

EXPRESSIONS HYDROCHIMIQUES, SEDIMENTOLOGIQUES
 ET BIOLOGIQUES DU GRADIENT DE CONFINEMENT
 DANS UN PARTENEMENT SALINIER ABANDONNE:
 LE TRIANGLE DES BERMUDAS (SANTA POLA, ESPAGNE)

GROUPE D'ETUDES DU DOMAINE PARALIQUE

Jean-Pierre Perthuisot. Ecole normale supérieure,
 Paris

Olivier Guerloget. Université des sciences et techniques
 du Languedoc, Montpellier

Guy-François Frisoni. CEMAGREF, Montpellier

André Maurin. Compagnie française des Pétroles, Paris.

RESUME. Le Triangle des Bermudas, partenement abandonné d'un ancien salin, est une entité confinée par rapport à la mer.

Il matérialise, dans la zonation biologique du domaine paralique, le terme de passage entre la "zone macrofaunistique" et la "zone cyanobactérienne" (C. Monty, travaux en cours).

Toutefois, le système est susceptible d'évoluer en fonction des variations du confinement.

ABSTRACT. The so-called "Triangle des Bermudas", which was a part of previous solar salt works, is nowadays a restricted, confined small basin.

It displays, within the biological zonation of the paralic realm, the transition between the "macrofaunal zone" and the "cyanobacterian zone" (C.Monty, unpublished studies).

Meanwhile, the system may shift laterally according to the confinement variations.

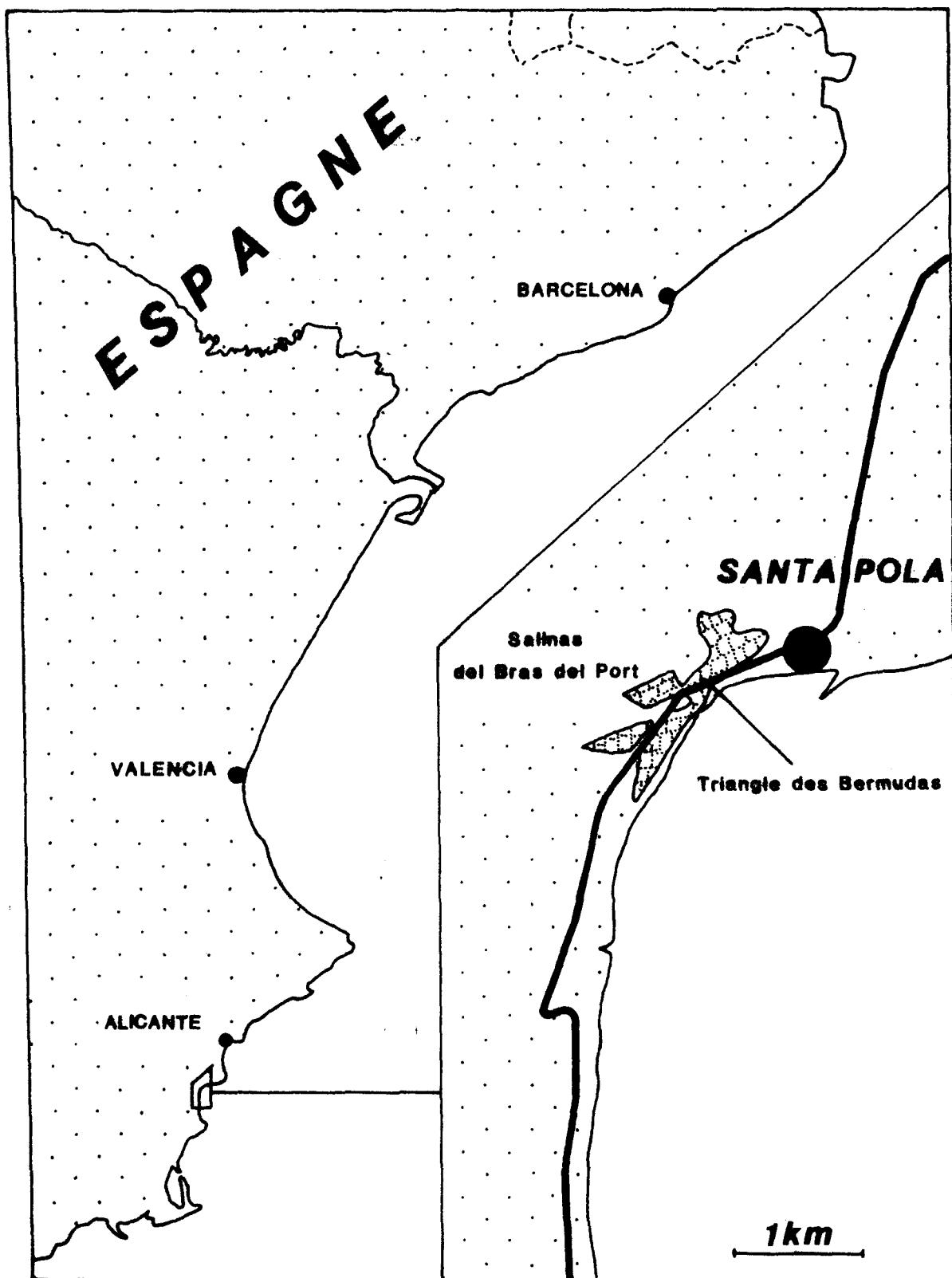


Fig.1. - Situation géographique du
Triangle des Bermudas.

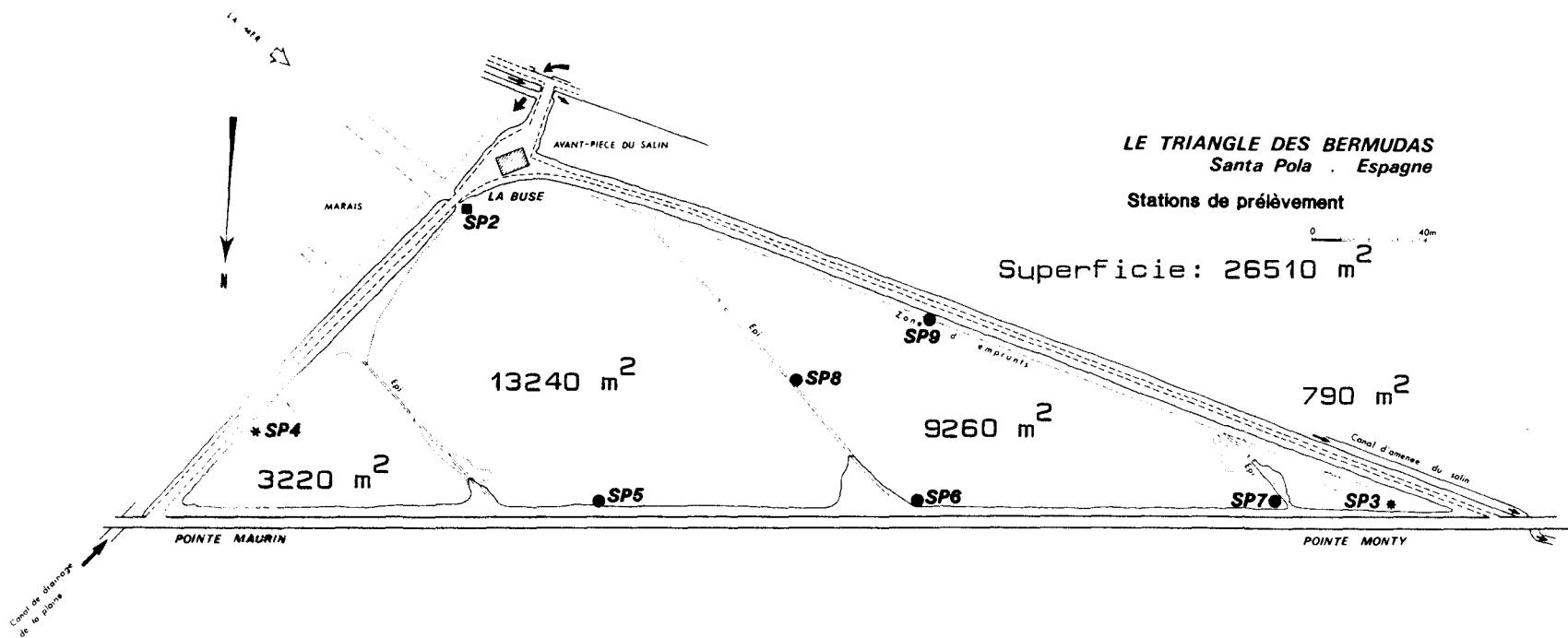


Fig.2. - Le Triangle des Bermudas. Localisation des stations de prélèvement.

Le Triangle des Bermudas, situé tout près de la petite localité de Santa Pola au Sud d'Alicante [Fig. 1], est un parténement abandonné de l'exploitation salinière locale.

Ce petit plan d'eau est remarquable par les cyanophycées qui s'y développent jusqu'à constituer localement des tapis importants.

La présente étude pluridisciplinaire, complément de celles entreprises par C. Monty et T. Le Campion, n'est qu'une approche fragmentaire qui, limitée par le nombre de missions (Juin et Octobre 1981) et la gamme des paramètres étudiés, ne saurait prétendre fournir une connaissance exhaustive de ce petit modèle naturel si schématique en apparence mais tout aussi complexe, en fait, que les grands bassins paralliques.

