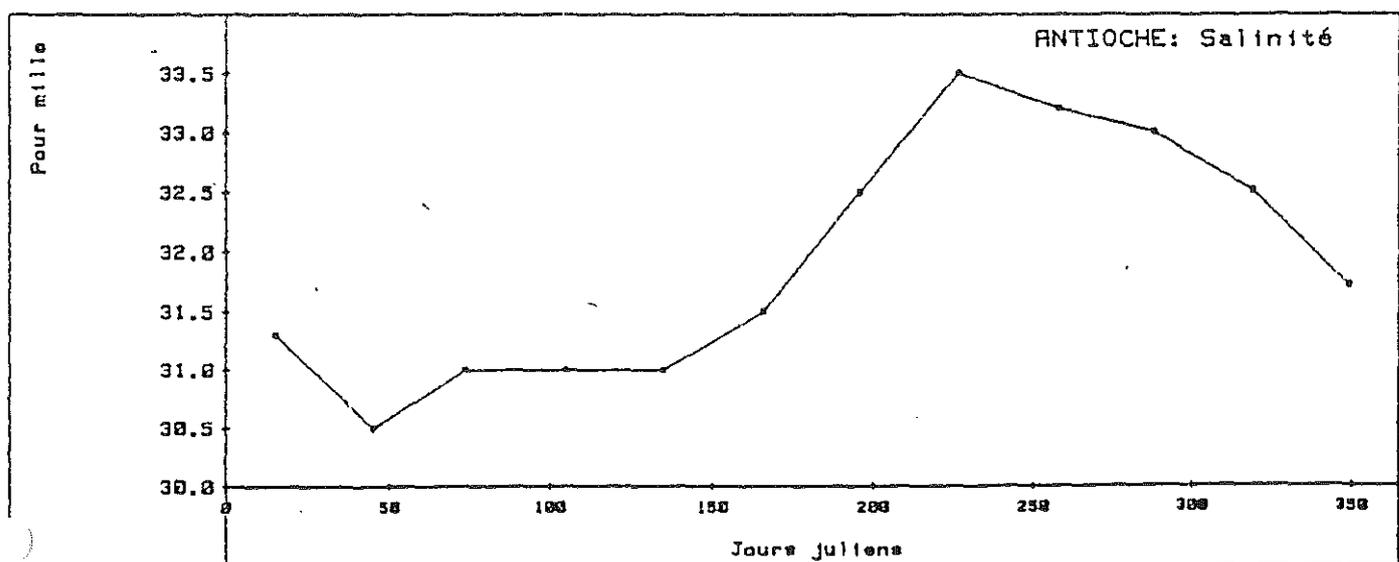
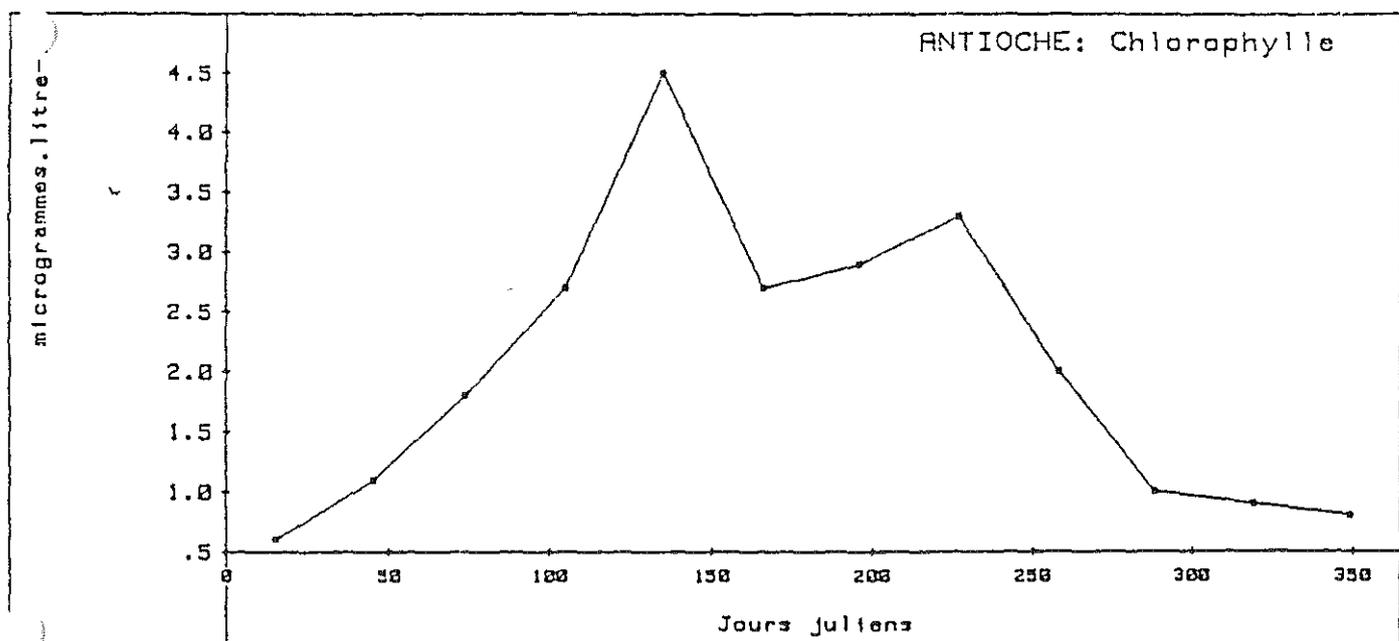