I. LE TRIANGLE ET SON FONCTIONNEMENT

A. Situation générale

Le plus grand côté du Triangle des Bermudas longe la route nationale d'Almería à Alicante, à quelques kilomètres à l'O. de Santa Pola. Les deux autres cotés sont constitués par des levées de terres et de blocs qui séparent le bassin d'une part des premiers parténements de l'exploitation salinière actuelle et d'autre part d'une zone de marais qui communique avec la mer à marée haute et lorsque le salin est alimenté en eau de mer (Perthuisot et al. 1981, 1982). Ce marais est en outre alimenté en eau par des canaux qui drainent le salin et la plaine côtière qui constitue l'arrière pays. Le Triangle communique avec ce marais par l'intermédiaire d'une buse (La Buse) aménagée sous le chemin correspondant au plus petit côté [Fig.2].

B. Le régime hydrologique

Le Triangle forme un plan d'eau d'une superficie de $26500 m^2$ et est divisé par des épis plus ou moins noyés en 4 clos qui communiquent très largement entre eux [Fig.2].

La profondeur, réglée par le niveau de l'eau dans le marais, est toujours faible (quelques décimètres au plus), sauf dans la zone d'emprunts qui longe la rive SO du bassin. Le niveau de l'eau dans le bassin dépend donc de celui du marais qui est commandé par les arrivées d'eau de mer et par les apports continentaux (eaux de décharge du salin, eaux de ruissellement de la plaine, décharge de nappes) mais, en définitive, les fluctuations du niveau dans le marais ne sont ni périodiques ni prévisibles. Enfin, le vent peut avoir une influence sensible sur le plan d'eau du Triangle et occasionner des seiches et le découvrement local des sédiments aux bordures du bassin. Ainsi, le sens et l'intensité des échanges hydriques entre le marais et le Triangle sont très variables et peu prévisibles.

Le régime des courants dans le bassin nous reste à peu près inconnu. Cependant, il semble que le courant d'entrée est dévié vers la droite au sortir de la Buse, en l'absence de vent fort du secteur Est. Ainsi, la pointe Monty semble généralement être la zone la plus confinée du bassin. Par ailleurs, le régime des vents est susceptible d'engendrer des

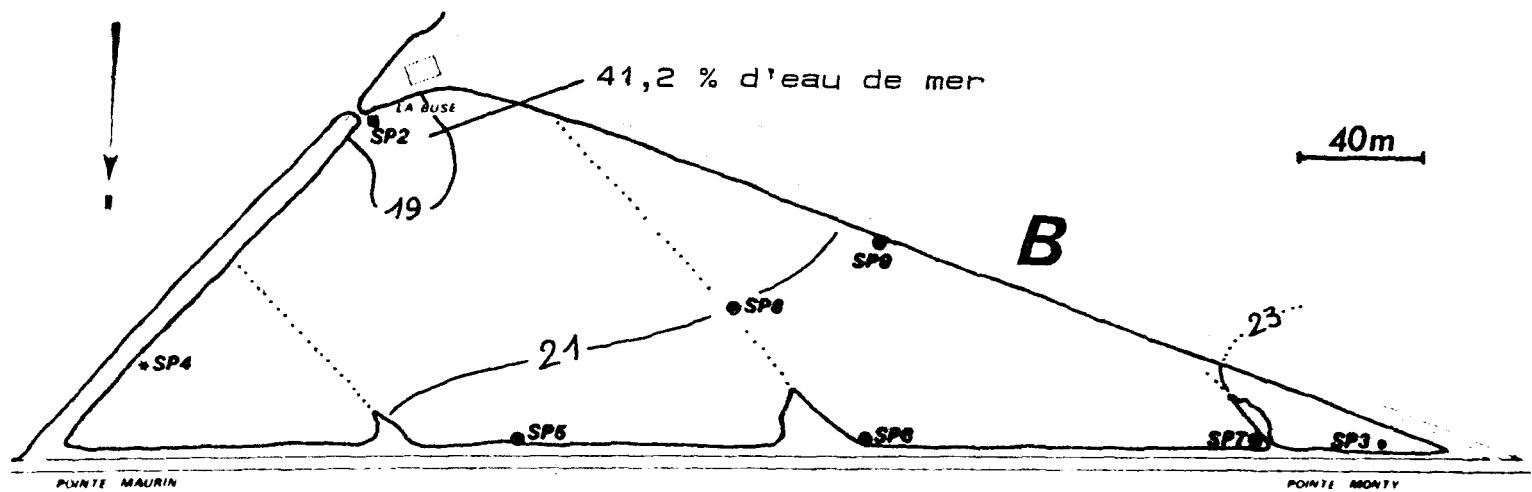
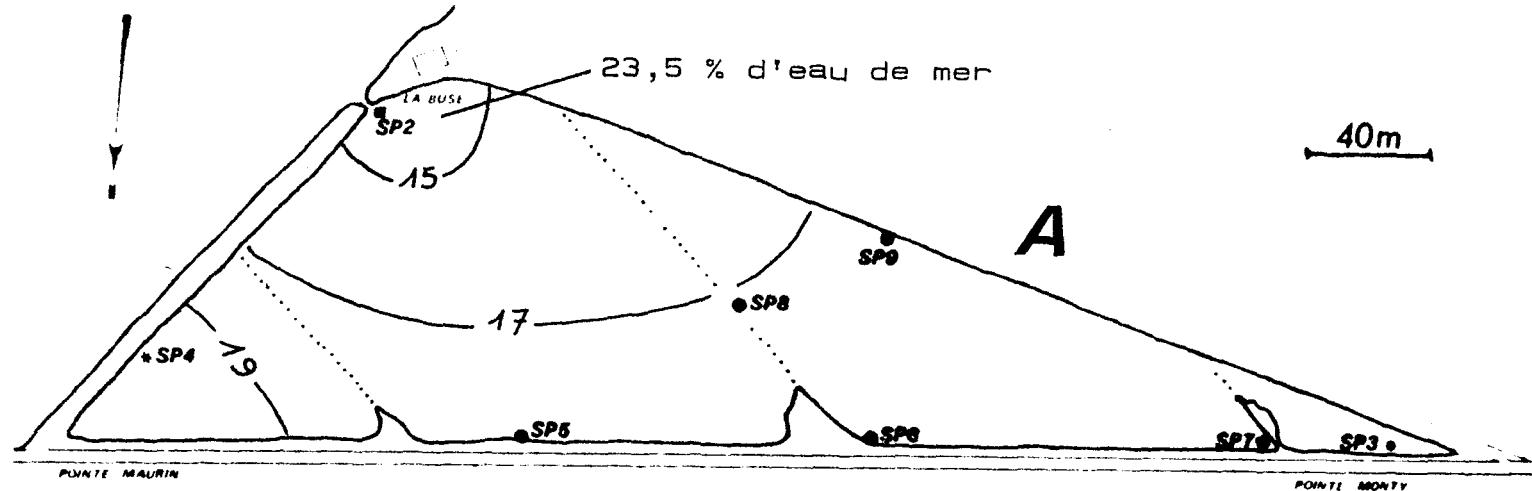


Fig.3. - Les gradients de concentration des eaux du Triangle des Bermudas à marée montante en Juin 81 (A) et Octobre 81 (B).

Il est très vraisemblable que la multiplication des stations de mesure conduirait à proposer des courbes isohalines beaucoup plus contournées en particulier du fait de la présence des épis qui traversent le bassin.

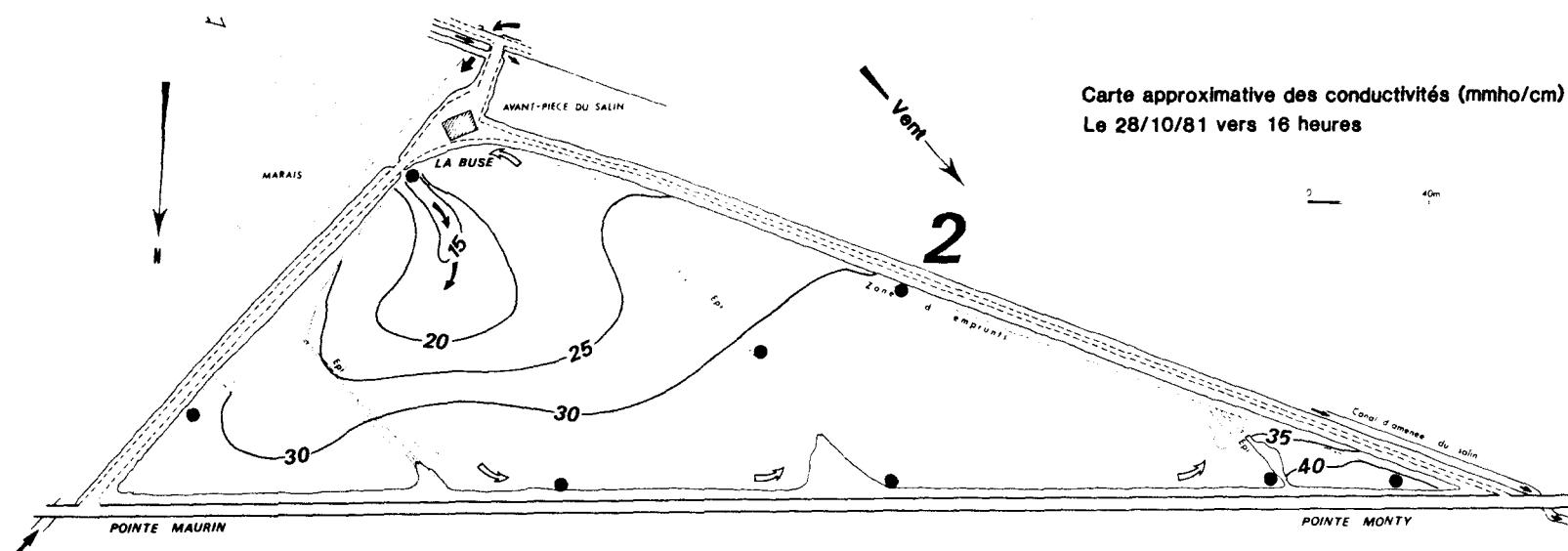
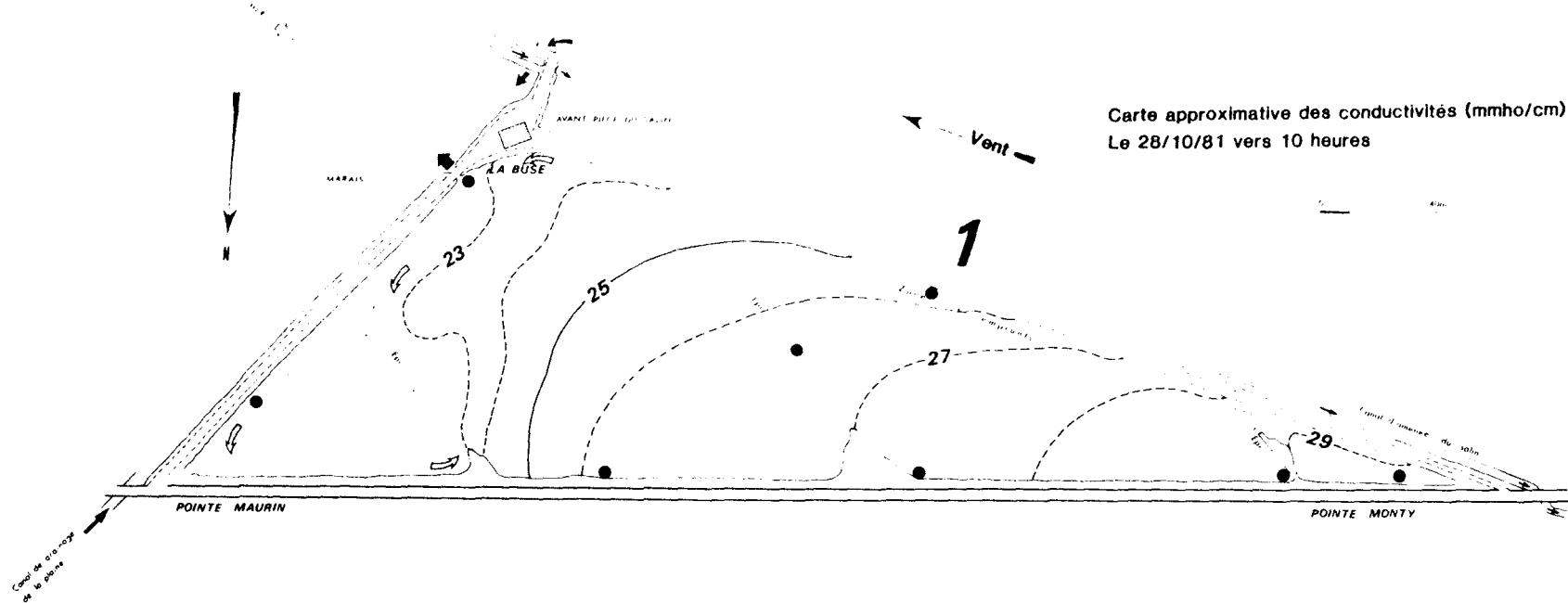


Fig.4. - Variations du champ de conductivité sur le Triangle des Bermudas le 28 Octobre 1981.

courants de dérive littorale et même, semble-t-il des phénomènes d'"upwelling" aux rives sous le vent, malgré la faible trame d'eau.

Ainsi, à cause de l'étroitesse de la communication avec le marais, le "Triangle des Bermudas" constitue un système confinant par rapport à celui-ci, lui-même confiné par rapport au domaine marin.

II. LES EAUX

A. Prélèvements, mesures, analyses

Les eaux ont été prélevées en 3 points en Juin 1981 (SP 2, SP 3 et SP 4) et en 5 points en Octobre 1981 (SP 2, SP 3, SP 4, SP 5 et SP 8). Chaque échantillon de 250 cc a été fixé par l'adjonction d'1cc de formol pur pour stopper le travail des microorganismes. Les analyses chimiques ont été exécutées selon les techniques classiques (photométrie de flamme, absorption atomique, colorimétrie, analyse pondérale).

Les paramètres hydrologiques (température, oxygène dissous, pH, conductivité, turbidité) ont été mesurés aux diverses stations (3 en Juin, 8 en Octobre) à l'aide d'une sonde multiparamètre Horiba.

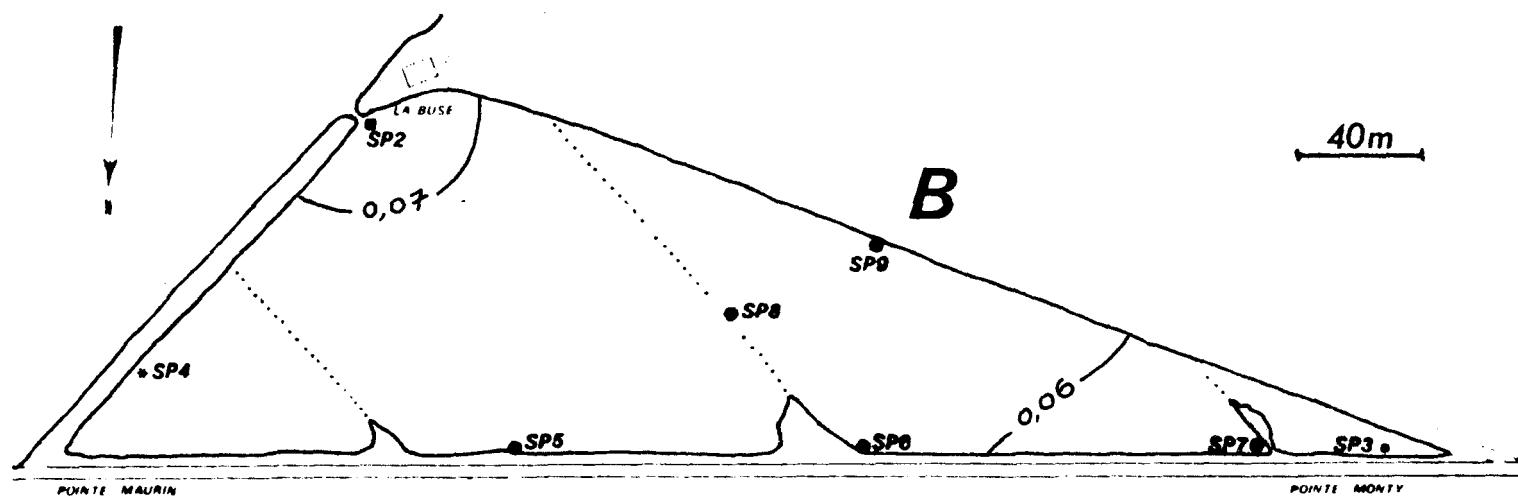
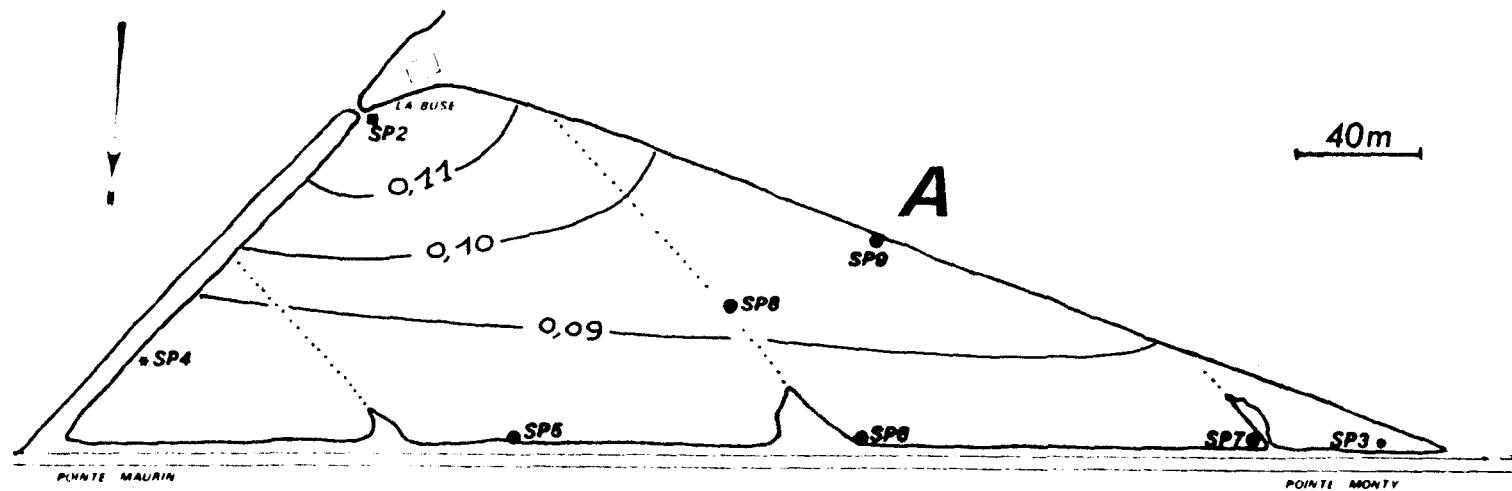
B. La chimie des eaux

Les analyses des eaux montrent que le Triangle est un système confinant comportant un gradient de concentrations positifs depuis la communication vers les confins du bassin: il est clair que d'une manière générale, le ruissellement étant pratiquement nul, l'évaporation l'emporte sur les précipitations et le bilan en eau douce du bassin est toujours positif sauf lors des pluies. Ainsi la tendance habituelle des eaux est à la sursalure -par rapport aux eaux du marais. En Juin comme en Octobre, la différence de concentration entre les eaux à la Buse et les zones les plus salées, était de l'ordre de 4 g/l, ce qui est considérable si l'on considère les faibles dimensions du plan d'eau mais compréhensible eu égard aux très faibles profondeurs de celui-ci [Fig. 3 et 4].