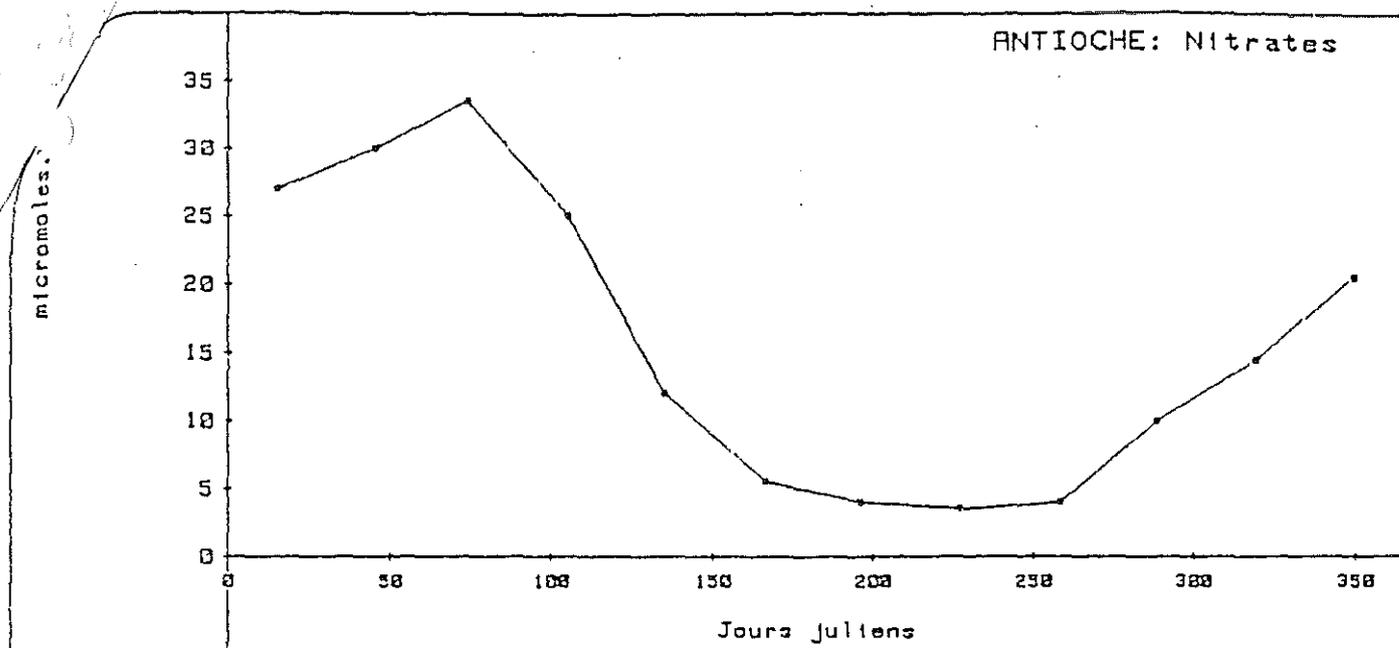