Les analyses montrent en outre que la composition des eaux entrantes est plus proche de celle de l'eau de mer en Octobre qu'en Juin : on peut assimiler la solution entrante en Octobre à un mélange à 41,2 % d'eau de mer et à 58,8 % d'une eau continentale à 4,55 g/l, sulfatée sodique et magnésienne. En Juin le mélange aurait été à 23,5 % d'eau de mer et à 76,5 % d'une eau à 7,08 g/l, de composition voisine, mais plus riche en chlorure de sodium. Ainsi, en Octobre, le milieu est plus "marin" - moins confiné - qu'en Juin.

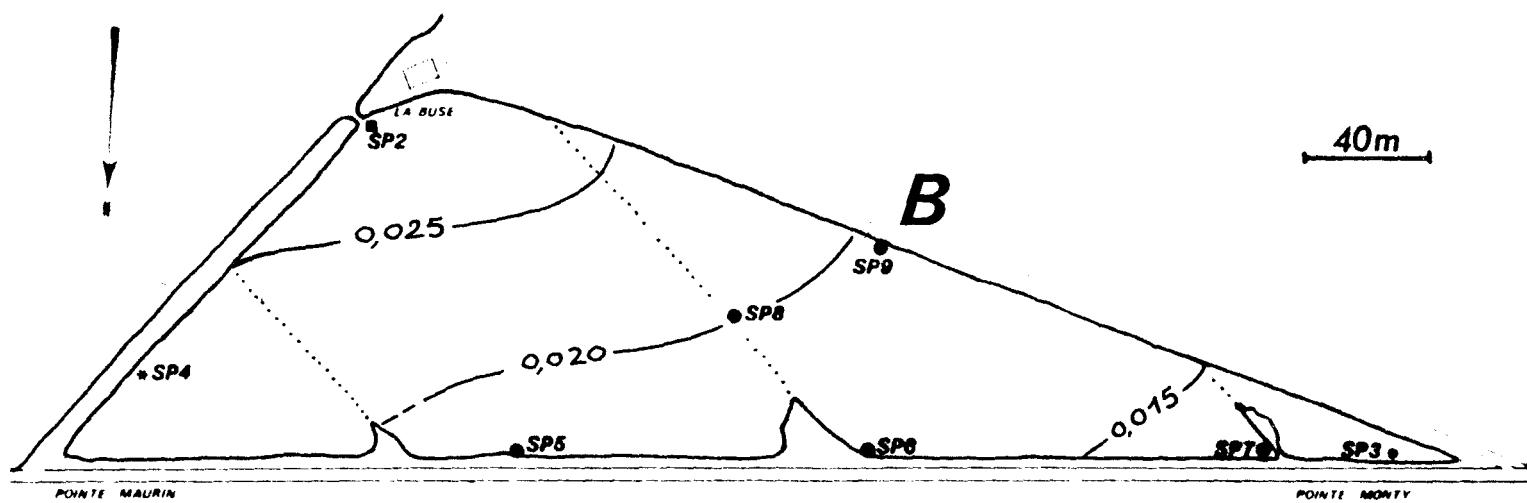
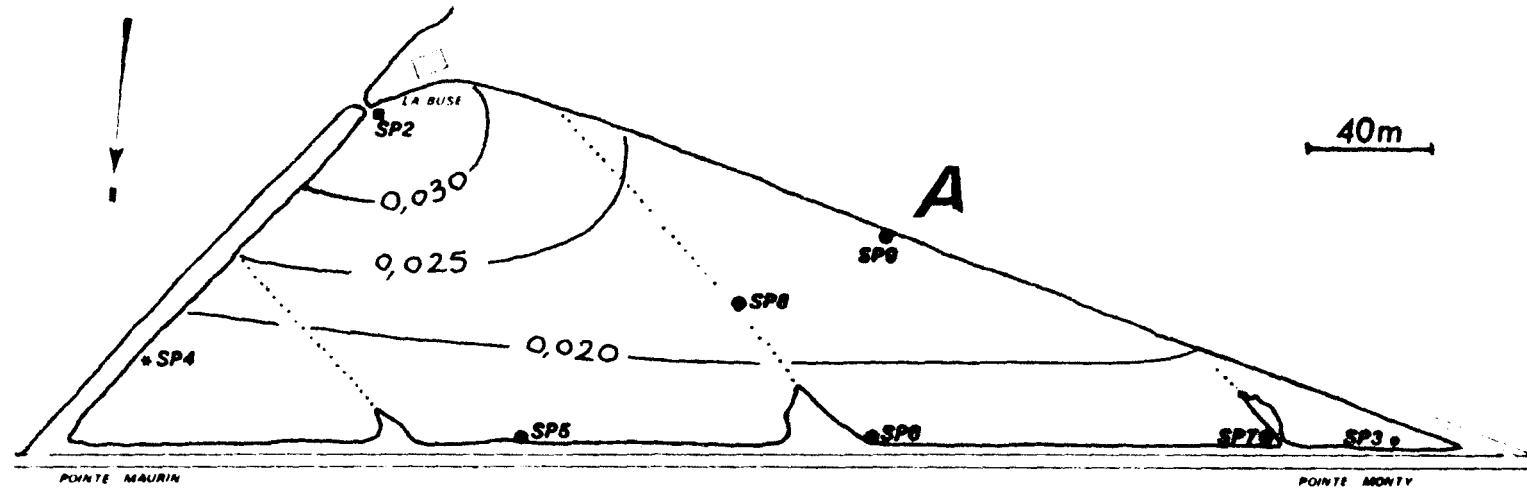
Enfin, les mesures de conductivité semblent indiquer que le gradient de concentration des eaux du Triangle est plus fort à "marée montante" qu'à "marée descendante", comme il était prévisible.

En ce qui concerne les ions majeurs, les variations à un instant donné et sur l'ensemble du plan d'eau des teneurs relatives en Cl^- et Na^+ sont faibles, erratiques et généralement inférieures ou de l'ordre de l'erreur de mesure. Par contre, les teneurs en ion Ca^{++} , HCO_3^- et SO_4^{--} varient de façon significative en Juin comme en Octobre (Fig. 5, 6 et 7). On assiste à un appauvrissement des eaux en ces éléments



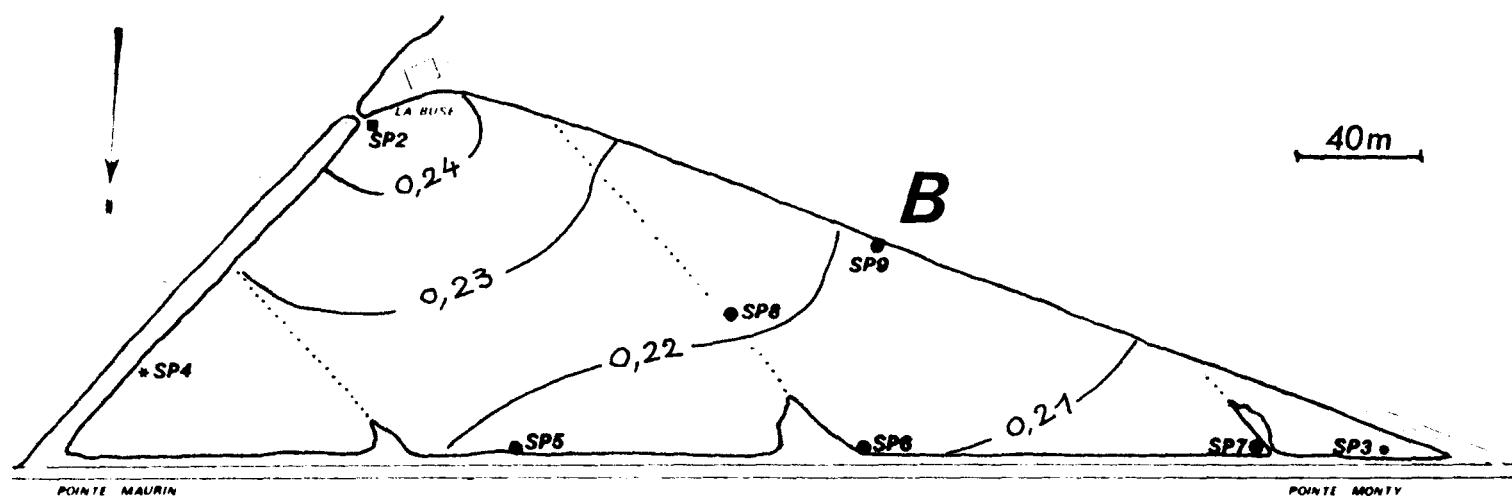
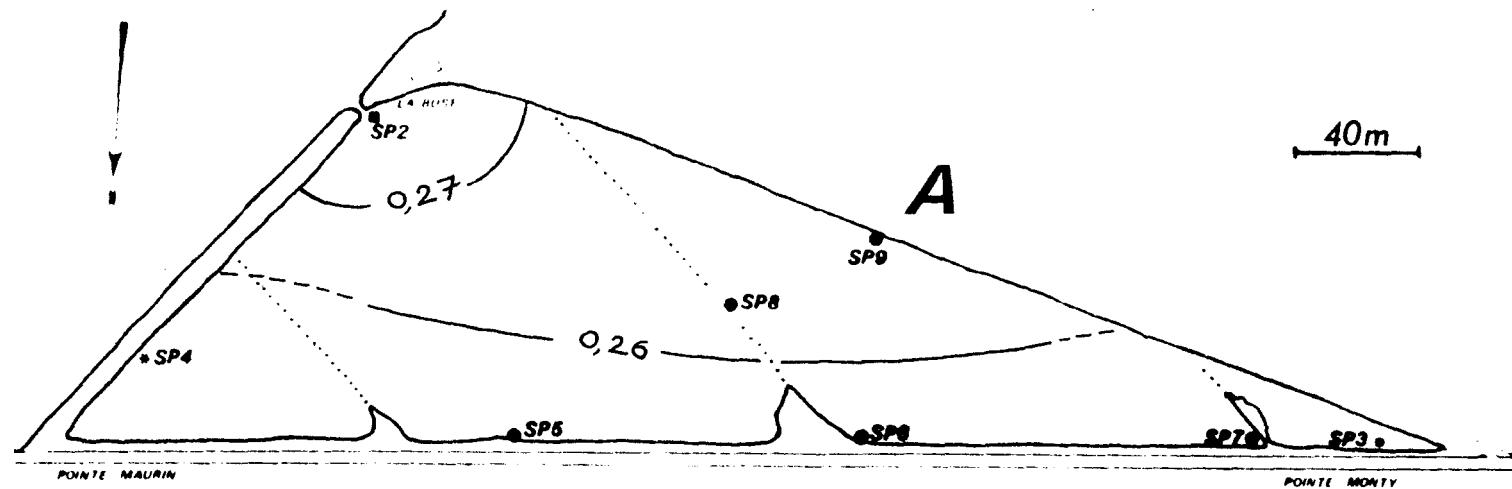
Ca/Cl (g/l)

Fig. 5. - Carte schématique du rapport Ca/Cl des eaux libres du Triangle des Bermudâs. A: Juin 1981, B: Octobre 1981.



HCO_3/Cl (g/l)

Fig. 6. - Carte schématique du rapport HCO_3/Cl des eaux libres du Triangle des Bermudas. A: Juin 1981, B: Octobre 1981.



SO_4/Cl (g/l)

Fig. 7. - Carte schématique du rapport SO_4/Cl des eaux libres du Triangle des Bermudas. A: Juin 1981, B: Octobre 1981.

avec l'éloignement de la communication, vers les confins du bassin.

- La perte de calcium et de carbonate est liée à la précipitation de carbonates (calcite, aragonite).

- La perte de sulfate est imputable à l'activité des bactéries sulforéductrices au sein des sédiments: bien que le Triangle ait eu, semble-t-il, des dépôts de gypse au cours des années précédentes, ce n'était pas le cas en 1981, même si ses eaux sont plus proches de la saturation en gypse que l'eau de mer normale. En outre, l'appauvrissement en sulfate est plus prononcé en Octobre qu'en Juin, malgré une température globalement plus faible; il est possible que la production organique estivale favorise le développement de ces colonies bactériennes à l'automne.

Cette activité bactérienne saprophytique est peut-être aussi responsable de l'enrichissement des eaux libres en potassium, et dans une moindre mesure en magnésium.

Enfin, les teneurs en silice sont éminemment variables, même d'un jour à l'autre. D'une façon générale, les eaux du Triangle sont appauvries en SiO_2 , soluble par rapport aux eaux entrantes et ceci est beaucoup plus net en Octobre qu'en Juin : cette consommation de silice soluble dans les eaux libres est le fait des diatomées qui se développent dans le Triangle.

Au total, le Triangle agit comme un capteur et un échangeur d'éléments grâce à des processus purement physiques (concentration par évaporation, augmentation de température) mais aussi grâce à l'activité biologique du milieu (photosynthèse, réduction biochimique du soufre, productions minérales bactériennes et algales). Cette importance du rôle des organismes dans la sédimentation et la diagenèse est une des caractéristiques essentielles des milieux du domaine paralique (Guelorget et Perthuisot, 1982, Guelorget et al., 1982).

C. Les "paramètres hydrologiques" [Température, Oxygène dissous, pH, turbidité, conductivité]

Le suivi de ces paramètres au cours des deux missions montre très clairement un rythme nyctéméral que modulent les conditions météorologiques. Ainsi, du 25 au 28 octobre 1981 (Fig. 8), période d'établissement progressif du beau temps, on assiste à une augmentation des écarts journaliers de la température mais simultanément à l'augmentation globale du pH des eaux et de leurs teneurs en oxygène dissous, sans nul doute en relation avec l'augmentation de l'activité photosynthétique du milieu. Ces deux derniers paramètres sont, en outre, plus élevés en Octobre qu'en Juin: ceci est à mettre en relation avec une densité phytoplanctonique nettement supérieure en automne (120 000 à 160 000 cellules/l en Octobre contre 15 000 à 40 000 cellules/l en Juin).

Les conductivités présentent toujours un gradient positif entre la Buse et les confins du Triangle, spécialement la Pointe Monty mais il n'y a pas de relation simple entre la conductivité et la concentration minérale des eaux: il existe dans le milieu des complexes organiques ionisés qui entachent d'erreur les mesures de "salinité" (Perthuisot et al. 1982).

Dans ce petit bassin assez bien protégé du vent, les turbidités sont toujours faibles et les eaux claires.

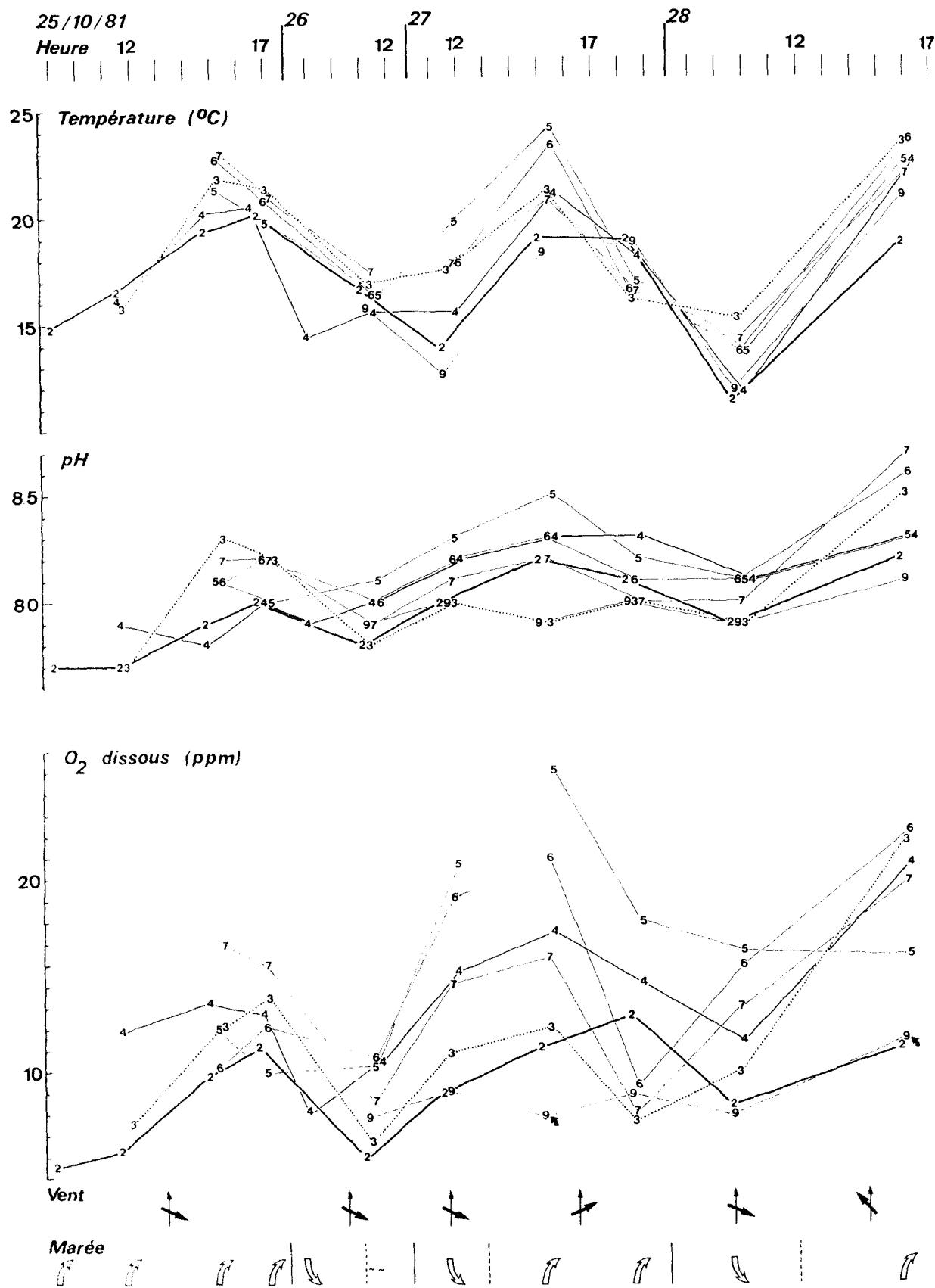


Fig. 8. - Variations de la température, de l'oxygène dissous et du pH du 25/10/81 au 28/10/81 aux différentes stations du Triangle des Bermudas.