Figure 4 : Conditions à la limite maritime nord (Pertuis d'Antioche).
 4.a : concentrations en nitrates (moyennes mensuelles).
 4.b : concentrations en chlorophylle (moyennes mensuelles).
 4.c : salinité (moyennes mensuelles).

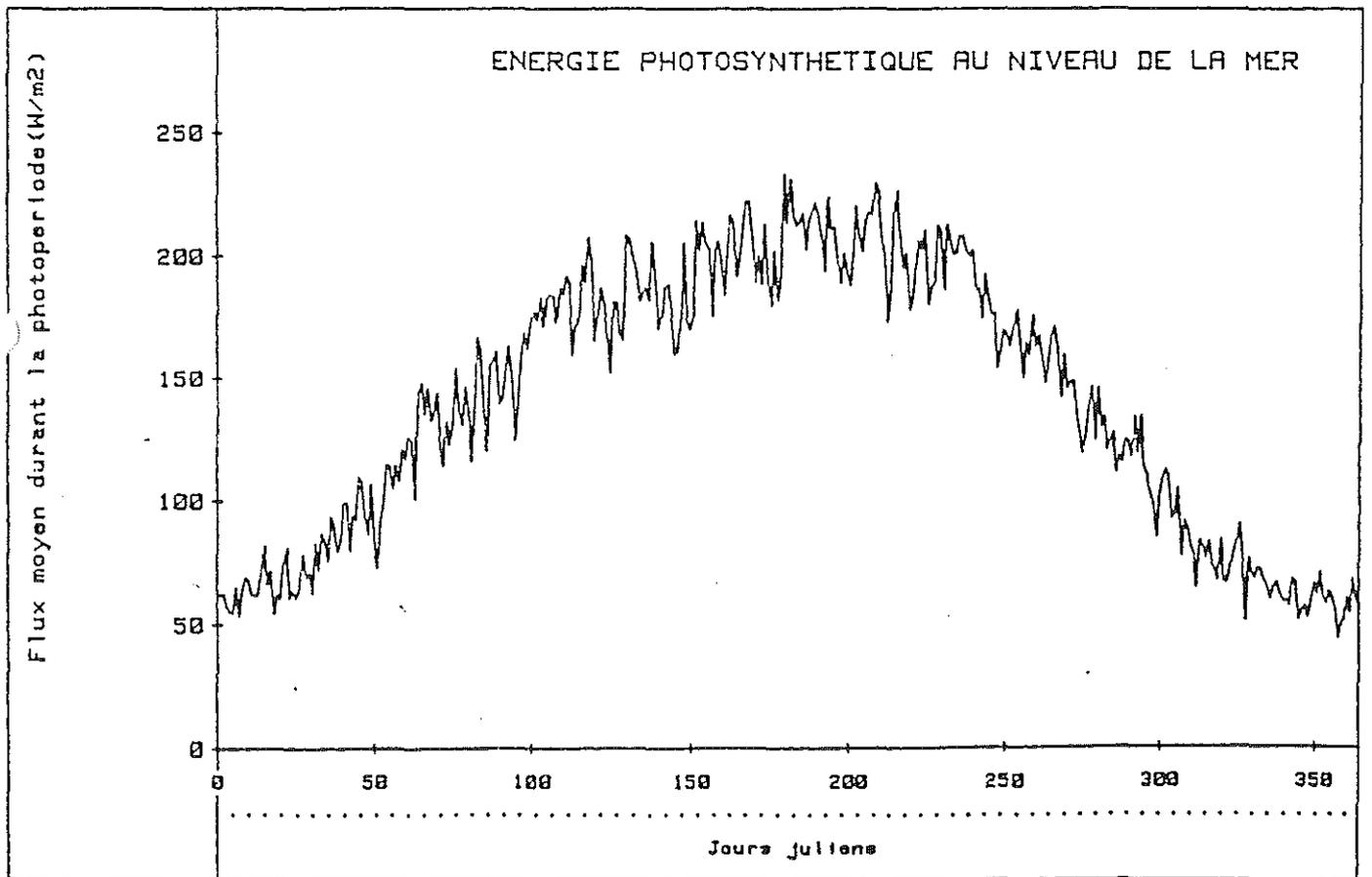
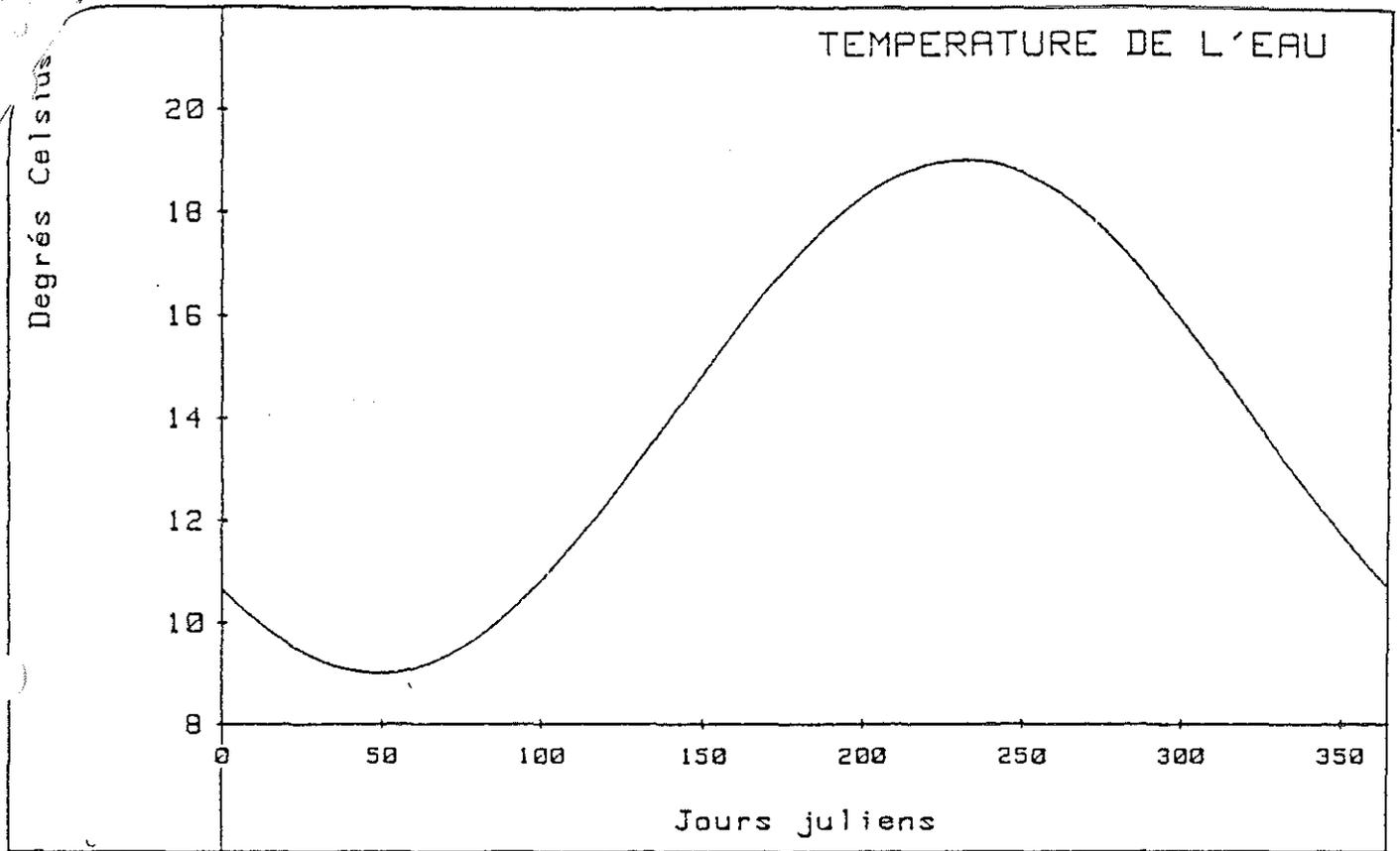
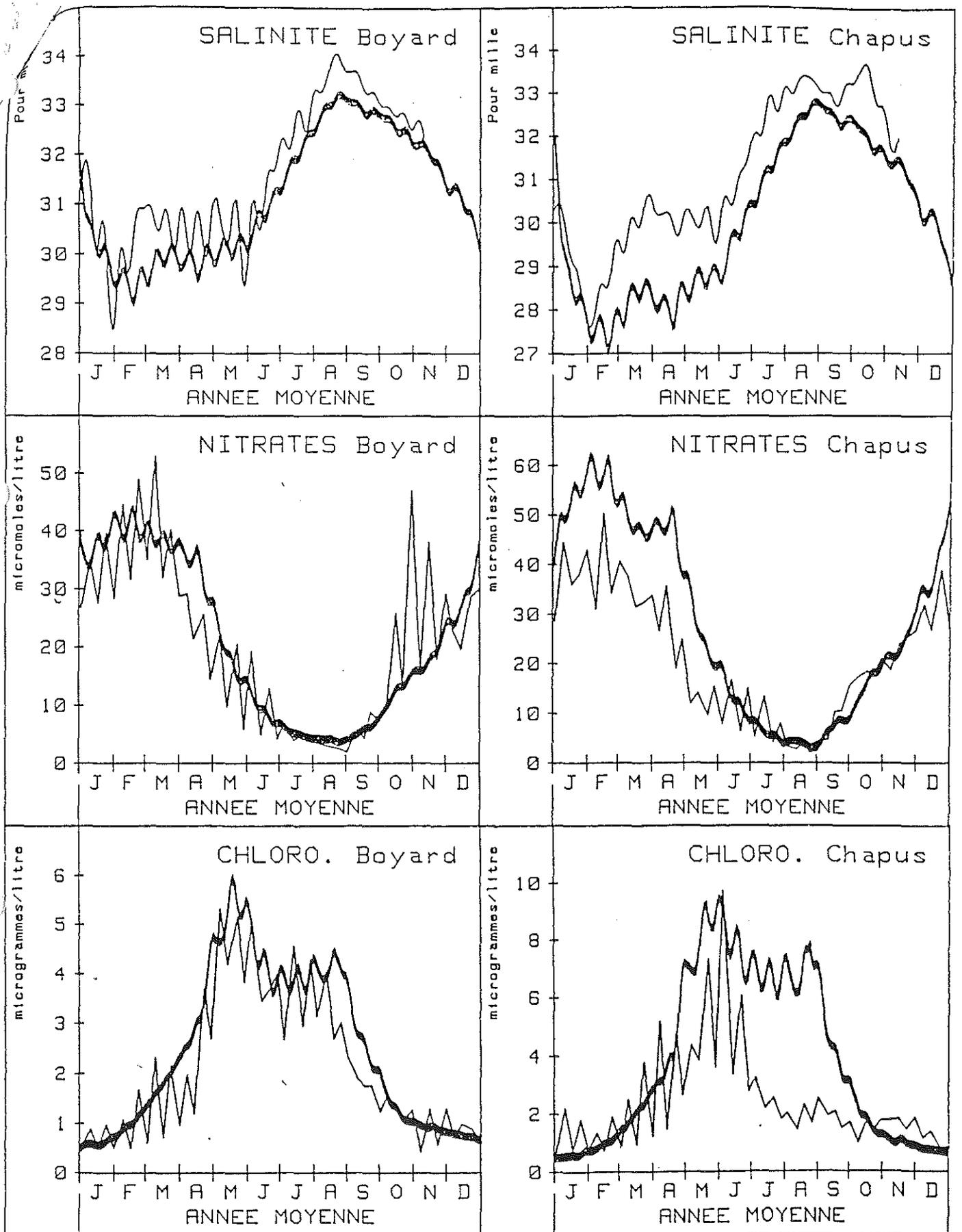