III. LES SEDIMENTS

Les sédiments du Triangle des Bermudas sont essentiellement des boues carbonatées très fluides pratiquement dépourvues d'éléments détritiques (le quartz est présent seulement à l'état de traces), sur au moins un mètre d'épaisseur au centre du bassin.

En SP 3 [Pointe Monty], le sédiment est constitué d'un tapis algaire à *Lyngbya* et *Microcoleus* [C. Monty, communication orale] avec la structure laminée typique de ce genre de formation. Ce tapis, de quelques centimètres d'épaisseur, repose sur un substrat constitué d'une matrice carbonatée englobant des éléments détritiques (galets, sables) et de nombreux débris coquillers (*Cerastoderma*): il s'agit, selon toute vraisemblance, d'un sédiment antérieur à l'établissement du salin.

La phase carbonatée (fraction inférieure à 40 microns) des sédiments du Triangle est constituée de calcite peu magnésienne et de calcite à environ 5% de molécules de $MgCO_3$. L'aragonite n'est présente qu'en SP 2 au droit de la communication avec le marais: il est possible que sa présence à cet endroit corresponde à la rencontre des eaux fraîches, riches en calcium en provenance du marais et des eaux plus confinées, plus chaudes et plus évoluées du Triangle. L'aragonite pourrait ainsi être essentiellement d'origine chimique. Les autres carbonates sont plus vraisemblablement d'origine biochimique (activité photosynthétique, production bactérienne).

IV. FLORE ET FAUNE

A. Le phytoplancton

En Juin 1981, l'association phytoplanctonique présente un gradient marqué depuis la zone de La Buse où dominent les cyanophycées (10 000 cel./l) vers les pointes confinées du Triangle où dominent les diatomées (20-40 000 cel./l).

En Octobre 1981, la population est beaucoup plus homogène sur l'ensemble du plan d'eau, plus abondante et plus riche en espèces. Les diatomées s'inscrivent à 10-20 000 cel./l, tandis que les cyanophycées dominent largement avec 70-130 000 cel./l. Par ailleurs, les péricliniens et les chlorophycées sont omniprésents avec cependant des densités faibles, inférieures à 10 000 cel./l.

Ceci dénote un déconfinement du milieu entre Juin et Octobre que suggéraient déjà les analyses chimiques des eaux du bassin.

B. Le phytobenthos

Les sédiments du Triangle sont colonisés en surface par un microphytobenthos remarquable. Pratiquement nu dans la région de la Buse, le substrat est recouvert sur la quasi-totalité du bassin par une fine pellicule grumeleuse de cyanophycées où se mélangent de nombreuses espèces. Dans les zones très confinées, à l'abri des mouvements d'eau et en particulier à la Pointe Monty se développe un tapis cyanobactérien à *Microcoleus* et *Lyngbya* [T. Le Campion et C. Monty, études en cours], de quelques centimètres d'épaisseur avec un réseau polygonal de craquelures et de boursouflures. Ce tapis est en partie consommé par des petits poissons.

En Juin 1981, le macrophytobenthos se localisait uniquement aux environs de La Buse avec quelques thalles d'*Ulva*

lactuca et quelques filaments d'Enteromorpha gr. intestinalis. En Octobre ces deux espèces sont beaucoup plus répandues dans le bassin mais surtout il apparaît des taches de Ruppia spiralis dont la présence confirme le déconfinement du Triangle.

C. La macrofaune.

Elle a fait l'objet d'une étude quantitative au cours des deux missions (Tabl. 1, Fig. 9, 10, 11, 12).

Dans les deux cas, on observe un gradient négatif depuis la Buse vers les confins du Triangle, en ce qui concerne la richesse spécifique, la densité et la biomasse. Cependant, entre Juin et Octobre, les populations benthiques du bassin ont subi d'importantes variations:

- En Octobre, la richesse spécifique globale (Fig. 9) a largement augmenté surtout du fait de l'envahissement du milieu par les mollusques (de petite taille) essentiellement dans la zone de La Buse (SP 2) mais on observe des cardium jusqu'en SP 8, à la limite d'action du courant de "marée montante" et Hydrobia acuta colonise l'ensemble du bassin. Ces espèces immigrantes sont toutes typiques des milieux lagunaires et correspondent à un confinement relativement modéré.

- La densité subit aussi globalement une légère croissance (Fig. 10) mais dans le détail, on peut observer que les maxima de densité des Nereis diversicolor (Fig. 11) et des Chironomides (Fig. 12) se sont déplacés de Juin à Octobre, depuis les environs immédiats de La Buse vers une zone plus centrale.

- La biomasse est globalement plus faible en Octobre qu'en Juin du fait de la très petite taille des Nereis en Octobre, ceci n'étant pas compensé par l'immigration des mollusques dans le bassin.

Ainsi, en Juin comme en Octobre, le Triangle des Bermudas matérialise une limite essentielle du domaine paralique: le terme de passage entre la zone que l'on peut qualifier de "macrofaunistique", caractérisée par la présence d'espèces dites "thalassoïdes" (Ici les espèces sont cependant strictement paraliques) et la zone des tapis algaires bien individualisés que l'on peut appeler "zone cyanobactérienne". Cette limite qui existe dans la plupart des bassins paraliques suffisamment confinés (Guelorget et al. 1982, Perthuisot 1982, Perthuisot et Guelorget 1982) est ici particulièrement spectaculaire.

On remarquera cependant qu'étant donné la résistance et la pérennité des tapis algaires et la relative malléabilité des peuplements du macrobenthos, ces deux zones peuvent au moins momentanément se chevaucher ou se séparer nettement. En Octobre on peut admettre la zonation de détail suivante:

- 1: zone à pélécypodes
- 2: zone à Nereis et chironomides dominants
- 3: zone cyanobactérienne

En Juin, la première de ces zones était à l'extérieur du Triangle et seule une partie de la deuxième empiétait sur celui-ci dans la région de la Buse.

Le déconfinement du Triangle entre ces deux saisons se manifeste donc par une translation de ces zones et un renforcement des gradients biologiques en réponse à l'évolution des eaux vers un caractère plus "marin".

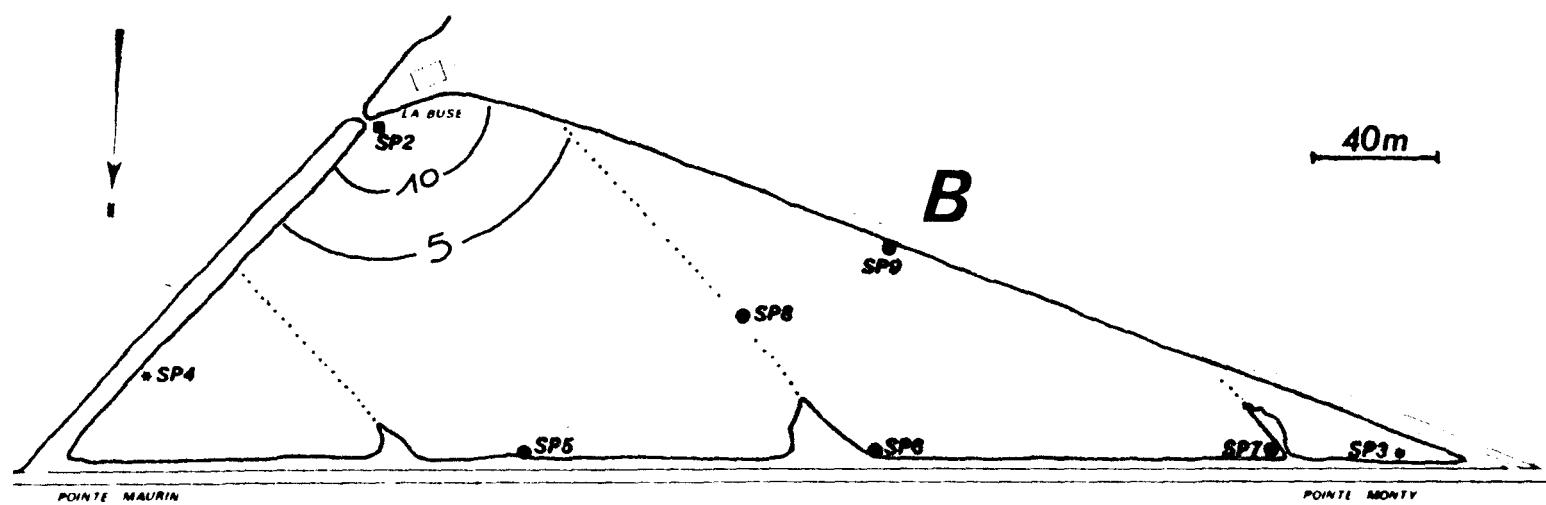
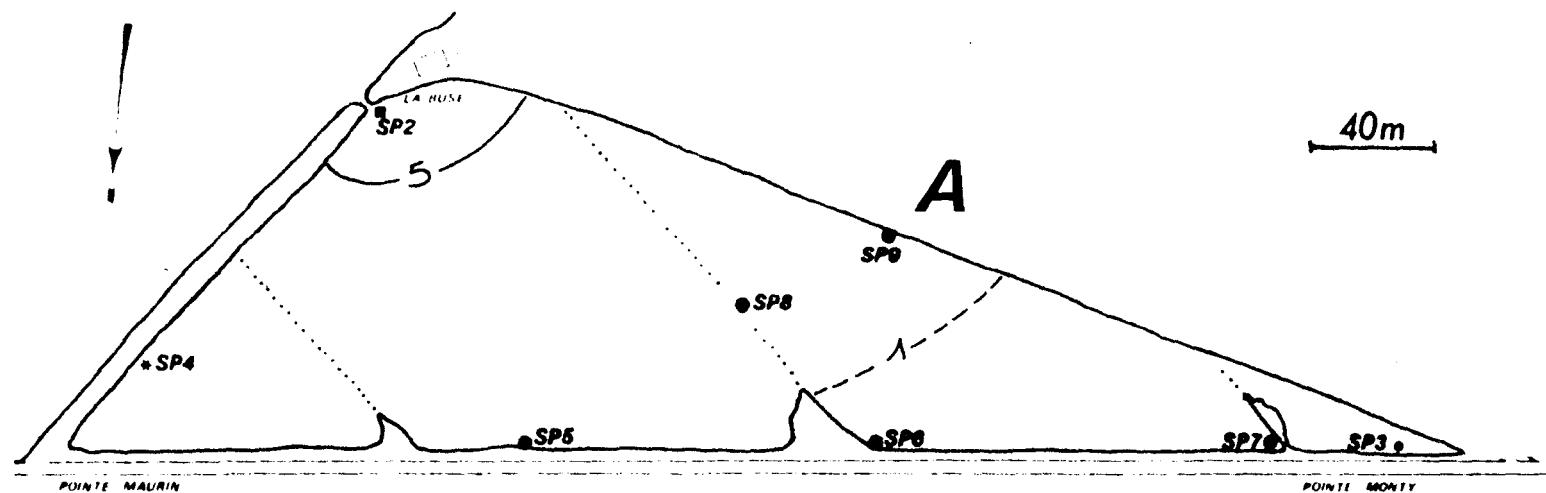