Figure 5 : Variables forçantes climatiques.

5.a : température de l'eau.

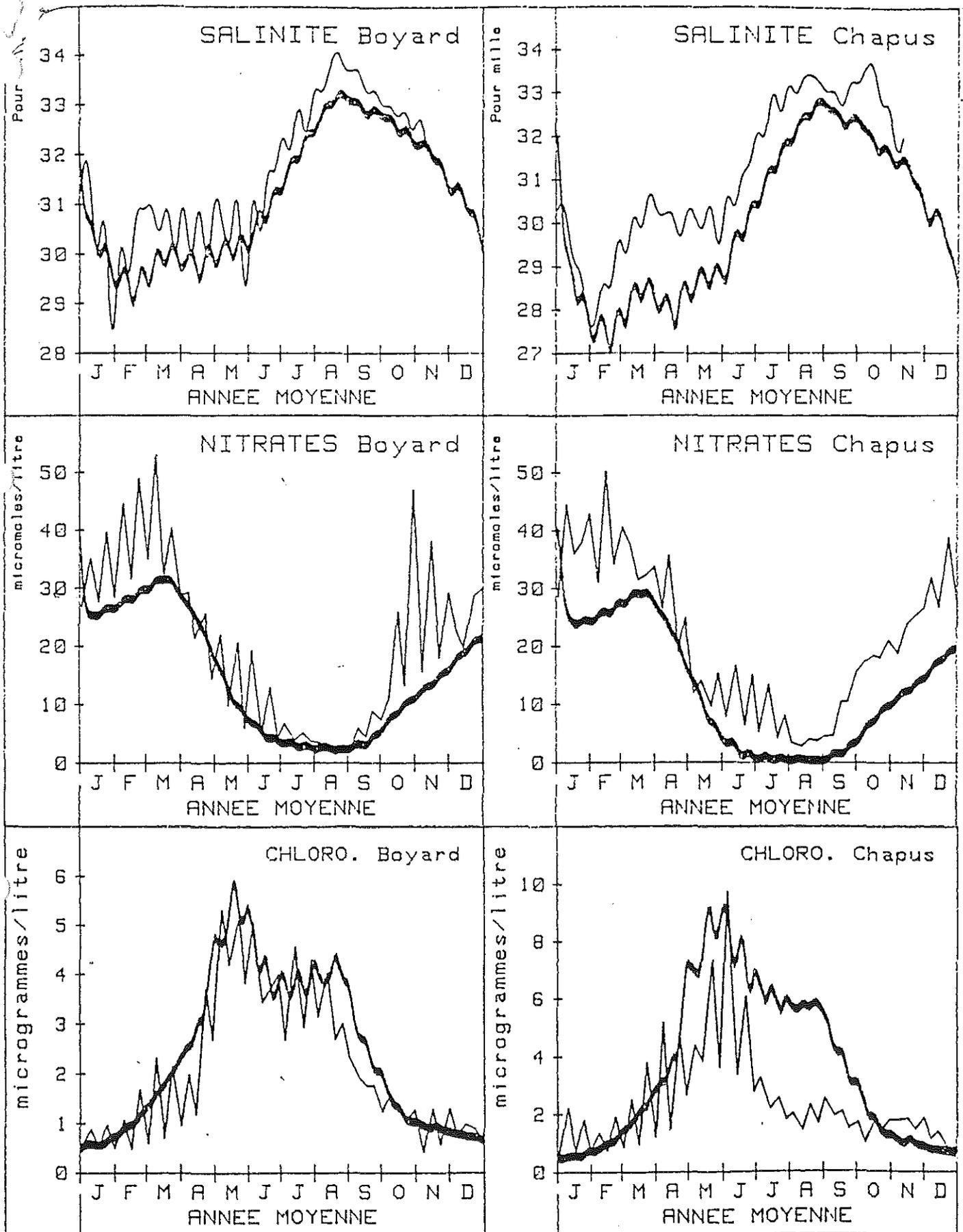
5.b : P.A.R. en surface (année moyenne sur 20 ans).