Fig. 9. - Carte schématique de la richesse spécifique du Triangle des Bermudas en Juin 1981 (A) et Octobre 1981 (B).

Seules les espèces sédentaires sont ici prises en considération.

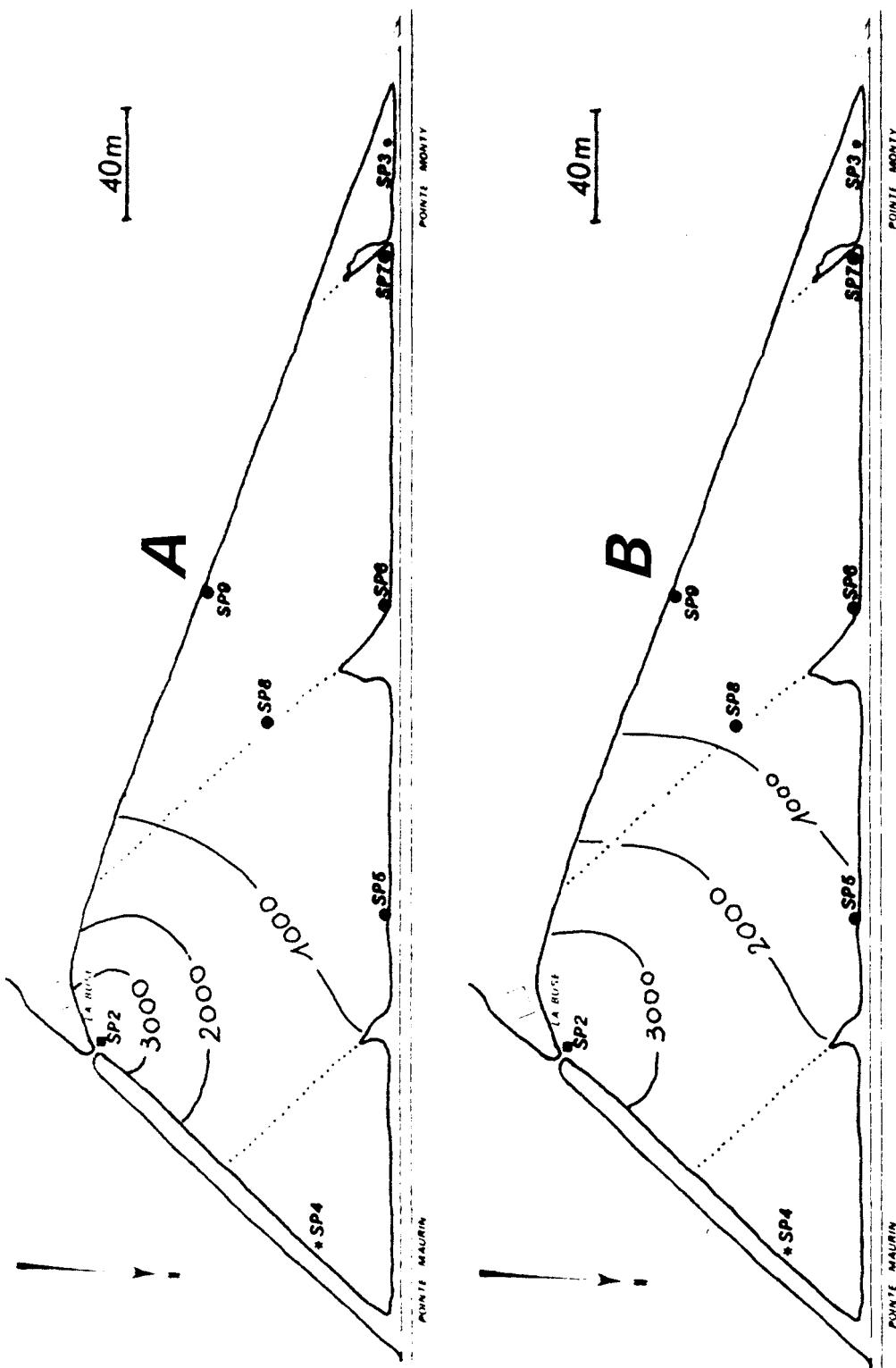


Fig. 10. - Carte schématique de la densité du macrobenthos (nombre d'individus par m²) en Juin 1981 (A) et Octobre 1981 (B).

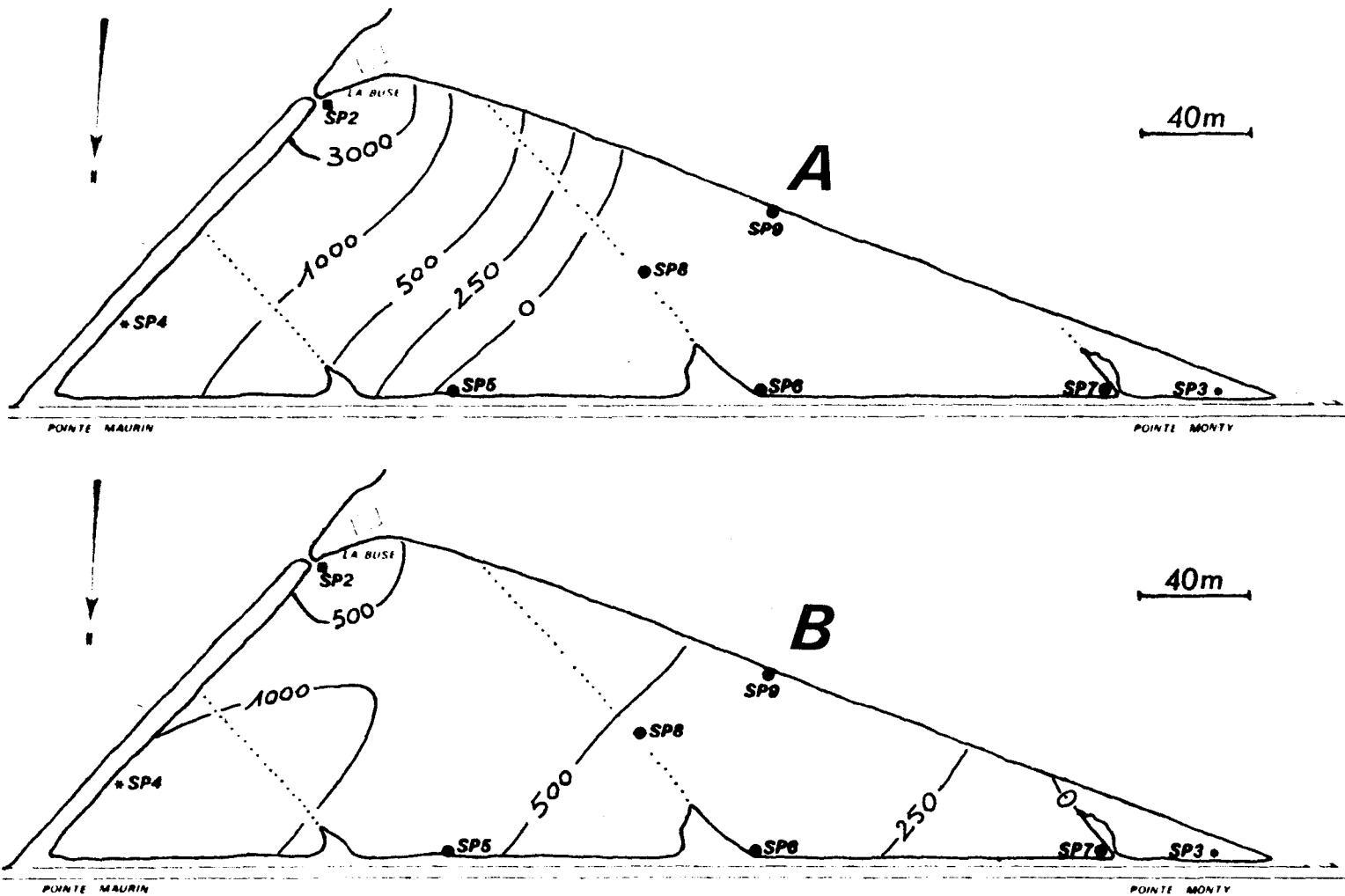


Fig. 11. - Carte schématique de la densité de *Nereis diversicolor* en Juin 1981 [A] et Octobre 1981 [B].