— Mesures

— Modèle

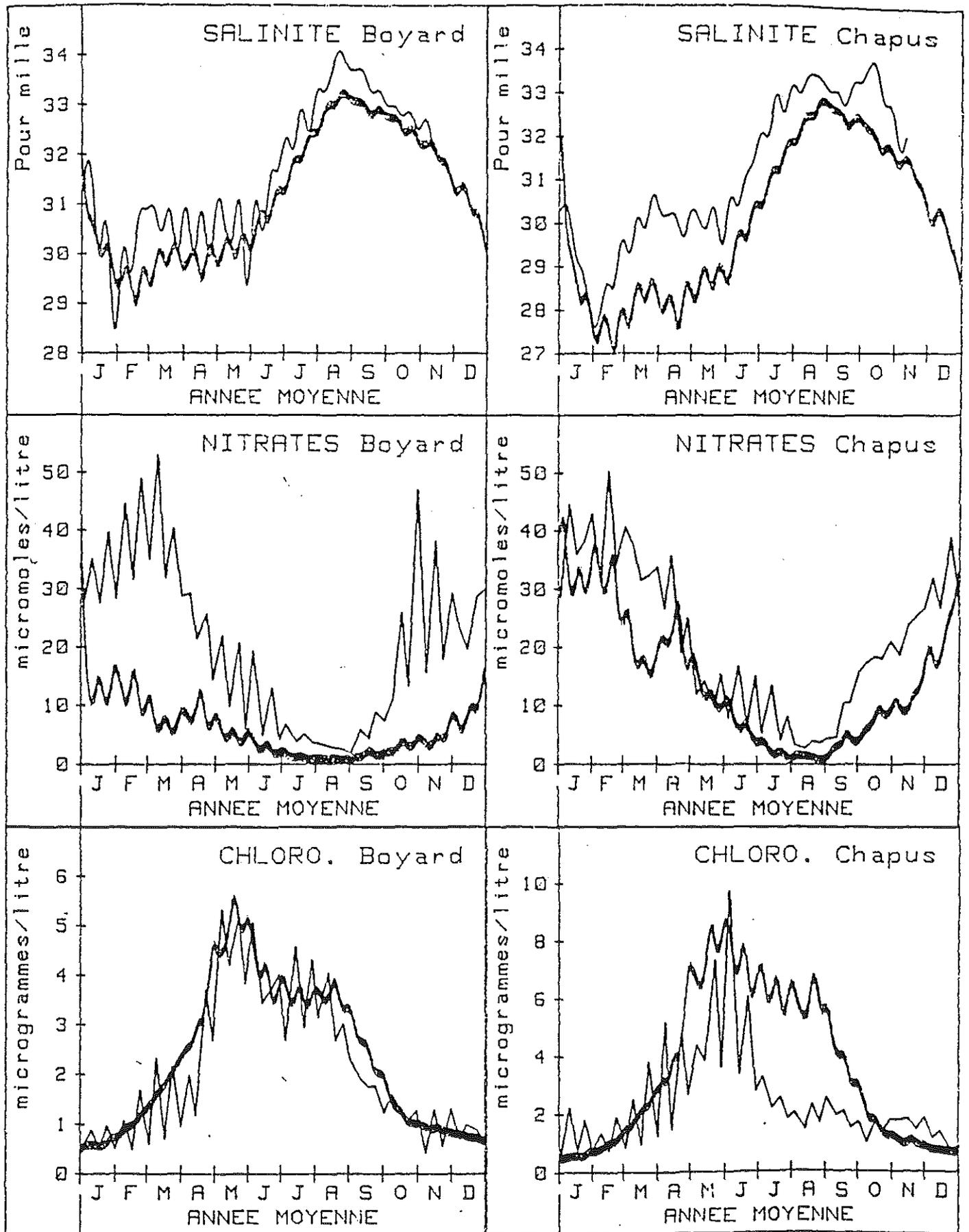
Figure 6 : Résultats de la simulation nominale (conditions actuelles).



— Mesures

— Modèle

Figure 7 : Résultats de la simulation sans apports de nitrates par la Charente.



— Mesures

— Modèle

Figure 9. Résultats de la campagne de mesures effectuée en 1971-1972 dans les stations de mesure 2 et 3.