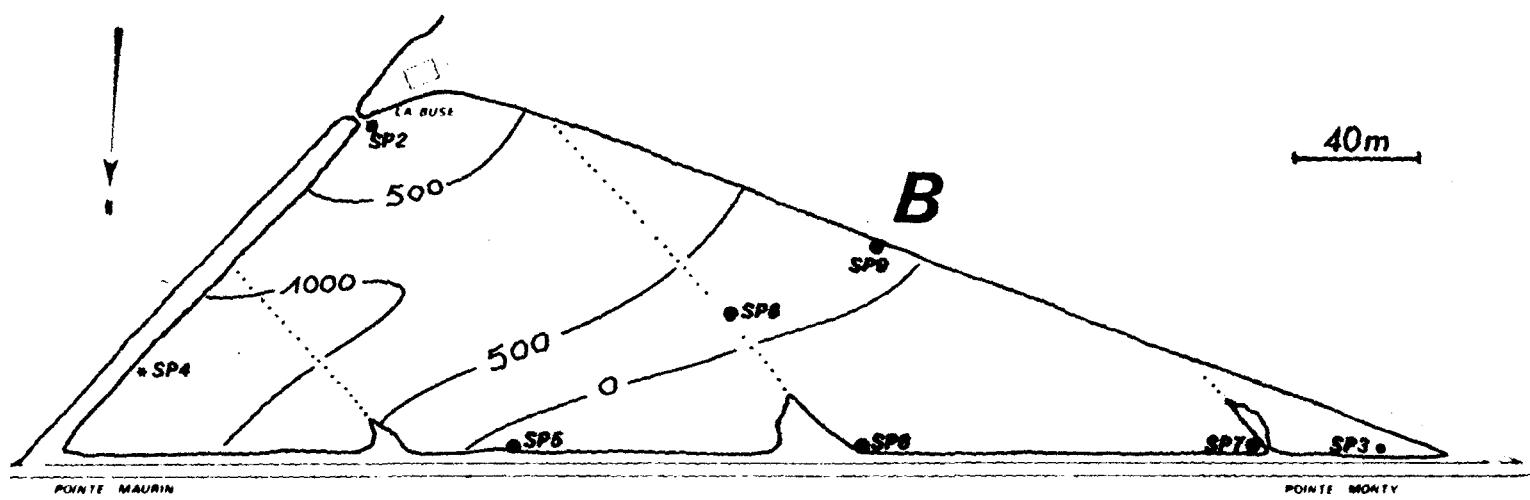
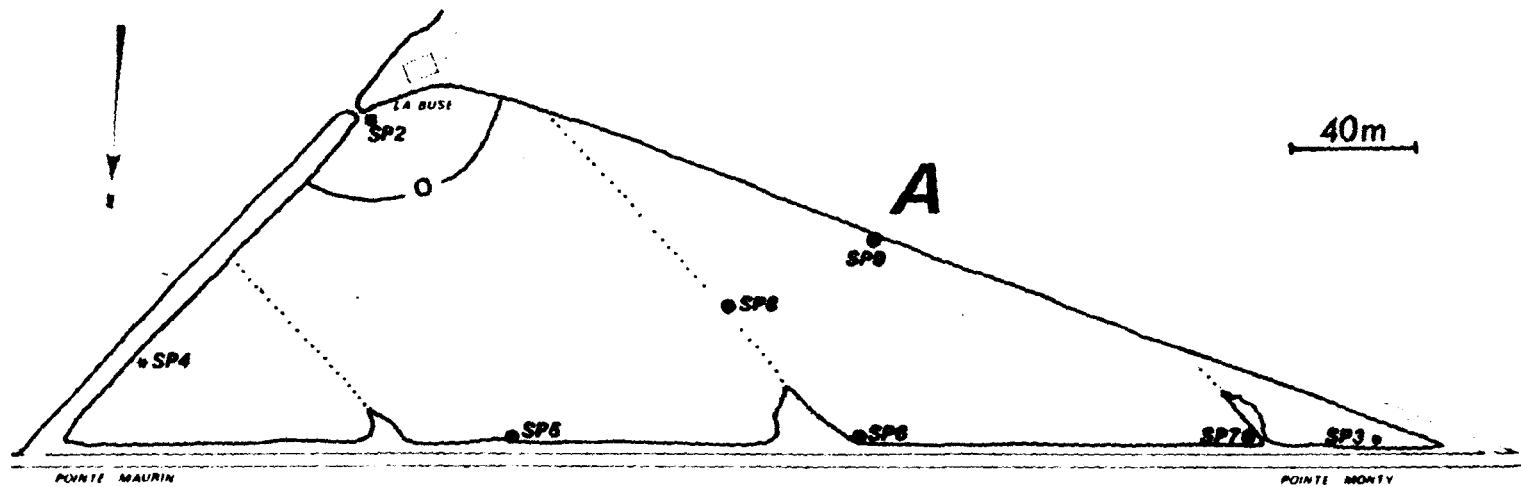


Fig. 12. - Carte schématique de la densité des chironomides en Juin 1981 [A] et Octobre 1981 [B].

Tableau 1. Répartition des espèces de la macrobenthifaune du Triangle des Bermudas en Juin 81 et Octobre 81. [Les chiffres correspondent aux densité en nombre d'individus par m²]

	Juin 1981			Octobre 1981				
	SP2	SP4	SP3	SP2	SP4	SP8	SP5	SP3
Espèces sédentaires								
<i>Cardium glaucum</i>				20		90		
<i>Abra ovata</i>				10				
<i>Brachydontes marioni</i>				10				
<i>Venerupis aurea</i>				10				
<i>Hydrobia acuta</i>				2750	510		570	10
<i>Rissoa</i> sp.				10				
<i>Nereis diversicolor</i>	3380	1310		460	850	410	650	
<i>Capitella capitata</i>	20							
<i>Microdeutopus</i> <i>gryllotalpa</i>		10			10			10
<i>Corophium insidiosum</i>		10						10
<i>Chironomidae</i>	210			380	1180	30		
Espèces vagiles								
<i>Sphaeroma hookeri</i>	10	20	20				20	
<i>Gammarus</i> gr. <i>locusta</i>	140	20					10	10
<i>Iodothea baltica</i>				-	-	-		10
<i>Carcinus mediterraneus</i> ..							-	
Total	3780	1350	20	3660	2560	530	1250	50

CONCLUSION

Cette petite étude montre à la fois la permanence de la zonation biologique des milieux du domaine paralique et la rapidité de l'adaptation de celle-ci aux changements des paramètres extérieurs qui dans le cas qui nous occupe correspondent à une diminution du confinement.

Si l'on considère les transformations sédimentologiques et diagénétiques que ceci implique, nature des dépôts, remaniements biologiques, etc, on comprend la nécessité d'une grande prudence dans les reconstitutions des paléoenvironnements mais aussi tout l'intérêt des traceurs de confinement que sont les organismes paraliques.

Remerciements. Nous avons l'agréable devoir de remercier ici Nicole Picot, Lucile Mamou et Joëlle Clastère qui, à des titres divers, ont participé à cette étude.

Liste bibliographique

Guelorget O., Frisoni GF. et Perthuisot JP. - 1982 - Caractérisation écologique des milieux du domaine paralique. Critères de choix des paramètres utiles.
Bulletin d'Ecologie, à paraître.

Perthuisot JP. - 1982 - Introduction générale : le cadre géographique et le milieu. in Etudes hydrochimiques, biologiques, sédimentologiques et diagénétiques d'un grand marais salant: Salin de Giraud (Bouches du Rhône).
Réunion RCP 459, Mai 1981,
Géologie Méditerranéenne, à paraître.

Perthuisot JP et Guelorget O. - 1982 - Le confinement, paramètre essentiel de la dynamique biologique du domaine paralique.
Réunion GRECO 52, Mai 1982,
Sciences Géologiques, à paraître.

Perthuisot JP., Guelorget O. et Frisoni GF. - 1981 - Contribution à l'étude géochimique, sédimentologique et biologique du Triangle des Bermudas (Santa Pola, Espagne).
Rapport inédit CFP et GREDOPAR, 19p.

Perthuisot JP., Guelorget O., Frisoni GF. et Clastère J. - 1982 - Nouvelle contribution à l'étude du Triangle des Bermudas (Santa Pola, Espagne).
Rapport inédit CFP et GREDOPAR, 21p.